

Travail de fin d'études / Projet de fin d'études : Analyse du Cycle de Vie en phase conception : influence de l'estimation des quantités sur la précision du calcul

Auteur : Castagné, Emma

Promoteur(s) : Attia, Shady; Boucher, Fabian

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

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

Année académique : 2022-2023

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/17404>

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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



Université de Liège
Faculté des Sciences Appliquées

Analyse du Cycle de Vie en phase conception : influence de l'estimation des quantités sur la précision du calcul

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du
grade de master Ingénieur Civil Architecte par
Emma Castagné

Promoteur: Pr. ATTIA Shady - SBD Lab

Jury: Pr. DE BOISSIEU Aurélie,
Pr. REITER Sigrid,
M. BOUCHER Fabian,
Mme. DENIS Eloïse

Année académique 2022-2023

Abstract

Recently, some countries have been regulating the environmental impacts and requiring Life Cycle Assessment (LCA) calculations. The objective of this work is to make it easier to estimate product quantities when carrying out an LCA. To do this, it aims to determine the influence of these estimates on the accuracy of the results.

This study is carried out at the various design stages for a BESIX case study, the structural work of the Tour Triangle. Four methodologies are used to collect data and four LCAs are compared. Two are based on 3D models and two on bills of quantities, one of which takes into account all building products (including non-structural products).

The study shows that all the methodologies give the same order of magnitude of impacts, i.e. 50,000 tCO₂eq. LCAs carried out using 3D models give lower results than LCAs using bills of quantities, but are subject to data loss on One Click LCA (up to 18% loss). Performing an LCA using bills of quantities is more reliable and taking non-structural products into account provides up to 3% greater accuracy. The findings are then compared with the French regulation (RE2020).

The results are finally merged and summarised in the form of recommendations for designers. The choice of methodology depends on the objective. 3D models can be used to quickly obtain an order of magnitude of the building's impacts and assess the relevance of optimisation. Bills of quantities can instead be used to calculate the precise impacts of all the building's products.

In conclusion, the study contributes to facilitating the choice of methodology to be adopted by designers and to making LCA more accessible during the design stages.

Keywords : France, RE 2020, data, structural work, environmental impacts, global warming potential, One Click LCA

Résumé

Analyse du Cycle de Vie en phase conception : influence de l'estimation des quantités sur la précision du calcul

Mots clés : France, RE 2020, données, gros œuvre, impacts environnementaux, réchauffement climatique, potentiel de réchauffement global, One Click LCA

L'Union européenne a pour ambition de rendre le secteur du bâtiment neutre en carbone d'ici à 2050. Ainsi, depuis peu, certains pays réglementent les impacts sur le réchauffement climatique et imposent un calcul d'Analyse en Cycle de Vie (ACV). Cette méthode nécessite de collecter les quantités de produits du bâtiment mais pendant les phases de conception, cette démarche peut être délicate. Le but du travail est de faciliter l'estimation des quantités de produits lors de la réalisation de l'ACV. Pour cela, son objectif est de déterminer l'influence de ces estimations sur la précision du calcul.

Cette étude se fait aux différentes phases de conception pour un cas d'étude de BESIX, le Gros Œuvre de la Tour Triangle. Quatre méthodologies sont mises en place pour collecter les données et ainsi, quatre ACV sont réalisées et comparées. Pour deux d'entre elles, les quantités de béton et d'acier sont collectées grâce aux modèles 3D. Les quantités d'armatures sont alors calculées grâce à des ratios basés sur la quantité de béton. Pour deux autres ACV, les quantités de béton, d'acier et d'armatures sont calculées grâce aux bordereaux. Pour l'une d'entre elles, les autres produits de construction sont également considérés. Les potentiels de réchauffement global sont calculés grâce à l'outil One Click LCA.

L'étude montre que toutes les méthodologies donnent le même ordre de grandeur des impacts, soit 50 000 tCO_{2eq}. Les ACV réalisées avec les modèles 3D donnent des résultats plus bas qu'avec les bordereaux (-1%) et sont plus rapides. Toutefois, les quantités sont sujettes à des pertes de données sur One Click LCA (jusqu'à 18% de pertes). Réaliser une ACV à l'aide des bordereaux est plus long mais plus fiable. De plus, en prenant en compte les produits non structurels, les résultats de l'ACV peuvent gagner jusqu'à 3% de précision. Les résultats sont finalement mis en parallèle avec la RE2020 : le Gros Œuvre de la Tour Triangle représente 60% du seuil de 2021.

Ces résultats sont synthétisés sous forme de recommandations aux concepteurs. Le choix de la méthodologie dépend de l'objectif. Les modèles 3D et les ratios peuvent être utilisés pour obtenir rapidement un ordre de grandeur des impacts du bâtiment et évaluer la pertinence d'une optimisation. Les bordereaux peuvent être utilisés pour calculer précisément les impacts de tous les produits du bâtiment.

En conclusion, l'étude permet de comparer différentes stratégies pour la collecte des données, en matière de temps investi et de précision obtenue. Elle contribue à faciliter le choix de la méthodologie à adopter par les concepteurs et à rendre l'ACV plus accessible lors des phases de conception.

Remerciements

Tout au long de ce parcours, j'ai eu la chance d'être accompagnée et soutenue. Je tiens à remercier les personnes ayant non seulement rendu possible la réalisation de ce travail mais également contribué à rendre cette expérience épanouissante.

Je tiens tout particulièrement à remercier **Shady Attia**, professeur à l'Université de Liège. En sa qualité de promoteur, il m'a apporté de précieux conseils et sa disponibilité comme ses encouragements tout au long de l'étude ont considérablement enrichi ma réflexion.

J'aimerais remercier l'ensemble de l'équipe de **BESIX** pour leur accueil. Je suis reconnaissante envers tous les collaborateurs qui ont consacré du temps pour répondre à mes questions et me partager leurs connaissances.

En particulier, je remercie, **Fabian Boucher**, directeur du département Ingénierie chez BESIX et co-promoteur de ce mémoire. Son expérience m'a permis de prendre le recul nécessaire et de guider mon travail de manière judicieuse.

Je remercie également **Eloïse Denis**, ingénieure durabilité chez BESIX, pour le temps qu'elle m'a accordé et sa bienveillance dans la supervision de mes travaux. Les échanges que nous avons eus au sujet de l'environnement ont été particulièrement enrichissants et ont contribué à approfondir mes connaissances du domaine.

Je souhaite aussi remercier **Sigrid Reiter** et **Aurélie de Boissieu**, membres de mon jury, pour le temps qu'elles consacreront à la lecture de mon mémoire.

Je souhaite adresser une pensée chaleureuse à ma famille, en particulier, **mon père, ma mère et ma sœur**. Comme ils l'ont fait tout au long de ma scolarité, ils ont été les premiers à m'encourager et à reconnaître la valeur de mon travail.

Enfin, je voudrais exprimer ma gratitude envers mes amis. En particulier, merci à mes colocataires, **Camille, Corentin et Paul**, pour leur aide mais surtout pour leur présence et leur bonne humeur qui m'ont permis de mener à bien la rédaction de ce mémoire dans les meilleures conditions possibles.

Abréviations

ACV	Analyse du Cycle de Vie
CEN	Comité Européen de Normalisation
DEP	Déclaration Environnementale de Produit
DPGF	Décomposition des Prix Globaux Forfaitaires
FDES	Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire
GES	Gaz à Effet de Serre
ISO	International Organization for Standardization (Organisme international de normalisation)
LCI	Life Cycle Inventory (Inventaire du cycle de vie)
LCC	Life Cycle Cost (Coûts du Cycle de Vie)
LCIA	Life Cycle Impact Assessment (Evaluation des impacts du cycle de vie)
LOD	Level of Development (Niveau de développement)
OCL	One Click LCA
PRG	Potentiel de Réchauffement Global
RE	Réglementation Environnementale

Table des matières

Abstract.....	2
Résumé	3
Remerciements	4
Abréviations	5
Table des matières	6
Liste des figures.....	9
Liste des tableaux	11
1 Introduction.....	12
1.1 Contexte et problématique	12
1.2 Pertinence du sujet de recherche	14
1.3 Objectifs de la recherche.....	15
1.4 Questions de recherche	15
1.5 Structure de l'étude	16
2 Etat de l'art.....	17
2.1 Concepts et définitions	17
2.1.1 Analyse du Cycle de Vie (ACV).....	17
2.1.2 Bilan carbone, carbone incorporé et opérationnel	18
2.1.3 Elément et produits de construction	19
2.1.4 Etapes du projet	19
2.1.5 Données génériques	20
2.1.6 Données spécifiques	20
2.1.7 Gaz à Effet de Serre (GES).....	20
2.1.8 Méthodes d'exécution des projets	20
2.1.9 Niveau de Développement (Level of Development LOD).....	21
2.1.10 Potentiel de Réchauffement Global (PRG).....	21
2.1.11 Uniclass.....	21
2.2 Contexte réglementaire	22
2.2.1 À l'échelle internationale	23
2.2.2 À l'échelle européenne.....	23
2.2.3 À l'échelle nationale : la RE 2020.....	24
2.3 Évaluation des impacts environnementaux	27
2.3.1 Les différentes méthodes	27
2.3.2 L'ACV	27
2.3.3 One Click LCA (OCL)	33
2.4 Études similaires et gap scientifique.....	34
3 Méthodologie	38

3.1	<i>Description des méthodes de recherche</i>	38
3.2	<i>Cadre de l'étude</i>	39
3.3	<i>Variables et indicateurs</i>	41
3.3.1	Facteurs influençant la qualité des données	41
3.3.2	Définition des niveaux de précision	42
3.3.3	Résumé des variables de l'étude	43
3.4	<i>Frontières de l'étude</i>	44
3.4.1	Hypothèses de travail	44
3.4.2	Cas d'étude – La Tour Triangle à Paris	45
3.4.3	Choix des éléments à étudier	46
3.5	<i>Collecte des données</i>	47
3.5.1	Données primaires fournies par BESIX	47
3.5.2	Traitement des données primaires	49
3.6	<i>Analyse des données</i>	50
3.6.1	One Click LCA	50
3.6.2	Analyse sur Excel	51
3.7	<i>Validation</i>	51
3.7.1	Triangulation	52
3.7.2	Cycles de validation	52
4	Résultats	54
4.1	<i>Limites du logiciel One Click LCA</i>	54
4.2	<i>Comparaison globale des quatre niveaux de précision</i>	55
4.3	<i>Influence de la fiabilité des données</i>	56
4.3.1	Comparaison des bordereaux et modèle 3D	57
4.3.2	Influence de la mise à jour des ratios	59
4.3.3	Influence sur les matériaux les plus contributeurs	61
4.4	<i>Influence de la complétude des données</i>	62
4.4.1	Cas 1 : les produits non structurels impactent le PRG de l'élément	62
4.4.2	Cas 2 : les produits non structurels n'impactent pas le PRG de l'élément	64
4.4.3	Synthèse : retour sur le lot Gros Œuvre	66
4.5	<i>Mise en parallèle des résultats avec la RE2020</i>	68
5	Discussion	69
5.1	<i>Rappels des objectifs de l'étude</i>	69
5.2	<i>Analyse des résultats</i>	69
5.2.1	Influence de la fiabilité des données sur le résultat	69
5.2.2	Influence de la complétude des données sur le résultat	72
5.2.3	Comparaison qualitative des sources de données	74
5.2.4	Lien avec la réglementation	75
5.3	<i>Recommandations</i>	76
5.4	<i>Forces du travail</i>	79

5.5	<i>Limites du travail</i>	79
5.6	<i>Impact pratique</i>	80
5.7	<i>Futurs travaux</i>	81
6	Conclusion	82
7	Références	84
8	Annexes	90
8.1	<i>Annexes - Etat de l'art</i>	90
8.1.1	Vocabulaire utilisé pour l'étude	90
8.2	<i>Annexes - Méthodologie</i>	91
8.2.1	Niveaux de précision	91
8.2.2	Eléments sélectionnés	92
8.2.3	Collecte des données primaires	94
8.2.4	Traitement des données primaires	97
8.2.5	Analyse des données	101
8.2.6	Validation	103
8.3	<i>Annexes - Résultats</i>	111
8.3.1	Compléments sur les résultats de la validation	111
8.3.2	Comparaison des bordereaux et des modèles 3D	112
8.3.3	Comparaison des ratios calculés avec les bordereaux et des ratios généraux	115
8.3.4	Résultats par élément	116
8.4	<i>Poster</i>	123

Liste des figures

Figure 1-1 - Répartition sectorielle des émissions de GES (GIEC, 2014)	12
Figure 1-2 - Objectifs de l'Agenda 2030, appliqués à l'étude (17 Objectifs de développement durable, 2023).....	12
Figure 1-3 - Mesures mises en place par 6 pays de l'Europe (Jankovic et al., 2022)	13
Figure 2-1 - 3 modèles d'ACV (Nickel, 2023)	17
Figure 2-2 - Carbone incorporé et opérationnel, aux différentes phases du cycle de vie (LETI Embodied Carbon Primer, 2020)	18
Figure 2-3 – Méthode de Conception-Soumission-Construction (Design-Build Construction Advantages, s. d.)..	20
Figure 2-4 – Méthode de Conception-Construction (Design-Build Construction Advantages, s. d.)	21
Figure 2-5 - Répartition des impacts du bâtiment entre carbone opérationnel et incorporé (LETI Embodied Carbon Primer, 2020)	24
Figure 2-6 - 6 indicateurs de la RE2020 (Cabassud, s. d.)	25
Figure 2-7 - Seuils définis par le Code de la construction et de l'habitat, pour Ic.construction_maxmoyen (Article R172-4 - Code de la construction et de l'habitation - Légifrance, 2022).....	26
Figure 2-8 - Phases du cycle de vie (EN 15978, 2013).....	28
Figure 2-9 - Potentiel de réduction carbone en fonction des phases (Ness, 2022)	32
Figure 2-10 - Schéma expliquant le calcul de l'ACV (Tchakorom, 2022).....	33
Figure 3-1 - Cadre de la thèse	40
Figure 3-2 - Vue 3D de la tour (données fournies par BESIX)	45
Figure 3-3 - Maquette Revit de la tour (données fournies par BESIX)	45
Figure 3-4 - Traitement des données primaires	50
Figure 3-5 - Capture d'écran de l'onglet Matériaux de construction du logiciel One Click LCA.....	51
Figure 3-6 - Validation / Ajustement des ACV suivant les différents cycles	53
Figure 4-1 – PRG du Gros Œuvre pour les 4 niveaux de précision.....	56
Figure 4-2 - Comparaison des PRG des sous-lots Fondations, Ossature, Murs et du lot Gros Œuvre aux niveaux A et C	57
Figure 4-3 - Différence entre les PRG du niveau C (modèle 3D) et du niveau A (bordereaux), par sous-lot et par produit	58
Figure 4-4 - Comparaison des PRG des sous-lots Fondations, Ossature, Murs et du lot Gros Œuvre aux niveaux C et D.....	60
Figure 4-5 - Avancement des plans d'exécution en fonction des sous-lots (au 10 mars 2023).....	60
Figure 4-6 - Répartition du PRG de l'élément radier et dalles contre sol, par produit	63
Figure 4-7 - Part du PRG du Gros Œuvre correspondant aux produits de l'élément radier et dalles contre sol....	63
Figure 4-8 - Répartition du PRG de l'élément maçonnerie, par produit.....	63
Figure 4-9 - Part du PRG du Gros Œuvre correspondant aux produits de l'élément maçonnerie	63
Figure 4-10 - Répartition du PRG de l'élément traitement des locaux techniques, par produit	64
Figure 4-11 - Part du PRG du Gros Œuvre correspondant aux produits de l'élément traitement des locaux techniques.....	64
Figure 4-12 - Répartition du PRG de l'élément dalles hors noyau, par produit	65
Figure 4-13 - Part du PRG du Gros Œuvre correspondant aux produits de l'élément dalles hors noyau.....	65
Figure 4-14 - Répartition du PRG de l'élément voiles du noyau, par produit.....	65
Figure 4-15 - Part du PRG du Gros Œuvre correspondant aux produits de l'élément voiles du noyau.....	65
Figure 4-16 - Répartition du PRG de l'élément poteaux mixtes acier-béton, par produit	66
Figure 4-17 - Part du PRG du Gros Œuvre correspondant aux produits de l'élément poteaux mixtes acier-béton	66

Figure 4-18 - Répartition du PRG du Gros Œuvre par sous-lot et par produit.....	67
Figure 4-19 - Comparaison des résultats aux seuils de la RE2020	68
Figure 8-1 - Avancement des études structures en EXE au 10/03/23 - Progress report STR 028 fourni par BESIX	95
Figure 8-2 – Avancement des études au 2023-03-10 - TTR - Progress report STR 028 fourni par BESIX.....	95
Figure 8-3 - Ratios appliqués à une même quantité de béton.....	96
Figure 8-4 - Ratios appliqués à une même quantité de béton, par partie du bâtiment	96
Figure 8-5 - Extrait de l'excel brut Dirroots Structure fourni par BESIX	98
Figure 8-6 - Extrait du CCTP fourni par BESIX	98
Figure 8-7 - Schéma d'un corbeau filant (Applications courantes, 2018).....	99
Figure 8-8 - Fiche technique des boîtes d'attente Stabox (Solutions, 2021)	99
Figure 8-9 - Goujon d'ancrage (Distribution, s. d.)	100
Figure 8-10 - Tableur Excel avant consolidation	100
Figure 8-11 - Tableur Excel après consolidation	100
Figure 8-12 - Données environnementales choisies, capture d'écran du logiciel One Click LCA	102
Figure 8-13 - Comparaison des quantités des modèle 3D de l'étude et BESIX - Fondations	106
Figure 8-14 - Comparaison des quantités des modèle 3D de l'étude et BESIX - Structure	106
Figure 8-15 – Comparaison des quantités des bordereaux de l'étude et de BESIX.....	108
Figure 8-16 - PRG des différents produits des radiers et dalles, pour chaque niveau de précision	116
Figure 8-17 – Répartition du PRG du Gros Œuvre (radier et dalles).....	116
Figure 8-18 - Répartition du PRG du sous-lot fondations (radier et dalles).....	116
Figure 8-19 - PRG des différents produits des voiles du noyau, pour chaque niveau de précision	117
Figure 8-20 – Répartition du PRG du Gros Œuvre (voiles du noyau)	117
Figure 8-21 - Répartition du PRG du sous-lot murs (voiles du noyau)	117
Figure 8-22 - PRG des différents produits des poteaux mixtes acier-béton, pour chaque niveau de précision ..	118
Figure 8-23 - Répartition du PRG du Gros Œuvre (poteaux mixtes acier-béton)	118
Figure 8-24 - Répartition du PRG du sous-lot ossature (poteaux mixtes acier-béton)	118
Figure 8-25 - PRG des différents produits des maçonneries, pour chaque niveau de précision	119
Figure 8-26 - Répartition du PRG du Gros Œuvre (maçonneries).....	119
Figure 8-27 - Répartition du PRG du sous-lot murs (maçonneries)	119
Figure 8-28 - PRG des différents produits des dalles hors noyau, pour chaque niveau de précision	120
Figure 8-29 - Répartition du PRG du Gros Œuvre (dalles hors noyau).....	120
Figure 8-30 - Répartition du PRG du sous-lot ossature (dalles hors noyau)	120
Figure 8-31 - PRG des différents produits des traitements des locaux techniques, pour chaque niveau de précision	121
Figure 8-32 - Répartition du PRG du Gros Œuvre (traitement des locaux techniques).....	121
Figure 8-33 - Répartition du PRG du sous-lot ossature (traitement des locaux techniques).....	121
Figure 8-34 - PRG des différents produits des micro-berlinoises, pour chaque niveau de précision	122
Figure 8-35 - Répartition du PRG du Gros Œuvre (micro-berlinoises)	122
Figure 8-36 - Répartition du PRG du sous-lot fondations (micro-berlinoises)	122
Figure 8-37 - Poster lié au mémoire.....	123

Liste des tableaux

Tableau 2-1 - Phase de la conception d'un bâtiment	19
Tableau 2-2 – Uniclass, exemple d'une colonne dans la table des Systèmes	21
Tableau 2-3 - Synthèse des normes et réglementations autour de l'ACV	22
Tableau 2-4 - Synthèse des étapes de l'ACV selon ISO 14040 ou EN 15978	28
Tableau 2-5 - 7 indicateurs décrivant les impacts environnementaux dans la norme EN 15804	30
Tableau 2-6 - 5 paramètres de la qualité des données définis par Weidema & Wesnaes	32
Tableau 2-7 - Synthèse des études similaires	35
Tableau 3-1 - Source de la donnée dépendant des phases du projet.....	41
Tableau 3-2 - Produits de construction de l'élément radier et dalles contre sol	42
Tableau 3-3 - Niveaux de précision définis pour l'étude.....	43
Tableau 3-4 - Variables de l'étude	43
Tableau 3-5 - Hypothèses de travail	44
Tableau 3-6 – Parties prenantes du projet Tour Triangle.....	45
Tableau 3-7 - Extrait du tableau de ratios fourni par BESIX.....	48
Tableau 3-8 - Structure des fichiers Excel listant les quantités	49
Tableau 3-9 - Triangulation au sein de l'étude	52
Tableau 4-1 - Comparaison des quantités collectées lors de l'étude et par BESIX.....	55
Tableau 4-2 - Rappel des niveaux de précision définis dans l'étude.....	55
Tableau 4-3 - Différences entre les quantités du niveau C (modèle 3D) et du niveau A (bordereau)	58
Tableau 4-4 - Comparaison entre les ratios généraux et les ratios calculés avec le bordereau	59
Tableau 4-5 - Classement des matériaux les plus contributeurs des niveaux A et C.....	61
Tableau 5-1 - Classement des produits de construction en fonction de leur influence sur le PRG, à l'échelle de l'élément et du Gros Oeuvre	73
Tableau 5-2 – Synthèse : comparaison des niveaux de précision, atouts et limites	77
Tableau 5-3 – Synthèse : recommandations pratiques	78
Tableau 8-1 - Hierarchie du vocabulaire utilisé	90
Tableau 8-2 – Détail des niveaux de précision.....	91
Tableau 8-3 - Ensemble des éléments du bordereau	92
Tableau 8-4 – Ensemble des ratios fournis par BESIX	94
Tableau 8-5 - Hypothèses faites avec les modèles 3D	97
Tableau 8-6 - Hypothèses faites avec le bordereau.....	99
Tableau 8-7 - Données utilisées pour chaque ACV réalisée.....	103
Tableau 8-8 – Justification : pourquoi une autre ACV a été réalisée ?	105
Tableau 8-9 - Hypothèses comparaison ACV initiale – Modèle 3D.....	107
Tableau 8-10 - Hypothèses comparaison ACV initiale - Bordereaux	108
Tableau 8-11 - Comparaison des niveaux de précision avant et après Cycle 2.....	109
Tableau 8-12 - Modifications apportées au mapping de l'ACV Bordereau.....	110
Tableau 8-13 - Comparaison des ACV initiales.....	111
Tableau 8-14 - Comparaison des quantités et PRG entre bordereaux et modèle 3D, par lot, par matériau	112

1 Introduction

Les derniers rapports du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) sont frappants : le réchauffement climatique accélère. Il est notamment lié à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre (GES) (United Nations Climate Change, s. d.). Afin de les limiter, des changements majeurs doivent être opérés. A cet effet, en 2015, les Accords de Paris ont été adoptés par la Convention-Cadre des Nations Unies pour le Changement Climatique. 196 parties, dont l'Union Européenne, se sont engagées. L'un de leurs objectifs vise à limiter le réchauffement mondial à +2°C par rapport à l'ère préindustrielle d'ici à 2100. Or, tous les engagements politiques actuels ne permettent pas de limiter le réchauffement sous ce seuil. Le Ministère de la Transition Ecologique indique qu'il est **encore possible d'atteindre les objectifs**, mais que les mesures prises en faveur de l'environnement doivent être renforcées rapidement (Ministère de la Transition Ecologique, s. d.).

1.1 Contexte et problématique

Selon le GIEC, le secteur du bâtiment est responsable de 6% des émissions directes et de 12% des émissions indirectes de GES mondiales (Figure 1-1). Les émissions directes sont liées à l'utilisation du bâtiment (carbone opérationnel) tandis que les émissions indirectes sont relatives à la production, au transport, à l'installation des produits ainsi qu'à la maintenance et à la déconstruction du bâtiment (carbone incorporé) (GIEC, 2014). Pour répondre aux objectifs de réduction, il est donc nécessaire de **décarboner le secteur de la construction**. Ces mesures s'inscrivent dans la dynamique de l'Agenda 2030. En effet, les Etats membres de l'Organisation des Nations Unies ont défini 17 objectifs pour un développement durable. Décarboner le secteur de la construction permet de répondre à trois de ces objectifs, représentés dans la Figure 1-2 : favoriser l'innovation (n°9), penser des villes résilientes et durables (n°11), et lutter contre les changements climatiques (n°13) (*17 Objectifs de développement durable*, 2023).

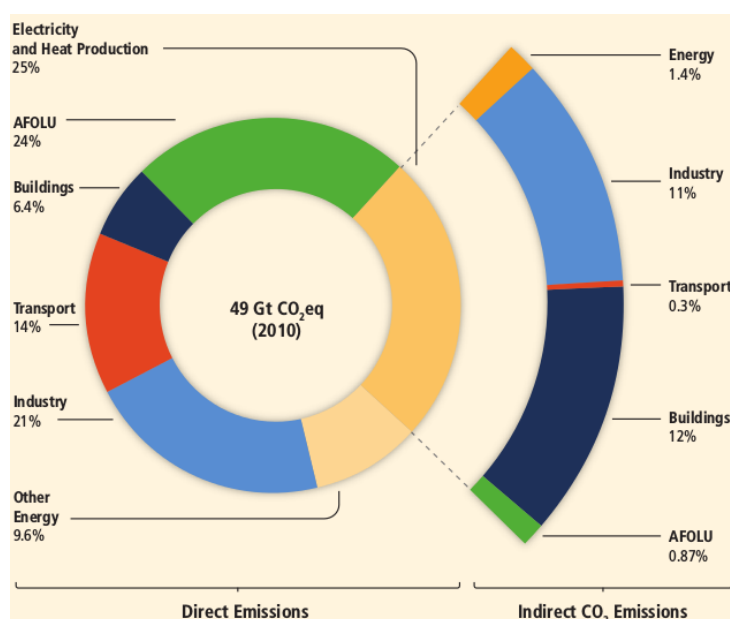


Figure 1-1 - Répartition sectorielle des émissions de GES (GIEC, 2014)



Figure 1-2 - Objectifs de l'Agenda 2030, appliqués à l'étude (17 Objectifs de développement durable, 2023)

Les Etats réglementent déjà le carbone opérationnel. Il a pendant longtemps été majoritaire. Toutefois, les énergies utilisées pendant la phase d'exploitation se sont progressivement décarbonées. En plus, les constructions sont devenues de plus en plus performantes (Francart et al., 2021). Des études pointent désormais du doigt le carbone incorporé.

L'Europe a pour objectif d'atteindre la neutralité carbone en 2050 (*Energy Performance of Buildings*, 2023). L'Institut des Performances Energétiques des Bâtiments d'Europe (Buildings Performance Institute Europe) examine les nouvelles réglementations nationales en lien avec cet objectif. Celles de la Belgique, de la France, de l'Allemagne, de l'Italie, de la Pologne et de l'Espagne sont notamment analysées. Les mesures mises en place par ces pays sont évaluées par rapport à ces objectifs, dans la Figure 1-3. Elles sont jugées comme **ambitieuses**, **partielles**, **non conformes** ou **absentes** (Jankovic et al., 2022). Une majorité de ces pays ne réglementent pas encore les émissions carbone.












 Country / Region	 Primary energy (PE) requirement	 Minimum share of RES in energy demand	 Carbon emission limits	 Fossil fuel phase-out
 Flanders (Belgium)	Green	Yellow	Red	Green
 France	Orange	Green	Yellow	Orange
 Germany	Yellow	Orange	Red	Orange
 Italy	Yellow	Orange	Red	Red
 Poland	Yellow	Orange	Red	Yellow
 Spain	Yellow	Orange	Red	Orange

Figure 1-3 - Mesures mises en place par 6 pays de l'Europe (Jankovic et al., 2022)

En France, la RE2020 est entrée en vigueur en 2022. L'impact sur le changement climatique des bâtiments est désormais soumis à un seuil. Pour y répondre, il sera nécessaire de calculer ces impacts à toutes les étapes du cycle de vie. Une **ACV** est donc requise (Ministère de la Transition Ecologique, 2023).

A l'heure actuelle, l'ACV est souvent effectuée au moment où le bâtiment est déjà construit, quand toutes les données nécessaires sont disponibles (Röck et al., 2018). Elle ne peut donc pas être utilisée pour améliorer les performances environnementales du bâtiment. En effet, le potentiel de réduction carbone est maximal **lors des premières phases du projet** (Stassen, 2016). D'ailleurs, le Centre d'Etudes et d'Expertises sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (CEREMA) indique qu'une première ACV peut être effectuée pendant les phases d'avant-projet. Ces calculs préliminaires permettent de cibler les matériaux les plus émetteurs et de les remplacer au plus tôt, à moindre coût (Bourru, 2022).

Toutefois, intégrer l'ACV aux premières phases de conception est une démarche compliquée. A ces étapes, le design et les matériaux utilisés sont encore incertains. (Röck et al., 2018). Ce **manque de données** peut être un véritable frein à l'utilisation de l'ACV. Plusieurs études tentent de proposer des solutions, notamment à travers l'intégration de l'ACV au BIM. Ces études limitent néanmoins le choix des concepteurs à cette unique source de données. D'autres études mènent une comparaison entre ACV complète et simplifiée mais ces modèles restent assez théoriques et sont rarement appliqués à un cas concret.

1.2 Pertinence du sujet de recherche

L'étude est centrée sur la méthode d'Analyse en Cycle de Vie. Diversifier les recherches autour de ce sujet est pertinent pour plusieurs raisons :

- Rendre la méthode plus **fiable**, en identifiant ses atouts et ses limites.
- La rendre plus **transparente**, en identifiant les données nécessaires à sa réalisation, les mécanismes de calcul et le panel de résultats possibles.
- La rendre plus **accessible**, en étudiant diverses méthodologies, des plus simples aux plus complexes.

L'étude s'intéresse plus particulièrement à la collecte des données nécessaires à l'ACV, en phase de conception. En effet, comme expliqué précédemment, cette étape est critique. Pour compléter les études existantes, il peut être pertinent de comparer plusieurs manières de collecter les données (notamment basées sur différentes sources de données).

L'étude est importante puisqu'elle permettra de comparer différentes méthodologies. Il sera également pertinent de baser l'analyse sur un cas concret en entreprise.

1.3 Objectifs de la recherche

Le but de l'étude est de faciliter l'estimation des quantités de produits lors de la réalisation de l'ACV, aux différentes phases de conception. Pour cela, son objectif est de déterminer l'influence de ces estimations sur la précision du calcul.

L'étude s'adresse aux professionnels et particulièrement aux concepteurs. Les résultats les aideront à prendre en main l'ACV dès les premières étapes du projet. Ils les aideront également à choisir la méthodologie qui permette d'atteindre le meilleur équilibre (entre temps à investir dans l'ACV et précision des résultats obtenus). Elle s'adresse aussi à la communauté scientifique : les recherches effectuées sont complémentaires à celles existant dans la littérature.

Plusieurs objectifs en découlent :

- Définir les différentes données disponibles pour estimer les quantités, aux différentes phases de conception (de la conception schématique à la conception technique).
- Quantifier l'influence de l'estimation de ces quantités sur le résultat de l'ACV, à savoir le potentiel de réchauffement global.
- Synthétiser les résultats grâce à des tableaux qui comparent les méthodologies (en matière de temps à investir, de précision obtenue, de fiabilité des résultats, etc.).
- Mettre en parallèle les résultats avec le contexte réglementaire.

1.4 Questions de recherche

La question de recherche principale correspondant à ces objectifs est la suivante :

Comment l'estimation des quantités de produits du gros œuvre aux différentes phases de conception influence-t-elle la précision des calculs du potentiel de réchauffement global ?

Les sous-questions de recherche qui se posent sont alors :

1. *Quelles sont les exigences réglementaires liées au potentiel de réchauffement global (PRG) des bâtiments en France (contexte du cas d'étude) ?*
2. *Comment la fiabilité des données influence-t-elle la précision des calculs du PRG ?*
3. *Comment la complétude des données influence-t-elle la précision des calculs du PRG ?*
4. *Comment intégrer les résultats de l'étude dans la pratique (inclus BESIX) ?*

L'étude se base sur la réalisation de quatre ACV à des niveaux de précision différents. En effet, pour chacune de ces ACV, les quantités de produits sont estimées grâce à des données de qualité variable.

1.5 Structure de l'étude

L'étude débute par un Etat de la littérature (Chapitre 2). Ce chapitre permet de synthétiser les différents concepts de la recherche. Le contexte réglementaire du bâtiment, les différentes méthodes d'évaluation des impacts environnementaux et les études similaires sont notamment mentionnés.

La Méthodologie (Chapitre 3) est ensuite détaillée. Ce chapitre présente le cadre et les frontières de l'étude, les différentes variables considérées ainsi que la manière dont les différentes données sont collectées, analysées et validées.

Les Résultats (Chapitre 4) reviennent sur des problématiques identifiées lors de l'étape de validation du travail. Les impacts environnementaux calculés pour chaque ACV sont également présentés et comparés.

La Discussion (Chapitre 5) analyse et met en relation les résultats obtenus. Ce chapitre donne des recommandations à destination des concepteurs. Il met également en lumière les forces et les limites de l'étude.

Enfin, la Conclusion (Chapitre 6) synthétise les principaux résultats du travail.

Les Références sur lesquelles se base l'étude sont rappelées (Chapitre 7) et toutes informations complémentaires se trouvent en Annexe (Chapitre 8).

2 Etat de l'art

Ce chapitre présente les différents concepts gravitant autour du sujet de l'étude.

D'abord, les principaux termes utiles à la compréhension du reste du travail sont définis (2.1). Puis, le contexte réglementaire (2.2) et les différentes méthodes d'évaluation des impacts environnementaux (2.3) sont analysés. Enfin, les études similaires et leurs limites sont évoquées (2.4).

2.1 Concepts et définitions

2.1.1 Analyse du Cycle de Vie (ACV)

L'**ACV** est définie dans la norme internationale comme la « compilation et évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie » (ISO 14040, 2006).

Appliquée au bâtiment, elle est définie dans la norme européenne comme étant la « méthode qui permet d'évaluer la performance environnementale d'un bâtiment » (EN 15978, 2013).

Trois modèles d'ACV existent. Ils sont représentés sur la Figure 2-1. Le modèle **Cradle-to-gate** (du berceau à la sortie de l'usine) prend en compte les impacts, de l'extraction des matières premières jusqu'à la sortie de l'usine des produits, avant qu'ils ne soient transmis au client.

Le modèle **Cradle-to-grave** (du berceau à la tombe) prend en compte cinq étapes : la production, le transport, l'utilisation et la fin de vie du bâtiment. Ce modèle est donc linéaire.

Le **modèle Cradle-to-cradle** (du berceau au berceau) est lui, circulaire, puisqu'il complète le Cradle-to-grave en prenant en compte le recyclage et la réutilisation des matériaux (Nickel, 2023).

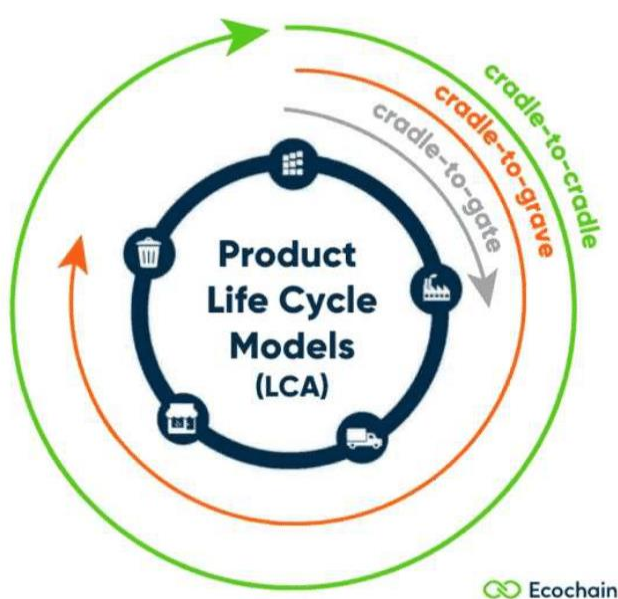


Figure 2-1 - 3 modèles d'ACV (Nickel, 2023)

2.1.2 Bilan carbone, carbone incorporé et opérationnel

Le **bilan carbone (ou l'empreinte carbone)** d'un bâtiment prend en compte :

- Ses émissions directes de gaz à effet de serre liées à la combustion d'énergies fossiles.
- Ses émissions liées à la production d'électricité et de chaud/froid.
- Ses autres émissions liées à la vie du bâtiment (de sa construction jusqu'à sa fin de vie), incluant celles liées aux matériaux, déplacements et travaux (Grandjean et al., 2018).

Ces émissions se distinguent en deux types (comme le montre la Figure 2-2) :

- Le « **carbone incorporé** » (embodied carbon) est l'empreinte carbone des matériaux. Il comprend les émissions carbone de la phase d'extraction des matériaux à la phase de construction. Ces émissions peuvent aussi prendre en compte la fin de vie du bâtiment.
- Le « **carbone opérationnel** » (operational carbon) comprend les émissions carbone durant l'utilisation du bâtiment : il inclut les émissions liées au chauffage, refroidissement et éclairage (Akbarnezhad & Xiao, 2017).

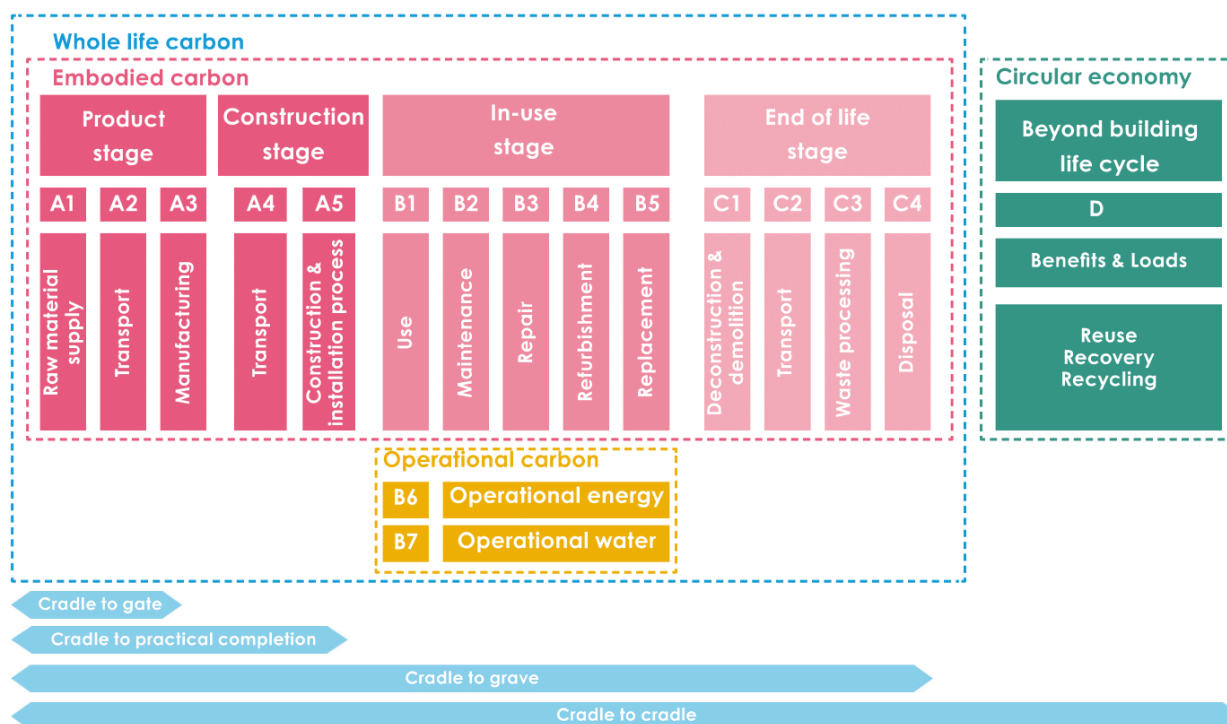


Figure 2-2 - Carbone incorporé et opérationnel, aux différentes phases du cycle de vie (LETI Embodied Carbon Primer, 2020)

2.1.3 Élément et produits de construction

Un **produit** de construction est défini dans la norme européenne comme « article fabriqué ou conçu pour être intégré dans des ouvrages de construction » (EN 15804, 2013).

Un **élément** de construction est défini dans la norme européenne comme « partie d'une construction contenant une combinaison définie de produits » (EN 15804, 2013). Un élément de construction est donc composé de plusieurs produits : des produits structurels (béton, acier, armatures) et des produits non structurels (étanchéité, goudrons, coffrage, etc.).

2.1.4 Etapes du projet

Les différentes **phases du projet** de conception et de construction des bâtiments sont définies au niveau national.

En ce qui concerne la conception, en France, la Loi n° 85-704 du 12 juillet 1985 définit les phases suivantes : études d'esquisse (ESQ), études d'avant-projets (APS et APD), études de projet (PRO), assistance apportée au maître de l'ouvrage pour la passation du contrat de travaux (ACT) et études d'exécution (EXE) (Loi n° 85-704 du 12 juillet 1985 relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'oeuvre privée., s. d.).

L'Institut Royal des Architectes Britanniques (Royal Institute of British Architects RIBA) définit également plusieurs étapes propres à la conception et construction du bâtiment. Parmi elles, les étapes correspondant à la conception sont les suivantes : définition stratégique (« strategic definition »), préparation et brief (« preparation and briefing »), conception schématique (« concept design »), conception développée (« developed design »), conception technique (« technical design ») (RIBA Plan of Work, 2021).

