

Travail de fin d'études / Projet de fin d'études : Étude du potentiel d'intégration de l'ACV des bâtiments en écoconception au stade de l'avant-projet grâce à des ACV simplifiées

Auteur : Van Wonterghem, Cyril

Promoteur(s) : Reiter, Sigrid

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/2268.2/17750>

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

Étude du potentiel d'intégration de l'ACV des bâtiments en écoconception au
stade de l'avant-projet grâce à des ACV simplifiées

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de Master
Ingénieur Civil en Architecture par **Cyril Van Wonterghem**

Promotrice : Sigrid Reiter

Membres du jury : Aurélie de Boissieu et Shady Attia

Année académique 2022-2023

Je souhaite tout d'abord exprimer ma profonde gratitude envers ma promotrice, Madame Sigrid Reiter. Son suivi rigoureux, ses conseils enrichissants, ainsi que son engagement infailible en termes de temps, d'organisation et d'écoute ont été essentiels à la réalisation de ce travail. Je lui suis sincèrement reconnaissant pour son soutien indéfectible. J'aimerais également adresser mes remerciements à Madame Aurélie de Boissieu et Monsieur Shady Attia, membres du jury, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et pour le temps qu'ils consacreront à la lecture de ce mémoire.

Je souhaite accorder une mention spéciale à ma sœur, Eva Van Wonterghem, qui a joué un rôle inestimable dans l'aboutissement de ce mémoire. Sa présence inconditionnelle, son encouragement au quotidien, ainsi que son regard extérieur ont été une réelle source d'inspiration et de persévérance.

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance envers toutes les autres personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail de fin d'études.

Résumé

L'analyse en cycle de vie des bâtiments est une méthode d'évaluation de performance environnementale mondialement reconnue dont l'intérêt est à ce jour incontestable. Toutefois, l'utilisation de cet instrument n'est pas encore généralisée à cause de sa complexité. Pour y répondre, les analyses en cycle de vie ont été simplifiées de diverses manières. Il existe cependant peu de directives et aucune norme pour encadrer et définir clairement les outils qui en résultent.

L'objectif principal de ce mémoire est d'évaluer la pertinence des **méthodes d'analyse en cycle de vie simplifiées de bâtiments** pour une utilisation en écoconception au stade de l'avant-projet. Pour ce faire, cette étude commence par redéfinir clairement la notion d'analyse en cycle de vie simplifiée à l'aide d'une revue de la littérature, synthétisant et discutant les principaux résultats de recherche dans ce domaine. Une recherche supplémentaire a également été menée sur l'évolution du processus de conception, et plus particulièrement du type de données disponibles à différentes phases de conception. À la fin de cet état de l'art, une nouvelle typologie des simplifications des analyses en cycle de vie est également proposée pour compléter cette définition.

Ensuite, une évaluation est faite à travers une **étude comparative** des résultats d'analyses en cycle de vie simplifiées et des résultats d'une analyse en cycle de vie complète, obtenus sur un même cas d'étude. L'étude de cas choisie est la résidence Arola, un immeuble à appartements belge situé dans l'écoquartier du Sart-Tilman achevé en 2018, dont une analyse en cycle de vie complète a été réalisée a posteriori, dans un mémoire de master de Charline Malmedy (2020). Ainsi, il est possible de comparer le niveau de détails nécessaire et la précision des résultats des méthodes d'analyse en cycle de vie simplifiées avec ceux de la méthode complète pour une référence fiable et documentée.

Enfin, à partir des résultats de l'état de l'art, une seconde étude propose de reconstituer l'évolution du processus de conception du projet étudié afin de tester les analyses en cycle de vie simplifiées selon un état intermédiaire de conception. Cela a permis d'analyser, pour ce cas d'étude, le potentiel d'intégration des différentes méthodes d'ACV simplifiées en tant qu'outil d'aide à la conception.

Abstract

Life cycle analysis of buildings is a worldwide recognized method for evaluating environmental performance, whose importance is currently undeniable. However, the use of this tool is not yet widespread due to its complexity. As a response, various simplifications have been applied to life cycle analyses, but there are few guidelines and no standards to frame and clearly define the resulting tools.