Ces données sont mises en relation dans le Tableau 2-1. L'étude se focalise sur les phases de conception schématique (APD), conception développée (PRO et ACT) et conception technique (EXE). A ces différentes étapes, le projet évolue et se précise. Des documents sont fournis dans les premières étapes (dans le cas de l'étude, les bordereaux). D'autres ne sont disponibles qu'à partir de phases plus avancées (dans le cas de l'étude, les modèles 3D). Cet aspect sera précisé dans la Méthodologie (notamment Tableau 3-1).

Tableau 2-1 - Phase de la conception d'un bâtiment

RIBA Plan Of Work	Préparation et brief	Conception schématique	Conception développée	Conception technique
Loi française	ESQ et APS	APD	PRO et ACT	EXE

2.1.5 Données génériques

Les données **génériques**, aussi appelées « données par défaut », sont fournies par le ministère chargé de la construction pour pallier le manque de données spécifiques (« Autres Données de La Base INIES », s. d.).

2.1.6 Données spécifiques

Les données **spécifiques** sont fournies par les fabricants, suivant le cadre de la EN 15978 en Europe. Elles sont définies par la norme comme les « données représentatives d'un produit, d'un groupe de produits ou d'un service de construction, fournies par un fournisseur » (EN 15804, 2013). En France, on parlera de FDES (Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire) (Stassen, 2016).

2.1.7 Gaz à Effet de Serre (GES)

Les principaux **GES** sont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O) et les hydrocarbures halogénés (un groupe de gaz contenant du fluor, du brome et du chlore). Dans le monde, le CO₂ est le gaz le plus émis, suivi du CH₄ (Coelho, 2017).

2.1.8 Méthodes d'exécution des projets

Lors de la réalisation d'un projet, la phase d'exécution correspond à la réalisation du bâtiment. Elle peut s'organiser de différentes manières :

- « Conception – Soumission – Construction » (**Design-Bid-Build**)

Dans cette méthode, les concepteurs et les constructeurs interviennent séparément. Le concepteur s'occupe de la conception tandis que le constructeur s'occupe de la réalisation. Dans ce cas, les quantités sont déterminées à la fin de la conception puis fournies à l'entrepreneur qui remet une offre, comme montré sur la Figure 2-3.



Figure 2-3 – Méthode de Conception-Soumission-Construction (Design-Build Construction Advantages, s. d.)

- « Conception – Construction » (**Design-Build**)

Dans cette méthode, le client ne signe un contrat qu'avec une seule entité. Cette entité s'occupera à la fois de la conception et de la réalisation du projet (Ling et al., 2004). Ici, les quantités (et donc le coût) sont estimées dès les premières esquisses et mises à jour au fil du projet, comme représenté sur la Figure 2-4.

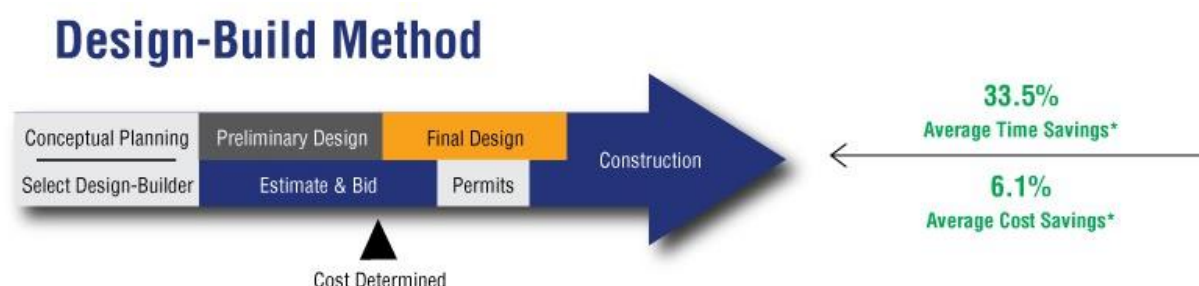


Figure 2-4 – Méthode de Conception-Construction (Design-Build Construction Advantages, s. d.)

2.1.9 Niveau de Développement (Level of Development LOD)

Le **niveau LOD** est défini par BIM Forum comme la référence qui permet aux praticiens de spécifier le contenu et la précision de leur modèle BIM à différentes étapes du processus de conception et de construction (*Level of Development Specification – BIM Forum, 2022*).

2.1.10 Potentiel de Réchauffement Global (PRG)

Le **PRG** est l'unité de mesure généralement utilisée pour quantifier les émissions de GES ainsi que leur impact relatif sur le réchauffement climatique. Les différentes émissions de GES sont converties en kgCO₂.eq (Levasseur, 2011).

2.1.11 Uniclass

Lors d'un projet, de nombreuses données sont produites à chaque étape. Pour les contrôler, il est nécessaire de les classer (Kula & Ergen, 2018). **Uniclass** est un système de classification international qui comprend 12 tableaux. Chaque tableau permet de classer un aspect ou l'autre d'un projet (par exemple les activités, les systèmes, les informations, etc.) (*Uniclass, s. d.*). Chaque objet de la table est dénommé grâce à un code. Par exemple, dans la table des Systèmes (Ss), pour l'exemple d'une colonne, la classification serait celle du Tableau 2-2.

Tableau 2-2 – Uniclass, exemple d'une colonne dans la table des Systèmes

	Code	Nom
Groupe	Ss_20	Systèmes structurels
Sous-groupe	Ss_20_30	Colonnes structurelles
Section	Ss_20_30_75	Système de colonnes structurelles
Objet	Ss_20_30_75_35	Système de colonnes en acier lourd

Cette classification peut notamment être utilisée au sein des modèles BIM afin d'organiser les éléments.

2.2 Contexte réglementaire

Depuis 50 ans, de nouveaux enjeux ont émergé : parmi eux, la protection de l'environnement et la prise en compte des impacts environnementaux associés aux produits de construction. Pour les évaluer, de nombreuses méthodes ont été développées, notamment l'Analyse en Cycle de Vie (ACV) (ISO 14040, 2006).

Dès les années 70, ces méthodes sont apparues sous différentes formes en Amérique du Nord et en Europe. Dans les années 90, la SETAC (Société de Toxicologie et de Chimie de l'Environnement) a été la première à tenter d'harmoniser la méthodologie. En 1993, l'ISO (Organisation Internationale de Normalisation) a pris la suite dans l'objectif de proposer la normalisation de l'ACV (Klöpffer, 2006). Aujourd'hui, de nombreuses normes arbitrent ce concept aux échelles internationales, européennes ou nationales. Elles assurent l'harmonisation et la comparabilité des différentes méthodes. Un récapitulatif des normes et réglementations existantes est donné dans le Tableau 2-3.

Tableau 2-3 - Synthèse des normes et réglementations autour de l'ACV

Niveau	Norme / Réglementation	Contenu	Date	Domaine d'application
International	ISO 14040	Management environnemental – ACV – Principes et cadre	2006	Tous secteurs
	ISO 14044	Management environnemental – ACV – Exigences et lignes directrices	2006	
Européen	EN 15978	Contribution des ouvrages de construction au développement durable – Évaluation de la performance environnementale des bâtiments – Méthode de calcul	2012	Secteur de la construction
	EN 15804	Contribution des ouvrages de construction au développement durable – Déclarations environnementales sur les produits – Règles régissant les catégories de produits de construction	2012	
National (Pour le cas d'étude)	RE 2020	Amélioration de la performance énergétique, du confort et prise en compte des impacts environnementaux	2020	

2.2.1 À l'échelle internationale

Au niveau international, deux normes sont établies. Ces normes ont été élaborées par le Comité Technique ISO et adoptées par le Comité Européen de Normalisation (CEN). L'ISO est un regroupement, à l'échelle internationale, d'organismes nationaux de normalisation. (*ISO 14040*, 2006).

2.2.1.1 *ISO 14040*

Cette norme indique les principes à prendre en compte lors de la réalisation d'ACV (*ISO 14040*, 2006). Plusieurs grandes thématiques sont abordées. Parmi elles :

- La définition des objectifs et du domaine d'application de l'ACV,
- La phase d'inventaire du cycle de vie,
- La phase d'évaluation de l'impact du cycle de vie,
- La phase d'interprétation du cycle de vie,
- La communication et la revue critique de l'analyse du cycle de vie,
- Les limitations de l'ACV,
- La relation entre les phases de l'ACV.

2.2.1.2 *ISO 14044*

Cette norme indique les règles spécifiques à prendre en compte lors de la réalisation d'ACV, notamment concernant les huit points mentionnés plus haut (*ISO 14044*, 2006).

2.2.2 À l'échelle européenne

Au niveau européen, deux normes existent. Elles ont été élaborées par le Comité Technique CEN et ont été adoptées par le CEN. Ces normes sont des déclinaisons des normes ISO 14040/44 à l'échelle des produits de construction (EN 15804) et du bâtiment (EN 15978).

2.2.2.1 *EN 15978*

Cette norme donne les règles de calcul à suivre pour évaluer la performance environnementale des bâtiments grâce à l'ACV. Elle donne :

- La description de l'objet de l'évaluation,
- La frontière du système qui s'applique à l'échelle du bâtiment,
- La procédure à suivre pour l'analyse de l'inventaire,
- La liste des indicateurs et des procédures de calcul de ces indicateurs,
- Les exigences relatives à la présentation des résultats,
- Les exigences relatives aux données nécessaires pour réaliser le calcul.

La norme indique que « pour réaliser l'évaluation environnementale à l'échelle du bâtiment, des informations sur les produits et les services sont nécessaires ». En effet, la méthode ACV se base sur les données spécifiées dans la Déclaration Environnementale Produit. Ces dernières sont mentionnées dans la norme EN 15804 (*EN 15978*, 2013).

2.2.2.2 EN 15804

Cette norme encadre la réalisation des Déclarations Environnementales Produit (DEP). Elle assure que toutes ces déclarations sont vérifiées et harmonisées. Elle spécifie les informations que doit contenir la DEP (EN 15804, 2013).

La norme vise notamment à :

- Définir les indicateurs à déclarer, les informations à fournir et la manière dont ils sont regroupés,
- Décrire les étapes du cycle de vie prises en compte dans la Déclaration ainsi que tous les processus inclus dans le cycle de vie,
- Faire le lien avec l'évaluation de l'impact du cycle de vie suivant le calcul d'ACV,
- Définir comment comparer les produits de constructions sur base des DEP.

2.2.3 À l'échelle nationale : la RE 2020

Après publication de ces normes à l'échelle européenne, elles doivent être implémentées au niveau national (EN 15804, 2013).

Depuis 50 ans, les réglementations nationales régulent les consommations d'énergies et les émissions de CO₂ liées à l'utilisation du bâtiment. Or, ils sont de plus en plus performants et les énergies, de plus en plus décarbonées : le carbone opérationnel tend à diminuer, comme le montre la Figure 2-5. Ainsi, le carbone incorporé tend à devenir la source principale de leurs émissions. Dans les bâtiments neufs, il peut représenter entre 40 et 70% des émissions du bâtiment (LETI Embodied Carbon Primer, 2020).

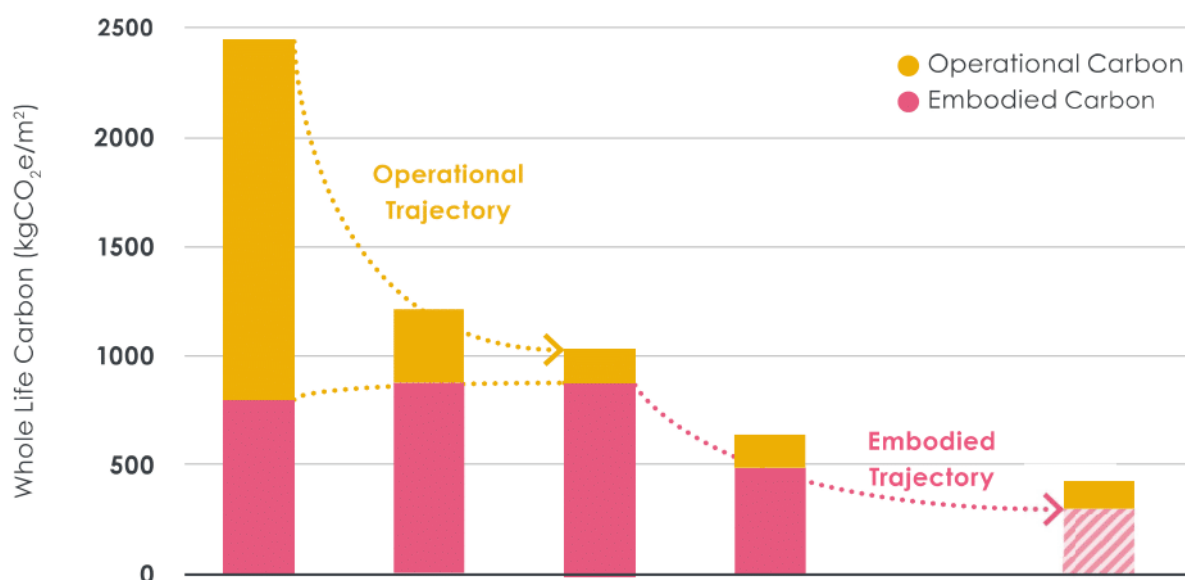


Figure 2-5 - Répartition des impacts du bâtiment entre carbone opérationnel et incorporé (LETI Embodied Carbon Primer, 2020)

En Europe, les réglementations nationales évoluent et sont notamment devenues contraignantes à ce sujet. Des réglementations à l'échelle du bâtiment ont déjà vu le jour aux Pays-Bas (Dutch Building Decree), en Norvège (Norwegian Building Regulation), en Suède (Act on Climate Declaration) et en France (RE2020). D'autres sont à venir au Danemark et en Finlande (One Click LCA, 2022).

Jusqu'à 2020, la France était concernée par la réglementation thermique RT 2012. Cette réglementation fixait notamment des règles liées à l'efficacité énergétique, au confort et aux consommations d'énergie du bâtiment. La RE 2020 vise cette fois à rendre le secteur du bâtiment neutre en carbone en 2050. Les objectifs se durcissent en matière de confort et de performance énergétique, mais de nouvelles cibles concernant l'impact environnemental apparaissent aussi. Un axe majeur de la RE 2020 est la diminution des impacts environnementaux, et notamment sur le réchauffement climatique, des bâtiments neufs. Il sera donc nécessaire de prendre en compte, à travers l'ACV, ses émissions sur tout son cycle de vie. En ce sens, la RE 2020 est pionnière : il s'agit d'une des premières réglementations mondiales à introduire la performance environnementale comme critère déterminant.

La RE 2020 s'applique aux bâtiments à usage d'habitation mais aussi aux bureaux, aux bâtiments d'enseignement primaire et secondaire ainsi qu'aux bâtiments tertiaires. Les projets de bureaux dont la demande de permis de construire a été déposée après le 1^{er} juillet 2022 sont soumis à la RE 2020 (Ministère de la Transition Ecologique, 2023).

Elle se base sur six indicateurs réglementaires, donnés dans la Figure 2-6. D'autres indicateurs sont définis, sans pour autant être soumis à des seuils. La surface de référence permettant de les calculer dépend du type de projet. Dans le cas des bâtiments de bureau, la surface utile est considérée.

Energie	Bbio [points]	Besoins bioclimatiques	Evaluation des besoins de chaud , de froid (que le bâtiment soit climatisé ou pas) et d'éclairage .	EVOLUTION
	Cep [kWh _{ep} /(m ² .an)]	Consommations d'énergie primaire totale	Evaluation des consommations d'énergie renouvelable et non renouvelable des 5 usages RT 2012 : chauffage, refroidissement, eau chaude sanitaire, éclairage, ventilation et auxiliaires +	EVOLUTION
	Cep,nr [kWh _{ep} /(m ² .an)]	Consommations d'énergie primaire non renouvelable	1. éclairage et/ou de ventilation des parkings 2. éclairage des circulations en collectif 3. électricité ascenseurs et/ou escalators	NOUVEAU
	Ic_{énergie} [kg eq. CO ₂ /m ²]	Impact sur le changement climatique associé aux consommations d'énergie primaire	Introduction de la méthode d'analyse du cycle de vie pour l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre des énergies consommées pendant le fonctionnement du bâtiment, soit 50 ans.	NOUVEAU
Carbone	Ic_{construction} [kg eq. CO ₂ /m ²]	Impact sur le changement climatique associé aux « composants » + « chantier »	Généralisation de la méthode d'analyse du cycle de vie pour l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre des produits de construction et équipements et leur mise en œuvre : l'impact des contributions « Composants » et « Chantier ».	NOUVEAU
Confort d'été	DH [°C.h]	Degré-heure d'inconfort : niveau d'inconfort perçu par les occupants sur l'ensemble de la saison chaude	Évaluation des écarts entre température du bâtiment et température de confort (température adaptée en fonction des températures des jours précédents, elle varie entre 26 et 28°C).	NOUVEAU

Figure 2-6 - 6 indicateurs de la RE2020 (Cabassud, s. d.)

Deux de ces indicateurs concernent le volet Carbone.

- $I_{c,energie}$

L'indicateur $I_{c,energie}$ représente l'impact du contributeur « Energie », c'est-à-dire l'énergie consommée pendant le fonctionnement du bâtiment.

- $I_{c,construction}$

L'indicateur $I_{c,construction}$ représente l'impact des contributeurs « Composants » et « Chantier », c'est-à-dire des produits de construction et équipements ainsi que la manière dont ils sont mis en œuvre.

Afin de répondre à la réglementation, $I_{c,construction}$ doit être inférieur à $I_{c,construction_max}$. $I_{c,construction_max}$ est issu d'un calcul dépendant de $I_{c,construction_maxmoyen}$. Pour ce dernier, des seuils sont définis. Ce calcul prend en compte notamment la présence de combles aménagés, la taille du bâtiment, les espaces souterrains, l'impact des voiries, la localisation géographique ou encore l'utilisation de données environnementales par défaut (Cabassud, s. d.).

L'Article R172-4 du Code de la Construction et de l'Habitat précise que tout bâtiment soumis au Code doit atteindre des résultats maximaux. Ces résultats maximaux concernent notamment l'impact sur le changement climatique lié aux composants du bâtiment et à leur installation sur chantier ($I_{c,construction}$). Ils dépendent de l'usage du bâtiment ainsi que de l'année à laquelle le permis est déposé, comme montré sur la Figure 2-7 (*Article R172-4 - Code de la construction et de l'habitation - Légifrance, 2022*).

Usage de la partie de bâtiment	Valeur de $I_{c,construction_maxmoyen}$			
	Années 2022 à 2024	Années 2025 à 2027	Années 2028 à 2030	À partir de l'année 2031
Maisons individuelles ou accolées	640 kg éq. CO ₂ /m ²	530 kg éq. CO ₂ /m ²	475 kg éq. CO ₂ /m ²	415 kg éq. CO ₂ /m ²
Logements collectifs	740 kg éq. CO ₂ /m ²	650 kg éq. CO ₂ /m ²	580 kg éq. CO ₂ /m ²	490 kg éq. CO ₂ /m ²
Bureaux	980 kg éq. CO ₂ / m ²	810 kg éq. CO ₂ / m ²	710 kg éq. CO ₂ / m ²	600 kg éq. CO ₂ / m ²
Enseignement primaire ou secondaire	900 kg éq. CO ₂ / m ²	770 kg éq. CO ₂ / m ²	680 kg éq. CO ₂ / m ²	590 kg éq. CO ₂ / m ²

Figure 2-7 - Seuils définis par le Code de la construction et de l'habitat, pour $I_{c,construction_maxmoyen}$ (Article R172-4 - Code de la construction et de l'habitation - Légifrance, 2022)

Enfin, deux attestations sont requises pour prouver les performances du projet : une doit être fournie en phase « permis de construire » et une à la réception du bâtiment. L'objectif est d'inciter les concepteurs à anticiper les évaluations et les encourager à concevoir un projet qui puisse respecter les exigences, dès les premières esquisses (Cabassud, s. d.).

2.3 Évaluation des impacts environnementaux

Les impacts environnementaux sont désormais réglementés. Plusieurs méthodes permettent de les évaluer.

2.3.1 Les différentes méthodes

Finnveden & Moberg présentent des méthodes d'évaluation des impacts environnementaux. Parmi elles, on retrouve les méthodes suivantes :

- Les ACV, définies précédemment,
- Les Coûts du Cycle de Vie (LCC), qui attestent du coût d'un produit ou d'un service sur tout son cycle de vie.
- L'analyse des Coûts Bénéfices, qui atteste des coûts et bénéfices d'un projet, dont les coûts environnementaux. L'objectif est de monétiser l'impact environnemental. Parfois, cette méthode est requise par les réglementations. Elle est similaire à la méthode LCC mais cette dernière ne considère pas les bénéfices.
- L'empreinte écologique, souvent utilisée à l'échelle d'une région, indique la superficie productive nécessaire à une certaine activité.
- Les analyses de risque, qui listent d'éventuels accidents dont les conséquences sur l'environnement seraient préjudiciables. Elles associent la probabilité de cet accident à ces conséquences.

Ces méthodes sont utilisées comme outil d'aide à la décision. Le choix de la méthode dépend du contexte : les acteurs, l'échelle, l'activité et les impacts considérés. Deux principaux aspects sont déterminants : l'objet de l'étude et les impacts environnementaux à considérer. L'ACV est particulièrement adaptée pour évaluer des impacts environnementaux globaux à l'échelle des produits et services (Finnveden & Moberg, 2005). La suite de l'étude se focalise sur cette méthode.

2.3.2 L'ACV

L'ACV est définie dans les normes internationales et européennes. D'abord, elle est définie par les normes ISO 14040/44. Ces définitions sont ensuite précisées dans la norme EN 15978, spécifique au bâtiment.

L'ACV consiste à étudier et évaluer les impacts environnementaux d'un produit, système ou service à toutes les étapes de son cycle de vie. Ces étapes sont représentées sur la Figure 2-8. La méthode prend en compte les impacts aussi bien au moment de la production, que de l'utilisation, l'élimination ou le recyclage des produits. Ces atouts font de la méthode l'une des plus utilisées dans le monde politique, de l'industrie ou de la recherche. Elle permet notamment de comparer un projet à une référence (réglementations par exemple), ou bien à un projet alternatif (Reiter, 2010).

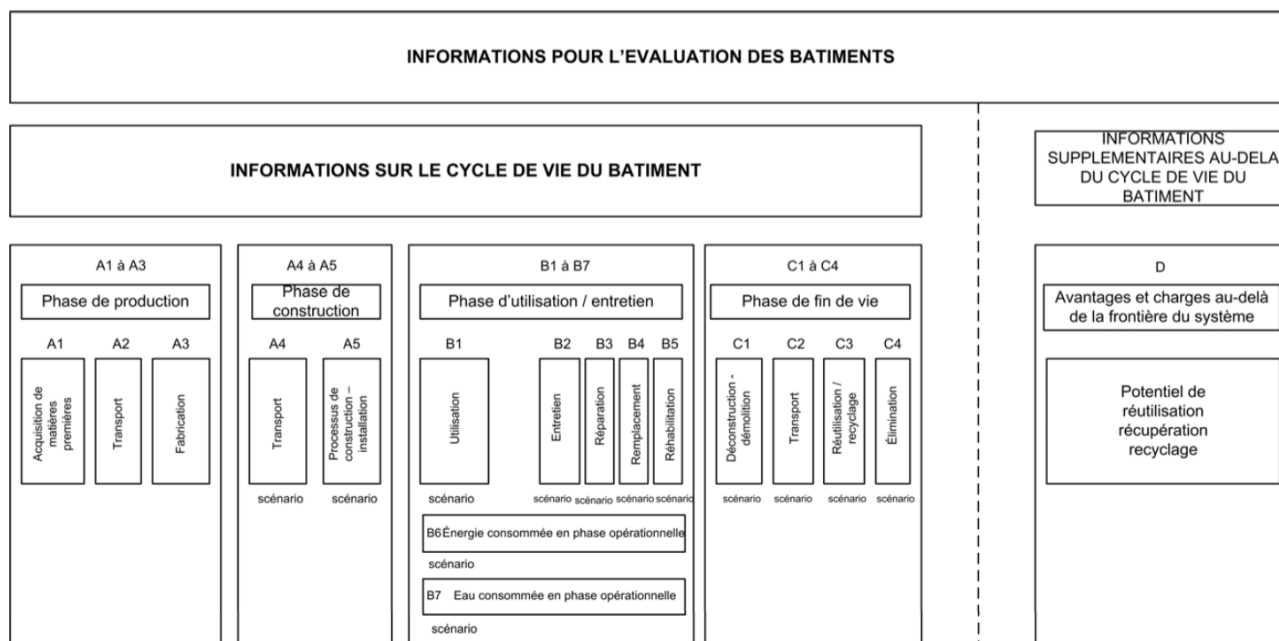


Figure 2-8 - Phases du cycle de vie (EN 15978, 2013)

2.3.2.1 Etapes de l'ACV

Les différentes étapes de la réalisation d'une ACV sont définies dans les normes ISO 14040/44 et EN 15978. Quatre grandes étapes sont notamment identifiées dans la norme internationale, et précisées pour les bâtiments dans la norme européenne. Ces étapes sont résumées dans le Tableau 2-4.

Tableau 2-4 - Synthèse des étapes de l'ACV selon ISO 14040 ou EN 15978

Étape	ISO 14040	EN 15978
1	Définition des objectifs	Identification du but de l'évaluation
		Spécification de l'objet de l'évaluation
		Elaboration du scénario du cycle de vie
2	Inventaire (« Life Cycle Inventory » LCI)	Quantification des impacts du cycle de vie
		Sélection des données environnementales et autres informations
3	Evaluation de l'impact (« Life Cycle Impact Assessment » LCIA)	Calcul des indicateurs environnementaux
4	Interprétation	Rapport et communication
		Vérification

- Étape 1 - Définition des objectifs

Des **objectifs** concrets et réalisables en matière de réduction des impacts doivent être fixés dès les premières phases (*ISO 14040*, 2006). La norme EN 15978 précise, dans le cas des bâtiments, pourquoi utiliser l'ACV : prendre une décision quant à différentes options de conception, comparer la performance environnementale avant et après réhabilitation, déclarer le bâtiment conforme aux exigences légales, certifier le bâtiment, etc. (*EN 15978*, 2013).

A cette étape, il est nécessaire d'établir l'objectif et la **portée** de l'étude : quelles parties du bâtiment inclure dans le calcul (Reiter, 2010) ? La norme EN 15978 précise l'objet de l'évaluation : il doit comprendre le bâtiment ainsi que ses fondations et tous les ouvrages extérieurs situés dans son périmètre. La **frontière** de l'étude doit prendre en compte l'ensemble du cycle de vie du bâtiment : la phase de production (du berceau à la sortie d'usine), la phase de construction (de la porte de l'usine jusqu'à la fin de réalisation des constructions), la phase d'utilisation (de la réalisation des constructions jusqu'à la déconstruction du bâtiment) et la phase de fin de vie (de la déconstruction jusqu'à la tombe, à savoir le moment où le bâtiment est hors service et inutilisé) (*EN 15978*, 2013).

A cette étape, il est également nécessaire de fixer les exigences relatives à la **qualité** des données. Enfin, pour chaque système, une **unité fonctionnelle** qui assure la comparabilité des résultats doit être déterminée (Reiter, 2010). Cette unité fonctionnelle spécifie les caractéristiques et fonctionnalités techniques du système (*EN 15978*, 2013). L'unité fonctionnelle est définie par la quantité (1m² par exemple), la fonction (isoler thermiquement une façade), la qualité de la fonction (résistance thermique de l'isolant) et une durée de vie (30 ans) (Peuportier, 2019).

- Étape 2 - Inventaire du cycle de vie

Cette étape consiste à **quantifier** toutes les émissions et consommations par étape du cycle de vie, pour tous les éléments inclus dans les frontières de l'étude (Reiter, 2010).

Les données collectées doivent avoir une **qualité** suffisante pour mener à bien l'ACV. Cette qualité doit être conforme aux objectifs définis en première étape en matière de précision, complétude et représentativité des données (Reiter, 2010). Le niveau de détail des données dépend notamment des informations disponibles au moment de l'étude. Il convient d'utiliser les données représentant avec le plus de précision possible le bâtiment. Pour cela, l'utilisation des Déclarations Environnementales Produits (DEP) est préférable (*EN 15978*, 2013). Différentes sources existent, parmi elles la base de données Ecoinvent qui recense près de 4000 systèmes associés à leurs émissions (Reiter, 2010).

- Étape 3 - Analyse d'impact du cycle de vie

Cette étape consiste à convertir les émissions tirées de l'inventaire en **impacts environnementaux**. A chaque catégorie d'impact correspond un indicateur : par exemple, pour l'impact « réchauffement climatique », l'indicateur est le PRG, exprimé en kg.CO2eq (Reiter, 2010). La norme EN 15804 fait mention de 22 indicateurs environnementaux, répartis en trois types : sept indicateurs décrivent les impacts environnementaux, huit indicateurs décrivent l'utilisation des ressources, sept indicateurs décrivent des informations environnementales complémentaires. Les sept indicateurs décrivant les impacts environnementaux sont décrits dans le Tableau 2-5 (EN 15804, 2013) :

Tableau 2-5 - 7 indicateurs décrivant les impacts environnementaux dans la norme EN 15804

Paramètre	Unité (exprimée par unité fonctionnelle)
Potentiel de réchauffement global (GWP ou PRG)	kg éq. CO2
Potentiel de destruction de la couche d'ozone stratosphérique	kg éq. CFC 11
Potentiel d'acidification du sol et de l'eau	kg éq. SO2-
Potentiel d'eutrophisation	kg éq. (PO4)3-
Potentiel de formation d'oxydants photochimiques de l'ozone troposphérique	kg éq. éthylène
Potentiel de dégradation abiotique des ressources pour les éléments	kg éq. Sb
Potentiel de dégradation abiotique des combustibles fossiles	MJ, valeur calorifique nette

La norme spécifie également les **méthodes de calcul** à mettre en œuvre. Le calcul est une suite d'additions et de multiplications. En fait, la quantité de produits est multipliée par la valeur de l'indicateur environnemental. Ce calcul est effectué pour chaque étape du cycle de vie (EN 15978, 2013).

- Étape 4 - Interprétation et recherche d'améliorations

Cette étape conclut et spécifie si les objectifs fixés en étape 1 ont été atteints. Elle peut prendre la forme de **recommandations** (ISO 14040, 2006).

2.3.2.2 Données utilisées pour l'ACV

Le Ministère de la Transition Ecologique définit les données utiles à l'évaluation de la performance environnementale. Ces données sont de deux **types** : les données du projet qui permettent de quantifier les équipements et produits de construction notamment ; et les données environnementales qui donnent la valeur des indicateurs d'impacts environnementaux, par unité fonctionnelle de matériau considéré (Cabassud, s. d.).

Plusieurs sources de données permettent de collecter les **quantités** nécessaires à la réalisation de l'ACV. A l'heure actuelle, elles sont principalement collectées grâce à des **modèles BIM** au format IFC (Industry Foundation Classes). Ce format permet l'interopérabilité entre outils et l'échange d'informations entre les différentes parties prenantes. Ces modèles recensent les éléments constituant le bâtiment. Les paramètres de l'élément permettent d'avoir accès au matériau et au volume, données nécessaires à l'ACV. Ces données peuvent être intégrées à un logiciel d'ACV.

Les modèles peuvent avoir des niveaux de précision variés : les résultats de l'ACV dépendent de ce niveau de développement (Level of Development LOD). Les niveaux LOD peuvent être découpés en cinq grandes familles, du niveau LOD 100, le moins précis, au niveau LOD 500, le plus précis. Un niveau LOD 300 sera considéré comme ayant des informations assez fiables pour être utilisé pour une ACV (Stassen, 2016).

La quantité des produits peut aussi se retrouver dans d'autres documents et notamment les **bordereaux de prix** : en France par exemple, des tableaux Excels ou des documents PDF peuvent être utilisés à cet effet. D'un point de vue de l'ACV, ces documents peuvent fournir une quantité de détail importante contrairement aux maquettes qui dépendent de leur niveau de développement. En effet, les bordereaux identifient la totalité des produits d'un bâtiment, même ceux ayant pu être ignorés dans le modèle BIM. Des éléments comme les peintures, étanchéités ou traitements de surface sont inclus et rendent le résultat de l'ACV plus complet.

De plus, ces documents sont disponibles en premier, aux étapes du projet où le potentiel de réduction carbone est maximal (Figure 2-9). Effectivement, dans les premières phases, le design est encore flexible : lui apporter des modifications est moins coûteux. Faire l'analyse environnementale au début du projet est donc le plus pertinent. Bien que les données environnementales spécifiques ne soient pas toujours disponibles à ces phases, l'utilisation de données génériques donnera une bonne approximation de l'ACV (Stassen, 2016).

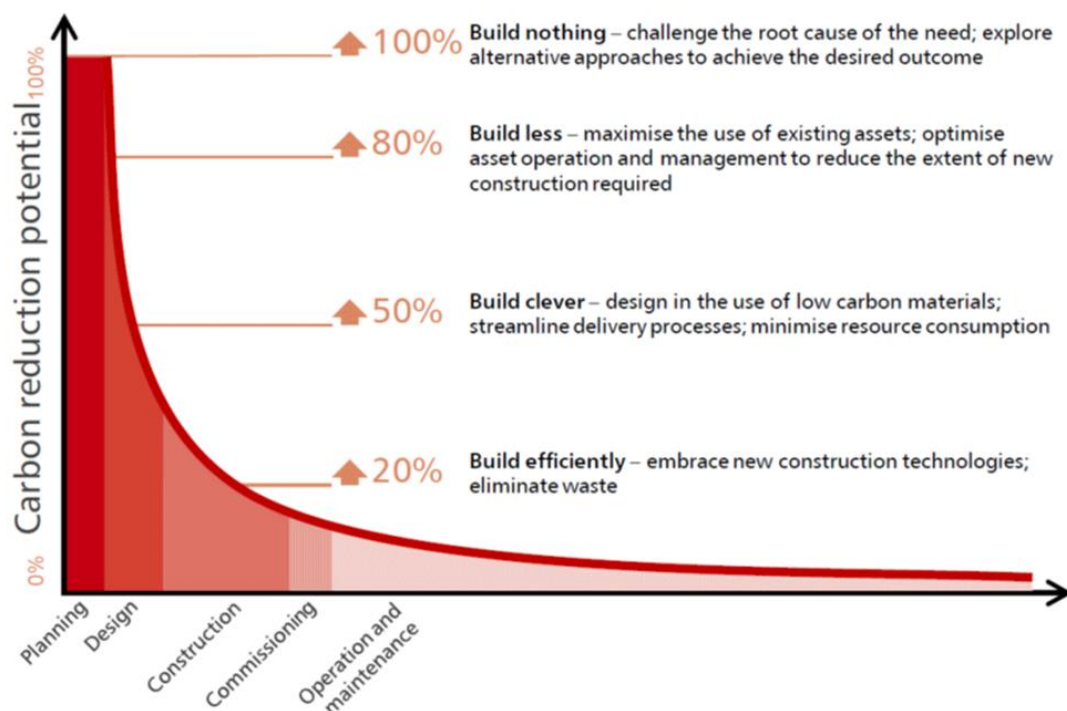


Figure 2-9 - Potentiel de réduction carbone en fonction des phases (Ness, 2022)

Enfin, la **qualité de ces différentes données** peut être déterminée suivant plusieurs paramètres. Weidema & Wesnaes décrivent cinq critères permettant d'assurer la qualité des données utilisées pour l'ACV et la fiabilité du résultat. Ces cinq critères sont donnés dans le Tableau 2-6.

Le choix de la qualité des données se fait par rapport aux objectifs. En fonction de la qualité des données utilisée, les résultats peuvent varier (Weidema & Wesnæs, 1996). On parle de « sensibilité » des résultats.

Tableau 2-6 - 5 paramètres de la qualité des données définis par Weidema & Wesnaes

Fiabilité	Quelles sources ont été considérées ? Par quelle méthode d'acquisition les données ont-elles été récupérées ? Avec quelles procédures de vérification ?
Complétude	L'échantillon choisi est-il représentatif ? Y'a-t-il assez de données dans l'échantillon ?
Corrélation temporelle	Est-ce que les données utilisées sont assez récentes ?
Corrélation géographique	Est-ce que les données correspondent à la localisation du projet ?
Corrélation technique	Est-ce que les données sont représentatives de l'entreprise ? Est-ce que les données correspondent aux produits réels ?

2.3.3 One Click LCA (OCL)

One Click LCA (OCL) est un logiciel développé par BioNova Ltd. Il permet le calcul des impacts d'un bâtiment sur tout le cycle de vie, du berceau à la tombe (Cradle-to-grave) (Cormick, 2017). OCL est une base de données considérable : elle donne accès à des DEP au niveau international, en se basant sur différentes sources notamment la base INIES ou Ecoinvent (*One Click LCA*, s. d.). Plus de 150 000 données sont vérifiées et mises à jour régulièrement. Le logiciel est également intégré au BIM et dispose d'un accès en ligne. Des bâtiments modélisés sur Revit ou Design Builder peuvent par exemple être transférés sur le logiciel. Enfin, OCL est conforme aux normes ISO 14040/44 et EN 15978 et permet de répondre à plus de 60 certifications, normes ou réglementations comme BREEAM, LEED ou la RE2020.

Le calcul est donc effectué conformément à ces normes, comme explicité précédemment. En effet, pour chaque produit de construction, le calcul est réalisé suivant le schéma de la Figure 2-10 (Tchakorom, 2022) :

$$\begin{array}{ccccc} \Sigma & \text{Quantité sur la} & \times & \text{Donnée d'impact} & = & \text{Impact} \\ & \text{durée de vie} & & & & \text{environnemental} \\ & \text{Ex: Kg} & & \text{Ex: facteur d'émission} & & \text{Ex: kgCO}_2\text{eq} \\ & & & \text{kCO}_2\text{eq/kg} & & \end{array}$$

Figure 2-10 - Schéma expliquant le calcul de l'ACV (Tchakorom, 2022)

2.4 Études similaires et gap scientifique

Cette analyse de la littérature est complétée par une revue des études relatives aux mêmes sujets (Tableau 2-7). Cette étape est primordiale : elle permet d'évaluer la pertinence du sujet de recherche.

L'influence des **choix méthodologiques** est un sujet récurrent dans la littérature. Par exemple, Francart et al. (2021) étudient l'influence de ces choix sur les impacts environnementaux des phases de Maintenance et Remplacement.

Plus précisément, la **source des données** nécessaires à l'ACV est abordée. Certaines études se focalisent sur les **données environnementales**. Takano et al. (2014) comparent les résultats d'ACV obtenus grâce à cinq bases de données différentes. Les autres se concentrent sur la collecte des **quantités**. Plusieurs études relèvent l'importance d'intégrer l'ACV au plus tôt dans les phases de conception, et notamment grâce au **BIM**. Wastiels & Decuypere (2019) étudient différentes stratégies permettant d'extraire les quantités de produits nécessaires à l'ACV à partir du BIM mais cette étude reste théorique. Basbagill et al. (2013) étudient également les résultats d'une ACV obtenue grâce au modèle BIM. Bueno & Fabricio (2018) comparent deux ACV. L'une est réalisée à partir d'un plugin BIM. L'autre est une ACV complète réalisée par un logiciel de calcul des impacts environnementaux (Gabi). Aucune de ces études ne s'élargit à des données comme les **bordereaux**.

La **complétude des données** est également un sujet abordé dans la littérature. Des études évaluent l'influence de la simplification de l'ACV sur le résultat. Ces travaux comparent notamment des ACV prenant en compte un nombre réduit de produits avec des ACV complètes. Soust-Verdaguer et al. (2016) comparent les simplifications faites dans 20 cas d'étude différents mais ne comparent pas l'impact de ces simplifications sur le résultat de l'ACV. Hoxha et al. (2017) identifient les matériaux ayant la plus grande contribution aux impacts du bâtiment. Ils étudient notamment la structure, les ouvertures et les revêtements. Toutefois, les résultats restent **généraux** et ne donnent pas de précision sur l'impact de chaque produit. Kellenberger & Althaus (2009) comparent les résultats obtenus pour différents complexes de **façade** à différents niveaux de simplification. Certains matériaux sont négligés dans les ACV simplifiées : les résultats de l'étude montrent pourtant qu'ils ont parfois un impact non négligeable. Cependant, cette étude ne se focalise que sur les façades et pas sur la **structure**.

Ainsi, les modèles 3D sont la source de données privilégiée pour la collecte des quantités. Les bordereaux sont peu mentionnés. Aussi, ces études ne se focalisent pas sur un cas d'étude concret du Gros Œuvre, lot contribuant majoritairement aux impacts. Les études citées précédemment ne comparent pas la source des données et la complétude des données. Ces travaux ne font pas non plus le lien entre les résultats et la réglementation. Cette dernière observation est logique : pour les bâtiments de bureaux par exemple, la RE2020 est entrée en vigueur en 2022.

Tableau 2-7 - Synthèse des études similaires

Référence	Paramètres étudiés	Sujet	Gap scientifique	Résultats
(Wastiels & Decuypere, 2019)	Quantités et données environnementales	<p>Identifier et développer des processus permettant de réaliser l'ACV à partir des modèles BIM.</p> <p>Comparer 5 stratégies théoriques pour la collecte des données.</p>	<p>Uniquement théorique.</p> <p>Uniquement sur base des modèles 3D.</p> <p>Pas d'étude du cycle de vie.</p>	Pour calculer l'ACV de la structure, le modèle BIM peut être utilisé en phase de conception.
(Hoxha et al., 2017)	Quantités et données environnementales	<p>Améliorer la fiabilité des résultats de l'ACV.</p> <p>Identifier les matériaux qui contribuent le plus aux impacts et à l'incertitude sur le résultat.</p>	<p>En phase d'exploitation et non de conception.</p> <p>Résultats par thématique (structure, ouvertures, etc.) et non par produit.</p>	Les éléments structuraux (acier et béton) sont les plus contributeurs, notamment le béton armé
(Bueno & Fabricio, 2018)	Quantités et données environnementales	<p>Intégrer l'ACV dans le BIM.</p> <p>Identifier les conséquences de la simplification des données sur le résultat.</p> <p>Comparer une ACV réalisée grâce au BIM (simplifiée) et une ACV réalisée à l'aide de base de données et d'outils (complète).</p>	<p>Pour un complexe de mur théorique.</p> <p>Uniquement sur base des modèles 3D.</p>	<p>L'ACV réalisée avec Revit est suffisante en phase de conception pour guider les choix des concepteurs.</p> <p>L'ACV complète peut être faite à la fin du processus.</p>

(Francart et al., 2021)	Frontières de l' étude et données environnementales	<p>Expliquer l'influence des choix méthodologiques sur les résultats.</p> <p>Comparer l'influence du choix de la période de référence, de la source de la donnée de durée de vie du matériau, et des méthodes de calcul.</p>	<p>En phase d'exploitation.</p> <p>Pour les phases de Maintenance et de Remplacement.</p>	La méthodologie choisie influence significativement le résultat. Les phases de Maintenance et Remplacement peuvent être impactantes pour certains matériaux (surtout s'ils sont remplacés souvent).
(Takano et al., 2014)	Données environnementales	<p>Comparer les résultats d'ACV utilisant 5 bases de données différentes.</p> <p>Pour 3 bâtiments, calculer les impacts environnementaux selon ces 5 bases de données.</p>	<p>Uniquement à propos des données environnementales.</p> <p>Uniquement du berceau à la sortie de l'usine (A1-A3).</p>	Des différences existent entre les résultats issus des 5 bases de données différentes mais les ordres de grandeur sont les mêmes.
(Basbagill et al., 2013)	Quantités et données environnementales	<p>Permettre aux concepteurs de comprendre l'influence des choix de conception sur l'impact environnemental.</p> <p>Etudier l'influence du choix des matériaux et de leur dimensionnement.</p>	<p>Uniquement sur base des modèles 3D.</p> <p>Se focalise sur les choix de conception et non les choix méthodologiques.</p>	<p>Les matériaux les plus contributeurs se trouvent dans la structure, l'enveloppe ou le partitionnement intérieur.</p> <p>Le choix de l'épaisseur des matériaux a de l'impact tandis que les équipements (plomberie, électricité, etc.) en ont peu.</p>

(Soust-Verdaguer et al., 2016)	Quantités et données environnementales	<p>Donner des stratégies permettant de réaliser des ACV simplifiées.</p> <p>Etudier la simplification des choix méthodologiques : unité fonctionnelle, source de données et impact environnemental considéré, pour 20 cas d'étude différents.</p>	<p>En phase d'exploitation.</p> <p>Pour des maisons unifamiliales uniquement.</p> <p>Comparaison qualitative uniquement.</p>	Utiliser les outils BIM est une solution fréquente permettant de simplifier l'ACV.
(Kellenberger & Althaus, 2009)	Quantités	<p>Evaluer l'impact de la simplification des éléments sur les résultats de l'ACV.</p> <p>Evaluer l'impact de certains matériaux, souvent négligés dans l'ACV (joints, isolation, etc.).</p>	<p>Uniquement les matériaux des façades.</p> <p>Uniquement grâce à la base de données de la SIA (Swiss Society of Engineers and Architects).</p>	Pour chaque complexe de façade, les résultats avec ACV simplifiée ou complète varient de 15 à 30%.

3 Méthodologie

Ce chapitre présente la méthodologie mise en place pour réaliser l'étude.

Dans un premier temps, il donne un aperçu général de la démarche : les questions et principales méthodes de recherche sont rappelées (3.1) puis l'organisation des différentes étapes du travail est expliquée (3.2). Dans les sections suivantes, le périmètre de l'étude est mis en évidence. Le choix des variables étudiées est détaillé, notamment la variable « qualité des données » et les sous variables qui en découlent (3.3). Les hypothèses de travail sont présentées (3.4) : cette partie mentionne le choix du cas d'étude et des éléments de construction à étudier au sein de ce cas. La méthode de récolte des données (3.5), la prise en main de l'outil One Click LCA pour l'ACV (3.6) et les différentes méthodes de validation (3.7) sont expliquées en fin de chapitre.

3.1 Description des méthodes de recherche

Cette partie présente les méthodes de recherche mises en place pour répondre à la question de recherche principale :

Comment l'estimation des quantités de produits du gros œuvre aux différentes phases de conception influence-t-elle la précision des calculs du potentiel de réchauffement global ?

Les sous-questions de recherche qui se posent sont alors :

1. *Quelles sont les exigences réglementaires liées au potentiel de réchauffement global des bâtiments (PRG) en France (contexte du cas d'étude) ?*
2. *Comment la fiabilité des données influence-t-elle la précision des calculs du PRG ?*
3. *Comment la complétude des données influence-t-elle la précision des calculs du PRG ?*
4. *Comment intégrer les résultats de l'étude dans la pratique (inclus BESIX) ?*

L'étude se base sur la réalisation de quatre ACV, aux différentes étapes de la conception. Pour chacune de ces ACV, les quantités de produits sont estimées grâce à des données de qualité variable. Ces ACV ont donc des niveaux de précision différents. La notion de « niveau de précision » est définie dans la suite de l'étude. Le calcul est réalisé pour un cas concret de l'entreprise BESIX, à savoir la Tour Triangle à Paris, projet pilote pour l'implémentation de l'ACV.

Le logiciel One Click LCA est utilisé pour la **modélisation** des impacts environnementaux. Les méthodes utilisées pour l'étude sont **quantitatives** (quantification des produits lors de la collecte des données et des impacts lors de l'analyse des données) et **qualitatives** (travail de synthèse et entretiens oraux avec BESIX).

3.2 Cadre de l'étude

La Figure 3-1 illustre les différentes étapes de l'étude. Elle est découpée en quatre parties. Chacune des parties est détaillée ci-dessous.

1. Etat de l'art et collecte des données

D'abord, l'Etat de l'art permet de collecter des informations au sujet du contexte réglementaire de la Tour Triangle. En outre, des renseignements sont recherchés au sujet de l'ACV et des données nécessaires à sa réalisation.

Cette étape permet de donner des éléments de réponse à la question : *quelles sont les exigences réglementaires liées au potentiel de réchauffement global des bâtiments en France (contexte du cas d'étude) ?*

Afin de calculer l'ACV de la Tour, les quantités de produits du bâtiment doivent être rassemblées. La **collecte** de données se fait en deux temps. D'abord, des données brutes sont collectées auprès de BESIX. **Trois principales sources de données** sont considérées : les **bordereaux** listant les quantités exactes de chaque produit composant le bâtiment, les **modèles 3D** (Revit) représentant sous forme de maquette numérique les différents éléments du bâtiment, et les **tableaux de ratios** permettant de calculer une quantité d'armature à partir d'une quantité de béton. En effet, les armatures ne sont pas modélisées sur le modèle 3D, contrairement au béton. Ensuite, ces données sont traitées : l'utilisation du plugin Diroots sur Revit et du logiciel Excel permet de regrouper les quantités nécessaires à la réalisation de l'ACV.

L'analyse des données se fait grâce à One Click LCA. Les quantités précédemment collectées sont importées sur le logiciel. Ainsi, le potentiel de réchauffement global de ces différentes quantités peut être évalué. Pour l'analyse des données, plusieurs ACV sont réalisées.

2. Les « ACV initiales »

BESIX a sa propre méthodologie pour la réalisation d'ACV. Avant le début de l'étude, deux ACV ont été réalisées par l'entreprise :

1. L'une a permis de calculer les impacts liés aux quantités de produits définies dans les bordereaux.
2. L'autre a permis de calculer les impacts liés aux quantités des produits définies dans les modèles 3D ainsi que les quantités d'armatures calculées selon les tableaux de ratios.

Alors, deux ACV sont réalisées en suivant la même méthodologie. Ce sont les « **ACV initiales** » : une ACV initiale Bordereau (1) et une ACV initiale Modèle 3D (2). Ces ACV sont validées lors du **cycle 1**. Les cycles de validation sont présentés plus en détail dans la partie Validation.

Elles permettent de prendre en main One Click LCA et de trouver certaines limites au logiciel. Elles sont également utiles pour assimiler les différentes variables dont dépend le potentiel de réchauffement global (PRG). Ainsi, les **variables étudiées** peuvent être choisies et des « niveaux de précision » peuvent être définis. En parallèle de ce calcul, **les éléments du bâtiment** à étudier sont sélectionnés.

3. Les ACV à différents niveaux de précision

Ces ACV permettent de répondre aux questions :

- Comment la fiabilité des données influence-t-elle la précision des calculs du PRG ?
- Comment la complétude des données influence-t-elle la précision des calculs du PRG ?

Pour cela, des **ACV sont réalisées aux différents niveaux de précision** définis dans l'étude. Pour chaque ACV, des données de qualité différente sont utilisées. Ces ACV sont validées lors du **cycle 2**.

4. Résultats et feedback de BESIX

Enfin, les PRG de chaque ACV sont comparés via le logiciel Excel. Les **résultats** de cette recherche sont des graphiques et tableaux simplifiés. Ces résultats sont validés lors du **cycle 3**. Ces trois cycles de validation permettent de prendre en compte les retours de BESIX et de répondre à la question : *comment intégrer les résultats de l'étude dans la pratique (inclus BESIX) ?*

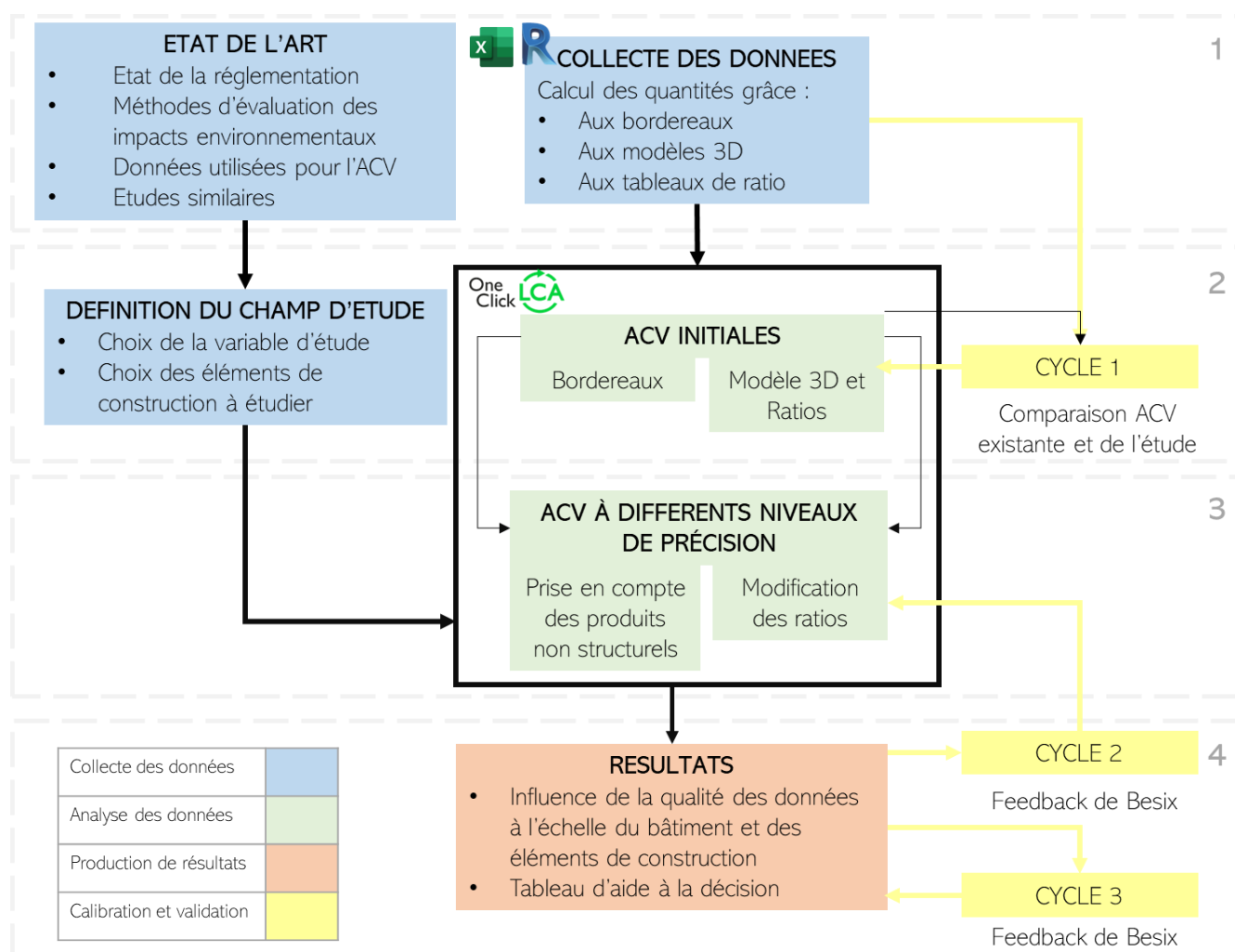


Figure 3-1 - Cadre de la thèse

3.3 Variables et indicateurs

Dans un premier temps, les variables étudiées et exclues sont présentées.

3.3.1 Facteurs influençant la qualité des données

Les données d'entrée utilisées pour l'ACV sont de deux types : les quantités et les données environnementales. Dans l'étude, la **quantité de produits** est le seul paramètre étudié.

Comme expliqué dans l'Etat de l'art, la qualité de ces données dépend de plusieurs facteurs : la corrélation temporelle, géographique et technique ainsi que la complétude et la fiabilité des données (Weidema & Wesnæs, 1996). Les trois types de données fournies par BESIX sont propres au cas d'étude de la Tour Triangle. La corrélation géographique, technique et temporelle est donc assurée.

La qualité de ces données dépend alors des facteurs suivants : la complétude et la fiabilité. La **fiabilité** dépend de la source des données. Dans le cas de l'étude, la source est de trois types, comme évoqué précédemment. La **complétude des données** dépend de la quantité de produits prise en compte dans l'ACV. Souvent, seuls les produits structurels sont considérés (béton, acier, armatures). Dans l'étude, l'influence des produits non structurels est également étudiée (coffrage, étanchéité, joints, etc.).

3.3.1.1 *Fiabilité des données*

Les données sont fournies par BESIX (cf. 3.5 Collecte des données). Elles ont toutes un format différent. Les bordereaux sont des tableurs Excel. Les modèles 3D sont une représentation numérique du bâtiment sur Revit. Enfin, les tableaux de ratios sont donnés au format PDF.

Elles correspondent à différentes phases du projet, comme le montre le Tableau 3-1. La réalisation de la Tour Triangle se fait suivant une méthode de conception-construction (design-build). Dans ce cas, BESIX participe à la fois à la conception technique et à la réalisation de la tour.

Les **modèle 3D** correspondent donc à la phase de conception technique. L'entreprise a réalisé un **bordereau** en phase de conception schématique, mis à jour en phase de conception développée. De plus, les **ratios** existent en plusieurs versions : des ratios généraux sont donnés en phase de conception schématique et actualisés en phase de conception technique (ratios de la phase d'exécution). Ainsi, les trois sources de données correspondent à des phases différentes du projet : elles n'ont pas la même fiabilité.

Tableau 3-1 - Source de la donnée dépendant des phases du projet

Phases du projet	Conception schématique	Conception développée	Conception technique
Source des données permettant d'estimer les quantités	Bordereau		Modèle 3D
	Ratios généraux		Ratios de la phase d'exécution

3.3.1.2 Complétude des données

Pour calculer l'ACV d'un bâtiment, les quantités de produits qui le composent sont indispensables. Or, certains produits ont un potentiel de réchauffement global plus grand que d'autres : c'est le cas du béton, de l'acier et des armatures, produits structurels du Gros Œuvre. Dans l'étude, les armatures sont distinguées du reste de l'acier (utilisé pour les poutres par exemple). Les produits non structurels sont à priori moins impactant.

Ils peuvent être distingués dans les bordereaux. Le Tableau 3-2 est un extrait des bordereaux fournis par BESIX. Il montre l'exemple de l'élément de construction *radier et dalles contre sol*. Par exemple, le béton C45/55 et les armatures sont des produits structurels. Les produits non structurels sont les coffrages perdus ou les étanchéités.

Tableau 3-2 - Produits de construction de l'élément radier et dalles contre sol

Radier et dalles contre sol
Béton de propreté ep. 10cm
Coffrage perdu fusible
Etanchéité parties courantes
Traitement des joints de construction
Adaptation étanchéité jonction radier paroi moulée
Armatures TS
Armatures HA
Voile par passe pour murs de fosses
Coffrage des murs de fosses
Bandes d'arrêt d'eau
Béton C45/55
P.V. formes de pente
Finition
Regards béton
Caniveaux
Produits de construction structurels
Produits de construction non structurels

3.3.2 Définition des niveaux de précision

La qualité des données dépend donc de deux sous-variables : la fiabilité et la complétude des données. Elles sont représentées dans le Tableau 3-3. Pour l'étude, la **fiabilité des données** se décline en trois types : les bordereaux, les modèles 3D associés aux ratios généraux pour le calcul des armatures, et les modèles 3D associés aux ratios de la phase d'exécution. La **complétude des données** est de deux types. Pour certaines ACV, seuls les produits structurels du Gros Œuvre sont pris en compte. Pour d'autres, tous les produits le sont.

Faire varier la qualité des données fait varier le **niveau de précision** de l'ACV. Cette notion de « niveau de précision » est propre à l'étude. Sept niveaux sont définis. L'étude est limitée aux quatre niveaux A, B, C et D par manque de données : seuls le béton et l'acier ont été modélisés sur Revit. De plus, les données réelles ne sont pas encore disponibles.

Tableau 3-3 - Niveaux de précision définis pour l'étude

			Complétude des données	
			Prise en compte...	
			Des produits structurels	De tous les produits
Fiabilité des données	Quantités calculées sur base...	Des bordereaux	ACV de niveau A	ACV de niveau B
		Des modèles 3D et des ratios généraux	ACV de niveau C	ACV de niveau E
		Des modèles 3D et des ratios de la phase d'exécution	ACV de niveau D	
		Des données réelles	ACV de niveau F	ACV de niveau G

Niveaux non pris en compte dans l'étude

3.3.3 Résumé des variables de l'étude

Pour résumer, les variables d'étude sont données dans le Tableau 3-4.

Tableau 3-4 - Variables de l'étude

	Variables de cause	Effet / Cause	Variable d'effet
Variable	Qualité des données permettant d'estimer les quantités de produits	Quantité des données [kg / m ³ / m ² / u]	Précision du calcul du potentiel de réchauffement global (PRG) [kg.CO ₂ eq]
Sous variable	Fiabilité des données [Bordereaux / Modèle 3D / Ratios]		
Sous variable	Complétude des données [Produits de construction structurels / non structurels]		

3.4 Frontières de l'étude

Les frontières de l'étude sont présentées dans cette section. Elle détaille notamment le choix du cas d'étude de la Tour Triangle. De plus, certains éléments du bâtiment sont étudiés en détail : le choix de ces éléments est également présenté dans cette partie.

3.4.1 Hypothèses de travail

Les hypothèses de travail sont résumées dans le Tableau 3-5.

Tableau 3-5 - Hypothèses de travail

Sujet	Frontière	Justification
Etapas du cycle de vie considérées	Toutes	
Impacts environnementaux étudiés	Potentiel de réchauffement global (kg.CO2.eq)	La RE2020 réglemente les seuils liés aux émissions de CO ₂ .
Phases du projet considérées	Conception schématique / Conception développée / Conception technique	Le potentiel de réduction carbone est maximal aux phases les plus précoces du projet, donc en phase de conception.
Logiciel utilisé	One Click LCA	One Click LCA fait partie des logiciels les plus reconnus et qui disposent du plus de données à l'international.
Données environnementales utilisées	Génériques	Les données environnementales ne sont pas étudiées. Toutes les ACV utiliseront les mêmes données environnementales. Aussi, les données génériques seront privilégiées.
Produits considérés	Cas d'étude Tour Triangle Produits de construction Gros Œuvre	L'étude se concentre sur le cas concret de la Tour Triangle, à Paris. L'ACV se focalise sur les produits de construction uniquement (pas les équipements). L'étude se restreint aux lots qui concernent BESIX, à savoir le lot Gros Œuvre.

3.4.2 Cas d'étude – La Tour Triangle à Paris

L'étude se focalise sur le cas de la Tour Triangle, à Paris. Elle culminera à près de 180 m de hauteur pour 44 étages. Elle totalisera une surface de plancher de 95 000 m². Le bâtiment sera notamment occupé par des **bureaux**, salles de réunion, hôtels et commerces. Dans la suite, il est considéré comme un bâtiment de bureaux. Deux représentations 3D du bâtiment sont données à la Figure 3-2 et à la Figure 3-3. De base trapézoïdale, le bâtiment et notamment ses façades ont été conçus pour être largement vitrés. La structure est constituée de béton armé et de poutres en acier. Ce cas d'étude est intéressant pour **deux raisons**.

D'une part, le bâtiment est en phase d'exécution. Les documents des phases précédentes sont donc disponibles pour l'étude. L'entreprise BESIX (Tableau 3-6) est en charge de la réalisation des lots Terrassements, Démolitions, Soutènement, Fondations spéciales, Gros œuvre, Maçonneries et Charpente. Dans l'étude, les lots **Gros Œuvre, Fondations, Maçonneries et Charpente** seront pris en compte. Pour l'étude, ils seront regroupés dans l'appellation « Gros Œuvre ».

Tableau 3-6 – Parties prenantes du projet Tour Triangle

Localisation	Paris (15e arrondissement)
Maîtrise d'ouvrage	Unibail Rodamco-Westfield (URW)
Maîtrise d'œuvre	Herzog & de Meuron
Entrepreneur général	BESIX

D'autre part, le bâtiment se trouve en France, pays où la Réglementation Environnementale 2020 (RE 2020) est entrée en vigueur. Le permis ayant été déposé avant juillet 2022, le bâtiment ne doit pas y répondre. Toutefois, il est intéressant de se pencher sur cette question : à l'avenir, des projets similaires pourraient être concernés. Bien que le bâtiment ne soit pas soumis à la RE2020, le Maître d'Ouvrage vise la certification BREEAM Excellent.



Figure 3-2 - Vue 3D de la tour (données fournies par BESIX)

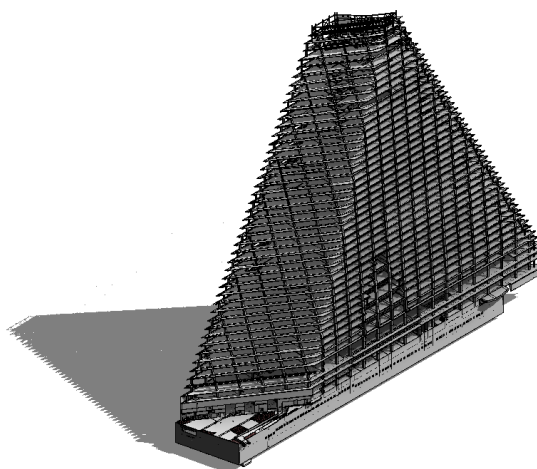


Figure 3-3 - Maquette Revit de la tour (données fournies par BESIX)

3.4.3 Choix des éléments à étudier

La qualité des données dépend de leur complétude. Afin d'évaluer l'influence de cette sous-variable, pour certains éléments de construction, les quantités de produits non structurels doivent être calculées. Ces quantités seront prises en compte dans l'ACV de Niveau B.

Or, le bâtiment est constitué de 67 éléments de construction différents (donnés en Annexe 8.2.2). Il serait beaucoup trop long de calculer, pour chacun de ces éléments, les impacts de tous les produits dont ils sont constitués. Alors, certains sont sélectionnés pour l'étude. Les quantités de produits non structurels sont calculées pour ces éléments uniquement. Ils sont choisis selon la méthodologie expliquée dans cette section.

3.4.3.1 *Recensement des éléments du bâtiment*

Grâce aux bordereaux, tous les éléments faisant partie du lot Gros Œuvre du bâtiment sont recensés. Pour chaque élément, les différents produits qu'il contient sont également recensés. Le Tableau 3-2 évoqué précédemment présente par exemple les produits de l'élément *radier et dalles contre sol*.

3.4.3.2 *Classement des éléments*

Parmi tous les éléments recensés, sept sont sélectionnés. Pour ce faire, quatre critères sont définis :

- **Quantité significative**

L'élément est constitué de produits dont la quantité est conséquente (plusieurs centaines de m² par exemple). En effet, si elle ne l'est pas, le potentiel de réchauffement global du produit sera négligeable.

- **Quantité de produits**

Plus l'élément contient de produits, plus il est intéressant pour l'étude. En effet, étudier un grand nombre de produits amènera à des résultats plus complets.

- **Élément représentatif**

Les éléments couramment mis en œuvre dans les bâtiments sont privilégiés (par exemple, des voiles en béton ou des radiers). En effet, de cette manière, les résultats peuvent être transposables à d'autres projets.

- **Thématique de l'élément**

Plusieurs thématiques sont identifiées (étanchéité, revêtement, coffrage, etc.). L'objectif est d'étudier des produits de nature variée afin d'enrichir les résultats.

Pour chaque élément, ces critères sont évalués. Les éléments répondant à un maximum de ces critères sont sélectionnés.

3.4.3.3 Sélection des éléments

A la suite de ce classement, sept éléments sont sélectionnés :

- Les radiers en béton armé et toutes les autres dalles de fondation contre le sol,
- Les voiles du noyau,
- Les poteaux mixtes acier-béton,
- Les maçonneries,
- Les dalles hors noyau,
- Le traitement acoustique des locaux techniques (dalles des locaux techniques),
- Les micro-berlinoises (murs de soutènement).

3.5 Collecte des données

Les trois prochaines parties détaillent la démarche mise en place pour l'étude à savoir : la collecte des données, l'analyse des données (3.6) et la validation du travail (3.7).

D'abord, la collecte des données est primordiale : elle consiste à récolter l'ensemble des quantités de produits nécessaires à la réalisation de l'ACV. La collecte des données se fait en deux temps. D'abord, des données brutes sont fournies par BESIX. Ensuite, ces données sont traitées pour faciliter le calcul de l'ACV.

3.5.1 Données primaires fournies par BESIX

Cette partie détaille les données brutes fournies par BESIX au début de l'étude. Elles constituent les trois sources de données étudiées (bordereaux, modèle 3D et tableaux de ratios).

3.5.1.1 *Bordereaux*

Les Détails des Prix Globaux Forfaitaires (DPGF), aussi appelés bordereaux, donnent le détail des quantités de tous les produits du bâtiment. Ces quantités sont évaluées en phase de conception schématique et mise à jour en phase de conception développée. Pour l'étude, les derniers bordereaux sont considérés (conception développée). Les bordereaux sont utilisés pour les calculs des quantités **des ACV de niveaux de précision A et B**.

3.5.1.2 *Modèles 3D*

Les maquettes Structure (LOD 300/350), Fondation (LOD 400/500) et Maçonneries sont fournies. Elles donnent le détail des quantités de béton et d'acier. Elles ont été modélisées par l'équipe BIM, dès la phase de conception technique. Elles sont utilisées pour les calculs des quantités des ACV aux **niveaux de précision C et D**.

3.5.1.3 Tableau de ratios

Les armatures n'étant pas modélisées sur Revit, leurs quantités sont calculées sur base de ratios : $Ratio [kg/m^3] = \frac{Quantité\ d'armatures\ (kg)}{Quantité\ de\ béton\ (m^3)}$

En multipliant la quantité de béton obtenue à partir des modèles 3D, la quantité d'armatures est obtenue. Ils sont utilisés pour le calcul des quantités des ACV aux **niveaux de précision C et D**.

Les ratios sont calculés à plusieurs moments, par plusieurs équipes différentes de l'entreprise. Ils sont représentés dans le Tableau 3-7 (et détaillés en Annexe 8.2.3) :

- Les ratios **généraux** sont déterminés en fonction du type de bâtiment. Aucun calcul précis n'est réalisé pour le projet de la Tour Triangle.
- Les ratios **de la phase d'exécution** sont les plus récents, à l'heure de la réalisation de l'étude (10/03/23). Ils sont calculés par l'équipe Structure pendant les phases de conception technique, sur base des plans d'exécution. A ce stade du projet, en prenant l'exemple des *voiles du noyau*, uniquement 24 plans d'exécution sur 416 ont été produits. Les ratios de la phase d'exécution sont alors calculés sur base de ces 24 plans.

Tableau 3-7 - Extrait du tableau de ratios fourni par BESIX

	Conception schématique et développée	Conception technique		
	Ratios généraux	Ratios de la phase d'exécution	Nombre de plans totaux	Nombre de plans produits
	[kg/m³]			
VOILES NOYAU	108	108.1	416	24
VOILES AUTRES	105	150.6	108	26
POTEAUX	246	124.6	297	51
RADIER	185	125.8	44	37
PLANCHER	119	204.5	546	26
POUTRES	295	190.0	538	24

3.5.1.4 Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP)

Parfois, certaines informations peuvent manquer dans les bordereaux ou les modèles 3D. Dans ces cas-là, le CCTP peut donner des informations complémentaires à propos de la forme de l'élément ou du matériau dont il est constitué.

3.5.2 Traitement des données primaires

Ces données primaires permettent d'avoir accès aux quantités nécessaires à la réalisation de l'ACV. Toutefois, elles ne sont pas exploitables comme telles. Les données doivent être formatées et triées avant d'être importées sur One Click LCA (OCL). La Figure 3-4, en fin de partie, représente les différentes étapes relatives au traitement des données primaires.

3.5.2.1 *Formatage des données*

Les **modèles 3D**, données primaires fournies par BESIX, peuvent difficilement être importés sur One Click LCA. Pour ce faire, il est nécessaire d'en extraire des fichiers détaillant les quantités de produits (Figure 3-4). Le plugin Diroots permet d'extraire des informations associées à un modèle Revit. Entre autres, les quantités de béton et d'acier sont récupérées. Pour chaque modèle (Structure, Maçonneries et Fondations), un fichier Excel est donc généré.

Les **bordereaux** sont déjà des fichiers Excel. Ils listent tous les produits du bâtiment. Au moment du formatage, seules les quantités de béton, d'acier et d'armatures sont considérées. Le formatage se fait manuellement. Comme expliqué précédemment, il aurait été trop long de le faire pour tous les produits du bâtiment.

Les fichiers Excel issus des modèles 3D et les bordereaux sont ensuite **formatés**. La structure de ces données est résumée dans le Tableau 3-8.

Chaque feuille d'un fichier Excel correspond à un groupe d'élément : dalles, escaliers, colonnes, fondations, poutres et murs. Chaque ligne d'une feuille correspond à la quantité d'un élément de ce groupe. Pour faciliter le contrôle des données, les lignes sont "consolidées" sur Excel (cf. Annexe 8.2.4). Autrement dit, lorsque le matériau est identique, les quantités sont additionnées. Chaque feuille est donc composée d'une ligne par matériau. Enfin, les colonnes sont renommées pour correspondre au format imposé par One Click LCA, **indiqué en bleu**.

Tableau 3-8 - Structure des fichiers Excel listant les quantités

Groupe d'éléments <i>Feuille Excel</i>	<i>IFC_MATERIAL</i> Matériau	<i>QUANTITY</i> Quantité	<i>QTY_TYPE</i> Unité	<i>CLASS</i> Classe
	<i>Ligne Excel</i>			
Dalles	Matériau 1	Quantité 1	m ³	Dalles
	Matériau 2	Quantité 2	m ³	Dalles
	Matériau 3	Quantité 3	kg	Dalles
Escaliers	...			
Colonnes				
Fondations				
Poutres				
Murs				

3.5.2.2. Tri des données

Les tableaux extraits des modèles 3D ainsi formatés listent les quantités de béton et d'acier. Pour rappel, les **armatures** ne sont pas modélisées sur Revit. Pour les prendre en compte, leurs quantités sont calculées à partir des ratios et de la quantité de béton.

Les bordereaux formatés listent les quantités de béton, d'acier et d'armatures. Les quantités des produits des **sept éléments sélectionnés** doivent être rajoutées. Ces quantités sont nécessaires pour calculer le potentiel de réchauffement global de chacun de ces éléments. Elles sont récupérées manuellement dans le bordereau et encodées dans One Click LCA.

L'ensemble des hypothèses prises lors de l'étape de traitement des données primaires sont données en Annexe (8.2.4).

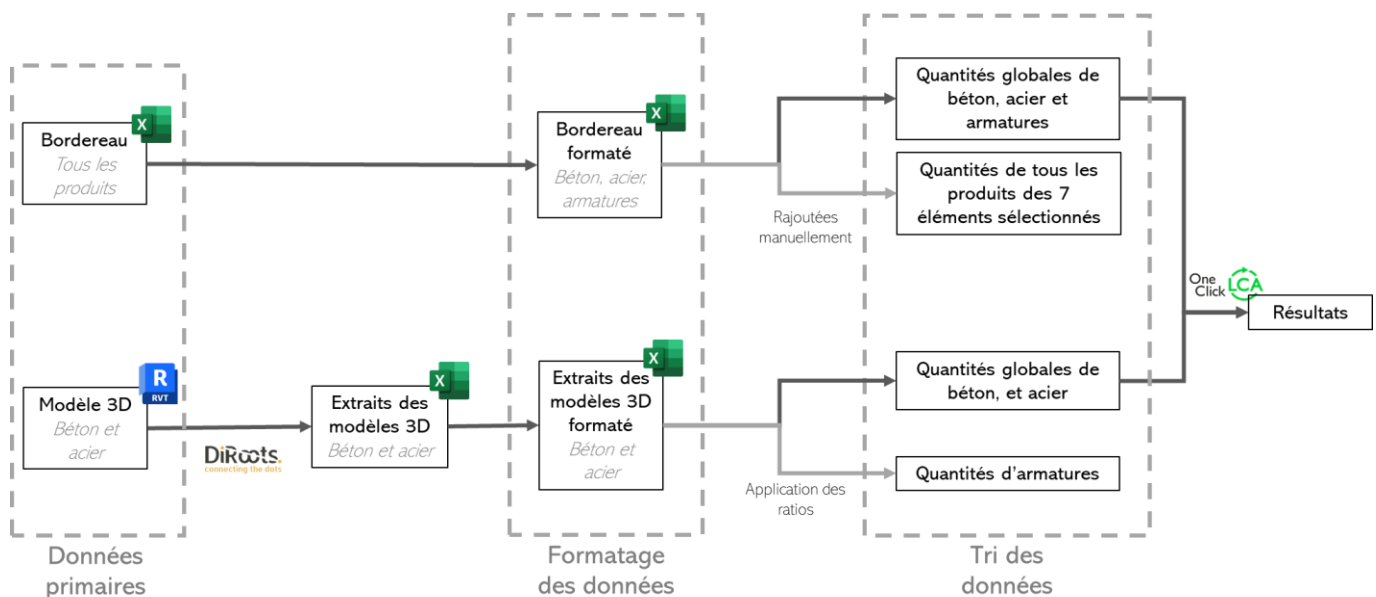


Figure 3-4 - Traitement des données primaires

3.6 Analyse des données

Toutes les quantités de produits collectées sont importées sur One Click LCA. Les potentiels de réchauffement global peuvent ainsi être générés. Puis, ces impacts sont analysés via le logiciel Excel.

3.6.1 One Click LCA

Le logiciel utilisé est One Click LCA (OCL). Le calcul est réalisé sur la version en ligne du logiciel. Un projet est créé puis 4 « designs » sont ajoutés au projet : chacun correspond à un niveau de précision de l'étude. Les quantités sont importées sur le logiciel grâce à la fonctionnalité « importer un fichier Excel ». Ces quantités sont ensuite associées à des données environnementales. Comme spécifié dans les hypothèses de travail, des données génériques sont privilégiées (détaillées en Annexe 8.2.5).

Après calcul de la part du logiciel, plusieurs onglets sont utilisés :

- A l'entrée dans le projet, des graphiques donnent une première comparaison entre niveaux de précision. Cette comparaison est disponible à l'échelle du bâtiment entier (ici, le lot Gros Œuvre) ou des sous-lots. Sur OCL, les trois principaux sous-lots considérés pour l'étude sont : **fondations**, **murs** (intérieurs et extérieurs) et **ossature** (poteaux, poutres et dalles).
- Au niveau de chaque design (pour chaque niveau de précision) :
 - Dans l'onglet « Matériau de construction » (Figure 3-5), tous les matériaux encodés dans le logiciel ainsi que leur impact sur tout le cycle de vie sont donnés.

Ressource ↕	Quantité ↕	CO ₂ e ↕	Commentaire ↕
Béton prêt à l'emploi, à résistance ?	19152.10 m3 ▼	6 536t - 12%	
Béton prêt à l'emploi, à résistance ?	55.77 m3 ▼	19t - ~0%	RADIER ET DALLES
Béton prêt à l'emploi, à résistance ?	87.60 m3 ▼	30t - 0,1%	RADIER ET DALLES

Figure 3-5 - Capture d'écran de l'onglet Matériaux de construction du logiciel One Click LCA

- Dans l'onglet Résultats, un certain nombre d'informations sont données, dont :
 - Toutes les catégories d'impact, pour chaque phase du cycle de vie,
 - Les matériaux les plus contributeurs,
 - Des graphiques, notamment la répartition du potentiel de réchauffement global entre les différents sous-lots.

3.6.2 Analyse sur Excel

One Click LCA (OCL) donne des résultats à l'échelle du Gros Œuvre ou des sous-lots. Pour traiter les données associées aux sept éléments, Excel est utilisé.

Pour chaque élément, les potentiels de réchauffement global (PRG) de tous ses produits sont récupérés manuellement sur OCL. Grâce à des graphiques, il est possible de visualiser le PRG des produits non structuraux par rapport au PRG des produits structuraux.

3.7 Validation

L'étape de Validation permet d'assurer la pertinence de la collecte et de l'analyse des données. Cette validation se base sur la triangulation des sources de données, des investigateurs et des méthodologies. En pratique, le travail est contrôlé à travers 3 cycles de validation.

3.7.1 Triangulation

Le contrôle de la qualité du travail se base sur les principes de la triangulation. Le Tableau 3-9 présente les différents types utilisés pendant l'étude.

Tableau 3-9 - Triangulation au sein de l'étude

Triangulation des sources de données	Plusieurs ACV sont réalisées et comparées sur base de différentes sources de données : <ul style="list-style-type: none">• Les bordereaux, liste de quantités.• Les modèles 3D, représentation numérique des quantités sur Revit.• Les ratios de la quantité de béton.
Triangulation des investigateurs	Les ACV de l'étude sont comparées aux ACV réalisées par les collaborateurs de BESIX. Les résultats obtenus par plusieurs investigateurs différents peuvent donc être comparés.
Triangulation des méthodologies	Lors de l'étude, plusieurs méthodologies sont appliquées : <ul style="list-style-type: none">• Recueil de bases théoriques dans la littérature,• Calculs pour le cas d'étude de la Tour Triangle,• Entretiens avec les collaborateurs de BESIX. Ainsi, les résultats de l'étude sont issus de méthodologies diverses.

3.7.2 Cycles de validation

En pratique, la qualité du travail est contrôlée grâce à **deux types de méthodes** :

- **Comparaison**

Cette validation se base sur la comparaison des quantités de produits collectées par BESIX et lors de l'étude.

- **Feedback**

Cette validation se base sur des discussions avec les ingénieurs de BESIX. Ces derniers ont formulé à l'oral leurs remarques sur le travail effectué.

Les ACV réalisées pour l'étude s'articulent autour de **3 cycles** de validation, lisibles sur la Figure 3-6.

- **Cycle 1 – Vérification par comparaison**

Pour rappel, deux ACV ont été réalisées par BESIX. Deux ACV similaires sont réalisées lors de l'étude (**ACV initiales**). Pour ces ACV, seules les quantités de produits structurels (béton, acier et armatures) sont considérées. Les quantités collectées pour les ACV initiales de l'étude sont comparées à celles collectées par BESIX. Afin de réaliser cette comparaison, des tableurs Excel sont utilisés.

De plus, les quantités sont comparées avant et après calcul du logiciel One Click LCA (OCL). En effet, les quantités sont importées sur OCL afin de calculer le potentiel de réchauffement global du Gros Œuvre. A l'issue du calcul, ces quantités peuvent être exportées du logiciel. Ces données devraient logiquement être les mêmes mais des problèmes peuvent parfois être rencontrés (cf. 4 Résultats).

- **Cycle 2 – Premier feedback de BESIX**

A l'issue de ce premier cycle, des ACV sont réalisées aux différents niveaux de précision. Une présentation est faite à une collaboratrice de BESIX, ingénieure environnement. Ensemble, quelques modifications sont décidées, notamment la fusion de certains niveaux de précision (fusion de **D** et **D'**, et de **B** et **B'**). Aux cycles 1 et 2, les ACV sont modifiées et mises à jour.

- **Cycle 3 – Deuxième feedback de BESIX**

A l'issue de ce deuxième cycle, les résultats des quatre ACV sont obtenus (**ACV Niveaux A, B, C et D**). De nouvelles réunions avec les collaborateurs de BESIX sont organisées : le design manager et directeur du département Ingénierie formulent leur retour à propos des résultats produits.

L'ensemble des résultats de la validation sont donnés en Annexe (8.2.6).