The main objective of this master thesis is to evaluate the relevance of **simplified life cycle analysis methods** for buildings, specifically in eco-design at the preliminary design stage. This study begins by clearly redefining the concept of simplified life cycle analysis through a literature review that synthesizes the main research results in this field. Additional research has also been conducted on the evolution of the design process, focusing on the type of data available at different design phases. At the end of this state-of-the-art analyses, a new typology of life cycle analysis simplifications is also presented to complete this definition.

Subsequently, the evaluation has been conducted through a **comparative study** of the results obtained from simplified life cycle analyses and those from a complete life cycle analysis, using the same case study. The chosen case study is the Résidence Arola, a Belgian apartment building located in the écoquartier du Sart-Tilman, completed in 2018, for which a complete life cycle analysis has been conducted in Chaline Malmedy's master's thesis (2020). Then, it is possible to compare the level of detail required and the accuracy of the results between simplified life cycle analysis methods and the complete method, providing a reliable and documented reference.

Finally, based on the results of the state-of-art analysis, a second study proposes to reconstruct the evolution of the design process for the chosen case study, in order to evaluate the simplified life cycle analyses based on an intermediate design stage. This has enabled to analyze the integration potential of different simplified life cycle analysis methods as design support tool for this specific case study.

Table des matières

1.	Introduction.....	1
1.1	Sujet et contexte	1
1.2	Problématique et intérêt de la recherche.....	2
1.2.1	Complexité de l'ACV	2
1.2.2	Paradoxe de l'écoconception	4
1.3	Objectifs.....	5
1.4	Questions de recherche	6
1.5	Structure et méthodologie de l'étude.....	6
2.	État de l'art.....	8
2.1	Cadre réglementaire général.....	8
2.1.1	Normes internationales.....	9
2.1.2	Normes belges (européennes)	9
2.1.3	Autres références	10
2.2	Définitions	11
2.2.1	ACV générale	11
2.2.2	ACV complète des bâtiments	12
2.2.3	ACV simplifiée des bâtiments.....	17
2.3	Modes de simplifications d'une ACV	24
2.4	Typologies d'ACV simplifiées.....	29
2.4.1	Typologies par mode de simplification	30
2.4.2	Typologies par stratégie de simplifications	31
2.4.3	Typologie « detailed – simplified – screening »	32
2.5	Phases du processus de conception.....	34
2.5.1	Interaction avec le processus d'écoconception	34
2.5.2	Types de données produites aux différents stades de développement du projet	34
2.6	Synthèse et réflexion personnelle sur l'état de l'art	37
2.6.1	Un problème de définition	37
2.6.2	Distinguer la démarche de l'outil	38
2.6.3	La frontière entre l'ACV complète et l'ACV simplifiée	39
2.6.4	Limites des phases de conception établies	40
2.6.5	Critique des modes de simplifications et typologies existantes	41
2.6.6	Proposition d'une nouvelle typologie des ACV simplifiées	42

3.	Méthodologie	46
3.1	Description de la méthodologie	46
3.1.1	Description et choix des méthodes d'ACV utilisées	50
3.1.2	Description du cas d'étude	56
3.1.3	Hypothèses et scénarios de modélisation.....	57
3.1.4	Élaboration des grilles pour les trois analyses.....	66
4.	Résultats	71
4.1	Analyse générale et fonctionnelle des outils simplifiés	71
4.1.1	Tableau comparatif des 3 outils	71
4.1.2	Schéma de simplification des trois outils d'ACV utilisés	73
4.1.3	Lien avec la typologie « detailed – simplified – screening »	74
4.1.4	Discussion de l'analyse générale et fonctionnelle	75
4.2	Analyse quantitative des résultats	78
4.2.1	Résultats pour le scénario du projet « fini »	78
4.2.2	Discussion de l'analyse quantitative	82
4.3	Analyse qualitative des résultats.....	85
4.3.1	Résultats pour le scénario à une phase intermédiaire de conception.....	85
4.3.2	Analyse qualitative du point de vue utilisateur.....	87
5.	Discussion	92
5.1	Analyse croisée : retour sur l'état de l'art et résultats des trois analyses	92
5.2	Forces et faiblesses des ACV simplifiées pour le cas étudié.....	93
5.3	Autocritique.....	95
5.3.1	Atouts et critiques du cas d'étude choisi	95
5.3.2	Limites de la recherche	96
5.3.3	Caractère innovant de l'étude et des résultats produits	97
5.3.4	Suggestions et ouvertures.....	98
6.	Conclusion	100
	Bibliographie.....	i
	Figures et tableaux	vii
	Remarque : les annexes ne sont pas intégrées au présent document.	

1. Introduction

1.1 Sujet et contexte

À l'heure actuelle, il y a un consensus généralisé dans la littérature quant à l'impact considérable du secteur du bâtiment sur l'environnement (Zabalza et al., 2009 ; Salmon et al., 2011 ; Roberts et al., 2020 ; Decorte et al., 2021). En effet, ce secteur contribue à environ 37% des émissions de gaz à effet de serre (GES) mondiales, comme montré en vert sur la *figure 1* ci-dessous (United Nations Environment Programme, 2021). En Europe, il représente à peu près 40 % de la consommation totale d'énergie (Zabalza et al., 2009). Il est également responsable d'une partie significative de l'épuisement des ressources, l'eutrophisation des rivières, l'acidification des pluies et d'autres impacts qui compromettent la capacité des générations futures à répondre à leurs besoins (Trocmé & Peuportier, 2008).

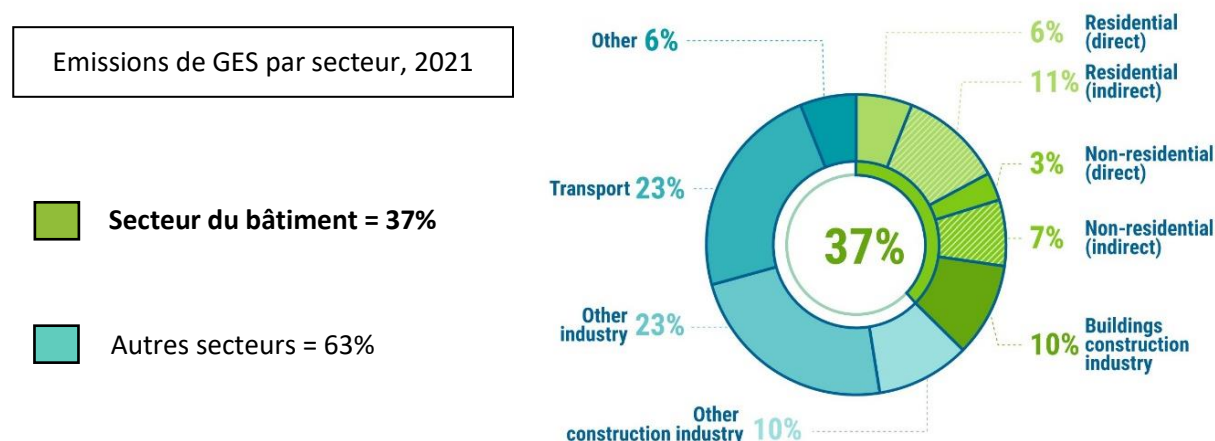


Figure 1 : Émissions de GES par secteur, 2021 (United Nations Environment Programme, 2021, p.15)

Pour y répondre, des mesures prises par la Commission européenne ont notamment pour ambition de réduire de 80% les émissions GES d'ici 2050, par rapport aux niveaux mesurés en 1990 (Commission européenne, 2019). Un grand nombre d'innovations ont été créées pour maximiser l'efficacité énergétique des bâtiments, en particulier lors de sa phase d'utilisation (Wittstock et al., 2012 ; Hollberg et al., 2019 ; Decorte et al., 2021).

Cependant, de nombreux efforts sont encore à déployer entre autres sur les phases de production des matériaux du bâtiment, ou encore sur la gestion de la fin de vie de ceux-ci. On constate ainsi que l'impact environnemental du cycle de vie des bâtiments est de plus en plus étudié (Verbeeck & Hens, 2010 ; Salmon et al., 2011 ; Wittstock et al., 2012 ; Buyle et al., 2013 ; Kumar Pal et al., 2017 cité dans Decorte et al., 2021).