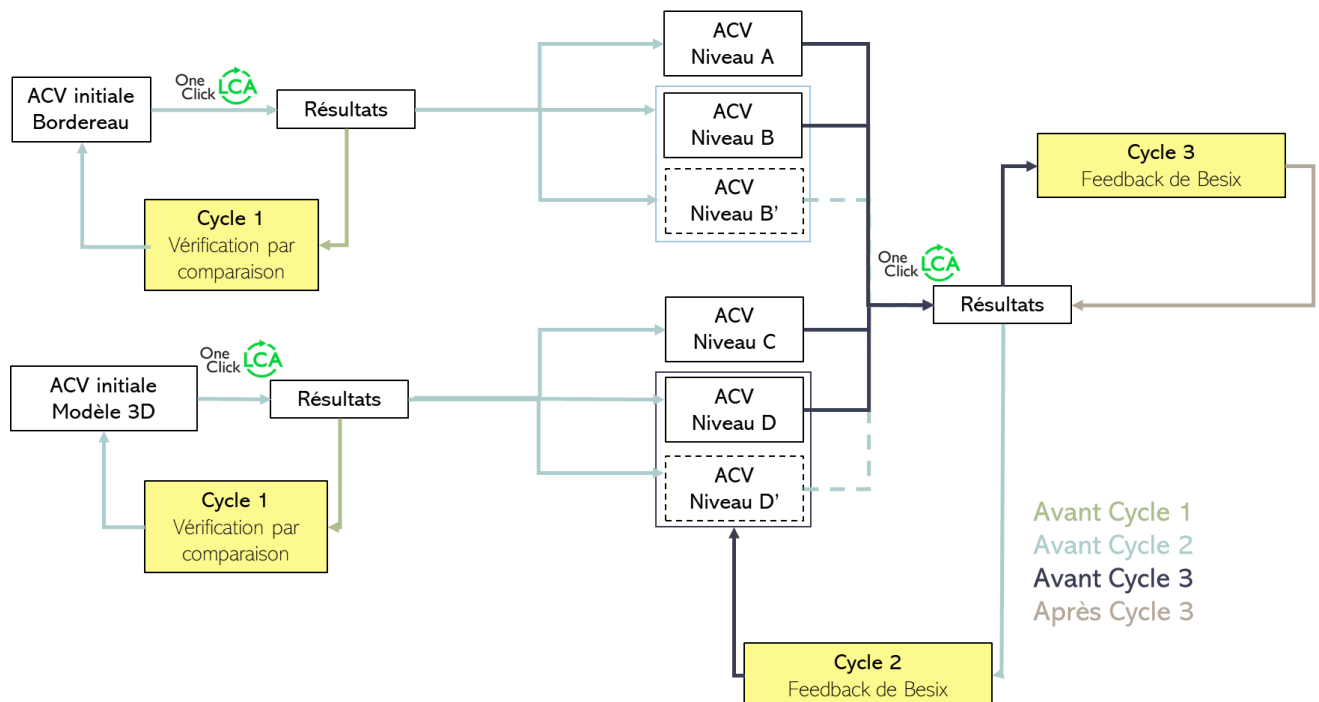


Figure 3-6 - Validation / Ajustement des ACV suivant les différents cycles

4 Résultats

Ce chapitre présente les résultats obtenus en suivant la méthodologie évoquée précédemment. Ils visent à répondre à la question de recherche principale :

Comment l'estimation des quantités de produits du gros œuvre aux différentes phases de conception influence-t-elle la précision des calculs du potentiel de réchauffement global ?

Il se décompose en 5 parties. Dans un premier temps, les résultats de la validation (4.1) sont présentés. La méthodologie suivie actuellement par BESIX pour l'ACV est étudiée. Des problèmes logiciels sont notamment identifiés. Ensuite, les résultats des ACV sont évoqués et notamment une comparaison entre chaque niveau de précision (4.2). Elle permet de mettre en évidence l'influence des sous-variables fiabilité (4.3) et complétude des données (4.4) sur la précision du calcul du potentiel de réchauffement global. Enfin, les résultats sont comparés aux seuils de la RE 2020 (4.5).

4.1 Limites du logiciel One Click LCA

Cette partie présente les résultats de la Validation. En effet, au début de l'étude, deux ACV sont réalisées suivant la même méthodologie que BESIX. Les quantités collectées lors de l'étude sont alors comparées à celles collectées par l'entreprise. Initialement, ces comparaisons sont faites pour valider le travail effectué lors de l'étude. Finalement, ces recherches permettent de mettre en évidence des problèmes liés à One Click LCA.

Cette comparaison est retranscrite dans le Tableau 4-1. Le tableau complet est donné en Annexe 8.3.1. Pour ces ACV, le béton, l'acier et les armatures sont pris en compte. Les quantités sont importées sur One Click LCA. Après calcul des impacts, les quantités sont exportées du logiciel. En théorie, ces quantités devraient être les mêmes.

La ligne (3) recense, pour un même investigateur, les différences relevées entre les quantités avant et après calcul sur One Click LCA (OCL). Effectivement, pour les quantités collectées lors de l'étude à partir des bordereaux, les différences sont nulles. Le constat est le même pour les quantités collectées lors de l'étude à partir des modèles 3D. Pour rappel, lors de l'étude, les quantités associées à des matériaux identiques sont fusionnées sur Excel avant import sur OCL.

Dans le cas de BESIX, les quantités n'ont pas été fusionnées sur Excel avant import sur OCL. Dans leur cas, pour les quantités collectées à partir des bordereaux, les différences sont nulles pour l'acier et les armatures. Cependant, elles sont de 2% pour le béton. A partir des **modèles 3D**, les différences sont d'autant plus importantes. Elles sont de **6% pour le béton, 1% pour l'acier et 15% pour les armatures**. Dans le cas des quantités collectées par BESIX, des différences importantes existent donc entre les quantités importées sur OCL avant calcul et les quantités exportées de OCL après calcul. Ces différences sont d'autant plus importantes pour les quantités obtenues avec les modèles 3D.

Tableau 4-1 - Comparaison des quantités collectées lors de l'étude et par BESIX

		Quantités collectées à partir des...			
		Bordereaux		Modèles 3D	
		Etude	BESIX	Etude	BESIX
Avant import sur OCL	Béton (m³)	100546	99418	98978	88871
	Acier (kg)	469519	441729	418924	403030
	Armatures (kg)	11094261	11103126	13330130	12585649
Après export de OCL	Béton (m³)	100222	97210	98978	83721
	Acier (kg)	469519	441729	418899	397885,8
	Armatures (kg)	11094261	11106960	13329470	10719486
Différence ⁽³⁾	Béton (m³)	0%	2%	0%	6%
	Acier (kg)	0%	0%	0%	1%
	Armatures (kg)	0%	0%	0%	15%

4.2 Comparaison globale des quatre niveaux de précision

Cette partie et les suivantes comparent les résultats des ACV de niveaux de précision différents. Pour rappel, les quatre niveaux de précision étudiés sont donnés dans le Tableau 4-2. Ils dépendent de deux sous-variables : la fiabilité et la complétude des données. Dans la suite, ces deux sous-variables sont analysées indépendamment.

Tableau 4-2 - Rappel des niveaux de précision définis dans l'étude

			Complétude des données	
			Prise en compte...	
			Des produits structurels	De tous les produits
Fiabilité des données	Quantités calculées sur base...	Des bordereaux	ACV de niveau A	ACV de niveau B
		Des modèles 3D et des ratios généraux	ACV de niveau C	
		Des modèles 3D et des ratios de la phase d'exécution	ACV de niveau D	

Dans la Figure 4-1, les potentiels de réchauffement global (PRG) du lot Gros Œuvre, pour chaque niveau de précision, sont comparés. La différence la plus importante entre deux de ces résultats est de 9%. C'est la différence entre le PRG du Niveau D et du Niveau A. Toutefois, les ordres de grandeur du PRG total sont similaires, autour de **50 000 t.CO₂eq**.

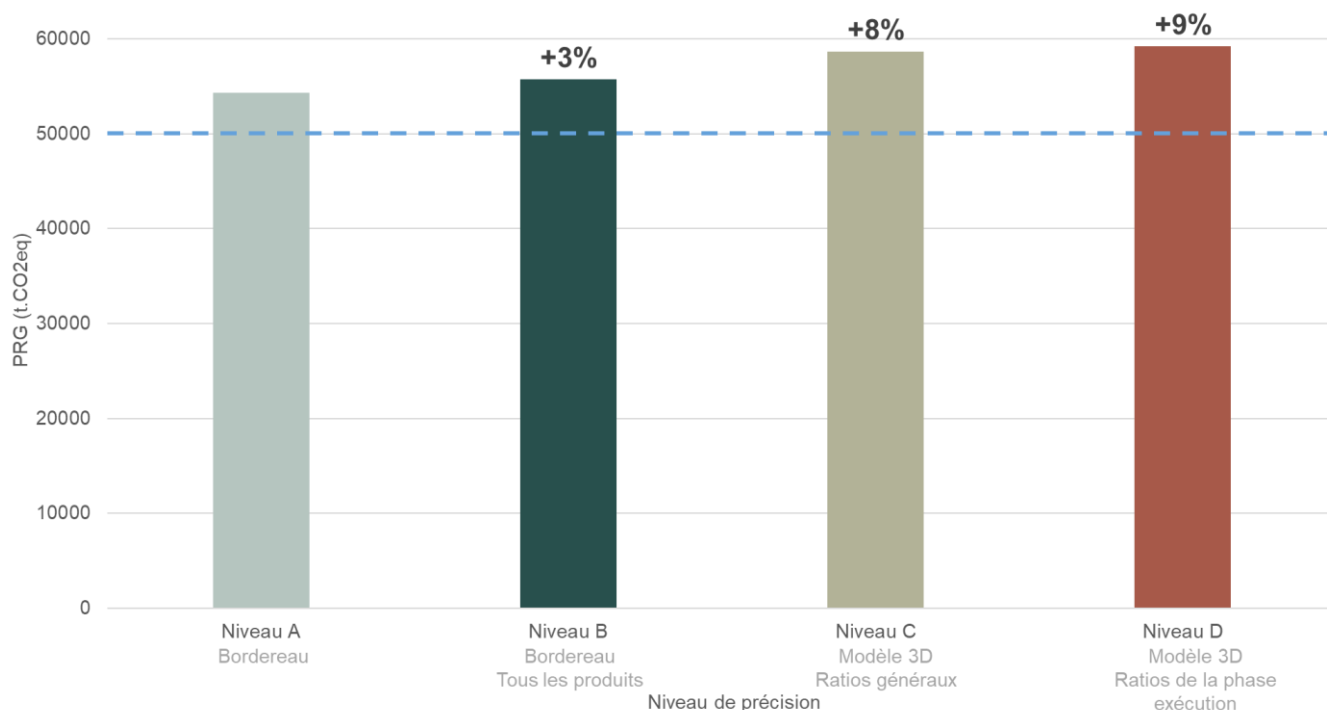


Figure 4-1 – PRG du Gros Œuvre pour les 4 niveaux de précision

4.3 Influence de la fiabilité des données

Les ACV peuvent être comparées plus en détail. L'influence de la qualité des données sur le potentiel de réchauffement global (PRG) est étudiée pour chacune des 2 sous-variables de l'étude.

D'abord, cette section vise à répondre à la question :

Comment la fiabilité des données influence-t-elle la précision des calculs du potentiel de réchauffement global ?

Le but est de mettre en évidence l'évolution du PRG lorsque la source des données varie. Les **niveaux A** (quantités calculées selon les bordereaux), **C** (quantités calculées selon les modèles 3D avec les ratios généraux) et **D** (quantités calculées selon les modèles 3D avec les ratios de la phase d'exécution) se basent sur trois sources de données différentes. Ils sont donc comparés.

Les résultats sont présentés pour le lot Gros Œuvre, mais aussi pour les trois sous-lots définis précédemment : fondations, murs et ossature (poteaux, poutres et dalles).

4.3.1 Comparaison des bordereaux et modèle 3D

D'abord, il est possible de comparer les bordereaux (Niveau A) et les modèles 3D (Niveau C et D). En particulier, le Niveau A est comparé au Niveau C. Le Niveau C sera comparé au Niveau D dans la suite de cette section. Des tableaux plus détaillés sont donnés en Annexe 8.3.2 et 8.3.3.

Dans la Figure 4-2, les potentiels de réchauffement global (PRG) des fondations et ossature sont plus faibles au Niveau C qu'au Niveau A. En effet, pour les fondations, la perte est de 2% (-292 tCO₂eq). Elle est de 1% pour l'ossature (-134 tCO₂eq).

En revanche, le PRG des **murs** est plus élevé au Niveau C qu'au Niveau A (+29% soit 4039 tCO₂eq). A l'échelle du lot Gros Œuvre, le PRG est également plus élevé au Niveau C qu'au Niveau A (+8% soit 3610 tCO₂eq).

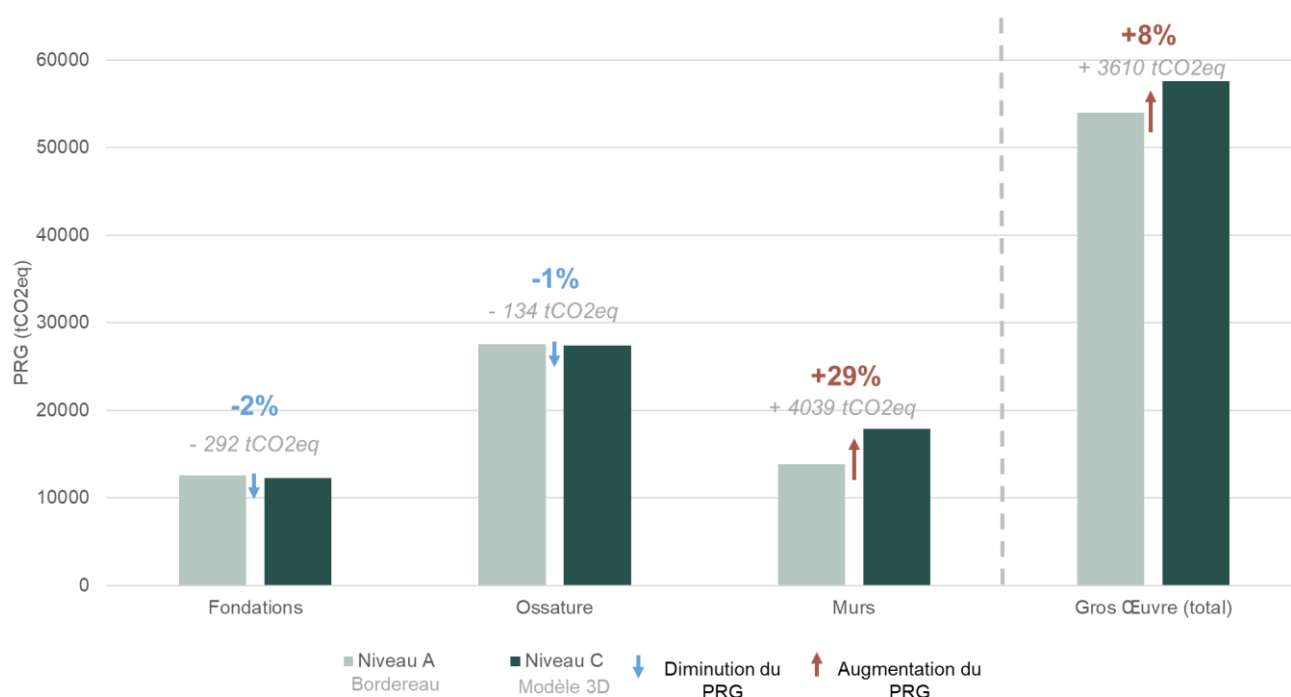


Figure 4-2 - Comparaison des PRG des sous-lots Fondations, Ossature, Murs et du lot Gros Œuvre aux niveaux A et C

Ces résultats sont présentés plus en détail dans la Figure 4-3. Elle représente la différence entre le PRG au Niveau C (modèle 3D) et au Niveau A (bordereau), pour chaque lot et pour chaque produit (béton, armatures, acier).

Les PRG des fondations et ossature sont en baisse. Toutefois, pour ces deux sous-lots, le PRG des **armatures** est plus élevé au Niveau C qu'au Niveau A. Pour les fondations, l'augmentation est de 2641 tCO₂eq. Pour l'ossature, elle est de 1219 tCO₂eq. Inversement, le PRG du béton est plus faible au Niveau C qu'au Niveau A. Pour les fondations, la diminution est de -2887 tCO₂eq. Pour l'ossature, elle est de -1292 tCO₂eq.

Au contraire, le PRG des murs est en hausse. Celui des armatures est en hausse (+729 tCO₂eq). Celui du béton l'est également (+3310 tCO₂eq). Au total, le PRG du Gros Œuvre est en hausse : celui des armatures est en hausse (+4589 tCO₂eq) et celui du béton est en baisse (-869 tCO₂eq).

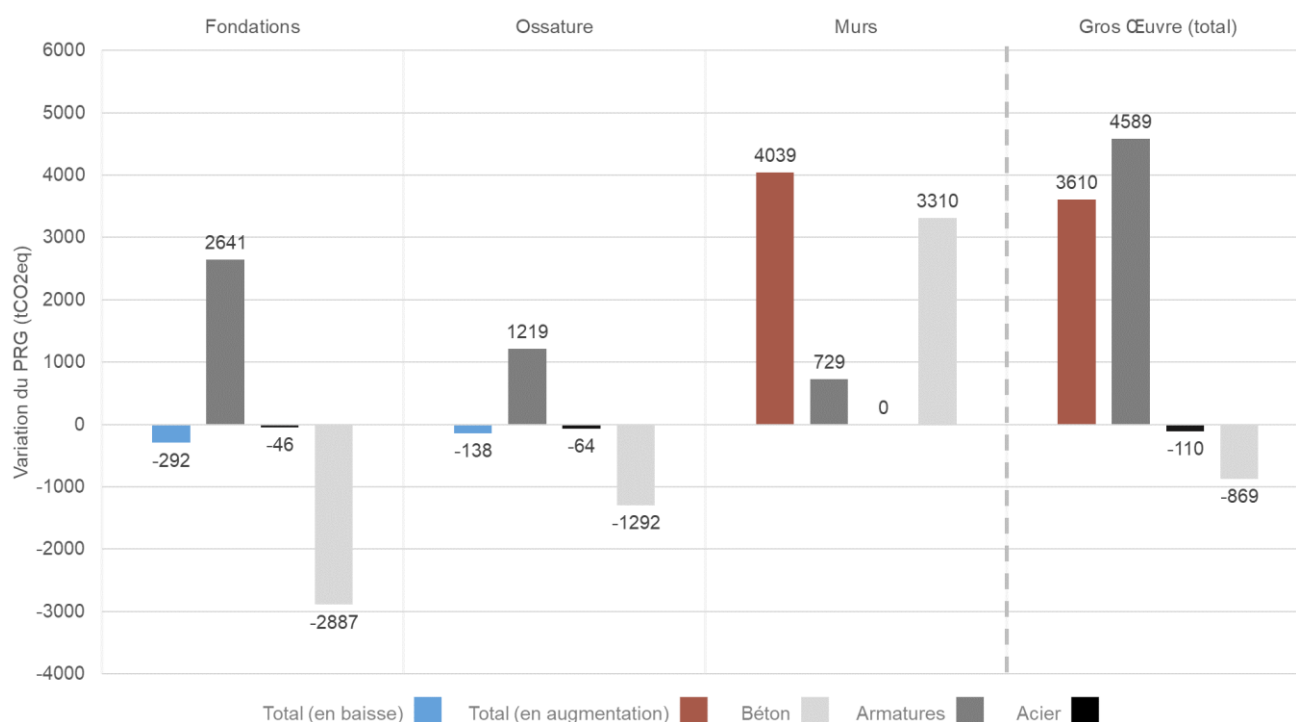


Figure 4-3 - Différence entre les PRG du niveau C (modèle 3D) et du niveau A (bordereaux), par sous-lot et par produit

Pour ces deux niveaux de précision, les quantités collectées sont comparées. Les résultats sont résumés dans le Tableau 4-3. Les quantités de béton et d'acier collectées avec les modèles 3D sont plus faibles que celles collectées avec les bordereaux. En revanche, les quantités d'armatures collectées avec les modèles 3D sont plus élevées que celles collectées avec les bordereaux (+3,27E+06 kg).

Tableau 4-3 - Différences entre les quantités du niveau C (modèle 3D) et du niveau A (bordereau)

	Bordereaux		Modèle 3D		Différence Modèle 3D - Bordereau	
	Quantités	PRG (tCO ₂ eq)	Quantités	PRG (tCO ₂ eq)	Quantités	PRG (tCO ₂ eq)
Total		53964		57574		+3610
Armatures (kg)	11065690	15135	14334954	19724	+3,27E+06	+4589
Acier (kg)	469518	1007	51	897	-4,69E+05	-110
Béton (m ³)	100406	37822	95639	36954	-4,77E+03	-869

Au Niveau A et au Niveau C, les quantités d'armatures ne sont pas calculées de la même manière.

- Au Niveau B, elles sont calculées grâce aux ratios généraux (donnés par BESIX),
- Au Niveau A, elles sont calculées sans ratio, grâce aux quantités listées dans le bordereau. Les quantités de béton sont également calculées grâce au bordereau. Les ratios « quantité d'armatures / quantité de béton » (ratios du bordereau) sont calculés afin d'être comparés aux ratios généraux.

Dans le Tableau 4-4, les ratios du bordereau sont très différents des ratios généraux. Les **ratios** généraux sont supérieurs pour les poteaux (246 au lieu de 84), pour les radiers (185 au lieu de 159), pour les planchers (119 au lieu de 103) et pour les poutres (295 au lieu de 285).

Tableau 4-4 - Comparaison entre les ratios généraux et les ratios calculés avec le bordereau

	Quantités collectées grâce au bordereau		Ratios bordereau (kg/m ³)	Quantités collectées grâce au modèle 3D		Ratios généraux (kg/m ³)
	Béton (m ³)	Armatures (kg)		Béton (m ³)	Armatures (kg)	
VOILES	27196	3011819	111	27562	2976681	108
POTEAUX	16753	1408981	84	14254	3506408	246
RADIER	6426	1020510	159	5920	1095267	185
PLANCHER	36540	3760627	103	33215	3952579	119
POUTRES	6535	1863759	285	9809	2893713	295

4.3.2 Influence de la mise à jour des ratios

Ensuite, les ratios sont étudiés. En particulier, l'influence de la mise à jour des ratios sur le potentiel de réchauffement global (PRG) est évaluée. Les ratios généraux (Niveau C) et les ratios de la phase d'exécution (Niveau D) sont comparés.

Sur la Figure 4-4, les PRG de l'ossature et des murs sont plus élevés au Niveau D qu'au Niveau C. En effet, pour l'ossature, la hausse est de 7%. Elle est de 4% pour les murs.

En revanche, le PRG des fondations est plus faible au Niveau D qu'au Niveau C (-18%). A l'échelle du lot Gros Œuvre, le PRG est plus élevé au Niveau D qu'au Niveau C (+1%).

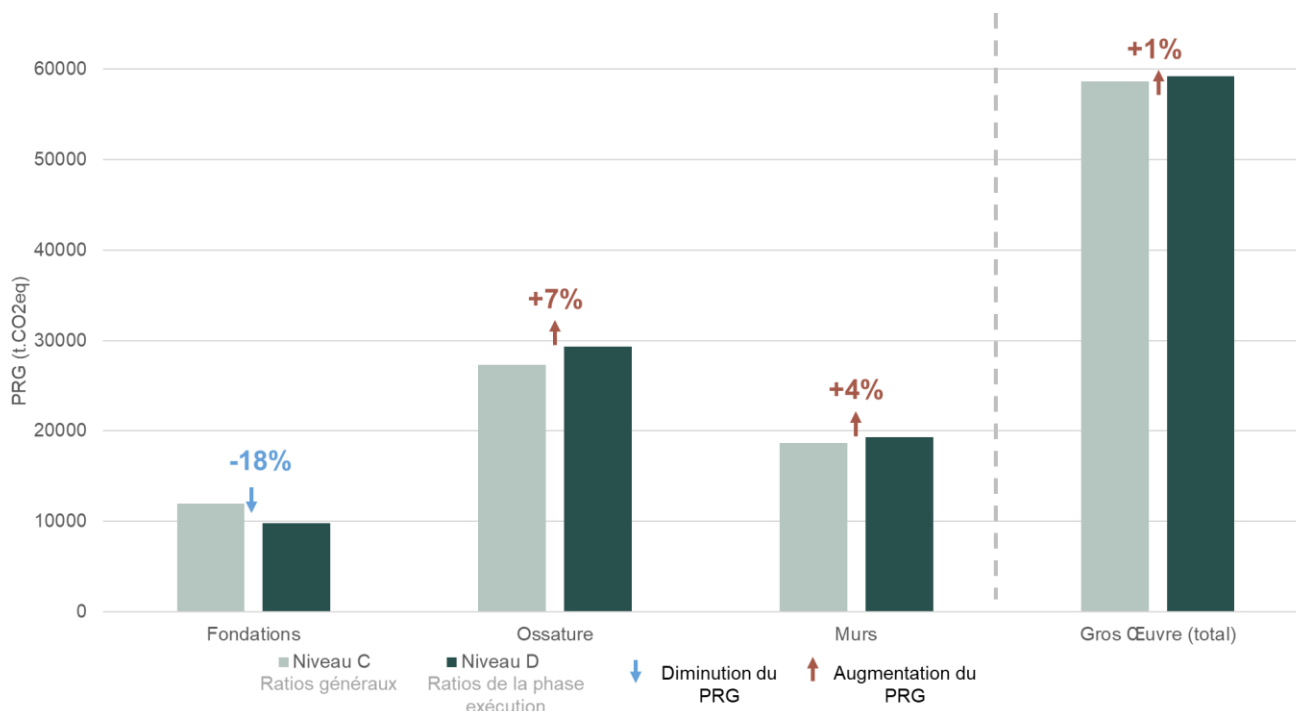


Figure 4-4 - Comparaison des PRG des sous-lots Fondations, Ossature, Murs et du lot Gros Œuvre aux niveaux C et D

Comme expliqué dans la partie Collecte des données (3.5.1 Données primaires fournies par BESIX), les **ratios de la phase d'exécution** sont calculés sur base des plans d'exécution disponibles au moment du calcul. En fonction des sous-lots, le nombre de plans produits est plus ou moins important, comme le montre la Figure 4-5. Les ratios permettant de calculer les armatures des **fondations** ont été calculés sur base de **84%** des plans. Pour les autres sous-lots, les plans sont moins complets. Pour les murs, ils ont été calculés sur base de 14% des plans. Pour l'ossature, ils n'ont été calculés que sur base de 7% des plans.

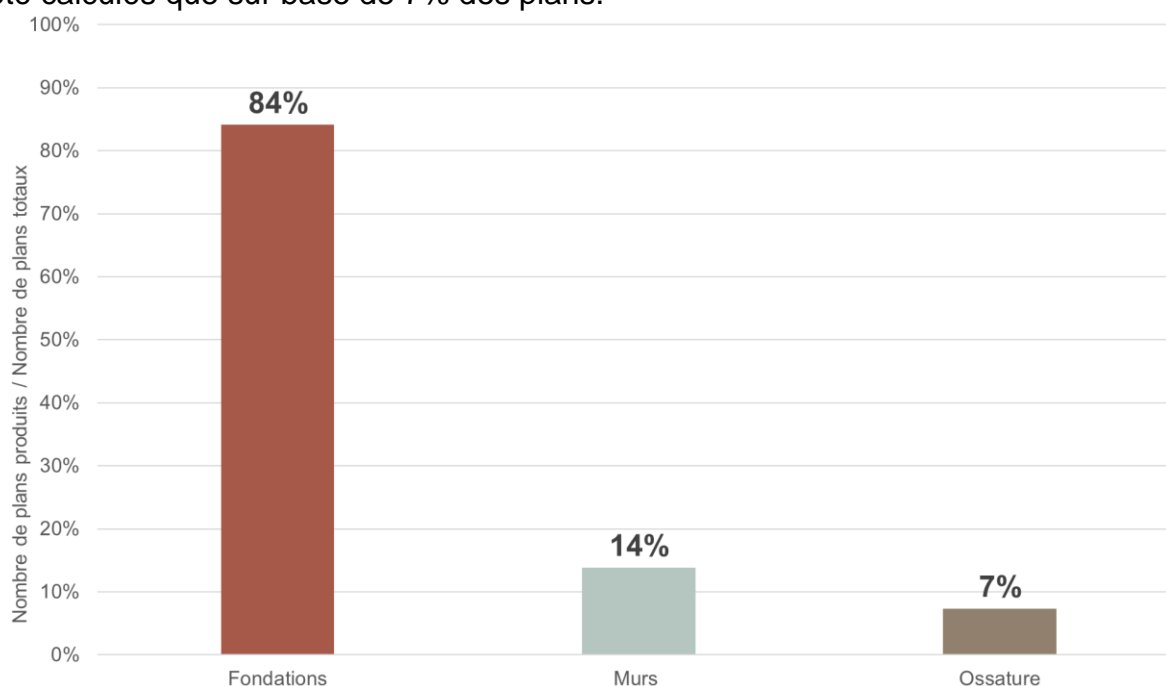


Figure 4-5 - Avancement des plans d'exécution en fonction des sous-lots (au 10 mars 2023)

4.3.3 Influence sur les matériaux les plus contributeurs

Réaliser une ACV peut aussi être utile pour identifier les matériaux les plus contributeurs. Ce sont les matériaux dont le potentiel de réchauffement global est le plus grand. Ces résultats ont pour objectif de montrer l'influence de la fiabilité des données sur le classement de ces matériaux, pour le Gros Œuvre.

Dans cette partie, les 10 matériaux les plus contributeurs sont comparés au Niveau A (bordereaux) et au Niveau C (modèles 3D et ratios généraux), comme le montre le Tableau 4-5. En effet, entre les Niveaux C et D, ces matériaux sont similaires. Dans le tableau, les matériaux identiques sont identifiés par une seule couleur.

Pour ces deux niveaux de précision, les **deux matériaux les plus contributeurs**, les Armatures et le Béton C35/45, sont classés au même endroit. Dans le classement, le Béton C60/75, l'Acier et le Béton C30/37 sont à une place d'écart. Le Béton C45/55, Béton C40/50, les Maçonneries et le Béton C20/25 sont classés à deux places d'écart. Enfin, le Béton C40/50 est classé à cinq places d'écart.

Tableau 4-5 - Classement des matériaux les plus contributeurs des niveaux A et C

Rang	Niveau A <i>Bordereaux</i>	Niveau C <i>Modèle 3D</i> <i>Ratios généraux</i>
1	Armatures	Armatures
2	Béton C 35/45	Béton C 35/45
3	Béton C 45/55	Béton C 60/75
4	Béton C 60/75	Béton C 40/50
5	Acier structurel	Béton C 45/55
6	Bloc creux maçonneries	Acier structurel
7	Béton C 20/25	Béton C 30/37
8	Béton C 30/37	Blocs creux maçonneries
9	Béton C 40/50	Béton C 20/25
10	Béton C 25/30	Blocs pleins maçonneries

4.4 Influence de la complétude des données

Cette partie se focalise sur la sous-variable *complétude des données* en répondant à la sous-question de recherche suivante :

Comment la complétude des données influence-t-elle la précision des calculs du potentiel de réchauffement global ?

Pour répondre à cette question, sept éléments sont étudiés en détail. Pour rappel, ces éléments sont les suivants : radier et dalles contre sol, poteaux mixtes acier-béton, voiles du noyau, dalles hors noyau, maçonneries, traitement des locaux techniques et micro-berlinoises.

Pour ces éléments, les quantités de tous les produits, qu'ils soient structurels ou non, sont calculées. Ainsi, le potentiel de réchauffement global (PRG) des produits structurels est comparé au PRG des produits non structurels. Enfin, ils sont comparés au PRG du Gros Œuvre. L'ensemble des résultats, par élément, est donné en Annexe 8.3.2.

Les résultats sont classés en deux parties. Certains éléments contiennent des produits non structurels dont le PRG représente plus de 10% de celui de l'élément. Pour d'autres, le PRG de ces produits est négligeable à l'échelle de l'élément.

4.4.1 Cas 1 : les produits non structurels impactent le PRG de l'élément

D'abord, pour certains éléments, les produits non structurels sont à l'origine de **plus de 10%** du potentiel de réchauffement global (PRG) de l'élément.

C'est notamment le cas des *radiers et dalles contre sol*. La Figure 4-6 représente le PRG de cet élément. Il est réparti entre les produits structurels et non structurels.

Ici, le PRG des **produits non structurels** représente 12% du PRG de l'élément. Les produits contribuant le plus à ces impacts sont le béton pour forme de pente et les coffrages perdus. L'élément *radier et dalle contre sol* représente 8% du PRG du Gros Œuvre, comme le montre la Figure 4-7. 7% correspondent aux produits structurels et 1% aux produits non structurels.

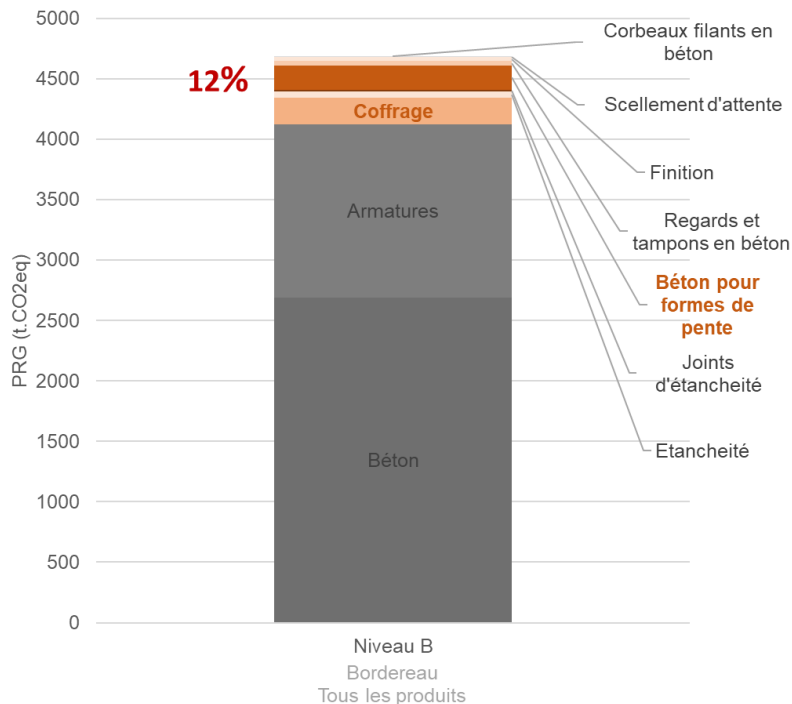


Figure 4-6 - Répartition du PRG de l'élément radier et dalles contre sol, par produit

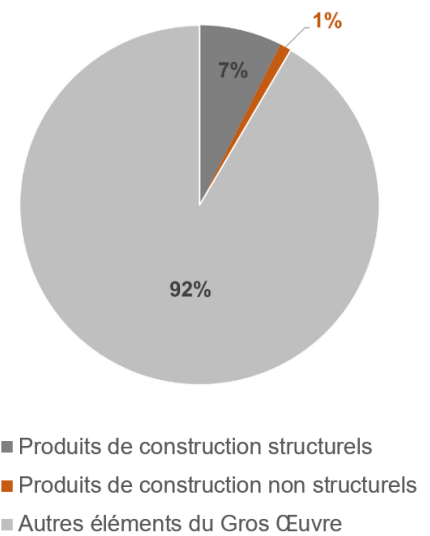


Figure 4-7 - Part du PRG du **Gros Œuvre** correspondant aux produits de l'élément radier et dalles contre sol

L'élément *maçonneries* est dans le même cas (Figure 4-8). En effet, pour cet élément, le PRG des **produits non structurels** représente 34% du PRG de l'élément. Les produits en question sont les joints et les enduits. Les *maçonneries* représentent 1% du PRG du Gros Œuvre, comme le montre la Figure 4-9. 1% correspond aux produits structurels et 0% aux produits non structurels.

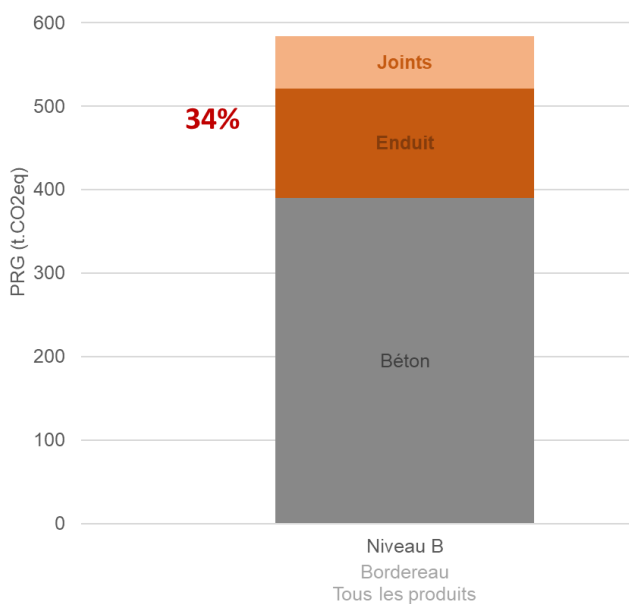


Figure 4-8 - Répartition du PRG de l'élément maçonnerie, par produit

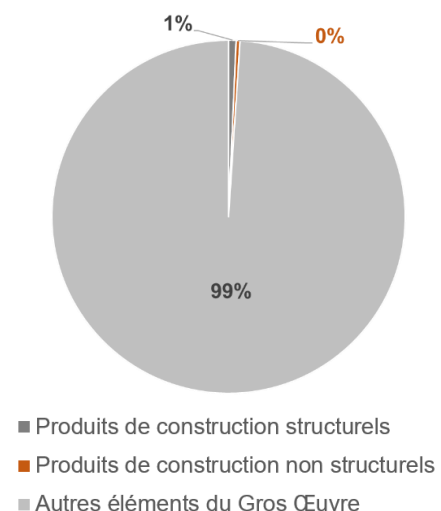


Figure 4-9 - Part du PRG du **Gros Œuvre** correspondant aux produits de l'élément maçonnerie

Pour l'élément *traitement des locaux techniques* (Figure 4-10), le PRG des **produits non structurels** représente 20% du PRG de l'élément. La laine minérale est responsable d'une grande majorité de ces impacts. Les *traitements des locaux techniques* représentent 0% du PRG du Gros Œuvre, comme le montre la Figure 4-11.

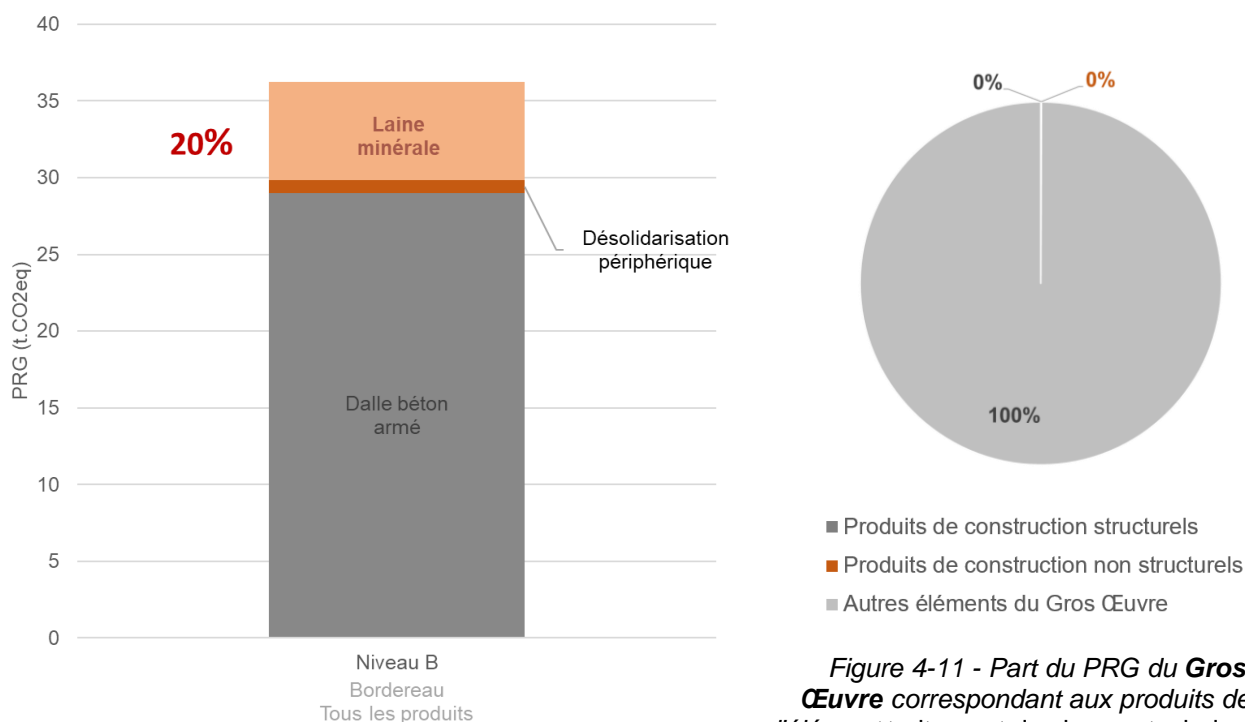


Figure 4-10 - Répartition du PRG de l'élément traitement des locaux techniques, par produit

Figure 4-11 - Part du PRG du Gros Œuvre correspondant aux produits de l'élément traitement des locaux techniques

4.4.2 Cas 2 : les produits non structurels n'impactent pas le PRG de l'élément

Pour les autres éléments, les produits non structurels sont à l'origine de **moins de 10%** du potentiel de réchauffement global (PRG) de l'élément. Pour les *dalles hors noyau* (Figure 4-12), le PRG des **produits non structurels** représente 5% du PRG de l'élément. Les produits contribuant le plus à ces impacts sont le béton pour forme de pente et les finitions. L'élément *dalles hors noyau* représente 27% du PRG du Gros Œuvre, comme le montre la Figure 4-13. 26% correspondent aux produits structurels et 1% aux produits non structurels.