L'analyse en cycle de vie (ACV) des bâtiments est un instrument mondialement reconnu pour son approche complète et intégrée concernant l'évaluation de la performance environnementale des bâtiments sur tout le cycle de vie (Wittstock et al., 2012 ; Soust-Verdaguer et al., 2016). Son intérêt a considérablement augmenté avec le développement des systèmes de labels et de certifications des bâtiments durables (Malmqvist et al., 2011), considérés comme des précurseurs de l'insertion des concepts du développement durable dans le secteur de la construction (Wittstock et al., 2012). Néanmoins, à la différence de l'ACV, les processus de certification ne considèrent pas systématiquement le cycle de vie complet des bâtiments étudiés. Cela peut conduire à un paradoxe où un bâtiment peut avoir une bonne classification énergétique ou environnementale sur base d'un label, même s'il est davantage consommateur d'énergie ou pollueur sur l'ensemble de son cycle de vie (Zabalza et al., 2009). De plus, l'ACV a l'avantage de proposer une analyse quantitative (armée d'hypothèses détaillées plus tard) dite plus objectivable (Salmon et al., 2011). Une définition complète de l'ACV et la présentation de sa méthodologie de calcul seront données dans l'état de l'art.

C'est pourquoi il y a un réel intérêt à étudier et encourager l'utilisation des ACV des bâtiments. À terme, les organes législatifs pourront compter davantage sur l'ACV comme un outil de référence (Wittstock et al., 2012).

1.2 Problématique et intérêt de la recherche

1.2.1 Complexité de l'ACV

Bien que cette méthode présente un intérêt incontestable et une grande précision scientifique, elle peut être coûteuse à la fois en termes de temps et d'effort (Roy, 2017). En effet, il y a également un consensus quant à la complexité de l'ACV des bâtiments (Papamichael, 2000 ; Malmqvist et al., 2011 ; Basbagill et al., 2013 cité dans Soust-Verdaguer et al., 2016 ; Sung et al., 2013 ; Lebert, 2014 ; Jusselme, 2018 cité dans Miyamoto et al., 2020 ; Meex et al., 2018 ; Beemsterboer, 2019 ; Tasala Gradin & Björklund, 2021). Même la norme internationale ISO 14040 (qui donne les principes et le cadre des ACV) affirme cette complexité à plusieurs reprises : « *En raison de la complexité propre à l'analyse du cycle de vie (...)* » (ISO, 2006, p.7), « *(...) Le recueil de données peut être un processus lourd en termes de moyens à déployer.* » (ISO, 2006, p.14). Cela peut dissuader certains concepteurs d'utiliser l'ACV des bâtiments. De surcroît, on constate que l'usage de l'ACV dans l'industrie du bâtiment est encore assez limité (Han et al., 2015 ; Soust-Verdaguer et al., 2016).

Les raisons sous-jacentes sont multiples et peuvent être caractérisées comme étant soit compliquées, soit complexes. La distinction est la suivante : ce qui est considéré comme compliqué est perçu comme étant plus subjectif et dépendant de l'utilisateur, alors que la complexité est une propriété intrinsèque du système lui-même (Beemsterboer, 2019).

Parmi les causes « compliquées » les plus récurrentes, on peut citer la demande d'un haut niveau de connaissances notamment pour comprendre et interpréter les résultats ou formuler des hypothèses pertinentes (Brick, 2008 cités dans Malmqvist et al., 2011 ; Zabalza et al., 2009 ; Lebert, 2014 ; Soust-Verdaguer et al., 2016 ; Beemsterboer, 2019 ; Tasala Gradin & Björklund, 2021), le manque d'intuitivité des interfaces de saisie utilisées dans de nombreux outils pour réaliser l'ACV (Lebert, 2014), la difficulté des calculs intermédiaires (Papamichael, 2000 ; Beemsterboer, 2019), l'existence de méthodes/pondérations différentes menant à des résultats différents pour des cas identiques (Soust-Verdaguer et al., 2016), l'exigence d'un niveau suffisant de qualité des données (Malmqvist et al., 2011 ; Wittstock et al., 2012), ou encore le temps à y consacrer et la difficulté de l'insérer dans le processus du projet, en particulier lorsque celui-ci est de petite taille (Sung et al., 2013 ; Lebert, 2014 ; Jusselme, 2018 cité dans Miyamoto et al., 2020).