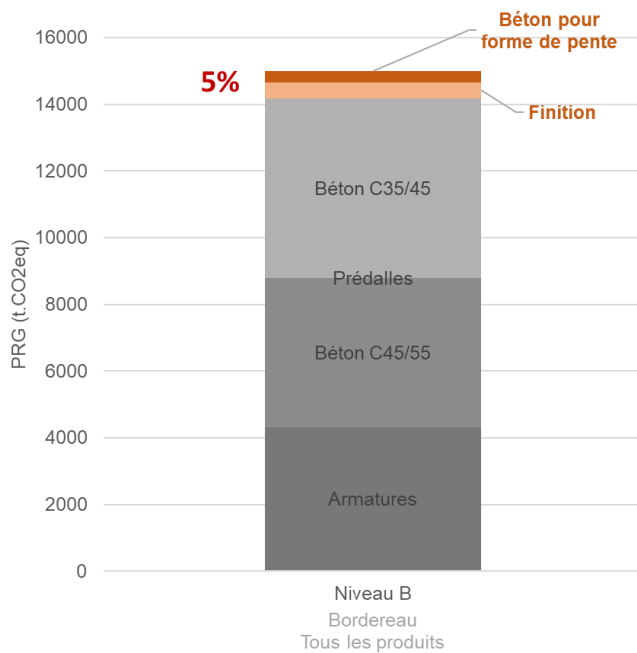


Figure 4-12 - Répartition du PRG de l'élément dalles hors noyau, par produit

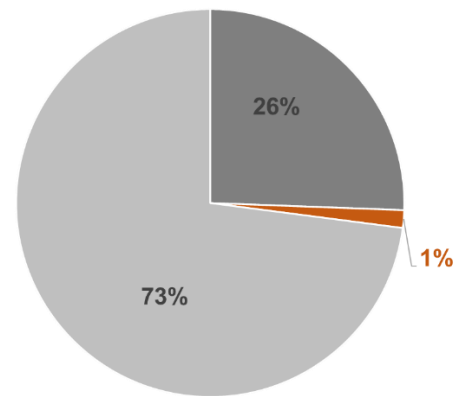


Figure 4-13 - Part du PRG du **Gros Œuvre** correspondant aux produits de l'élément dalles hors noyau

Pour les *voiles du noyau* (Figure 4-14), le PRG des **produits non structurels** représente 1% du PRG de l'élément. Les *voiles du noyau* représentent 19% du PRG du Gros Œuvre, comme le montre la Figure 4-15. Tous ces impacts correspondent aux produits structurels.

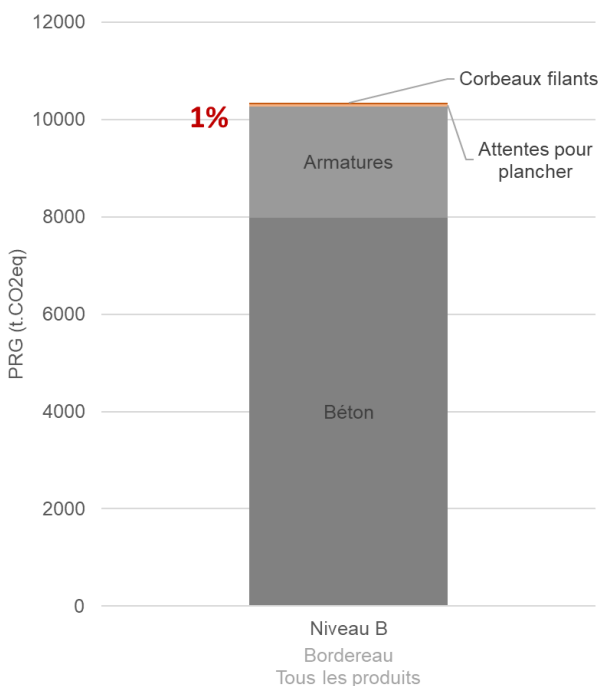


Figure 4-14 - Répartition du PRG de l'élément voiles du noyau, par produit

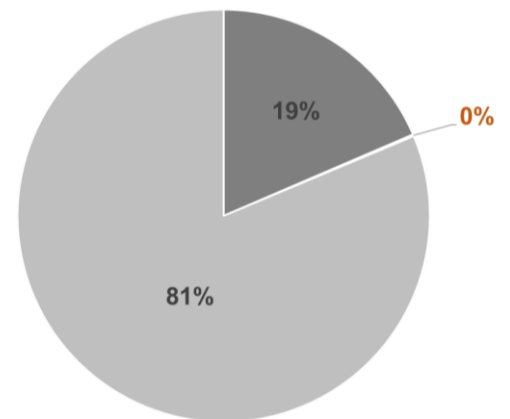


Figure 4-15 - Part du PRG du **Gros Œuvre** correspondant aux produits de l'élément voiles du noyau

Pour les *poteaux mixtes acier-béton* (Figure 4-16), le PRG des **produits non structurels** représente 0% du PRG de l'élément. Les *poteaux mixtes acier-béton* représentent 1% du PRG du Gros Œuvre, comme le montre la Figure 4-17. Tous ces impacts correspondent aux produits structurels.

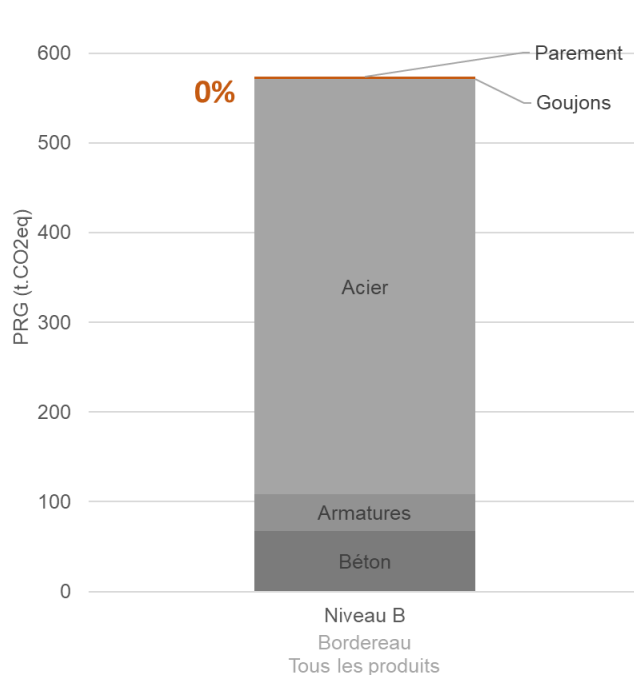


Figure 4-16 - Répartition du PRG de l'élément poteaux mixtes acier-béton, par produit

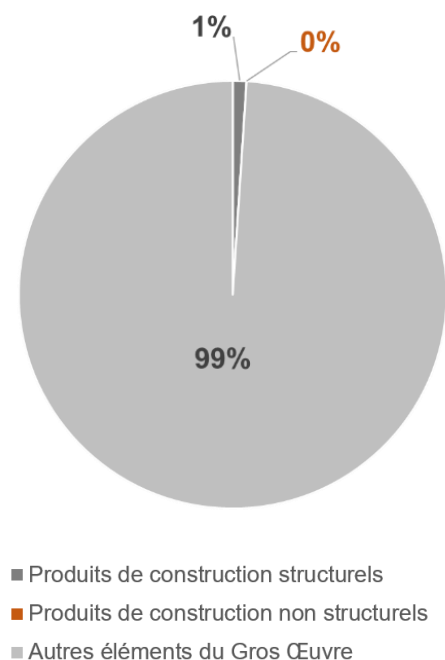


Figure 4-17 - Part du PRG du Gros Œuvre correspondant aux produits de l'élément poteaux mixtes acier-béton

4.4.3 Synthèse : retour sur le lot Gros Œuvre

Les résultats précédents peuvent également être représentés à l'échelle du lot Gros Œuvre. La Figure 4-18 représente la répartition du potentiel de réchauffement global (PRG) du Gros Œuvre entre les trois sous-lots : **ossature**, **murs** et **fondations**. Elle représente également la distribution de ces impacts entre les produits structurels (à gauche) et non structurels (à droite). Cette figure permet de comparer les éléments entre eux. Elle permet également de visualiser l'influence des produits non structurels à l'échelle du Gros Œuvre.

Certains produits se démarquent. Les produits non structurels des éléments *radiers et dalles contre sol* représentent 1% du PRG du lot Gros Œuvre. Le même constat est fait pour les produits non structurels des *dalles hors noyau*. Les produits **non structurels** des *dalles hors noyau* et des *radiers et dalles contre sol* ont donc le même impact que les produits **structurels** des *maçonneries* et *poteaux mixtes acier-béton*. Ils sont représentés **en rouge** sur la Figure 4-18.

Ces produits non structurels ont même un impact supérieur à certains produits structurels : ceux des *traitements des locaux techniques* et des *micro-berlinoises* notamment. En effet, ces derniers représentent 0% du PRG du Gros Œuvre.

Eléments étudiés

Eléments non étudiés

Eléments comparés

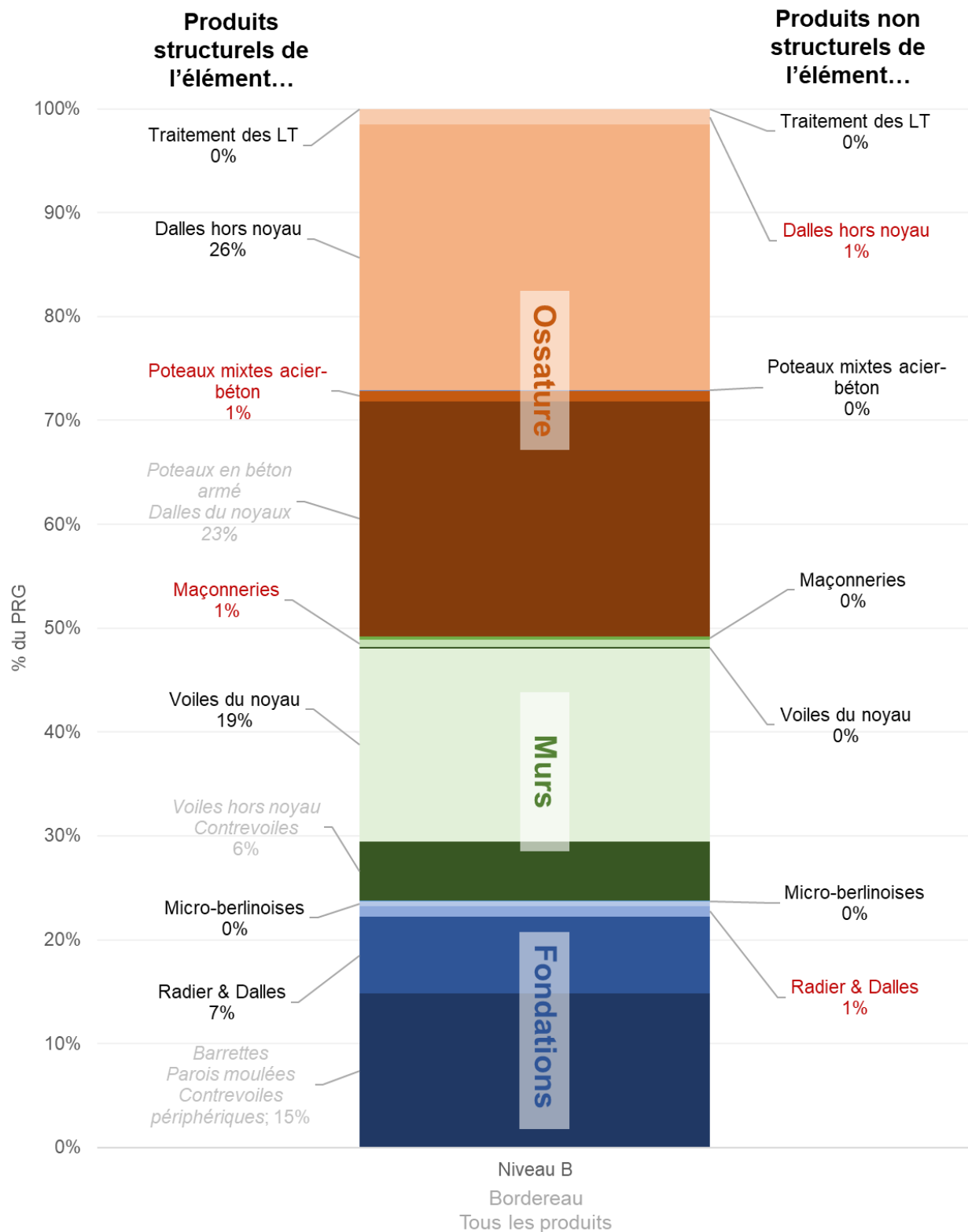


Figure 4-18 - Répartition du PRG du Gros Œuvre par sous-lot et par produit

4.5 Mise en parallèle des résultats avec la RE2020

Cette section se focalise sur la sous-question de recherche suivante :

Quelles sont les exigences réglementaires liées au potentiel de réchauffement global des bâtiments en France (contexte du cas d'étude) ?

La Figure 4-19 permet de comparer les résultats de l'étude aux seuils de la RE2020. Bien que cette comparaison ne soit pas exacte, elle donne une première idée de ce que représentent les impacts du lot Gros Œuvre par rapport aux seuils de la réglementation. En effet, cette réglementation impose des seuils pour l'indicateur $I_{c,construction}$. Ce seuil est appelé $I_{c,construction_max}$. Comme expliqué dans l'Etat de l'Art (cf. 2 Etat de l'art), ce seuil est calculé à partir de $I_{c,construction_max,moyen}$. Cet indicateur est modulé en fonction de la localisation géographique du projet, du type de projet ou de sa morphologie. Sur la Figure 4-19, le seuil $I_{c,construction_max,moyen}$ est donné mais $I_{c,construction_max}$ n'a pas été calculé. Le véritable seuil à respecter n'est donc pas représenté.

De plus, les seuils de la RE2020 sont donnés en $kgCO_2.eq/m^2$. Pour pouvoir y être comparés, les potentiels de réchauffement global (PRG) doivent donc être convertis dans la même unité. Pour les bâtiments de type « bureaux », la surface réglementaire est la surface utile. Or, la surface de plancher est la seule donnée disponible à ce stade de l'étude. Pour pallier ce problème, une estimation est faite : la surface de plancher représente approximativement 90% de la surface utile. Ainsi, la surface utile et donc, le PRG par m^2 de surface utile sont estimés.

Enfin, $I_{c,construction}$ porte sur les matériaux de construction, les équipements et le chantier. Ici, seuls les produits du lots Gros Œuvre sont pris en compte. Pour ce seul lot, le PRG représente déjà **60%** de la valeur seuil imposée en 2022.

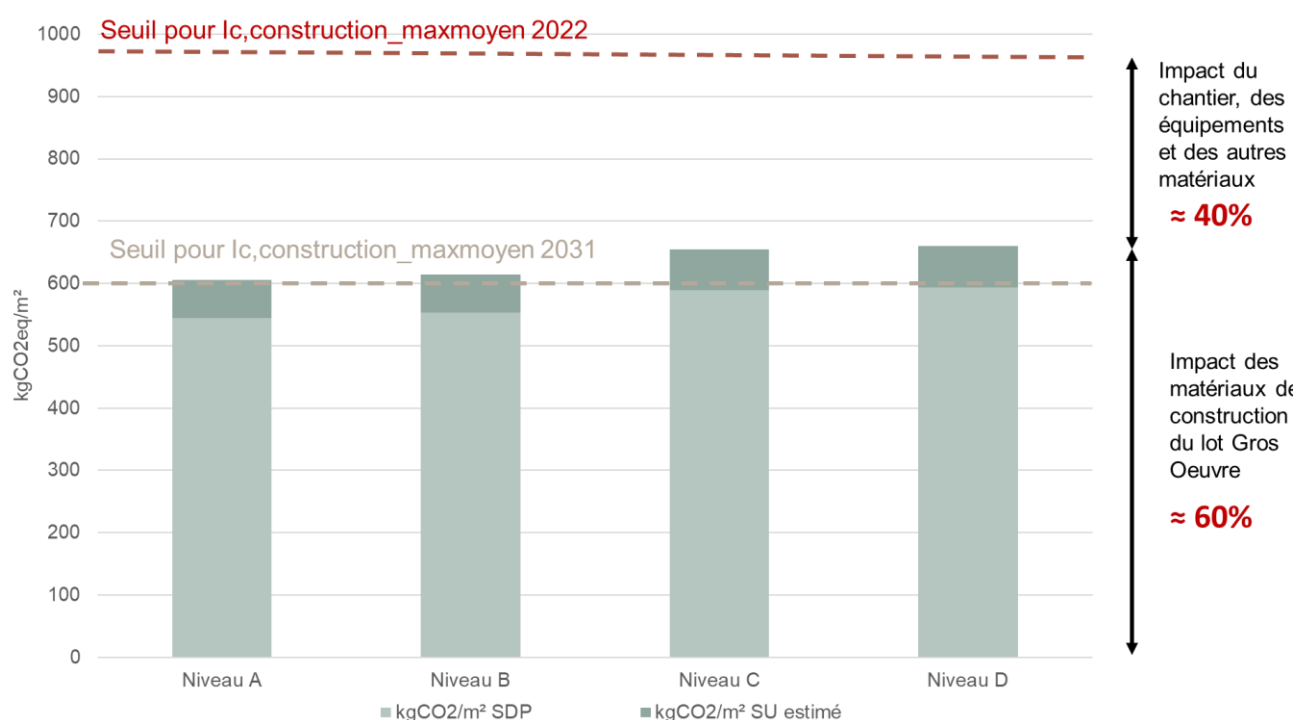


Figure 4-19 - Comparaison des résultats aux seuils de la RE2020

5 Discussion

Ce chapitre permet d'expliquer les Résultats.

D'abord, le contexte et les objectifs de l'étude sont rappelés (5.1). Les résultats sont ensuite analysés (5.2) et des recommandations à destination des entreprises sont formulées (5.3). Ainsi, l'étude aura nécessairement un impact sur les pratiques en entreprise (5.4). Les forces et limites de l'étude sont abordées (5.5 et 5.6). Pour finir, à la suite de ce mémoire, de futurs travaux peuvent être envisagés afin de répondre aux questions laissées en suspens. Ils sont mentionnés en fin de chapitre (5.7).

5.1 Rappels des objectifs de l'étude

La question de recherche principale est la suivante :

Comment l'estimation des quantités de produits du gros œuvre aux différentes phases de conception influence-t-elle la précision des calculs du potentiel de réchauffement global ?

Le but du travail est de faciliter l'estimation des quantités de produits lors de la réalisation de l'ACV. Pour cela, son objectif est de déterminer l'influence de ces estimations sur la précision du calcul. Cette étude se fait aux différentes phases de conception, pour le lot Gros Œuvre de la Tour Triangle, cas d'étude de BESIX.

Plusieurs objectifs en découlent :

- Définir les différentes données disponibles pour estimer les quantités, aux différentes phases de conception,
- Quantifier l'influence de l'estimation de ces quantités sur le résultat de l'ACV, à savoir le potentiel de réchauffement global,
- Faciliter la prise en main des résultats par les concepteurs en réalisant des tableaux synthétiques,
- Mettre en parallèle les résultats avec le contexte réglementaire du cas d'étude (RE2020).

5.2 Analyse des résultats

Dans un premier temps, les principaux résultats sont rappelés et analysés. L'influence des sous-variables de l'étude est d'abord évoquée. Des discussions plus générales et qualitatives sont menées en fin de partie. Les **grandes conclusions** sont résumées à l'issue de chaque paragraphe.

5.2.1 Influence de la fiabilité des données sur le résultat

La fiabilité des données est liée à sa source. Pour l'étude, elles sont de trois types : les bordereaux (tableurs listant les quantités de tous les produits du bâtiment), les modèles 3D (représentation numérique du bâtiment) et les tableaux de ratios. Chaque source de donnée permet d'estimer des quantités de produits et donc, leur potentiel de réchauffement global, impact sur le réchauffement climatique. Ces impacts peuvent être comparés. Trois sous-lots sont étudiés : fondations, murs et ossature (poteaux, poutres et dalles).

Comparaison des résultats obtenus à l'aide des bordereaux et des modèles 3D

Les ACV réalisées sur base des bordereaux et des modèles 3D sont comparées.

A l'échelle du Gros Œuvre, les quantités de béton collectées avec le modèle 3D sont plus faibles qu'avec les bordereaux. Inversement, les quantités d'armatures collectées avec les modèles 3D sont plus élevées (Tableau 4-3). En effet, les armatures ne sont pas modélisées sur le modèle 3D. Leurs quantités sont estimées grâce aux ratios généraux. Ils sont fournis par BESIX mais le détail du calcul de ces ratios est inconnu. Ils sont **beaucoup plus grands** que les ratios calculés avec les bordereaux (Tableau 4-4). Ce constat explique la différence entre les quantités d'armatures. Ainsi, pour les trois sous lots, les quantités d'armatures collectées grâce au modèle 3D, et donc leurs impacts sont plus grands (Figure 4-3).

Pour les fondations et l'ossature, l'impact du béton calculé grâce au modèle 3D est plus faible que celui calculé grâce au bordereau (Figure 4-3). Effectivement, entre les phases de conception développée (bordereaux) et de conception technique (modèles 3D), le projet évolue. Les coûts et donc les **quantités sont optimisées**. Ainsi, l'impact diminue. Pour ces sous-lots, la diminution de l'impact du béton compense l'augmentation de l'impact des armatures. Au global, les impacts des fondations et de l'ossature diminuent (Figure 4-2).

Néanmoins, entre différentes phases du projet, des **décisions majeures** peuvent être prises. Elles peuvent également influencer les quantités. Par exemple, dans le cas de la Tour Triangle, entre les phases de conception développée et de conception technique, des murs maçonnés ont été remplacés par des voiles coulés en béton. Or, le béton coulé a un impact plus élevé que les maçonneries. Alors, pour les murs, l'impact du béton calculé grâce au modèle 3D est plus grand que celui calculé grâce au bordereau (Figure 4-3). Pour ce sous-lot, l'impact du béton et des armatures augmente donc l'impact global augmente. Au total, l'impact du Gros Œuvre calculé grâce au modèle 3D est supérieur à celui calculé grâce au bordereau (Figure 4-2).

Pour conclure, les impacts des armatures calculés avec le modèle 3D sont supérieurs à ceux calculés avec les bordereaux. En effet, les ratios généraux sont plus grands que ceux calculés avec les bordereaux. Les impacts du béton calculés avec le modèle 3D sont inférieurs car leurs quantités ont été optimisées. **Au global, les impacts calculés avec le modèle 3D sont inférieurs à ceux calculés avec les bordereaux. Mais des décisions majeures quant aux choix de conception peuvent interférer et fausser la lecture des résultats** (par exemple, changement des murs maçonnés en voiles béton).

La comparaison des deux méthodologies est délicate. Les ratios généraux sont différents des ratios calculés avec les bordereaux : ils sont calculés par des investigateurs différents, avec des quantités différentes, à des moments différents... Il est difficile de déterminer quels ratios sont les plus fiables. **Toutefois, bien qu'ils ne donnent pas de résultats exacts, ils peuvent être utilisés pour estimer approximativement les impacts des armatures.** En effet, les quantités évoquées précédemment sont différentes mais du même ordre de grandeur.

Comparaison des résultats obtenus à l'aide des ratios

Les armatures ne sont pas modélisées sur le modèle 3D. Dans ce cas, les quantités d'armatures sont estimées à l'aide de ratios de la quantité de béton. Ces ratios sont disponibles en différentes versions. Les ACV réalisées sur base des différents ratios sont comparées. Dans les Résultats, cette comparaison se retrouve dans la Figure 4-4.

Les ratios les plus anciens sont des ratios généraux, évoqués précédemment. Ils sont choisis en fonction du type de projet mais ne sont pas propres à la Tour Triangle. Les ratios de la phase d'exécution sont calculés sur base des plans d'exécution.

Lors du chantier, les travaux de fondations ont lieu en premier. Les plans des fondations sont donc dessinés en priorité. Ainsi, pour les fondations, les ratios de la phase d'exécution sont calculés grâce à 84% des plans (Figure 4-5). Ils sont **représentatifs** de l'ensemble du sous-lot.

Comme évoqué précédemment, plus le projet évolue, plus les quantités sont optimisées. De cette façon, pour les fondations, les quantités d'armatures estimées à l'aide des ratios généraux sont supérieures à celles estimées à l'aide des ratios de la phase d'exécution. Pour ce sous-lot, l'impact estimé à l'aide des ratios de la phase d'exécution est plus bas.

Pour les 2 sous-lots restants (murs et ossature), la tendance est opposée. L'impact estimé à l'aide des ratios de la phase d'exécution est supérieur à celui estimé à l'aide des ratios généraux. A l'heure actuelle, les murs, poteaux, poutres et dalles de la tour n'ont pas tous été mis en œuvre sur le chantier. Les plans n'ont donc pas tous été dessinés. Pour ces sous-lots, les ratios de la phase d'exécution sont calculés sur base de 14% (murs) et 7% (ossature) des plans (Figure 4-5).

Les travaux débutent par le socle de la tour. Les plans ont donc principalement été dessinés pour cette partie. Or, les éléments composant le socle nécessitent d'être renforcés. La quantité d'armatures utilisée pour des éléments se trouvant à cet endroit sera plus élevée que pour des éléments se trouvant aux étages. Les ratios calculés sur base de ces plans ne sont donc pas représentatifs de l'ensemble de la Tour. En utilisant les ratios de la phase d'exécution, pour les murs et l'ossature, les quantités d'armatures ont donc été **surestimées**.

Ainsi, **les impacts calculés à l'aide des ratios de la phase d'exécution sont plus faibles que ceux calculés sur base des ratios généraux. Cette conclusion n'est vraie que si les ratios sont calculés sur base d'un nombre suffisant de plans.**

5.2.2 Influence de la complétude des données sur le résultat

Le lot Gros Œuvre est composé de plusieurs éléments. Chaque élément est composé de plusieurs produits. Une ACV est réalisée en prenant en compte tous les produits des éléments suivants : radiers et dalles contre sol, voiles du noyau, poteaux mixtes acier-béton, traitements des locaux techniques, maçonneries, micro-berlinoises et dalles hors noyau. Les produits structurels (béton, acier, armatures) et non structurels (coffrages, étanchéité, joints etc.) ont alors été pris en compte.

Le potentiel de réchauffement global (PRG) des ces produits est évalué (Figure 4-6 à Figure 4-18). Il est comparé au PRG de l'élément mais aussi à celui du Gros Œuvre. Plusieurs cas sont possibles. **Les produits sont classés dans le Tableau 5-1.** Ce tableau est expliqué dans les paragraphes suivants.

- **Cas 1**

L'impact des produits non structurels n'est pas négligeable à l'échelle de l'élément. De plus, celui de l'élément n'est pas négligeable à l'échelle du Gros Œuvre,.

Par conséquent, l'impact des produits non structurels n'est lui aussi pas négligeable à l'échelle du Gros Œuvre. C'est le cas des *radiers et dalles contre sol*. Les coffrages perdus et le béton pour forme de pente peuvent donc être pris en compte pour atteindre un résultat global plus précis.

- **Cas 2**

L'impact des produits non structurels n'est pas négligeable à l'échelle de l'élément. Mais, celui de l'élément est négligeable à l'échelle du Gros Œuvre.

Par conséquent, l'impact des produits non structurels est négligeable à l'échelle du Gros Œuvre. C'est le cas des *maçonneries et traitements des locaux techniques*. Toutefois, si l'impact de l'élément avait été plus important, les produits structurels n'auraient peut-être pas été négligeables. Dans le cas d'une autre étude, les produits de ces éléments (joints, enduits et laine minérale) ne doivent donc pas être écartés.

- **Cas 3 & 4**

L'impact des produits non structurels est négligeable à l'échelle de l'élément. Mais, celui de l'élément n'est pas négligeable à l'échelle du Gros Œuvre.

Par conséquent, l'impact des produits non structurels peut finalement avoir de l'impact à l'échelle du Gros Œuvre. C'est le cas des *dalles hors noyau* : ses produits non structurels ne représentent que 5% de l'impact de l'élément mais quand même 1% de l'impact du Gros Œuvre (**Cas 3**).

Cette observation n'est pas systématique. Par exemple, les *voiles du noyau* représentent 19% de l'impact du Gros Œuvre mais ses produits non structurels sont négligeables (**Cas 4**).

- **Cas 5**

L'impact des produits non structurels est négligeable à l'échelle de l'élément. De plus, celui de l'élément est négligeable à l'échelle du Gros Œuvre.

Par conséquent, l'impact des produits non structurels est lui aussi négligeable à l'échelle du Gros Œuvre. C'est le cas des *poteaux mixtes acier-béton* et des *micro-berlinoises*.

Les produits **mis en évidence** dans le Tableau 5-1 sont ceux qui peuvent avoir de l'impact sur le lot Gros Œuvre. Dans tous les cas, ils font partie d'un élément ayant un fort impact. Lors d'une prochaine ACV, il peut être pertinent de prendre en compte ces produits.

Tableau 5-1 - Classement des produits de construction en fonction de leur influence sur le PRG, à l'échelle de l'élément et du Gros Œuvre

		A l'échelle de l'élément, l'impact des produits non structurels...	
		N'est pas négligeable (PRG du produit > 10% du PRG de l'élément)	Est négligeable (PRG du produit < 10% du PRG de l'élément)
A l'échelle du Gros Œuvre, l'impact de l'élément...	N'est pas négligeable (PRG de l'élément > 5% au PRG du Gros Œuvre)	Cas 1 Radier & dalles contre sol Béton pour forme de pente Coffrages perdus Etanchéité Joints d'étanchéité Regardes et tampons Finition Scellement d'attente Corbeaux filants	Cas 3 Dalles hors noyau Parement Béton pour forme de pente
	Est négligeable (PRG de l'élément < 5% au PRG du Gros Œuvre)	Cas 2 Maçonneries Joints Enduits Traitement des locaux techniques Laine minérale Désolidarisation périphérique	Cas 4 Voiles du noyau Attentes pour plancher Corbeaux filants Cas 5 Poteaux mixtes acier-béton Goujons Parement Micro-berlinoises Béton projeté

Elément

Produits ayant de l'impact sur le résultat du Gros Œuvre

Produits ayant de l'impact sur le résultat de l'élément

Ainsi, en fonction de l'élément considéré, les produits non structurels peuvent être impactants à l'échelle du Gros Œuvre. **Si l'élément a lui-même un fort impact, les produits non structurels peuvent apporter jusqu'à 1% de précision sur celui du lot.** En prenant en compte les produits non structurels, la précision des résultats peut être améliorée de quelques %.

A titre comparatif, les produits non structurels des *radiers et dalles contre sol* ont un impact égal à celui des produits structurels des *maçonneries*. Les produits non structurels ne sont donc pas toujours moins impactants que les produits structurels. **Certains produits se démarquent** comme le béton pour forme de pente, les revêtements de finition, les joints, les enduits, la laine minérale et les coffrages perdus. D'autres paraissent négligeables comme les goujons, les corbeaux filants et les attentes pour plancher.

5.2.3 Comparaison qualitative des sources de données

Incertitude sur le résultat

Certaines ACV sont calculées à l'aide des **bordereaux**. Les bordereaux sont des documents très précis. Pour chaque élément, chaque produit est renseigné ligne par ligne. La compréhension et le contrôle de ces données sont aisés. D'ailleurs, lors de la collecte des données, peu d'hypothèses sont faites pour calculer les quantités de produits.

D'autres ACV sont calculées à l'aide des **modèles 3D**. Les tableurs extraits des modèles 3D sont composés de milliers de lignes. Certaines lignes correspondent parfois à une quantité très faible. Selon le support client de One Click LCA (OCL), le logiciel ne prend pas en compte les quantités ayant moins de deux décimales. Dans ce cas-là, il peut négliger une partie des données au moment de l'import. Afin de ne pas perdre de données, il est nécessaire de fusionner les lignes des tableurs avant de les importer sur OCL. De plus, la collecte des quantités de produits à partir des modèles 3D est complexe. Dans les tableurs extraits de Revit, il peut parfois être difficile de comprendre à quels éléments correspondent les quantités. Beaucoup d'hypothèses sont faites à cette étape. Les données sont plus difficiles à contrôler qu'avec les bordereaux.

Ainsi, les quantités collectées avec les modèles 3D sont plus difficiles à prendre en main et plus sujettes à la perte de données sur OCL. **Les impacts calculés sur base des bordereaux peuvent être considérés comme les plus fiables.**

Temps à investir dans l'ACV

Toutefois, les bordereaux sont des documents très denses. Lors de la collecte des données, le tableur doit être formaté pour être reconnu par One Click LCA (OCL). Pour ce faire, chaque quantité doit être sélectionnée manuellement. Cette étape est chronophage. Au contraire, recenser les quantités de produits à partir des modèles 3D est rapide. Les tableurs extraits de Revit ont presque le bon format, il suffit de changer le nom des colonnes (imposé par OCL). Ainsi, **les résultats obtenus sur base des modèles 3D sont moins fiables mais plus rapides à obtenir.**

5.2.4 Lien avec la réglementation

L'impact du Gros Œuvre de la Tour Triangle est comparé aux seuils de la RE2020 (Figure 4-19). Toutefois, en phase de conception, il manque encore trop d'information pour mener une comparaison exacte :

- L'indicateur $I_{c,construction}$ englobe les impacts de tous les produits et équipements ainsi que du chantier. Ici, seuls les impacts des produits du lot Gros Œuvre sont calculés. Or, d'autres lots pourraient également avoir un fort impact sur le résultat (façades, couverture, CVC, etc.).
- Le seuil $I_{c,construction}$ doit être calculé sur base de $I_{c,construction_maxmoyen}$ ainsi que de facteurs propres au bâtiment et à l'ACV. Afin de calculer ce seuil, une extension est nécessaire sur One Click LCA (OCL). BESIX ne dispose pas de cette extension.
- La surface de référence permettant de calculer l'indicateur $I_{c,construction}$ est la surface utile. Dans le cas de la Tour Triangle, la surface de plancher est la seule donnée disponible.
- Dans l'étude, lors de l'encodage des quantités sur OCL, seules des données génériques sont considérées. Ces données donnent en général des impacts plus grands que des données spécifiques. Le résultat de l'ACV est donc surestimé.

A l'heure actuelle, il est donc difficile de comparer précisément le résultat de l'ACV au seuil de la RE 2020. Toutefois, il est pertinent de constater que **les impacts calculés représentent déjà 60% du seuil**. En 2031, le seuil pour $I_{c,construction_maxmoyen}$ associé aux immeubles de bureau passe de 1000 kgCO₂/m² à 600 kgCO₂/m² soit une baisse de 40%. Un projet comme celui de la Tour Triangle pourrait rencontrer des difficultés à répondre aux réglementations.

5.3 Recommandations

Cette section synthétise les discussions précédentes. Elle donne des recommandations sur la marche à suivre pour réaliser une ACV dans les meilleures conditions.

Pour collecter les données nécessaires à l'ACV, aucune méthodologie n'est meilleure qu'une autre. La question à se poser est la suivante : **pourquoi faire une ACV ?**

- Elle peut être utile pour **optimiser** le potentiel de réchauffement global du bâtiment. Dans ce cas, l'objectif est de comparer l'impact avant et après l'optimisation. Connaître l'ordre de grandeur initial des impacts du bâtiment peut suffire. Or, l'impact global du lot Gros Œuvre est du même ordre de grandeur pour les quatre ACV (autour de 50 000 t.CO₂eq). Ici, calculer les quantités nécessaires sur base des modèles 3D est préférable car le calcul est plus rapide.
- Elle peut également être utilisée afin d'identifier les **hotspots** du bâtiment. Là, le but est de déterminer les matériaux les plus contributeurs. Pour toutes les ACV, les deux matériaux les plus contributeurs sont les mêmes. Collecter les quantités grâce aux modèles 3D peut suffire. Pour plus de fiabilité, utiliser les bordereaux peut aussi être envisagé.
- Elle peut servir à étudier un **élément en particulier**. Dans ce cas, tous les produits de cet élément doivent être étudiés, grâce aux bordereaux.
- Enfin, elle peut être utile pour répondre à des **réglementations**. Dans ce cas, il peut être intéressant de considérer les données les plus récentes. En effet, plus les données sont récentes, plus les quantités sont optimisées et plus l'impact du Gros Œuvre est bas. Il peut donc être judicieux de calculer les quantités sur base des modèles 3D et des ratios de la phase d'exécution, quand les plans sont suffisamment avancés.
Cependant, le but est aussi de connaître avec certitude les impacts du bâtiment. En plus, prendre en compte les produits de structurels ne suffit pas : les produits non structurels doivent aussi être considérés. Ici, calculer les quantités nécessaires sur base des bordereaux est préférable.

Afin d'intégrer ces résultats aux pratiques, des tableaux synthétisent ces différentes conclusions. D'abord, **chaque méthodologie a ses atouts et limites** : le Tableau 5-2 met en lumière ces différences.

Enfin, le Tableau 5-3 donne des recommandations sur les données à utiliser pour l'ACV, en fonction de l'objectif. **Ce tableau pourra être utilisé par les concepteurs comme outil d'aide à la décision lors du choix des données à utiliser pour réaliser l'ACV.**

Tableau 5-2 – Synthèse : comparaison des niveaux de précision, atouts et limites

Atout Limite	Niveau de précision de l'ACV			
	A	B	C	D
Atouts et limites de chaque méthodologie				
Source des données (Fiabilité des données)	Bordereaux	Bordereaux	Modèles 3D Ratios généraux	Modèles 3D Ratios de la phase d'exécution
Produits considérés (Complétude des données)	Béton, armatures, acier	Béton, armatures, acier Produits non structurels (notamment coffrages perdus, béton pour forme de pente, joints, enduits et laine minérale)	Béton, armatures, acier	Béton, armatures, acier
Incertitude sur le résultat	Faible Une ligne du fichier = Un produit de construction. Les données sont claires. Peu d'hypothèses à faire.		Haute Une ligne du fichier = Un élément Revit. Il est parfois difficile de savoir à quoi correspond cette ligne. Beaucoup d'hypothèses à faire.	
Nb de produits à considérer	3	Entre 5 et 10	3	
Outils nécessaires	Excel		Revit / Diroots / Excel	
Temps total nécessaire	6h	8h	3h	
Précision supplémentaire obtenue sur ... l'impact de l'élément		De 0 à +34%		
...l'impact total du Gros Œuvre		De 0 à +1% par élément		

Tableau 5-3 – Synthèse : recommandations pratiques

	Niveau de précision de l'ACV			
	A	B	C	D
En pratique : recommandations				
Précautions à prendre	Consolider les tableurs Excels			
				Ne considérer les ratios de la phase conception technique que s'ils sont calculés sur base d'un nombre suffisant de plans d'exécution
A quelle phase du projet ?	Conception schématique, développée ou technique	Conception schématique, développée ou technique	Conception développée ou technique	Conception technique
Que prendre en compte ?	Les produits béton, acier et armatures des bordereaux	Les produits béton, acier et armatures des bordereaux + tous les produits des éléments les plus contributeurs, (notamment béton pour forme de pente, joints, enduits)	Les produits béton, acier du modèle 3D Les armatures, en utilisant les ratios généraux	Les produits béton, acier du modèle 3D Les armatures, en utilisant les ratios de la phase d'exécution
Pour quel usage ?	Pour avoir plus de contrôle sur les données et obtenir un résultat fiable A privilégier si Revit n'est pas maîtrisé	Pour prendre en compte les produits non structurels : Pour la RE2020 Pour étudier un élément en particulier Pour obtenir un résultat plus précis	Pour obtenir rapidement les ordres de grandeur des impacts du bâtiment, les hotspots ou les matériaux les plus contributeurs du bâtiment Pour identifier l'impact d'une optimisation	Pour obtenir un résultat plus précis, si les ratios de la phase d'exécution sont disponibles (et basés sur un nombre suffisant de plans)

5.4 Forces du travail

Les forces du travail peuvent être expliquées en plusieurs points.

Lors de la collecte des informations nécessaires à l'ACV, les concepteurs peuvent faire divers choix en matière de fiabilité et de complétude des données. L'étude compare plusieurs sources de données, notamment les bordereaux et les modèles 3D. Cette recherche est **novatrice** et met en lumière un certain nombre de points intéressants. En particulier, les données les plus récentes ne sont pas toujours celles qu'il faut considérer pour l'ACV. De plus, les produits non structurels du Gros Œuvre sont étudiés. Ces produits peuvent avoir un impact significatif et ne sont pas toujours négligeables.

Dans l'étude, quatre ACV sont réalisées suivant quatre méthodologies. Pour chacune, l'ACV atteint un certain niveau de précision. Ces niveaux de précision sont définis dans l'étude et permettent de **schématiser** les différents choix qui se présentent aux concepteurs. L'étude met en évidence les atouts et limites de chaque méthodologie et peut directement être utilisée par les entreprises comme outil d'aide à la décision. Ces recherches complètent la littérature existante.

De plus, ces niveaux de précision dépendent de la qualité des données définie dans la littérature (Weidema & Wesnæs, 1996). La méthodologie est donc **réplicable** à d'autres études.

Enfin, le travail est effectué chez BESIX. Les calculs sont donc faits en condition réelle. Les méthodologies mises en place sont réalistes et concrètes. Les recommandations proposées dans le cadre de cette étude peuvent donc être appliquées en **entreprise**. De plus, les résultats de l'étude sont comparés aux résultats de BESIX. Cette comparaison permet de mettre en lumière des problématiques liées au logiciel qu'ils utilisent, One Click LCA. Ces problèmes n'auraient pas pu être identifiés sans cette comparaison.

5.5 Limites du travail

L'étude a également certaines limites.

Les **frontières** de l'étude peuvent notamment être questionnées.

- L'ACV est calculée à l'aide de différentes données : les quantités de produits et les données environnementales. Dans l'étude, seules les quantités de produits sont étudiées. Or, le choix des données environnementales peut grandement influencer le potentiel de réchauffement global. Etudier ce paramètre aurait pu être pertinent.
- Le choix du cas d'étude a également ses limites. Il se situe à Paris, en France. La RE2020 est donc étudiée. Toutefois, de nombreux autres pays réglementent désormais l'impact carbone des bâtiments. Etudier d'autres réglementations aurait été intéressant. De plus, les armatures et les produits non structurels n'apparaissent pas dans le modèle 3D de la Tour. La quantité de ces produits est calculée par d'autres méthodes. Choisir un autre cas d'étude aurait permis de travailler avec un modèle 3D plus complet.

De plus, la **présentation des résultats et des analyses** aurait pu être améliorée. Premièrement, les résultats sont donnés pour trois sous-lots définis par One Click LCA : fondations, murs et ossature. Afin de rendre les résultats plus clairs, le sous-lot « ossature » aurait pu être divisé en deux : poteaux/poutres et dalles. Ensuite, la comparaison qualitative des différentes méthodologies présente des limites. Elle est subjective et ne se base que sur l'étude d'un bâtiment. En travaillant sur un autre cas d'étude, le modèle 3D et les bordereaux auraient pu être différents. D'autres conclusions auraient alors pu être formulées.

Ensuite, le **lien entre modèles 3D et ACV** est encore compliqué. Le modèle 3D est une maquette Revit. L'interopérabilité est assurée entre Revit et One Click LCA. Toutefois, la nomenclature Revit n'est pas optimisée pour l'ACV. Il est difficile de faire le lien entre les éléments du modèle 3D et les données environnementales de One Click LCA.

Enfin, l'étude se focalise sur les phases de conception. Elle se restreint aussi au lot Gros Œuvre. Ainsi, comparer les résultats au **seuil de la RE2020** est limité. Il faudrait étendre l'étude à tous les lots et aux phases d'exécution pour obtenir un résultat comparable.

5.6 Impact pratique

A l'heure actuelle, lors des phases de conception, les concepteurs ne réalisent pas systématiquement une ACV. Ces calculs sont souvent réalisés par des bureaux d'étude spécialisés à la fin de la conception, en vue d'obtenir une certification. Or, le potentiel de réduction carbone est maximal aux premières phases du projet. L'ACV doit être intégrée bien plus tôt au processus de conception.

Les concepteurs ont donc un rôle majeur à jouer en matière d'ACV. L'étude vise à **éclairer les choix des concepteurs** en répondant à diverses questions : quelles données sont nécessaires pour l'ACV ? Comment le choix des données influence-t-il l'estimation des quantités de produits et donc les résultats du calcul ? Quel est le meilleur choix à faire ?

L'étude aura un impact sur la pratique en entreprise (inclus BESIX). Les tableaux synthétiques résument les documents nécessaires, les atouts et les limites de chaque méthodologie. Les concepteurs pourront décider des données à utiliser pour l'ACV, en connaissance de cause. Ainsi, en fonction de la méthodologie qu'ils choisissent, ils pourront décider s'ils préfèrent gagner du temps ou gagner en précision.

Les résultats concrets de l'étude peuvent également être percutants. Par exemple, **connaître l'ordre de grandeur** du potentiel de réchauffement global des produits non structurels est intéressant. A l'avenir, les concepteurs pourront être guidés dans le choix des produits à considérer ou non, lors de la réalisation d'ACV.

En outre, des **problématiques liées aux logiciels** One Click LCA sont démontrées. Prendre en compte cette problématique pourra améliorer considérablement la précision des résultats des ACV faites en entreprise.

Enfin, comparer les résultats à la RE2020 permet de mettre en évidence l'exigence de ses seuils. Elles vont se durcir dans les années à venir. Il est important de constater qu'une première estimation peut déjà être menée en phase de conception. Cela permettra **d'anticiper** les réglementations et de faire des choix de conception en conséquence.

5.7 Futurs travaux

A l'issue de l'étude, certaines questions sont laissées en suspens. Plusieurs pistes de futurs travaux ou études peuvent être intéressantes.

D'abord, l'influence du choix des **données environnementales** sur la précision du calcul du potentiel de réchauffement global pourrait être étudiée. Ainsi, les influences des deux types de données (quantités ou données environnementales) pourraient être comparées. Il pourrait notamment être intéressant de comparer les potentiels de réchauffement global obtenus avec des données génériques ou spécifiques (en France par exemple, les Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire FDES), pour un même cas d'étude. Cela nécessite donc de choisir un cas d'étude dont les données spécifiques sont connues.

Il pourrait également être intéressant d'étendre l'étude aux **phases d'exécution**. De cette manière, les impacts pourraient être comparés avec la réglementation. Pour ce faire, les quantités mises en œuvre sur chantier pourraient être récupérées auprès des fournisseurs et sous-traitants. Il serait également intéressant de comparer les quantités réelles avec les quantités des phases de conception.

Afin de comparer les résultats à la réglementation, il serait également pertinent d'étendre l'étude aux **autres lots**. Les façades et les lots techniques (CVC par exemple) peuvent être impactants. Les déchets générés sur chantier sont également susceptibles d'avoir un impact non négligeable.

Etudier **d'autres cas d'étude** peut aussi être judicieux. Par exemple, des bâtiments dont les modèles 3D sont plus détaillés (avec armatures et produits non structuraux) pourraient être considérés. De cette manière, les quantités d'armatures et de produits non structuraux pourraient cette fois être calculées grâce au modèle 3D.

Tous ces travaux permettraient **d'affiner** les résultats de l'étude. En effet, les « niveaux de précision » définis pourraient être comparés aux données réelles. L'incertitude par rapport à la réalité pourrait donc être évaluée. Cette incertitude pourrait aussi être chiffrée pour d'autres cas d'étude. Ainsi, il serait possible d'estimer des incertitudes moyennes.

Enfin, il serait judicieux d'étudier le **lien entre BIM et ACV**. A l'heure actuelle, les éléments du modèle Revit sont codés grâce au système Uniclass. Ce travail pourrait notamment permettre d'adapter la nomenclature pour faciliter l'ACV. Par exemple, pour chaque élément Revit, des paramètres pourraient mentionner la présence d'armatures, le ratio correspondant ou la donnée environnementale à encoder sur One Click LCA.

6 Conclusion

Les réglementations liées au secteur de la construction évoluent rapidement. Dans quelques pays en Europe, l'impact carbone des bâtiments est désormais réglementé. Pour prendre en compte ce paramètre au moment de la conception, plusieurs méthodes d'évaluation des impacts peuvent être mises en place. Parmi elles, l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) évalue notamment le potentiel de réchauffement global des produits de construction du bâtiment. Afin de chiffrer ces impacts, les quantités des produits doivent être évaluées. En phase de conception, les estimer peut représenter un défi pour les concepteurs.

Dans la **littérature**, plusieurs études se penchent sur la question. Des travaux tentent de proposer des solutions pour simplifier la collecte des données nécessaires à l'ACV. Toutefois, ces études ne proposent pas de synthèse à destination des concepteurs, leur permettant de comparer rapidement les différentes méthodologies possibles.

Le **but du travail** est de faciliter l'estimation des quantités de produits lors de la réalisation de l'ACV. Pour cela, son objectif est de déterminer l'influence de ces estimations sur la précision du calcul. Cette étude se fait aux différentes phases de conception. Quatre méthodologies sont mises en place pour collecter les données et ainsi, quatre ACV sont réalisées et comparées. L'étude évalue ces méthodologies en matière de précision, temps investi, données et outils nécessaires. Cette comparaison permet aux concepteurs de choisir la méthodologie la plus adaptée à leurs besoins. Ainsi, l'étude **contribue** à rendre l'ACV plus accessible lors des phases de conception.

En premier lieu, l'influence de la qualité des données sur les résultats de l'ACV est mise en évidence. Plusieurs sources de données sont considérées : les bordereaux, les modèles 3D et les ratios. En effet, les armatures ne sont pas modélisées sur le modèle 3D. Leurs quantités sont calculées grâce à des ratios de la quantité de béton. Deux versions de ces ratios sont considérées. Les ratios les plus anciens sont généraux, et choisis en fonction du type de bâtiment. Les plus récents sont calculés pour le projet, grâce aux plans d'exécution. Trois ACV sont comparées et deux **résultats** sont mis en évidence.

- Les impacts calculés avec les modèles 3D sont inférieurs à ceux calculés avec les bordereaux (-1%).
- Les impacts calculés avec les ratios de la phase d'exécution sont inférieurs à ceux calculés avec les ratios généraux (-1%). Cette conclusion n'est pas toujours vraie. Si le nombre de plans est insuffisant, les ratios de la phase d'exécution ne sont alors pas représentatifs et les résultats sont faussés.

En second lieu, l'influence de la complétude des données est analysée. Une ACV est étudiée en prenant en compte non seulement les produits structurels (béton, acier et armatures) mais aussi non structurels (coffrages, étanchéité, joints, etc.). Les produits non structurels peuvent être impactants à l'échelle du Gros Œuvre (+3% de précision) s'ils font partie d'un élément ayant lui-même un fort impact.

En dernier lieu, les quatre méthodologies sont comparées qualitativement. Les modèles 3D peuvent être difficiles à prendre en main. De plus, les quantités collectées par cette méthode sont plus sujettes à la perte des données sur le logiciel One Click LCA (jusqu'à 18% de pertes). Les résultats des ACV issus du modèle 3D sont donc moins fiables. D'autre part, réaliser une ACV à partir des bordereaux prend plus de temps mais les quantités collectées sont plus fiables.

Ces résultats sont synthétisés sous forme de tableaux. Ils donnent des **recommandations** aux entreprises concernant le choix de la méthodologie à adopter pour la collecte des données. Chacune a ses atouts et ses limites. Suivant l'objectif, le choix de l'une ou l'autre de ces stratégies peut être envisagé :

- Si le but est de répondre à une réglementation, un résultat fiable et une ACV détaillée sont nécessaires. Pour collecter les quantités, les bordereaux doivent être utilisés. Cette ACV peut être estimée dès la phase de conception schématique, au moment de la réception des bordereaux. Tous les produits de construction structurels doivent être considérés. Les produits de construction non structurels des éléments les plus contributeurs doivent également être pris en compte. L'ACV sera donc plus précise. Par exemple, dans l'étude, en prenant en compte les produits non structurels, l'impact augmente de 3%.
- Si le but est d'évaluer l'impact d'une optimisation ou d'identifier les matériaux les plus contributeurs, connaître un ordre de grandeur des impacts du bâtiment suffit. Alors, collecter les quantités grâce aux modèles 3D est justifié. Cela nécessite de maîtriser le logiciel Revit. Cette ACV peut être envisagée dès que le modèle 3D est disponible (en phase de conception développée ou technique). Le béton et l'acier doivent être considérés. Les quantités d'armatures sont calculées grâce aux ratios, en utilisant les ratios généraux. Si les plans sont assez avancés, les ratios de la phase d'exécution peuvent être considérés. En utilisant les modèles 3D, le résultat est moins fiable qu'avec les bordereaux mais il donne le même ordre de grandeur.

Ces ACV sont réalisées en phase de conception pour le lot Gros Œuvre. La comparaison de ces résultats à la RE 2020 est donc inexacte. Toutefois, elle met en évidence l'exigence de cette réglementation : les impacts calculés pour les produits du Gros Œuvre représentent déjà 60% du seuil de 2021. Prendre en compte ces informations dès les premières phases de conception permettra aux entreprises d'avoir conscience de ces difficultés et de faire des choix forts en conséquence.

Dans les **années à venir**, il est probable que de nombreuses études émergent à ce sujet. La RE 2020 est une réglementation récente qui pose de nouveaux défis : quels lots (hors Gros Œuvre) peuvent avoir de l'impact sur le résultat ? Comment pallier le manque de données spécifiques à ces étapes du projet ? Quels choix de conception faire pour que l'impact du bâtiment respecte ces seuils ? De futurs travaux pourront y trouver des solutions, et de cette manière, contribuer à décarboner le secteur de la construction.

7 Références

- 17 Objectifs de développement durable. (2023, mai 29). L'Agenda 2030 en France.
<https://www.agenda-2030.fr/17-objectifs-de-developpement-durable/>
- Akbarnezhad, A., & Xiao, J. (2017). Estimation and Minimization of Embodied Carbon of Buildings : A Review. *Buildings*, 7(1), Article 1.
<https://doi.org/10.3390/buildings7010005>
- Applications courantes. (2018, mai 7). <https://www.technique-beton.fr/produits/systemes-darmatures-et-de-dilatation/4-traitement-des-dilatations-et-des-joints/43-goujons-de-dilatation-dirax/applications-courantes/>
- Article R172-4—Code de la construction et de l'habitation—Légifrance. (2022).
https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000043890801
- Autres données de la base INIES. (s. d.). *Inies*. Consulté 1 juin 2023, à l'adresse
<https://www.inies.fr/en/inies-and-its-data/autres-donnees-de-la-base-inies/>
- Basbagill, J., Flager, F., Lepech, M., & Fischer, M. (2013). Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts. *Building and Environment*, 60, 81-92.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.009>
- Bourru. (2022). *RE2020 : Calculer l'impact carbone d'un bâtiment*. Cerema.
<http://www.cerema.fr/fr/actualites/re2020-calculer-impact-carbone-batiment>
- Bueno, C., & Fabricio, M. M. (2018). Comparative analysis between a complete LCA study and results from a BIM-LCA plug-in. *Automation in Construction*, 90, 188-200. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.028>
- Cabassud, N. (s. d.). *Guide RE2020, réglementation environnementale. Eco-construire pour le confort de tous*.

- Coelho, L. (2017). *Facteurs et méthodes de calcul d'émissions de gaz à effet de serre*.
Facteurs et méthodes de calcul d'émissions de gaz à effet de serre.
- Cormick, H. (2017). *Comparing Three Building Life Cycle Assessment Tools for the Canadian Construction Industry*.
Design-Build Construction Advantages. (s. d.). Consulté 23 mai 2023, à l'adresse <https://www.linkedin.com/pulse/design-build-construction-advantages-brittany-southwood>
- Distribution, K.-O. (s. d.). *Goujon d'ancrage en acier électrozingué FBN II, taille au choix—FISCHER*. Consulté 31 mai 2023, à l'adresse <https://krenobat.fr/Goujon-d-ancrage-en-acier-electrozingue-FBN-II-taille-au-choix-FISCHER--0105236.html>
- EN 15804. (2013).
- EN 15978. (2013).
- Energy performance of buildings: Climate neutrality by 2050*. (2023, février 9). <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20230206IPR72112/energy-performance-of-buildings-climate-neutrality-by-2050>
- Finnveden, G., & Moberg, Å. (2005). Environmental systems analysis tools – an overview. *Journal of Cleaner Production*, 13(12), 1165-1173. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.06.004>
- Francart, N., Widström, T., & Malmqvist, T. (2021). Influence of methodological choices on maintenance and replacement in building LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(11), 2109-2126. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01985-z>
- GIEC. (2014). *Changements climatiques 2014—Rapport de synthèse*.

- Grandjean, A., Ledoux, R., & Daunay, J. (2018). Décarboner le bâtiment, sans oublier ses émissions indirectes. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, 90(2), 38-40. <https://doi.org/10.3917/re1.090.0038>
- Hoxha, E., Habert, G., Lasvaux, S., Chevalier, J., & Le Roy, R. (2017). Influence of construction material uncertainties on residential building LCA reliability. *Journal of Cleaner Production*, 144, 33-47. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.068>
- ISO 14040 (N° 14040). (2006).
- ISO 14044 (N° 14044). (2006).
- Jankovic, I., Mayer, A., & Staniaszek, D. (2022). *Ready for carbon neutral by 2050? Assessing ambition levels in new building standards across the EU > BPIE - Buildings Performance Institute Europe*. BPIE - Buildings Performance Institute Europe. <https://www.bpie.eu/publication/ready-for-carbon-neutral-by-2050-assessing-ambition-levels-in-new-building-standards-across-the-eu/>
- Kellenberger, D., & Althaus, H.-J. (2009). Relevance of simplifications in LCA of building components. *Building and Environment*, 44(4), 818-825. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.06.002>
- Klöpffer, W. (2006). The Role of SETAC in the Development of LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(1), 116-122. <https://doi.org/10.1065/lca2006.04.019>
- Kula, B., & Ergen, E. (2018). *Review of Classification Systems for Facilities Management*.
- LETI Embodied Carbon Primer. (2020).
- Levasseur, A. (2011). *Développement d'une méthode d'analyse du cycle de vie dynamique pour l'évaluation des impacts sur le réchauffement climatique*.

Level of Development Specification – BIM Forum. (2022).

<https://bimforum.org/resource/level-of-development-specification/>

Ling, F. Y. Y., Chan, S. L., Chong, E., & Ee, L. P. (2004). Predicting Performance of Design-Build and Design-Bid-Build Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 130(1), 75-83.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2004\)130:1\(75\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2004)130:1(75))

Loi n° 85-704 du 12 juillet 1985 relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'oeuvre privée.

Ministère de la Transition Ecologique. (s. d.). *L'Accord de Paris*. Chiffres clés du climat 2022. Consulté 25 mai 2023, à l'adresse <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat-2022/17-laccord-de-paris.php>

Ministère de la Transition Ecologique. (2023). *Réglementation environnementale RE2020*. Ministères Écologie Énergie Territoires. <https://www.ecologie.gouv.fr/reglementation-environnementale-re2020>

Ness, D. (2022). *Growth in floor area : The blind spot in cutting carbon*.

Nickel, L. (2023, février 9). *Cradle-to-Grave in LCA : What is it & How does it work?* Ecochain - LCA Software Company. <https://ecochain.com/knowledge/cradle-to-grave-in-lca/>

One Click LCA. (s. d.). One Click LCA® Software. Consulté 28 avril 2023, à l'adresse <https://www.oneclicklca.com/>

One Click LCA. (2022). *Construction Carbon Regulations in Europe. Review & Best Practises*.

Peuportier, B. (2019). *Vers une approche globale de l'éco-conception du cadre bâti*. <https://hal.science/hal-02201463>

- Reiter, S. (2010). *Analyse du cycle de vie des bâtiments - un examen*.
- RIBA *Plan of Work*. (2021). <https://www.architecture.com/knowledge-and-resources/resources-landing-page/riba-plan-of-work>
- Röck, M., Hollberg, A., Habert, G., & Passer, A. (2018). LCA and BIM : Visualization of environmental potentials in building construction at early design stages. *Building and Environment*, 140, 153-161. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.006>
- Solutions, P. (2021, septembre 16). *Boite d'attente Stabox—Sismique*. <https://www.plaka-solutions.com/catalogue-produit/01-01-10-boite-dattente-stabox-sismique>
- Soust-Verdaguer, B., Llatas, C., & García-Martínez, A. (2016). Simplification in life cycle assessment of single-family houses : A review of recent developments. *Building and Environment*, 103, 215-227. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.04.014>
- Stassen, P. (2016). *Automatisation of Building Life-cycle Assessment*.
- Takano, A., Winter, S., Hughes, M., & Linkosalmi, L. (2014). Comparison of life cycle assessment databases : A case study on building assessment. *Building and Environment*, 79, 20-30. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.04.025>
- Tchakorom, F. (2022). *Formation—L'ACV dans la RE2020, comprendre le calcul et l'optimiser*.
- Uniclass. (s. d.). NBS. Consulté 23 mai 2023, à l'adresse <https://www.thenbs.com/our-tools/uniclass>
- United Nations Climate Change. (s. d.). *L'Accord de Paris | CCNUCC*. Consulté 25 mai 2023, à l'adresse <https://unfccc.int/fr/a-propos-des-ndcs/l-accord-de-paris>

- Wastiels, L., & Decuypere, R. (2019). Identification and comparison of LCA-BIM integration strategies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 323(1), 012101. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/323/1/012101>
- Weidema, B. P., & Wesnæs, M. S. (1996). Data quality management for life cycle inventories—An example of using data quality indicators. *Journal of Cleaner Production*, 4(3), 167-174. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(96\)00043-1](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(96)00043-1)

8 Annexes

Cette partie revient en détail sur certains points de l'étude. Elle est organisée autour des mêmes thématiques que l'étude à savoir Etat de l'Art, Méthodologie et Résultats.

8.1 Annexes - Etat de l'art

8.1.1 Vocabulaire utilisé pour l'étude

Le vocabulaire de l'étude est défini dans l'Etat de l'Art – Concepts et Définition. Le Tableau 8-1 explique la hiérarchie entre les différents termes de l'étude à travers des exemples.

Le Gros Œuvre se découpe en deux modèles 3D (Structure et Fondation) et en trois sous-lots (Ossature, Murs et Fondations). Au sein de chaque sous-lots, se trouvent des groupes d'éléments identiques (Dalles, Colonnes, Murs, etc.). Chacun de ces groupes est constitué d'éléments individuels (Dalles Hors Noyau par exemple). Chacun de ces éléments est constitué d'un certain nombre de produits de construction.

Tableau 8-1 - Hierarchie du vocabulaire utilisé

Hierarchie	Exemple				
Lot	GROS ŒUVRE				
Modèle 3D	STRUCTURE			FONDATION	
Sous-lot	OSSATURE		MURS		FONDATION
Groupe d'éléments	DALLES	COLONNES	MURS		DALLES
Élément	Dalles hors noyau	Poteaux mixtes acier-béton	Voiles du noyau	Maçonneries	Radier & Dalles Contre sol
Produit	<ul style="list-style-type: none"> - Coffrage - Armatures HA - Armatures TS - Béton C45/55 - Finition parement supérieur lissé - P.V. formes de pente - Caniveaux - Grilles - Siphons de sol 				

8.2 Annexes - Méthodologie

8.2.1 Niveaux de précision

Les niveaux de précisions sont rappelés dans le Tableau 8-2. Pour chacun, les quantités et les produits pris en compte à ce niveau de détail sont rappelés.

Tableau 8-2 – Détail des niveaux de précision

			Complétude des données	
			Prise en compte...	
			Des produits structurels	De tous les produits
Fiabilité des données	Quantités calculées sur base...	Des bordereaux	ACV de niveau A Quantités de béton, acier et armatures calculées selon les bordereaux	ACV de niveau B Quantités de tous les produits calculées selon les bordereaux
		Des modèles 3D et des ratios généraux	ACV de niveau C Quantités de béton et acier calculées grâce au modèle 3D Quantité d'armatures calculées grâce aux ratios généraux	ACV de niveau E Dans le cas de la Tour Triangle, il n'y a pas de maquette Revit qui détaille les produits comme les coffrages etc.
		Des modèles 3D et des ratios de la phase d'exécution	ACV de niveau D Quantité de béton et acier calculées grâce au modèle 3D Quantité d'armatures calculées grâce aux ratios de la phase d'exécution	
		Des données réelles	ACV de niveau F Le bâtiment n'étant pas encore construit entièrement, la maquette réelle du bâtiment n'est pas disponible	ACV de niveau G Cas idéal, pour certification et réglementation

8.2.2 Éléments sélectionnés

Les différents éléments présents dans les bordereaux sont donnés dans le Tableau 8-3. Il y a 67 éléments au total. En réalité, certains éléments sont fusionnés dans l'étude : l'élément *radier et dalles contre sol* est en fait composé des éléments radier, radier du carneau et dalles de transition.

Éléments sélectionnés pour l'étude

Tableau 8-3 - Ensemble des éléments du bordereau

Éléments du bordereau
Parois moulées de l'enceinte périphérique des infrastructures
Parois moulées du Carneau
Butons
Micro-berlinoise
Barrettes à l'intérieur de l'enceinte périphérique des infrastructures
Barrettes à l'intérieur du Carneau
Têtes de barrettes
Radier
Radier du Carneau
Dalles de transition
Murs poids de la Rampe Sud Pieux secants
Murs poids en bordure du passage Renan
Poutre de couronnement des parois moulées
Contrevoile périphérique
Voiles du noyau
Voiles hors noyau
Poteaux de la tour
Poteaux du Carneau
Poutres en béton armé
Poutre de remplacement voile de 16cm par maçonnerie + poutre
Poutres en acier supports des grilles de ventilation
Dalles du noyau
Dalles hors noyau
Planchers rampes
Dalle de couverture de la rampe Sud et du Carneau
Escaliers
Triement des joints de dilatation
Traitement acoustique des locaux techniques Groupe Electrogène
Aménagement des ouvrages de rétention
Aménagements divers
Voiles de façade (avenue Ernest Renan)
Voiles intérieurs du noyau
Voiles intérieurs hors noyau
Poteaux extérieurs

Poteaux intérieurs de la tour
Poutres courantes en béton armé
Poutres de transfert en béton armé
Poutres de transfert en acier
Ossature acier de la zone «mezzanine»
Ossature acier support cheneaux
Planchers à dalles alvéolaires précontraintes
Travaux en plancher bas
Poteaux
Poutres en plancher haut
Poutre de remplacement voile par maçonnerie + poutre
Habillage des rives des loggias
Poteaux mixtes acier-béton
Poteaux en béton armé
Ossature acier des « redans » double hauteur
Ossature acier
Dalles en plancher haut
Relevés d'étanchéité, murets et acrotères
Longrines
Plots
Souches
Formes de pente
Puisards
Arases de sol, décaissés de plancher, formes de pente
Massifs et socles des équipements techniques
Supports des éléments d'ascenseurs
Réservations, percements, calfeutrements
Incorporations
Siphons de sol
Seuils, relevés, murets
Supplément pour murs fusibles
Scellements de grilles
Maçonneries

8.2.3 Collecte des données primaires

8.2.3.1 Tableaux de ratios

Les différents ratios sont rappelés dans le Tableau 8-4. Dans le projet, seuls les ratios généraux et de la phase d'exécution sont considérés.

Tableau 8-4 – Ensemble des ratios fournis par BESIX

	[kg/m³]		
	Ratios généraux	Ratios de la phase tender	Ratios de la phase d'exécution
VOILES NOYAU	108	108	108.1
CONTRE VOILE	160	160	173.6
AUTRES VOILES	105	108	150.6
POTEAUX	246	230	124.6
RADIER	185	195	152.8
PLANCHER	119	131	204.5
POUTRES	295	160	190.0

- **Ratios généraux**

Ces ratios ont été déterminés par le client et fournis à BESIX. Ils ne sont pas calculés précisément pour le projet. Ce sont plutôt des ratios « types » dépendant du type de projet, de la surface, du nombre d'étages etc. Grâce à ces ratios, le client a pu définir des premières quantités.

- **Ratios de la phase tender**

Les ratios généraux ont été repris et adaptés par BESIX.

- **Ratios de la phase d'exécution**

Les ratios de la phase d'exécution sont obtenus par calcul : les plans d'exécution spécifient quelle quantité d'armatures correspond à quelle quantité de béton. Ils sont mis à jour progressivement au fil du projet en fonction de l'avancement de la phase EXE. Chaque mois, des Rapports de Progression sont envoyés par les ingénieurs structure (Figure 8-1 et Figure 8-2). Au 10 mars 2023, le rapport mentionnait les informations suivantes :

- L'avancement des études structures est globalement à 30%,
- Dépendant du lot qu'on considère, l'avancement varie de 4 à 90%.

Les ratios du 10 mars 2023, utilisés pour l'étude, ont donc des précisions dépendant du lot auquel ils se réfèrent puisqu'ils ont été calculés à un avancement plus ou moins important.

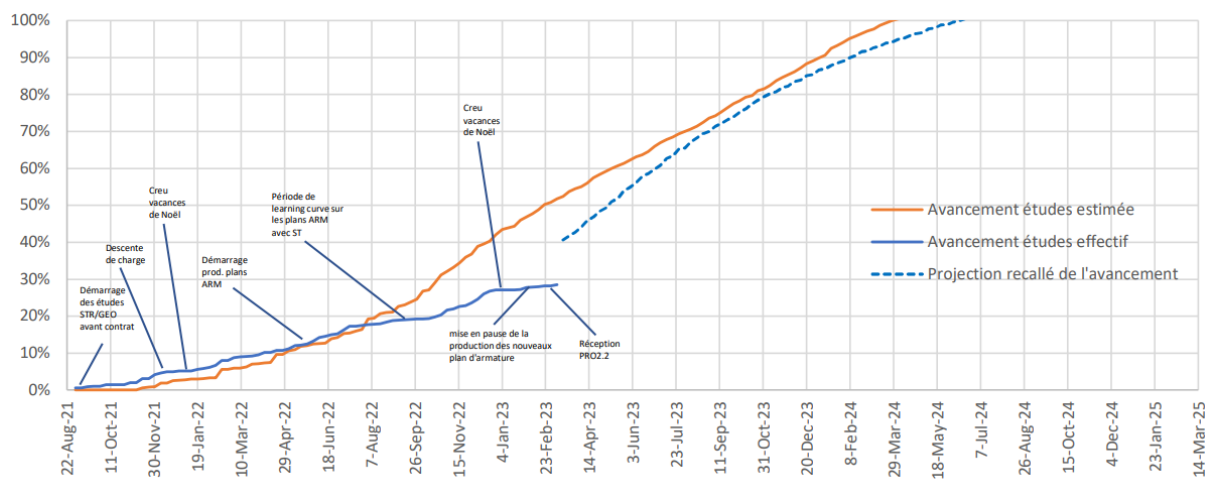


Figure 8-1 - Avancement des études structures en EXE au 10/03/23 - Progress report STR 028 fourni par BESIX

Récapitulatif des documents par émetteur				
Emetteur	type	Nb total	Nb REV A	Avancement
BED	NDC GEO	8	8	90.6%
BED	NDC STR	105	49	49.1%
DED	COF ESCALIERS	58	40	74.0%
DED	COF FOND	6	6	81.4%
DED	COF INFRA	11	11	85.5%
DED	COF PLANCHER	137	137	77.8%
DED	COF POTEAUX	16	16	83.8%
DED	COF POUTRES	98	22	25.2%
DED	COF VOILES	105	37	30.6%
DED	METALLIQUE	7	2	23.6%
DED	ARM PLANCHER	546	39	8.0%
DED	ARM POTEAUX	297	40	13.9%
DED	ARM POUTRES	538	33	7.9%
DED	ARM RADIER	44	44	90.0%
DED	ARM VOILES AUTRES	108	24	19.2%
DED	ARM VOILES NOYAU	416	26	4.7%
DED	MACONNERIE	63	52	61.9%
TOTAL		2563	586	28.49%

Figure 8-2 – Avancement des études au 2023-03-10 - TTR - Progress report STR 028 fourni par BESIX

Comme visible sur la Figure 8-3, si l'on applique chaque ratio à une même quantité de béton, les ratios généraux donnent une plus grande quantité d'armatures que les ratios de la phase tender. En effet, les ratios de la phase tender sont une version "optimisée" des ratios généraux. Enfin, les ratios de la phase d'exécution donnent une quantité d'armatures plus grande : au moment de l'étude, les ratios disponibles correspondaient principalement au calcul du socle du bâtiment. Ce socle est constitué d'un plus grand nombre d'armatures que le reste des étages. Les ratios ne sont donc pas représentatifs de l'entièreté de la tour mais uniquement de la partie exécutée / en cours d'exécution à savoir les fondations et le socle.

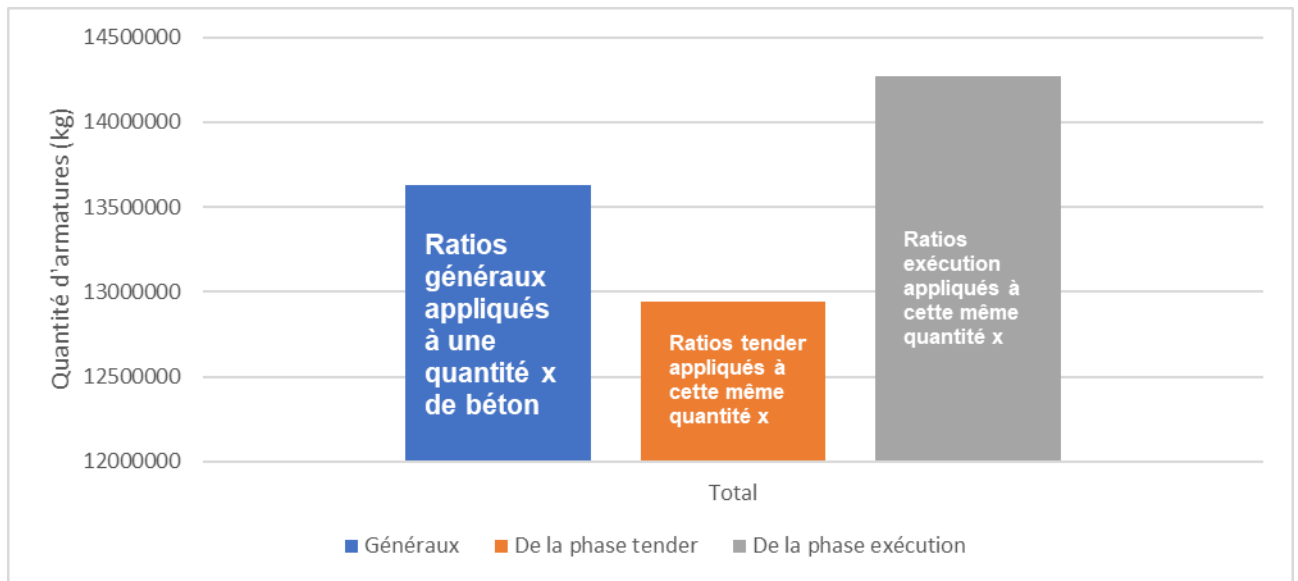


Figure 8-3 - Ratios appliqués à une même quantité de béton

La Figure 8-4 détaille ces quantités par partie du bâtiment.

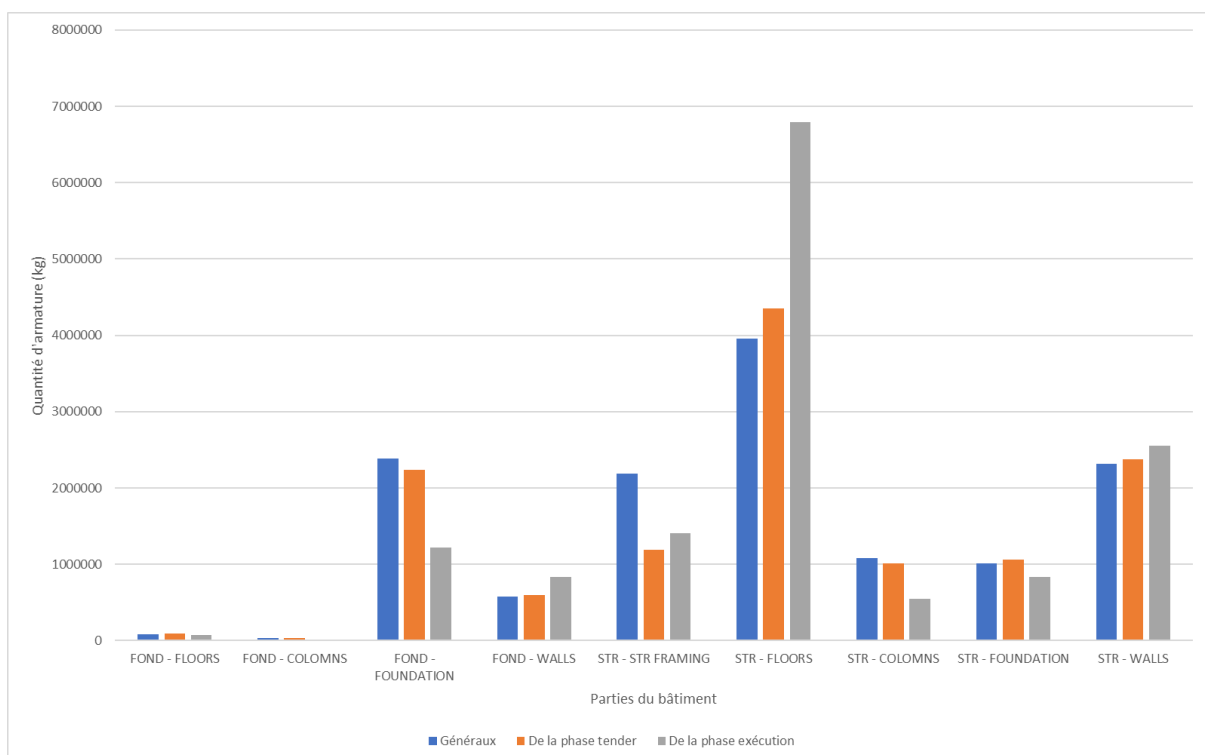


Figure 8-4 - Ratios appliqués à une même quantité de béton, par partie du bâtiment

8.2.4 Traitement des données primaires

Lors du traitement des données primaires, un certain nombre d'hypothèses sont prises.

D'abord, des hypothèses sont prises lors du traitement des **bordereaux**. Toutes les quantités de produits y sont spécifiées, ligne par ligne. Toutefois, parfois l'unité utilisée n'est pas adaptée. Par exemple, la quantité du produit « corbeaux filants » de l'élément « voile du noyau » était indiquée en ml (mètre linéaire). Or, pour prendre en compte ce produit sur One Click LCA, une quantité de béton en m³ doit être calculée. Ici, des hypothèses sur la forme du corbeau doivent être formulées. Les quantités sont calculées suivant la géométrie d'un corbeau trouvée sur internet. Toutefois, la géométrie exacte des corbeaux de la Tour Triangle aurait pu être recherchée et des calculs plus fins auraient pu être menés. La quantité aurait pu être plus précise.

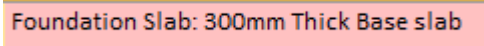
Ensuite, des hypothèses sont faites lors de la collecte des données réalisées grâce aux **modèles 3D**. Les quantités sont extraites de Revit grâce au plugin Diroots. Les tableurs ainsi obtenus compilent des milliers de lignes. Chaque ligne correspond à une quantité de béton ou d'acier. Parfois, la quantité associée à la ligne est nulle. Dans l'étude, ces lignes sont négligées. Toutefois, une analyse plus poussée sur Revit aurait pu permettre de retrouver l'élément concerné par cette ligne et donc la quantité associée.

8.2.4.1 *Hypothèses - Modèles 3D*

Les hypothèses faites lors du traitement des modèles 3D sont données dans le Tableau 8-5.

Tableau 8-5 - Hypothèses faites avec les modèles 3D

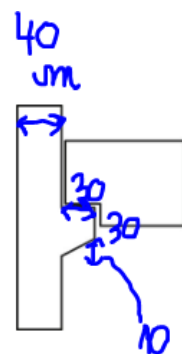
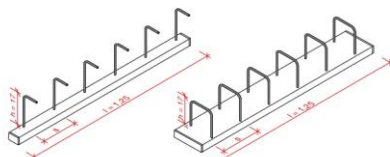
Problématique	Hypothèse
Béton et acier	
Ligne "matériau" vide	Lorsque certains matériaux sont inconnus, il est possible de chercher l'élément correspondant sur Revit grâce à la fonction Manage – Select by ID. Ainsi, on peut obtenir plus d'information sur l'élément et en déduire son matériau. Sinon, le Cahier des Charges Techniques (CCTP) peut donner des informations complémentaires. Par exemple, on y trouve que les escaliers sont constitués de béton C30/37.
Ligne "quantité" vide	La plupart du temps, ce problème correspond à l'export Revit de données qui n'ont pas de volume (des lignes de modèle par exemple). Toutefois, pour les escaliers, aucune quantité n'a pu être extraite en même temps que les autres éléments. Pour résoudre ce problème, un export est réalisé spécialement pour les escaliers. Les données sont mises en parallèle afin de relier les quantités (Volume) aux Element ID.

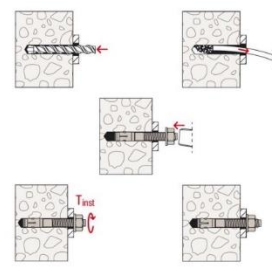
Armatures	
Quantité de béton à laquelle appliquer le ratio	<p>Nous avons 7 ratios à disposition : voiles du noyau, contrevoiles, autres voiles, poteaux, poutres, dalles et radier. Dans l'idéal, il faudrait appliquer à chaque élément le ratio correspondant. Or, lorsque l'on extrait les quantités de Revit, on retrouve des feuilles avec des milliers de lignes. Il est difficile de regarder manuellement, pour chaque ligne, quel ratio correspond.</p> <p>Le ratio est appliqué par "sous-lot". Par exemple, la quantité totale de béton pour le sous-lot Columns de la Structure est calculée, puis le ratio associé aux Colonnes est appliqué à cette quantité.</p>
Sept éléments sélectionnés	
Radier Dans Fondation – Structural Foundation Structure – Structural Foundation	<p>Une dalle mentionnée comme étant une fondation est considérée comme un radier.</p>  <p><i>Figure 8-5 - Extrait de l'excel brut Diroots Structure fourni par BESIX</i></p>
Voiles du noyau Dans Structure - Walls Maçonneries Dans Structure - Walls	<p>Le paramètre d'instance "B6_1D_Element_Number" donne des indications à propos du voile (V.FOND ou VN).</p> <p>La paramètre BTTRI_Matériau donne des informations sur le type de matériau (Maçonneries).</p> <p>On peut donc distinguer les différents types de voiles (Hors Noyau, Noyau, Maçonneries, Fondation).</p>
Poteaux mixtes acier béton Dans Structure – Structural Columns	<p>Le CCTP fait mention des poteaux mixtes acier-béton : ils sont utilisés à l'endroit où il est nécessaire de reprendre des efforts de traction en façade.</p> <p>11.6.3.2. Poteaux mixtes acier-béton</p> <p>Du fait d'importants efforts de traction tels que décrits au § 7.1.4 Figure 20, certains poteaux-tirants situés en façade sont constitués de profilés en acier type HEM enrobés de béton armé, la connexion étant assurée par des goujons.</p> <p>Une attention particulière devra être portée à la conception et à l'exécution des détails d'assemblages des poteaux-tirants entre eux et de leurs connexions avec les ossatures de planchers.</p> <p>Métré : profilé du commerce, goujons, coffrage rectangulaire incliné, parement soigné, fourniture et pose armatures HA, béton C80/95.</p> <p><i>Figure 8-6 - Extrait du CCTP fourni par BESIX</i></p> <p>Dans le paramètre d'instance "Comments", il est spécifié "poteau en traction" le cas échéant.</p>

8.2.4.2 Hypothèses - Bordereaux

Les hypothèses faites lors du traitement des bordereaux sont données dans le Tableau 8-6.

Tableau 8-6 - Hypothèses faites avec le bordereau

Problématique	Hypothèse	Schéma																																
Sept éléments sélectionnés																																		
Corbeaux filants des voiles	<p>Hypothèse sur la forme : un schéma trouvé sur internet d'un corbeau est utilisé (Figure 8-7).</p> <p>Hypothèse sur le matériau : le corbeau est constitué du même matériau que le mur donc C60/75</p>	 <p>Figure 8-7 - Schéma d'un corbeau filant (Applications courantes, 2018)</p>																																
Attentes pour plancher des voiles	<p>Hypothèse sur la forme et le matériau : une information est trouvée dans le CCTP (boîte Stabox) puis une recherche internet est menée à ce propos (Figure 8-8).</p> <p>Dans la fiche EPD (introuvable sur OCL), le matériau le plus contributeur est l'acier : on néglige donc les isolants etc.</p>	<p>Dimensions of the standard versions</p>  <table><thead><tr><th>Possible hook/stirrup spacing s cm</th><th>Number of stirrups and hooks with standard element length</th></tr></thead><tbody><tr><td>10</td><td>12</td></tr><tr><td>15</td><td>8</td></tr><tr><td>20</td><td>6</td></tr></tbody></table> <p>Standard dimensions</p> <table><thead><tr><th>Steel Ø mm</th><th>Possible hook/stirrup shape</th><th>Possible hook/stirrup spacing s cm</th><th>Stirrup height h cm</th><th>Overlap length l_o cm</th><th>Element length l m</th></tr></thead><tbody><tr><td>8</td><td>L / B</td><td>10 / 15 / 20</td><td>17</td><td>26*</td><td>1.25</td></tr><tr><td>10</td><td>L / B</td><td>10 / 15 / 20</td><td>17</td><td>30</td><td>1.25</td></tr><tr><td>12</td><td>L / B</td><td>10 / 15 / 20</td><td>17</td><td>39</td><td>1.25</td></tr></tbody></table> <p><small>With the standard types of the Stabox® rebar connections, the stirrup dimensions such as stirrup height h and overlap length l_o are manufactured in accordance with the Stabox® type static calculation and type test report. * Minimum value of the overlap length according to the Stabox® type test is 21 cm.</small></p> <p>Figure 8-8 - Fiche technique des boîtes d'attente Stabox (Solutions, 2021)</p>	Possible hook/stirrup spacing s cm	Number of stirrups and hooks with standard element length	10	12	15	8	20	6	Steel Ø mm	Possible hook/stirrup shape	Possible hook/stirrup spacing s cm	Stirrup height h cm	Overlap length l _o cm	Element length l m	8	L / B	10 / 15 / 20	17	26*	1.25	10	L / B	10 / 15 / 20	17	30	1.25	12	L / B	10 / 15 / 20	17	39	1.25
Possible hook/stirrup spacing s cm	Number of stirrups and hooks with standard element length																																	
10	12																																	
15	8																																	
20	6																																	
Steel Ø mm	Possible hook/stirrup shape	Possible hook/stirrup spacing s cm	Stirrup height h cm	Overlap length l _o cm	Element length l m																													
8	L / B	10 / 15 / 20	17	26*	1.25																													
10	L / B	10 / 15 / 20	17	30	1.25																													
12	L / B	10 / 15 / 20	17	39	1.25																													

Goujons des poteaux mixtes en acier-béton	<p>Hypothèse sur la forme : un schéma est trouvé sur internet (Figure 8-9).</p> <p>Hypothèse sur le matériau : acier</p>	 <p>Figure 8-9 - Goujon d'ancrage (Distribution, s. d.)</p>
---	--	---

8.2.4.3 Consolidation sur Excel

Les quantités sont collectées sur Excel. Avant d'importer les fichiers sur One Click LCA, les feuilles sont « consolidées » : lorsque le matériau est identique, les quantités sont additionnées. Le nombre de ligne final est donc réduit. Le mécanisme est montré grâce aux Figure 8-10 et Figure 8-11.

ELEMENT	IFCMATERIAL	CLASS	COMMENT_ID	QUANTITY	QTY_TYPE
1216169	BETON C45/55	SLAB	Floor: B6_r20_(23.2)_Floors 0.20	1,65784912	m3
1216209	BETON C45/55	SLAB	Floor: B6_r20_(23.2)_Floors 0.20	1,82970715	m3
1216737	BETON C35/45	SLAB	Floor: B6_r20_(23.2)_Floors 0.20	0,27630248	m3
1216779	BETON C45/55	SLAB	Floor: B6_r20_(23.2)_Floors 0.20	1,66639636	m3
1216486	BETON C45/55	SLAB	Floor: B6_r20_(23.2)_Floors 0.35	12,64088678	m3
1457249	Grave Bitume Classe 3 0/12 _ EB10 roul.35/50 (BBSG 0/10 classe2)	SLAB	Floor: B6_r20_(23.2)_Floors COUCHE ROULEM	37,88866917	m3
1457471	Grave Bitume Classe 3 0/12 _ EB10 roul.35/50 (BBSG 0/10 classe2)	SLAB	Floor: B6_r20_(23.2)_Floors COUCHE ROULEM	32,45951901	m3
1457723	Grave Bitume Classe 3 0/12 _ EB10 roul.35/50 (BBSG 0/10 classe2)	SLAB	Floor: B6_r20_(23.2)_Floors COUCHE ROULEM	12,01817357	m3
1457773	Grave Bitume Classe 3 0/12 _ EB10 roul.35/50 (BBSG 0/10 classe2)	SLAB	Floor: B6_r20_(23.2)_Floors COUCHE ROULEM	9,11136778	m3
4313944	Grave Bitume Classe 3 0/12 _ EB10 roul.35/50 (BBSG 0/10 classe2)	SLAB	Floor: B6_r20_(23.2)_Floors COUCHE ROULEM	12,28901566	m3
4668730	Grave Bitume Classe 3 0/12 _ EB10 roul.35/50 (BBSG 0/10 classe2)	SLAB	Floor: B6_r20_(23.2)_Floors COUCHE ROULEM	5,3229801	m3
4681490	BETON C45/55	SLAB	Floor: B6_r20_(23.2)_Precast Floors 0.20	2,1204724	m3
4681979	BETON C45/55	SLAB	Floor: B6_r20_(23.2)_Precast Floors 0.20	1,42076984	m3
4527098	BETON C35/45	SLAB	Floor: B6_r22_(23.2)_Beton de pente Beton n	8,35251564	m3
4547667	BETON C45/55	SLAB	Floor: B6_r22_(23.2)_Beton de pente Beton n	9,8810115	m3
4549072	BETON C45/55	SLAB	Floor: B6_r22_(23.2)_Beton de pente Beton n	4,3952416	m3
1421735	BETON C45/55	SLAB	Floor: B6_r22_(23.2)_Dalle BA de transition 3l	20,58218411	m3
1421790	BETON C45/55	SLAB	Floor: B6_r22_(23.2)_Dalle BA de transition 3l	19,17790024	m3
1421883	BETON C45/55	SLAB	Floor: B6_r22_(23.2)_Dalle BA de transition 3l	7,34972661	m3
1216082	BETON C35/45	SLAB	Floor: B6_r22_(23.2)_DalleBA 200mm	2,66739648	m3

Figure 8-10 - Tableur Excel avant consolidation



CLASS	IFCMATERIAL	QUANTIT Y	QTY_TY E
FLOOR	BETON C45/55	246,465	m3
FLOOR	BETON C35/45	222,833	m3
FLOOR	Grave Bitume Classe 3 0/12 _ EB10 roul.35/50 (BBSG 0/10 classe2)	109,09	m3
FLOOR	Armature acier	112786	kg

Figure 8-11 - Tableur Excel après consolidation

8.2.5 Analyse des données

8.2.5.1 One Click LCA

Les données environnementales sont choisies sur One Click LCA. Le plus que possible, des données génériques sont considérées. L'ensemble de ces données est résumé dans la Figure 8-12 (scindée en deux sur les pages suivantes).

Resource name	Technical specification	Product	Manufacturer	EPD program	EPD number	Environment Data Source	Standard	Verification	Year	Country	Upstream database	Density	Product Category Rules (PCR)	Notes about PCR	Performance ranking	Download EPD	
Aggregate (crushed gravel), generic, dry bulk density	1600 kg/m3			One Click LCA	-	One Click LCA	EN15804+A1	Internally verified	2018	LOCAL	ecoinvent	1600.0	EN15804+A1	-	CO2 CML: 43 / 153	See full ranking:	
Concrete block, masonry	B40, 200x500x200/250 mm		CERIB	INIES	INIES_CMUR20111104_133255_5685	FDES	EN15804+A1	Third-party verified (as per ISO 14025)	2017	france	ecoinvent	865.0	EN15804+A1	EN15804+A1	CO2 CML: 7 / 135	See full ranking:	Download EPD
Concrete masonry unit, hollow, for concrete filling, excluding the filling concrete	béton classes B40/B80, 200x200x200-250mm, 177 kg/m2 mur		CERIB	INIES	INIES_CBLO20170626_135016_26904	FDES	EN15804+A1	Third-party verified (as per ISO 14025)	2017	france	ecoinvent	885.125	EN15804+A1	EN15804+A1	CO2 CML: 5 / 135	See full ranking:	Download EPD
Crushed rock / gravel mix (50-50 %), dry bulk density	1680 kg/m3			One Click LCA	-	LCA of crushed stone, OneClickLCA 2016	ISO14040	Internally verified	2016	LOCAL	ecoinvent	1680.0	-	Only with EN15804	CO2 CML: 116 / 153	See full ranking:	
Electricity, France				One Click LCA		LCA study for country specific electricity mixes based on IEA, OneClickLCA 2022		Internally verified	2019	france	ecoinvent				Utilities: 153 / 1030	See full ranking:	
Flooring screed	C20/25 - XC1 - S3 - 20 CEM I, 50mm, 116.8kg/m2, 2336 kg/m3		SNBPE	INIES	INIES_OCHA20181217_151718_12450	FDES	EN15804+A1	Third-party verified (as per ISO 14025)	2018	france	ecoinvent		EN15804+A1	EN15804+A1	CO2 CML: 32 / 170	See full ranking:	Download EPD
Ready-mix concrete for outer walls	C25/30, XF1, ep.18cm, 455.67kg/m2, 2531.5kg/m3		SNBPE	INIES	INIES_CFAÇ20190911_122012_12329	FDES	EN15804+A1	Third-party verified (as per ISO 14025)	2020	france	ecoinvent		EN15804+A1	EN15804+A1	CO2 CML: 632 / 799	See full ranking:	Download EPD

Ready-mix concrete, high strength, generic	C45/55 (6527/7977 PSI) with CEM I (400 kg/m3; 25.0 lbs/ft3 total cement)	One Click LCA 2022	One Click LCA	-	One Click LCA	EN15804+A1, EN15804+A2	Internally verified	2022	LOCAL	ecoinvent	2400.0	EN15804+A1, EN15804+A2	-	CO2 CML: 316 / 510 See full ranking:
Ready-mix concrete, high-strength, generic	C60/75 (8700/10900 PSI), 0% recycled binders in cement (500 kg/m3 / 31.21 lbs/ft3)		One Click LCA	-	One Click LCA	EN15804+A1, EN15804+A2	Internally verified	2018	LOCAL	ecoinvent	2400.0	EN15804+A1	-	CO2 CML: 480 / 510 See full ranking:
Ready-mix concrete, normal strength, generic	C35/45 (5000/6500 PSI) with CEM I, 0% recycled binders (340 kg/m3; 21.2 lbs/ft3 total cement)		One Click LCA	-	One Click LCA	EN15804+A1, EN15804+A2	Internally verified	2020	LOCAL	ecoinvent	2400.0	EN15804+A1, EN15804+A2	-	CO2 CML: 792 / 946 See full ranking:
Ready-mix concrete, normal-strength, generic	C40/50 (5800/7300 PSI), 0% recycled binders in cement (400 kg/m3 / 24.97 lbs/ft3)		One Click LCA	-	One Click LCA	EN15804+A1, EN15804+A2	Internally verified	2018	LOCAL	ecoinvent	2400.0	EN15804+A1	-	CO2 CML: 542 / 711 See full ranking:
Ready-mix concrete, normal-strength, generic	C30/37 (4400/5400 PSI), 0% recycled binders in cement (300 kg/m3 / 18.72 lbs/ft3)		One Click LCA	-	One Click LCA	EN15804+A1, EN15804+A2	Internally verified	2018	LOCAL	ecoinvent	2400.0	EN15804+A1	-	CO2 CML: 653 / 946 See full ranking:
Reinforcement steel (rebar), generic	60% recycled content, A615		One Click LCA	-	One Click LCA	EN15804+A1	Internally verified	2018	LOCAL	ecoinvent	7850.0	EN15804+A1	-	CO2 CML: 227 / 316 See full ranking:
Structural hollow steel sections (HSS), cold rolled, generic	10 % recycled content, circular, square and rectangular profiles, S235, S275 and S355		One Click LCA	-	One Click LCA	EN15804+A1, EN15804+A2	Internally verified	2018	LOCAL	ecoinvent	7850.0	EN15804+A1	-	CO2 CML: 449 / 457 See full ranking:
Structural steel profiles, generic	60% recycled content, I, H, U, L, and T sections, S235, S275 and S355		One Click LCA	-	One Click LCA	EN15804+A1, EN15804+A2	Internally verified	2018	LOCAL	ecoinvent	7850.0	EN15804+A1	-	CO2 CML: 281 / 457 See full ranking:

Figure 8-12 - Données environnementales choisies, capture d'écran du logiciel One Click LCA

8.2.6 Validation

8.2.6.1 Résumé des calculs réalisés

Toutes les ACV réalisées dans le cadre de l'étude et leur lien avec les cycles de validation sont explicitées dans les tableaux suivants.

D'abord, le Tableau 8-7, les données utilisées (quantités et données environnementales) sont rappelées. En effet, bien que la variable « donnée environnementale » ne soit pas étudiée, le choix de cette donnée sur One Click LCA a nécessairement un impact sur le résultat.

Tableau 8-7 - Données utilisées pour chaque ACV réalisée

ACV	Données d'entrée		Cycle
	Quantités	Donnée environnementales	
ACV initiale Modèle 3D	Sur base des excels initiaux avec ratios BED Tender	Proposées par OCL	Avant cycle 1
ACV initiale Bordereau	Sur base des bordereaux		
ACV initiale Modèle 3D	Sur base des excels consolidés avec ratios BED Tender Comparaison des hypothèses	Par comparaison avec ACV existante Modèle 3D	Avant cycle 2
ACV initiale Bordereau	Sur base des bordereaux Comparaison des hypothèses	Par comparaison avec ACV existante Bordereau	
ACV initiale Modèle 3D	Après ajout de Fondation – Structural Framing et Maçonneries	Pas de modification	Avant cycle 3
ACV Niveau A	Sur base des bordereaux	Par comparaison avec ACV existante Bordereau	Avant cycle 2
ACV Niveau B	Sur base des bordereaux avec produits structurels de n° LOD 350		
ACV Niveau B'	Sur base des bordereaux avec produits structurels de n° LOD 300		
ACV Niveau A	Pas de modification	Adaptation du mapping : comparaison avec niveau C et D	Avant cycle 3
ACV Niveau B			
ACV Niveau C	Sur base des excels consolidés avec ratios généraux		

	Ratios distingués pour les sept éléments	Par comparaison avec ACV existante Modèle 3D	Avant cycle 2
ACV Niveau D	Sur base des excels consolidés avec ratios de la phase d'exécution Ratios distingués pour les sept éléments		
ACV Niveau D'	Sur base des excels consolidés avec ratios BED Tender Ratios distingués pour les sept éléments		
ACV Niveau C	Ajout Structural Framing et Maçonneries	Pas de modification	Avant cycle 3
ACV Niveau D			

Le Tableau 8-8 explique pourquoi plusieurs ACV sont réalisées. Le lien entre ces ACV et le résultat est également représenté.

Tableau 8-8 – Justification : pourquoi une autre ACV a été réalisée ?

ACV	Cycle	PRG total (kgCO2.eq)	Justification
ACV initiale Modèle 3D	Avant cycle 1	41 810 983	Première version de l'ACV → beaucoup d'oublis, hypothèses parfois fausses. Sur base des excels non consolidés. Pas de comparaison avec ACV existante, ni des quantités ni des matériaux
ACV initiale Bordereau		53 776 746	Première version de l'ACV → beaucoup d'oublis, hypothèses parfois fausses. Pas de comparaison avec ACV existante, ni des quantités ni des matériaux
ACV initiale Modèle 3D	Avant cycle 2	56 188 131	Après comparaison des quantités, hypothèses et matériaux avec ACV existante
ACV initiale Bordereau		53 776 746	Après comparaison des quantités, hypothèses et matériaux avec ACV existante
ACV initiale Revit	Avant cycle 3	57 376 272	Après ajout de Fondation – Structural Framing et Maçonneries
ACV Niveau A	Avant cycle 2	54 758 566	Première version
ACV Niveau B		55 668 438	
ACV Niveau B'	Avant cycle 2	55 499 613	
ACV Niveau A	Avant cycle 3	54 302 700	Après adaptation du mapping
ACV Niveau B		55 034 547	
ACV Niveau C	Avant cycle 2	56 155 124	Première version
ACV Niveau D		57 035 045	
ACV Niveau D'	Avant cycle 2	55 216 772	
ACV Niveau C	Avant cycle 3	58 667 725	Après adaptation du mapping
ACV Niveau D		59 204 359	Ajout de Fondation – Structural Framing et Maçonneries

8.2.6.2 Comparaison des ACV initiales lors du Cycle 1 – Modèle 3D

Pour rappel, le cycle 1 permet de comparer les ACV réalisées par BESIX avec les ACV de l'étude, réalisées dans les mêmes conditions. D'abord, les ACV réalisées à partir des modèles 3D sont comparées en détail. Comme expliqué dans le mémoire, ces différences peuvent être expliquées par des problématiques logiciel : BESIX n'a pas consolidé ses fichiers avant de les importer sur One Click LCA et donc, des données sont perdues.

Toutefois, les différences relevées entre les ACV de l'étude et de BESIX sont aussi expliquées par le fait que des hypothèses différentes sont prises lors de l'étude. D'abord, les Figure 8-13 et Figure 8-14 recensent les différences entre les quantités. Plus tard, il est également constaté l'oubli de la feuille « Structural Framing » du fichier Fondations. Ces quantités sont rajoutées aux ACV de l'étude.

	TFE	BESIX	Différence	/ tota
FLOORS				
BETON C45/55	246,5	242,9	1%	
BETON C35/45	222,8	222,8	0%	
Grave Bitume Classe 3 0i	109,1	109,4	0%	
Armature acier	91513,0	61014,1	50%	
STAIRS				
BETON C30/37	0,8	X		
COLUMNS				
BETON C40/50	72,2	X		
BETON C30/37	56,1	X		
HEA	2,2			
HEB	0,84	3,0	0%	
Armature acier	29519,5	X		
FOUNDATIONS				
BETON C45/55	57,5	57,5	0%	
BETON C35/45	57,2	57,2	0%	
BETON C40/50	9607,6	9607,6	0%	
Armature acier	2236147,3	2333371,1	-4%	
WALLS				
GRAVIER	287,2	287,2	0%	
BETON C25/30	36,3	36,3	0%	
BETON C45/55	70,7	77,4	-9%	
BETON C35/45	1,1	2,2	-48%	
BETON C40/50	5427,2	5427,2	0%	
Armature acier	597821,0	592303,8	1%	
TOTAL Hors Armatu	16255,5	16130,9	1%	
TOTAL Armatures (t)	2955000,8	2986689,0	-1%	
TOTAL BETON	16252,5	16127,9		
TOTAL ACIER (kg)	23589,0	23589,0		

Figure 8-13 - Comparaison des quantités des modèle 3D de l'étude et BESIX - Fondations

	EMMA	ELO	Différenc	/ tota
FLOORS				
BETON C35/45	32885,5	32879,9	0%	
BETON C45/55	329,4	324,2	2%	
Armature acier	4351158,2	4349735,8	0%	
STAIRS				
BETON C30/37	1032,2	485,9	112%	
COLUMNS				
BETON C80/95	4403,0	4410,5	0%	
Armatures acier	1012682,0	1014417,3	0%	
ACIER S355	31,8			
HEB260	0,08			
ACIER S275	0,64			
CHS65	0,04			
HE160A	0,15	35,6	0%	0
HE220B	0,73			
HE240B	1,51			
HEB360	0,62			
FOUNDATIONS				
BETON C45/55	5451,1	5451,1	0%	
Acier armature	1062957,3	714088,9	49%	
WALLS				
BETON C60/75	22026,5	22008,2	0%	
Armature acier	2378860,2	2376881,3	0%	
MACONNERIES BL	34,7	28,4	22%	
MACONNERIES BL	35,9	6,2	476%	
BEAMS				
BETON C35/45	7315,0	7045,4	4%	
BETON C60/75	102,6	102,6	0%	
BETON C45/55	1,1	1,1	0%	
Armatures acier	1186979,7	1143837,0	4%	
Acier	2,4			
HEA	4,3			
HEB	4,1	13,0		
IPE	2,0			
UPN	0,1		0%	0
TOTAL Hors Arm	73665,5	72792,0	1%	
TOTAL Armature:	9992637,4	9598960,2	4%	
TOTAL BETON	73616,9	72743,3		
TOTAL ACIER (kg)	379524,76	379440,99		

Figure 8-14 - Comparaison des quantités des modèle 3D de l'étude et BESIX - Structure

Les principales hypothèses pouvant expliquer ces différences sont données dans le Tableau 8-9.

Tableau 8-9 - Hypothèses comparaison ACV initiale – Modèle 3D

Problématique	Hypothèse
Quantité d'armatures différente	Ratios utilisés différents
Quantité de béton nulle pour Fondation – Escalier dans les quantités existantes de BESIX	Oubli / Volonté de BESIX ?
Feuille Fondation – Column non prise en compte dans les quantités existantes de BESIX	

8.2.6.3 Comparaison complète lors du Cycle 1 – ACV bordereau

Ensuite, les ACV réalisées à partir des bordereaux sont comparées. Les différences sont recensées dans la Figure 8-15.

	TFE	Besix	Différence	
COLUMNS				
Acier	217486,48	217486,5	0%	kg
Armatures	852980,85	852980,8	0%	kg
Béton C80/95	3708,6021	3708,602	0%	m3
FOUNDATION				
Acier	37164,77	37164,77	0%	kg
Armatures	2253554,9	2259554	0%	kg
Béton C35/45	19295,47	19295,47	0%	m3
Béton C40/50	400	0		m3
Béton C45/55	5880,337	5880,337	0%	m3
Béton de propreté	5732,85	5732,85	0%	m³
Béton projeté		253,5	-100%	m³
Coffrage des faces verticales		23,88	-100%	m³
Coffrage perdu fusible		5461	-100%	m³
Etanchéité parties courantes		5461	-100%	m³
Remblais complémentaires contre les ouvrages		0,97	-100%	m3
Coffrage des murs de fosses		577,12	-100%	m3
Soutènement	324,64	324,64	0%	m³
SLAB				
Armatures	3735090,3	3742018	0%	kg
Béton allégé	1443,864	1345,344	7%	m3
Béton C35/45	20581,266	20581,27	0%	m3
Béton C45/55	11272,136	11203,14	1%	m3
Coffrage des zones hors du calepin	0	27,35	-100%	m³
Dallage	140	140	0%	m³
Dalle flottante	6861,5	6861,5	0%	m³
DAP	9899,35	9899,35	0%	m³
Prédalles	201,4	201,4	0%	m³
STAIRS				
Armatures	28565,04	31440,78	-9%	kg
Béton C30/35	0	95,85807	-100%	m3
Béton C30/37	931,56924	238,042	291%	m3
STRUCTURAL FRAMING				
Acier	214868,12	187077,7	15%	kg
Armatures	1863758,8	1863759	0%	kg
Béton C35/45	626,0981	626,0981	0%	m3
Béton C45/55	5444,021	5444,021	0%	m3
Béton C60/75	93,9927	93,9927	0%	m3
Béton projeté	371	371	0%	m3
WALLS				
Armatures	2360310,8	2353373	0%	m3
Béton C35/45	444,88652	444,8865	0%	m3
Béton C45/55	3601,5473	3601,547	0%	m3
Béton C60/75	16674,012	16674,01	0%	m³
Maçonneries	41616,093	41616,09	0%	
TOTAL BETON (m3)	91093	89928	1%	
TOTAL BETON (m³)	64451	64705	0%	
TOTAL ACIER (kg)	469519	441729	6%	
TOTAL ARMATURES (kg)	11094261	11103126	0%	

Figure 8-15 – Comparaison des quantités des bordereaux de l'étude et de BESIX

Les différences, bien que faibles, peuvent être expliquées par le fait que certains matériaux n'aient pas été pris en compte par BESIX (Tableau 8-10).

Tableau 8-10 - Hypothèses comparaison ACV initiale - Bordereaux

Problématique	Hypothèse
Quantité de béton allégé, coulis de béton, poutres PRS, traitement acoustiques des locaux parfois nuls dans les quantités existantes de BESIX	Oubli / Volonté de BESIX ?

8.2.6.4 Données brutes issues du Cycle 2

Lors du cycle 2, une ingénieure environnement de BESIX fait ses retours sur les résultats et sur les niveaux de précision. Des modifications y sont apportées. Le Tableau 8-11 compare les niveaux de précision avant et après le cycle 2.

Tableau 8-11 - Comparaison des niveaux de précision avant et après Cycle 2

Situation initiale	Situation après cycle 2
<p>Six niveaux de précision</p> <p>Bordereau</p> <ul style="list-style-type: none"> - Béton / Acier structurel / Armatures - + produits LOD 300 - + produits LOD 350 <p>Modèle 3D</p> <ul style="list-style-type: none"> - Béton / Acier structurel / Armatures avec ratios généraux - Béton / Acier structurel / Armatures avec ratios de la phase tender - Béton / Acier structurel / Armatures avec ratios de la phase d'exécution 	<p>Quatre niveaux de précision</p> <p>Bordereau</p> <ul style="list-style-type: none"> - Béton / Acier structurel / Armatures - + produits LOD 350 <p>Modèle 3D</p> <ul style="list-style-type: none"> - Béton / Acier structurel / Armatures avec ratios généraux - Béton / Acier structurel / Armatures avec ratios de la phase d'exécution
Mapping matériau avec données génériques mais pas similaire entre ACV Modèles 3D et Bordereaux	Utilisation des mêmes matériaux entre toutes les ACV pour en faire réellement un paramètre fixe
Feuille Structural Framing oubliée dans le fichier Fondation	Quantités à prendre en compte
Maquette MACONNERIE à part	Quantités à prendre en compte

Lors de cette boucle, les matériaux sont notamment uniformisés dans l'ACV Bordereau pour correspondre à l'ACV Modèle 3D. Initialement, dans l'ACV Bordereau, des complexes de matériaux ont été choisis (par exemple pour "dalle flottante") mais étaient donc incomparables aux matériaux de l'ACV Modèle 3D. Finalement, le but est que ces deux ACV se basent sur les mêmes matériaux pour qu'elles soient comparables. Les modifications apportées aux matériaux de l'ACV Bordereau sont résumées dans Tableau 8-12.

Tableau 8-12 - Modifications apportées au mapping de l'ACV Bordereau

Problématique relevée dans l'ACV Bordereau	Modification apportée
Béton de propreté	Béton C35/45 d'épaisseur 10cm, conformément à ce qui est mentionné dans le DPGF.
Voiles par passe des murs de fosse	Béton C45/55, par comparaison avec les données du modèle (dans Fondation – Walls). Les dimensions sont calculées par défaut avec One Click LCA. En effet, le matériau choisi à l'origine était une DED correspondant à des murs de soutènement préfabriqués d'épaisseur 25 cm.
Prédalle	Les prédalles et DAP font partie des planchers, selon le DPGF. Or, dans les données Revit, on voit que tous les éléments de Structure – Floors sont en C35/45. On choisit donc ce même matériau.
DAP	
Dallage	Le dallage et le béton allégé correspondent à des épaisseurs de béton dans le plancher bas. Dans Structure – Fondation, les dalles sont en C45/55. On prend donc du C45/55.
Béton allégé	
Béton projeté	Ce béton est comparé à celui utilisé pour les “parois moulées” dans Revit, à savoir du C25/30. On choisit donc du C25/30.

8.3 Annexes - Résultats

8.3.1 Compléments sur les résultats de la validation

Le Tableau 8-13 suivant synthétise les différences entre les quantités :

- Des ACV Bordereau réalisées dans le cadre de l'étude (TFE) et des ACV Bordereau existantes réalisées par BESIX (BESIX) (1),
- Des ACV Modèle 3D réalisées dans le cadre de l'étude et des ACV Modèle 3D existantes réalisées par BESIX (2),
- Des ACV Modèle 3D et Bordereau réalisées dans le cadre de l'étude (3),
- Des ACV Modèle 3D et Bordereau réalisées par BESIX (4),
- Des quantités avant et après calcul du logiciel (5).

Dans le rapport, des problématiques logiciels sont mises en évidence (seule la ligne 5). Les autres différences sont expliquées par le fait que les hypothèses prises lors de la réalisation de ces ACV ne sont pas exactement les mêmes (comme expliqué précédemment dans les Annexes propres au Traitement des données primaires). Les différences entre les PRG totaux de ces ACV sont données à titre indicatif et sont expliquées par les différences entre les quantités, mais aussi par le choix des matériaux sur OCL qui peut être différent d'une ACV à l'autre. En effet, les matériaux renseignés sur les bordereaux et les modèles 3D ne sont pas toujours identiques.

Tableau 8-13 - Comparaison des ACV initiales

Quantités		Bordereau			Modèle 3D			Différence Bordereau / Modèle 3D	
		TFE	BESIX	Différence (1)	TFE	BESIX	Différence (2)	TFE (3)	BESIX (4)
Avant import sur OCL	Béton (m3)	91093	89928	1%	98978	88871	11%	2%	8%
	Béton (m2)	64451	64705	0%					
	Acier (kg)	469519	441729	6%	418924	403030	4%	12%	10%
	Armatures (kg)	110942 61	1110312 6	0%	1333013 0	1258564 9	6%	- 17%	-12%
Après export sur OCL	Béton (m3)	90769	87758	3%	98978	83721	18%	1%	5%
	Béton (m2)	64451	64311	0%					
	Acier (kg)	469519	441729	6%	418899	397885, 8	5%	12%	11%
	Armatures (kg)	110942 61	1110696 0,03	0%	1332947 0	1071948 6	24%	- 17%	4%
Différence (5)	Béton (m3)	0%	2%		0%	6%			
	Béton (m2)	0%	1%						
	Acier (kg)	0%	0%		0%	1%			
	Armatures (kg)	0%	0%		0%	15%			
PRG (kgCO2.eq)		54 758 566	50 407 473	9%	57 376 272	48 791 584	18%	-5%	3%

8.3.2 Comparaison des bordereaux et des modèles 3D

Les quantités issues des bordereaux et des modèles 3D sont comparées. Quelques résultats sont déjà présentés dans le rapport. Notamment, on recense plus d'armatures avec les modèles 3D mais moins de béton. Les quantités détaillées sont données dans le Tableau 8-14. Dans ce tableau, **les quantités de béton sont données en m³, d'acier en kg et d'armatures en kg.**

Diminution avec les modèles 3D

Augmentation avec les modèles 3D

Tableau 8-14 - Comparaison des quantités et PRG entre bordereaux et modèle 3D, par lot, par matériau

Bordereaux			3D			Différence Modèle 3D - Bordereau	
Matériau	Quantités	PRG (tCO2eq)	Matériau	Quantités	PRG (tCO2eq)	Quantités	PRG (tCO2eq)
LOT GROS ŒUVRE							
Total	11635614	53964		14430644	57574	0,00E+00	3610
Armatures	11065690	15135		14334954	19724	3,27E+06	4589
Acier	469518	1007		51	897	-4,69E+05	-110
Béton	100406	37822		95639	36954	-4,77E+03	-869
FONDATIONS							
Béton	19152	6536	Béton	5451	2255		
Béton	55	19	Armatures	1008446	1379		
Béton	87	30	Béton	9607	4006		
Béton	5880	2433	Béton	57	24		
Béton	400	167	Béton	57	20		
Armatures	1144470	1565	Armatures	2363475	3232		
Armatures	63037	86	Armatures	21229	29		
Armatures	9768	13	Acier	2	34		
Armatures	15768	22					
Armatures	1.020.510	1396	Béton	99	41		
Acier	37164	80	Béton	35	0,56		
Béton	5,2	1,8	Armatures	705219	964		
Béton	21,9	7,5	Béton C45	246	102		
Béton	546,1	186	Béton C35	222	76		
Béton	81	31	Armatures	86820	119		
Total	2316945	12573		4200965	12282		-292
Armatures	2253553	3082		4185189	5723	1,93E+06	2641
Acier	37164	80		2	34	-3,72E+04	-46
Béton	26228	9411		15774	6525	-1,05E+04	-2887
MURS							

Béton C60	1159	596	Béton C60	4060	2088		
Béton C60	15514	7978	Béton C60	17965	9239		
Béton C45	3601	1490	Maconnerie s creuses	35	1		
Béton C35	444	152	Maconnerie s creuses	34	1		
Armatures	684767	937	Armatures	426361	583		
Armatures	1675542	2292	Armatures	581214	795		
Maconneries creuses	7074,72	383	Armatures	1886419	2580		
			Béton C40	5427	2263		
			Graviers	287	4		
			Béton C60	70	29		
			Béton C25	36	11		
			Béton C35	1	0,4		
			Maconnerie s creuses	3459	159		
			Maconnerie s pleines	2272	114		
Total	2388102	13828		2927640	17867		4039
Armatures	2360309	3229		2893994	3958	5,34E+05	729
Acier							
Béton	27793	10599		33646	13909	5,85E+03	3310
OSSATURE							
Béton C60	3578	1840	Béton C60	4246	2183		
Béton C60	129	67	Béton C60	156	81		
Armatures	823153	1126	Acier	8	138		
Armatures	29827	41	Acier	23	394		
Acier	217486	463	Acier	1	25		
Béton C35	24,12	7	Acier	0,7	12		
Béton C45	21	7	Acier	0,6	11		
Béton C35	4826	1647	Acier	0,6	10		
Béton C35	15755	5377	Acier	0,1	2,5		
Béton C45	390	161	Acier	0,08	1,3		
Béton C45	10813	4473	Acier	0,04	1,3		
Béton C45	69	29	Armatures	1044535	1429		
Béton C45	5444	2252	Armatures	38593	53		
Béton C35	626	214	Béton C40	72	30		
Béton C35	371	108	Béton C30/37	56	18		
Béton C45	93	48	Acier	2	36		
Armatures	580765	794	Acier	0,8	14		
Armatures	3154325	4314	Armatures	31572	43		
Armatures	1863758	2549	Béton C60	396	204		
Acier	214868	464	Béton C35	32885	11222		
Béton C45	1443	586	Béton C35	7314	2496		

Béton C35	1979,8	676	Béton C45	329	136		
C20	823,32	320	Béton C45	102	53		
			Acier	4	72		
			Acier	4	68		
			Acier	2	34		
			Béton C45	1	0,44		
			Acier	0,1	2,5		
			Armatures	2188493	2993		
			Armatures	3952578	5406		
			Graviers	109	1,7		
			Acier	2	41		
			Béton C20	526	204		
			Béton C35	27	9,4		
Total	6930567	27563		7302039	27425		-138
Armatures	6451828	8824		7255771	10043	8,04E+05	1219
Acier	432354	927		49	863	-4,32E+05	-64
Béton	46385	17812		46219	16520	-1,66E+02	-1292

8.3.3 Comparaison des ratios calculés avec les bordereaux et des ratios généraux

Dans le rapport, les ratios calculés avec les bordereaux sont comparés aux ratios généraux, donnés par BESIX. La partie suivante explique les différences entre ces deux ratios.

Pour rappel, les ratios sont définis de la manière suivante :

$$Ratio = \frac{Quantité\ d'armatures}{Quantité\ de\ béton}$$

Ainsi, pour un même ratio, si la quantité de béton diminue, la quantité d'armatures devrait diminuer aussi. Les quantités de béton diminuent entre les bordereaux et les modèles 3D. Pourtant, les quantités d'armatures augmentent. Il y a donc un problème avec les ratios. Les ratios correspondant aux bordereaux sont différents des ratios correspondant aux modèles 3D.

- Pour l'ACV réalisée avec les modèles 3D, les ratios généraux sont utilisés. Ils sont appliqués à la quantité de béton issue du modèle 3D. Les **quantités d'armatures** sont donc déduites.

$$Ratio\ généraux = \frac{Quantité\ d'armatures}{Quantité\ de\ béton\ issue\ du\ modèle\ 3D}$$

- Pour l'ACV réalisée avec les bordereaux, les quantités sont calculées en additionnant les lignes correspondant dans les bordereaux. Elles ne sont donc pas calculées grâce aux ratios. Les quantités de béton sont également calculées grâce au bordereau. Afin d'identifier le problème, des **ratios** sont déduits de ces quantités.

$$Ratio\ bordereaux = \frac{Quantité\ d'armatures\ calculée\ grâce\ aux\ bordereaux}{Quantité\ de\ béton\ calculée\ grâce\ aux\ bordereaux}$$

8.3.4 Résultats par élément

Pour chacun des sept éléments sélectionnés, les quantités de produits structuraux et non structuraux sont calculées, ainsi que leurs impacts. Tous ces résultats sont recensés dans la suite.

8.3.4.1 Radier et dalles contre sol

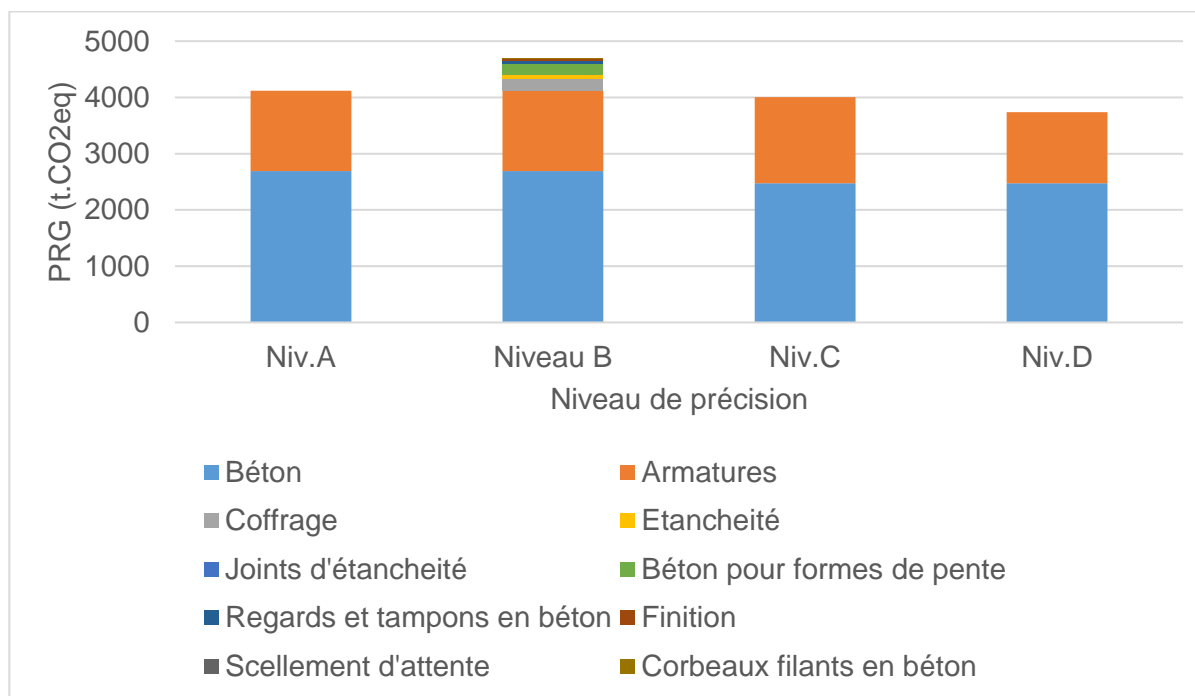


Figure 8-16 - PRG des différents produits des radiers et dalles, pour chaque niveau de précision

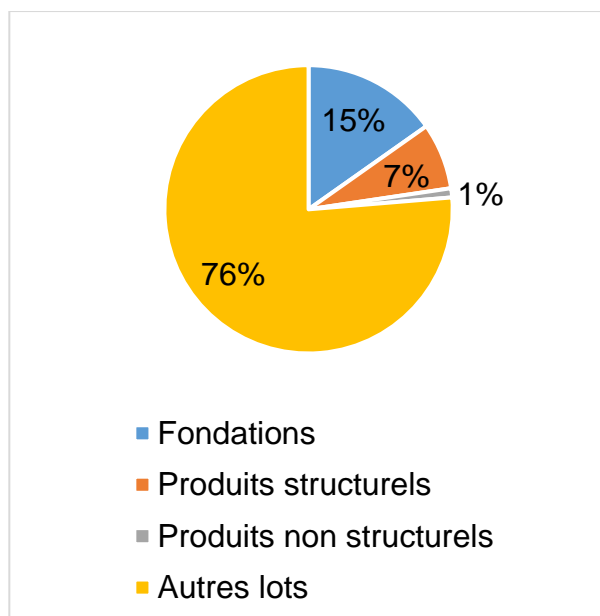


Figure 8-17 – Répartition du PRG du Gros Œuvre (radier et dalles)

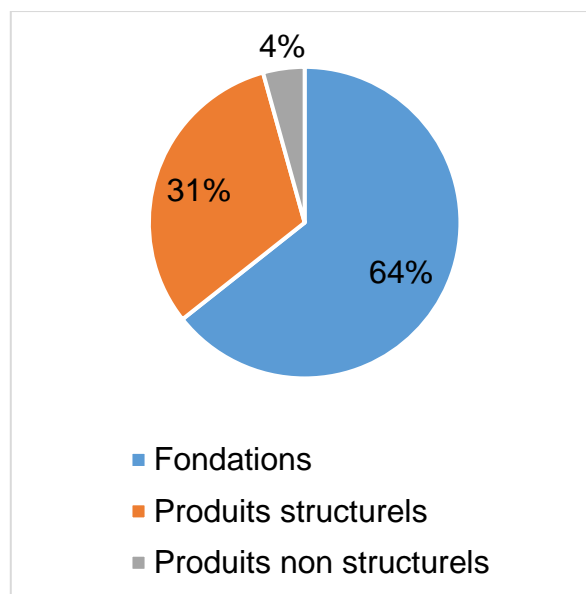


Figure 8-18 - Répartition du PRG du sous-lot fondations (radier et dalles)

8.3.4.2 Voiles du noyau

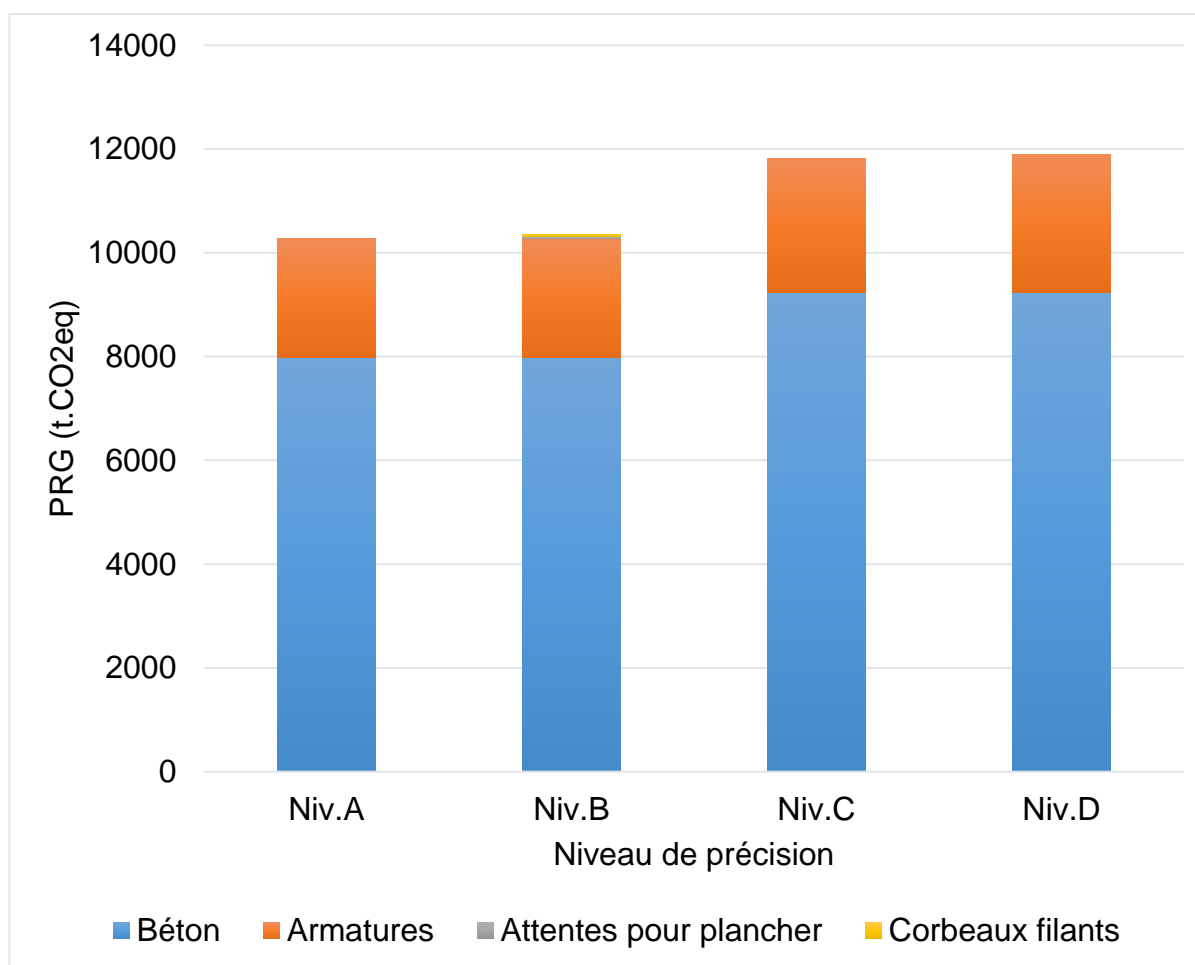


Figure 8-19 - PRG des différents produits des voiles du noyau, pour chaque niveau de précision

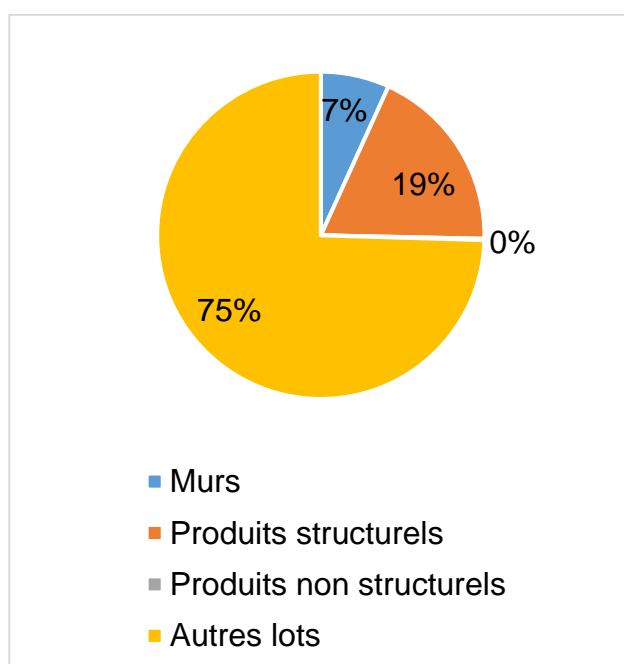


Figure 8-20 – Répartition du PRG du Gros Œuvre (voiles du noyau)

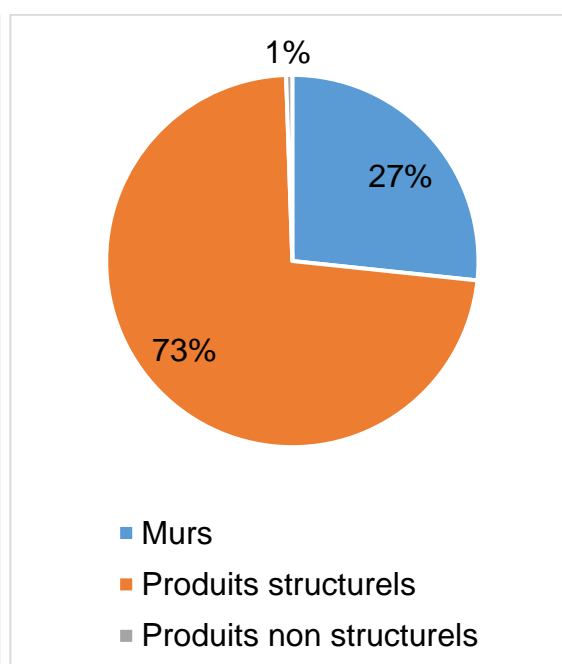


Figure 8-21 - Répartition du PRG du sous-lot murs (voiles du noyau)

8.3.4.3 Poteaux mixtes acier-béton

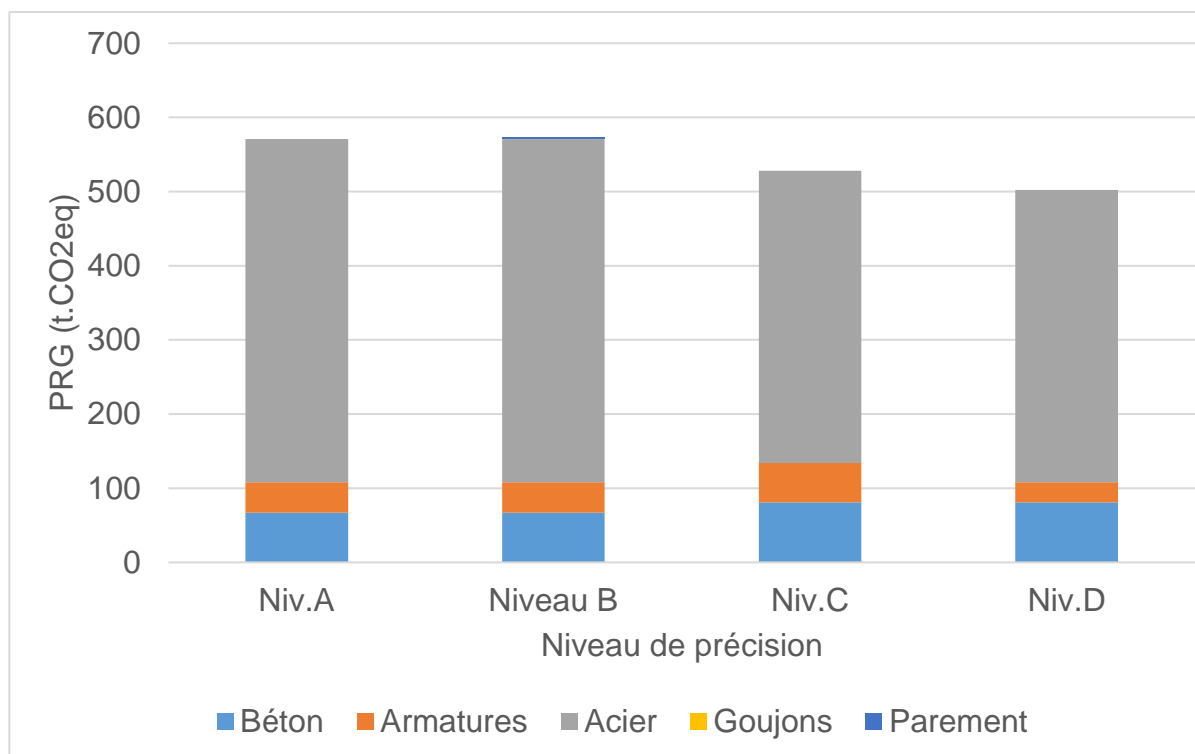


Figure 8-22 - PRG des différents produits des poteaux mixtes acier-béton, pour chaque niveau de précision

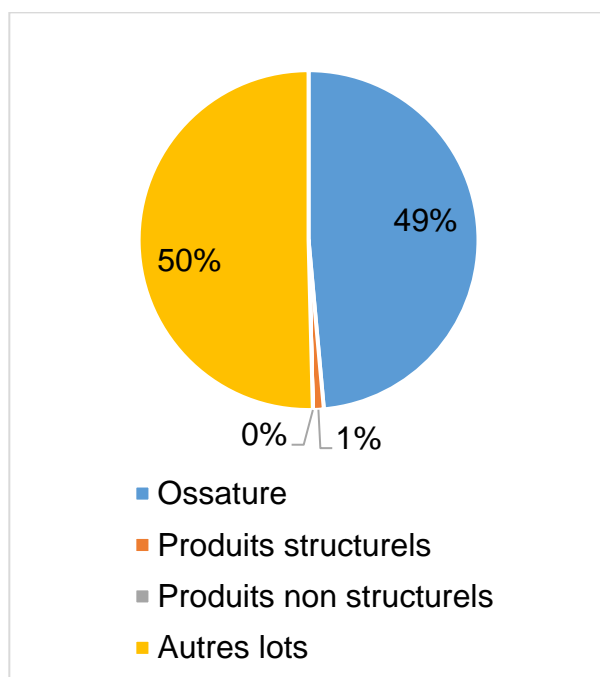


Figure 8-23 - Répartition du PRG du Gros Œuvre (poteaux mixtes acier-béton)

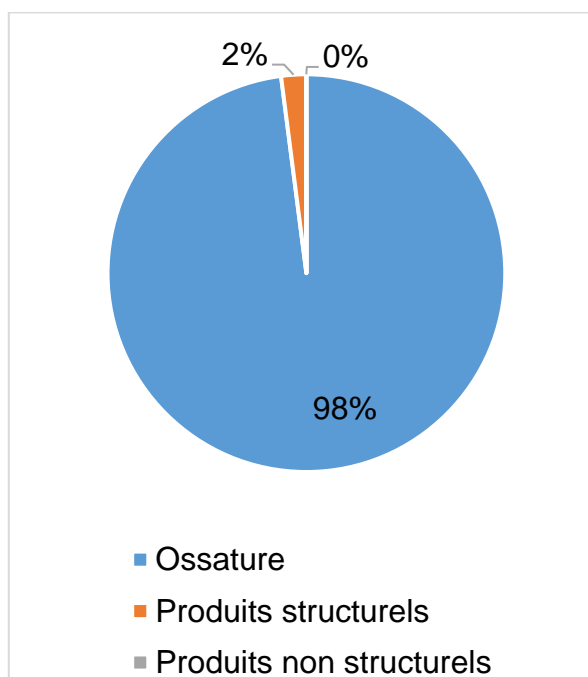


Figure 8-24 - Répartition du PRG du sous-lot ossature (poteaux mixtes acier-béton)

8.3.4.4 Maçonneries

Les enduits et joints, produits non structurels, représentent 34% du PRG total. Or, le PRG des maçonneries est lui-même assez faible. Dans un élément composé de béton coulé, les enduits et les joints auraient sûrement eu moins de poids.

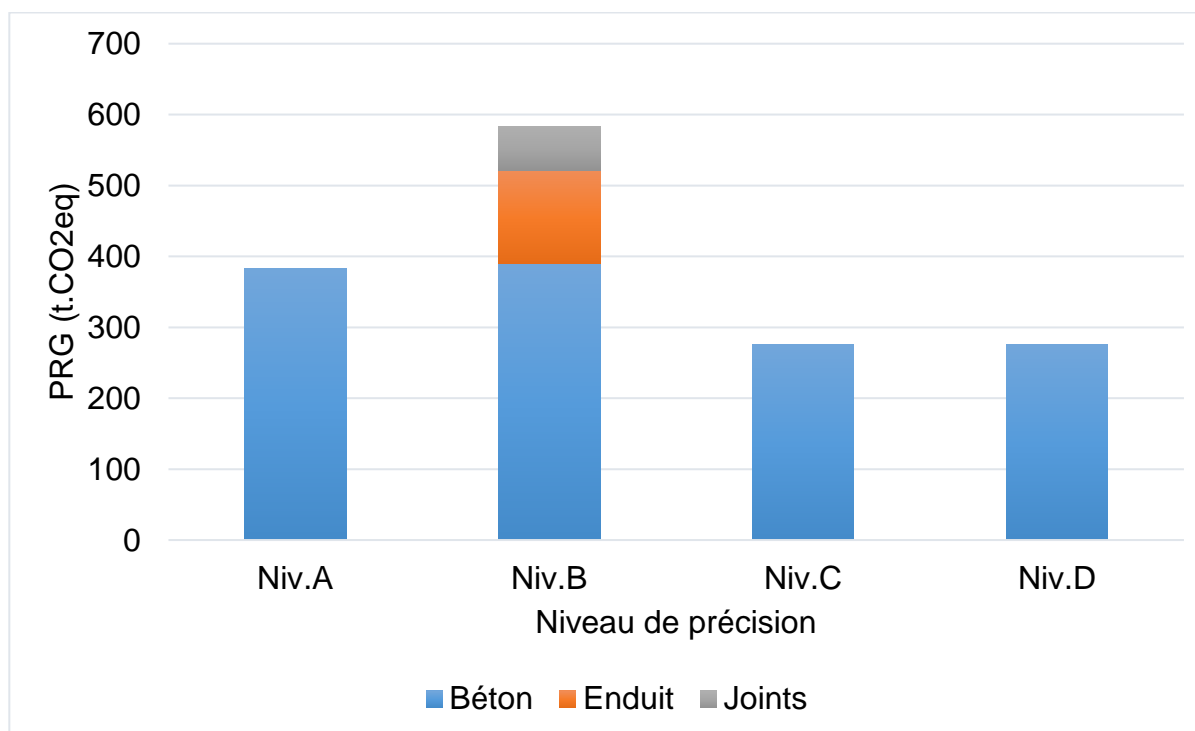


Figure 8-25 - PRG des différents produits des maçonneries, pour chaque niveau de précision

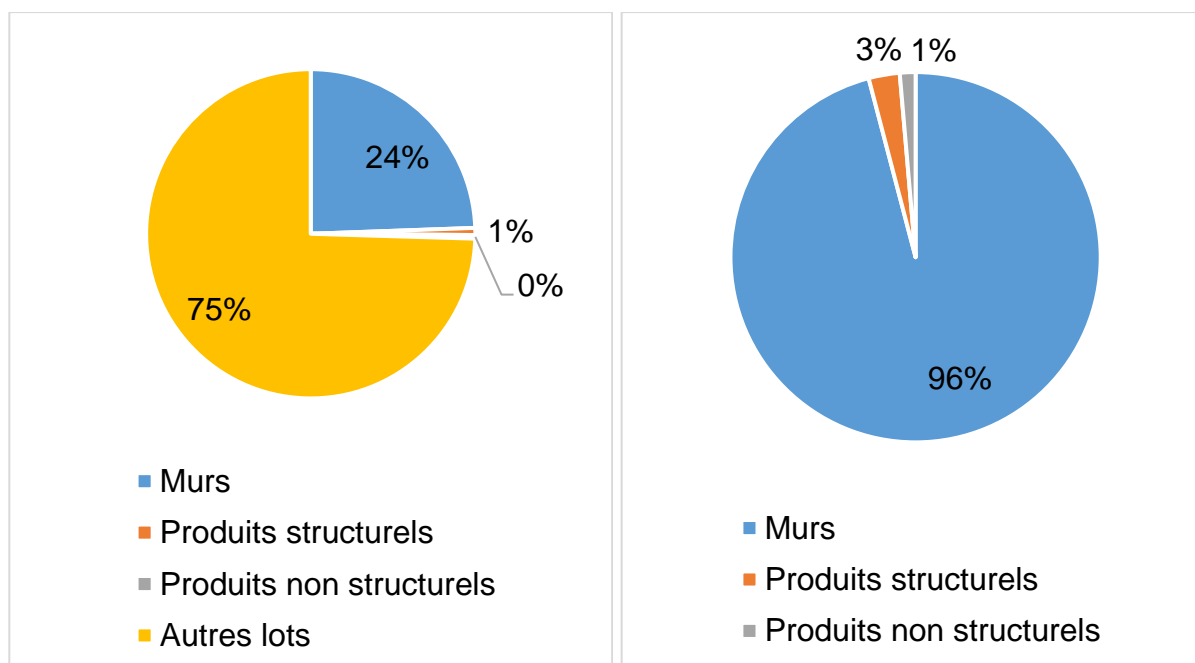


Figure 8-26 - Répartition du PRG du Gros Œuvre (maçonneries)

Figure 8-27 - Répartition du PRG du sous-lot murs (maçonneries)

8.3.4.5 Dalles hors noyau

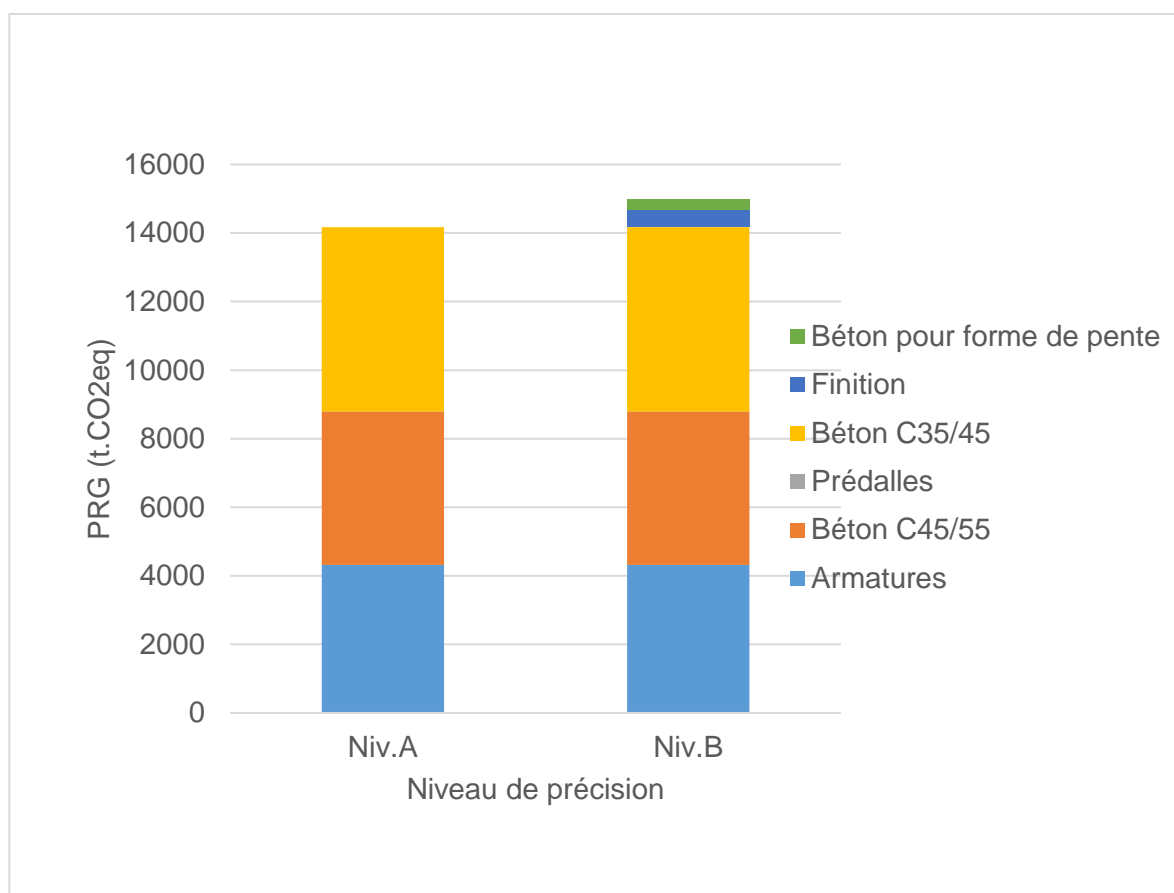


Figure 8-28 - PRG des différents produits des dalles hors noyau, pour chaque niveau de précision

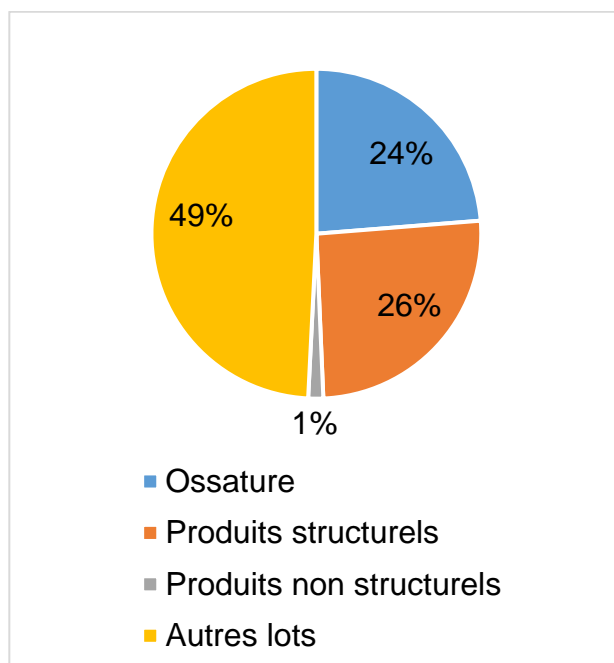


Figure 8-29 - Répartition du PRG du Gros Œuvre (dalles hors noyau)

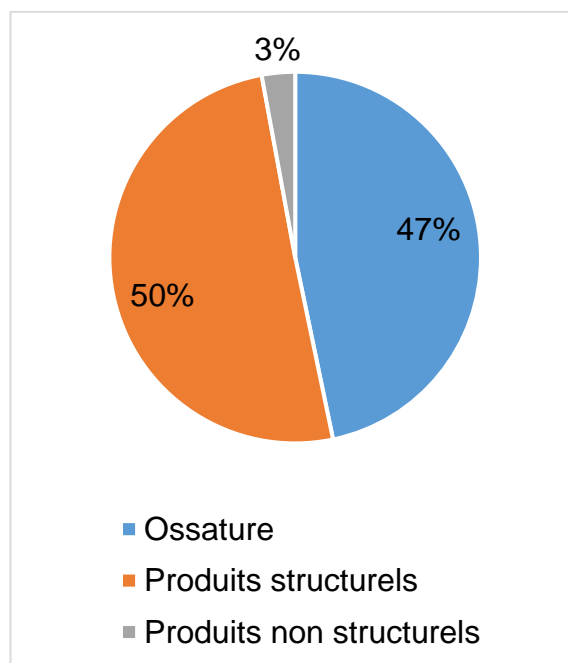


Figure 8-30 - Répartition du PRG du sous-lot ossature (dalles hors noyau)

8.3.4.6 Traitement des locaux techniques

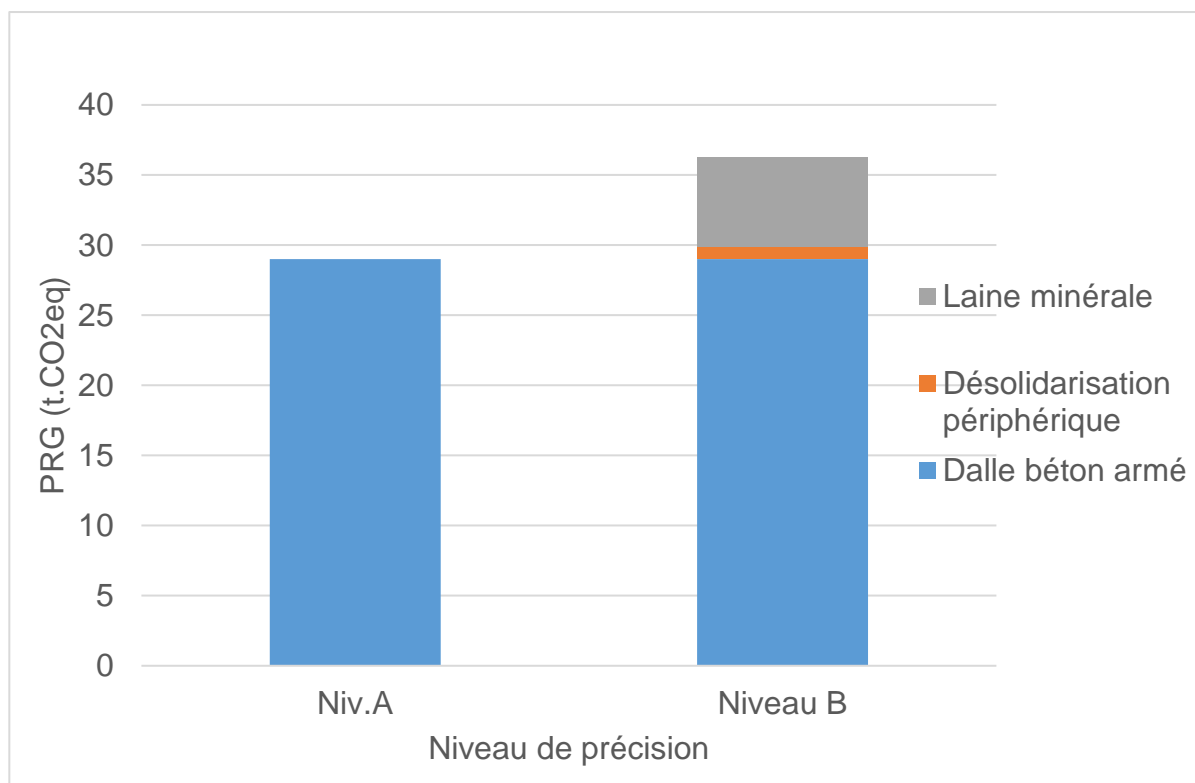


Figure 8-31 - PRG des différents produits des traitements des locaux techniques, pour chaque niveau de précision

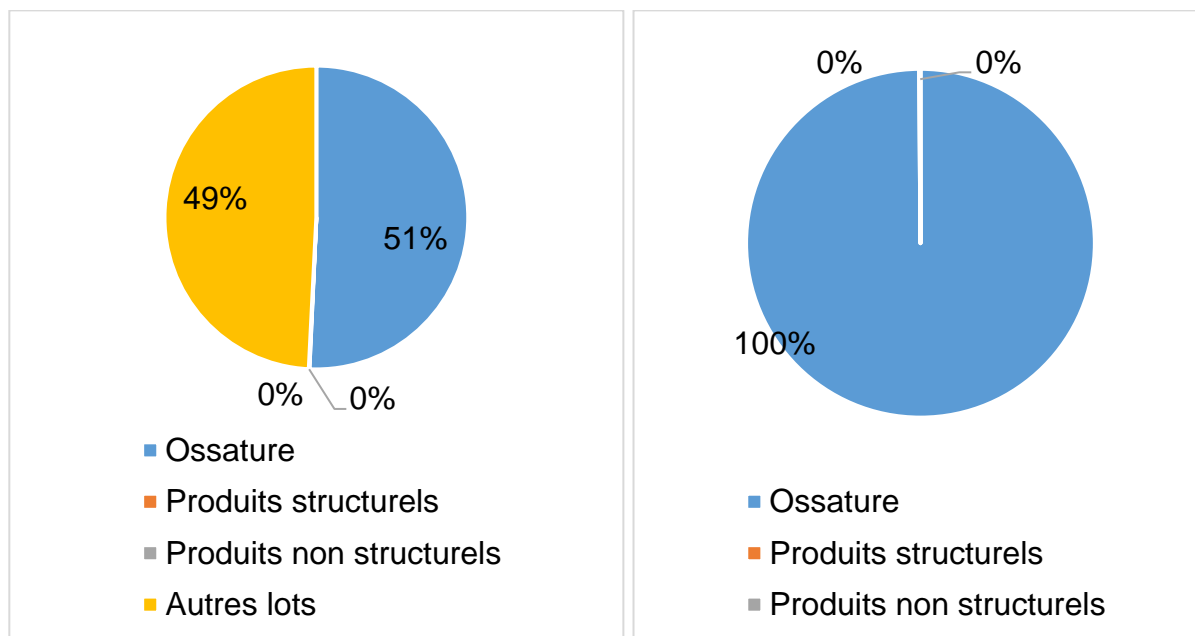


Figure 8-32 - Répartition du PRG du Gros Œuvre (traitement des locaux techniques)

Figure 8-33 - Répartition du PRG du sous-lot ossature (traitement des locaux techniques)

8.3.4.7 Micro-berlinoises

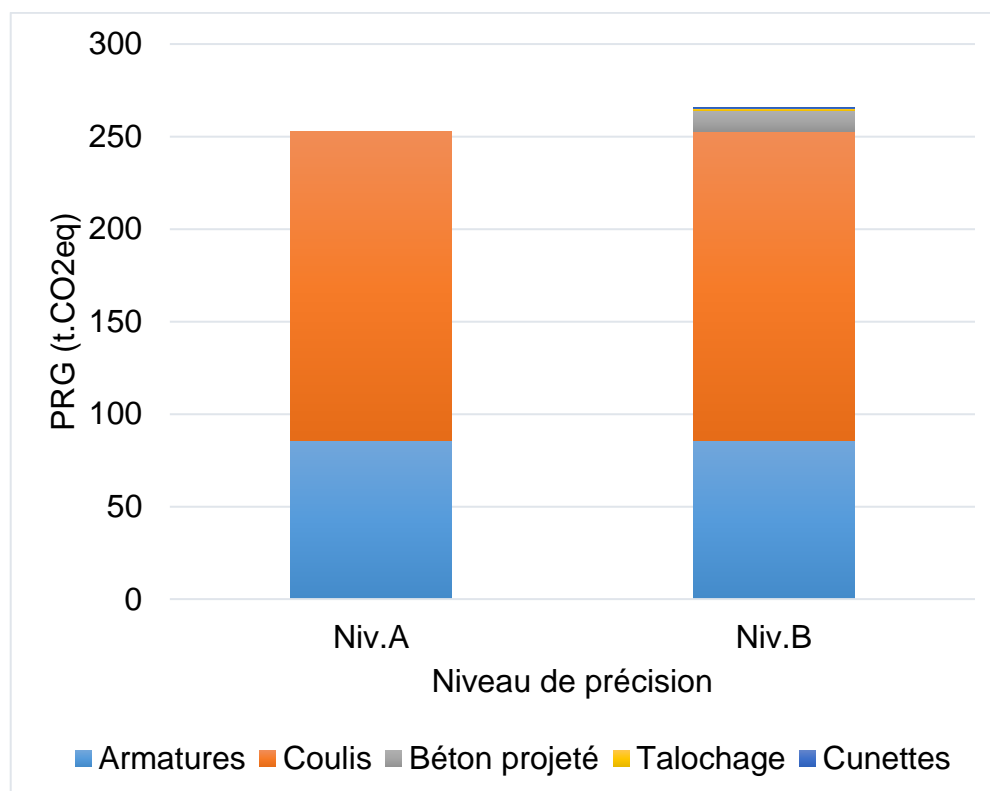


Figure 8-34 - PRG des différents produits des micro-berlinoises, pour chaque niveau de précision

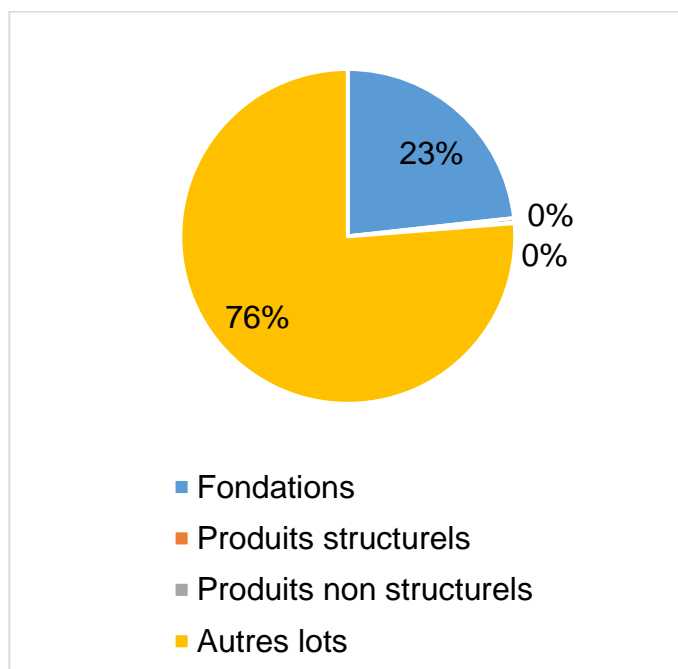


Figure 8-35 - Répartition du PRG du Gros Œuvre (micro-berlinoises)

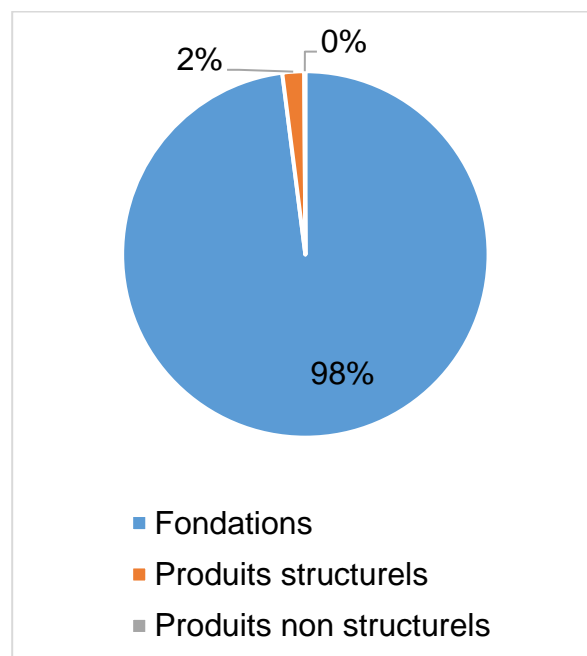


Figure 8-36 - Répartition du PRG du sous-lot fondations (micro-berlinoises)

8.4 Poster



Analyse du Cycle de Vie en phase conception : influence de l'estimation des quantités sur la précision du calcul

Authors: Emma Castagné

E-mail: Emma.castagne@student.uliege.be
Address: Sustainable Building Design Lab
Quartier Polytech 1
Allée de la Découverte 9
4000 Liège, Belgium
www.sbd.ulg.ac.be
Tel: +32 43.66.91.55
Fax: +32 43.66.29.09

RÉSUMÉ

Le but du travail est de faciliter l'estimation des quantités de produits lors de la réalisation de l'Analyse en Cycle de Vie (ACV), en déterminant l'influence de ces estimations sur la précision du calcul. Cette étude se fait aux différentes phases de conception. Quatre méthodologies sont mises en place pour collecter les données et ainsi, quatre ACV sont réalisées. Les résultats donnent une comparaison de ces méthodologies en matière de précision, temps investi, données et outils nécessaires. Ils permettent aux concepteurs de choisir la méthodologie la plus adaptée à leurs besoins. Ainsi, l'étude contribue à rendre l'ACV plus accessible lors des phases de conception.

MOTS-CLÉS

France, RE 2020, données, gros œuvre, impacts environnementaux, réchauffement climatique, potentiel de réchauffement global, One Click LCA

PROBLÉMATIQUE

Depuis peu, certains pays réglementent les impacts sur le réchauffement climatique et imposent un calcul d'ACV. En phase de conception, les quantités de produits sont encore incertaines. Les estimer peut être délicat pour les concepteurs. Dans la littérature, plusieurs études se penchent sur la question. Des travaux tentent de proposer des solutions pour simplifier la collecte des données nécessaires à l'ACV. Toutefois, ces études ne proposent pas de synthèse à destination des concepteurs, leur permettant de comparer rapidement les différentes méthodologies possibles.

HYPOTHÈSES / OBJECTIFS

Pour un cas d'étude de BESIX, le Gros Œuvre de la Tour Triangle, les objectifs sont de :

- Définir les différentes données disponibles pour estimer les quantités, en phase de conception
- Quantifier l'influence de l'estimation de ces quantités sur le potentiel de réchauffement global (PRG)
- Synthétiser les résultats grâce à des tableaux qui comparent les méthodologies (temps à investir, précision obtenue, fiabilité des résultats...)

AUDIENCE

Concepteurs de bâtiment (architectes, ingénieurs)
Communauté scientifique

QUESTIONS DE RECHERCHE

1. Quelles sont les exigences réglementaires liées au PRG des bâtiments en France ?
2. Comment la fiabilité des données influence la précision des calculs du PRG ?
3. Comment la complétude des données l'influence-t-elle ?
4. Comment intégrer les résultats de l'étude dans la pratique ?

VALEUR AJOUTÉE

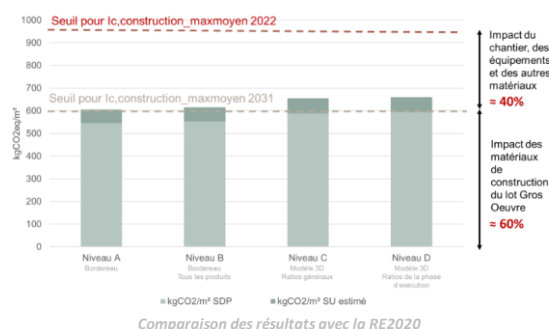
Les "niveaux de précision" définis dans l'étude permettent de schématiser les différents choix qui se présentent aux concepteurs, en matière de données à utiliser pour l'ACV (source des données et complétude des données notamment). Les méthodologies ont été mises en place en entreprise, en condition réelle : elles sont réalistes et concrètes. De plus, les résultats ont été comparés à la RE2020.

MÉTHODOLOGIE

Quatre méthodologies sont mises en place pour la collecte des données (« niveau de précision ») et ainsi, quatre ACV sont réalisées et comparées. Pour deux ACV, les quantités de béton et d'acier sont collectées grâce aux modèles 3D. Les quantités d'armatures sont alors calculées grâce à des ratios de la quantité de béton. Pour deux autres ACV, les quantités de béton, d'acier et d'armatures sont calculées grâce aux bordereaux. Pour l'une d'entre elles, les autres produits de construction sont également considérés. Les PRG sont calculés via One Click LCA.

RÉSULTATS

L'étude montre que toutes les méthodologies donnent le même ordre de grandeur des impacts, soit 50 000 tCO_{2eq}. Les ACV réalisées avec les modèles 3D donnent des résultats plus bas qu'avec les bordereaux (-1%) et sont plus rapides. Toutefois, les données sont sujettes à la perte de données sur One Click LCA (jusqu'à 18% de pertes). Réaliser une ACV à l'aide des bordereaux est plus long mais plus fiable. En plus, en prenant en compte les produits non structurels, les résultats de l'ACV peuvent gagner jusqu'à 3% de précision. Les résultats sont finalement mis en parallèle avec la RE2020. Le Gros Œuvre de la Tour Triangle représente 60% du seuil de 2021 :



Ces résultats sont synthétisés sous forme de recommandations aux concepteurs. Le choix de la méthodologie dépend de l'objectif. Les modèles 3D et les ratios peuvent être utilisés pour obtenir rapidement un ordre de grandeur des impacts du bâtiment et comparer la pertinence d'une optimisation. Les bordereaux peuvent être utilisés pour calculer précisément les impacts de tous les produits du bâtiment.

CONCLUSION

L'étude permet de comparer différentes stratégies pour la collecte des données, en matière de temps investi et de précision obtenue. Elle contribue à faciliter le choix de la méthodologie à adopter par les concepteurs et à simplifier l'intégration de l'ACV lors des phases de conception.

PRINCIPALES RÉFÉRENCES

- Weidema, B. P., & Wesnæs, M. S. (1996). Data quality management for life cycle inventories—An example of using data quality indicators. *Journal of Cleaner Production*, 4(3), 167-174. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(96\)00043-1](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(96)00043-1)
- Cabassud, N. (s. d.). *Guide RE2020, réglementation environnementale. Eco - construire pour le confort de tous*.