Dans sa thèse de 2019, Sjouke Beemsterboer propose de mettre en évidence six types de causes « complexes ». Tout d'abord, le volume du système, donc la grande quantité d'informations nécessaires (Malmqvist et al., 2011 ; Wittstock et al., 2012 ; Sung et al., 2013 ; Soust-Verdaguer et al., 2016 ; Meex et al., 2018) tels que les matériaux et processus. Ensuite, il y a l'interaction des composants du bâtiment liés les uns aux autres (le changement d'un élément influe sur les autres), les intérêts subjectifs des nombreuses parties prenantes du projet (choix méthodologiques et objectifs différents), le facteur temps (la durée de vie du bâtiment et ses changements), et le facteur géographique (l'influence du climat, des transports, etc.) ; enfin il y a la variabilité du système, c'est-à-dire le caractère unique de chaque bâtiment (Rossi et al., 2012) telle que sa forme.

Ces dernières raisons confirment le fait que dans le secteur de la construction, les études ACV ne peuvent pas être réalisées avec le même niveau de détail que dans les autres secteurs (Wittstock et al., 2012). Elles ont été spécifiquement adaptées car le bâtiment est un « produit complexe » (Salmon et al., 2011). En effet, les données des nombreux éléments divers analysés sont souvent indisponibles (on ne part plus de simples matières premières mais bien de produits déjà fortement transformés). On ne peut donc pas tout quantifier, ou du moins avec exactitude (données de site, implantation, satisfaction usagers, etc.) (Salmon et al., 2011). Les concepteurs ont besoin d'outils pouvant s'adapter aux particularités d'un projet de construction, ainsi qu'à leurs besoins. L'outil peut passer de main en main et doit pouvoir être compris par de nombreuses parties prenantes (Wittstock et al., 2012).

1.2.2 Paradoxe de l'écoconception

L'intégration de l'ACV des bâtiments dans un processus de conception est une question délicate à traiter, car elle est affectée par ce qu'on peut appeler un paradoxe de l'écoconception (Wadin et al., 2003).

Idéalement, pour pouvoir concevoir un bâtiment en intégrant les enjeux environnementaux de façon à réduire son impact environnemental de façon optimale, il faudrait réaliser l'ACV des bâtiments le plus tôt possible, dans les premières phases du projet (ADEME, 2018). La réalité est cependant différente. Il apparaît que l'ACV est très souvent utilisée tard dans le déroulement du projet, lorsque son potentiel d'influence est devenu faible pour en améliorer la conception (Roberts et al., 2020).

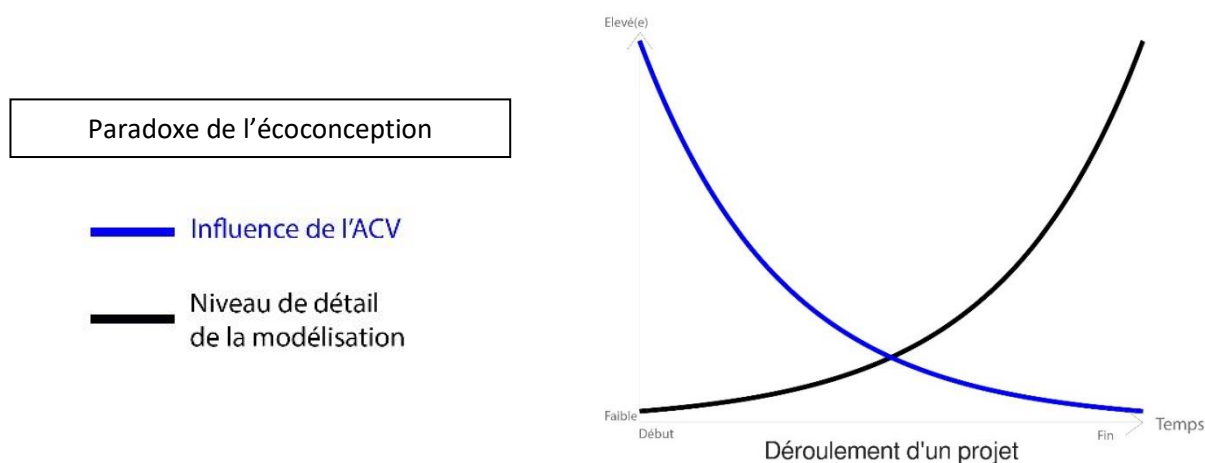


Figure 2 : Graphique conceptuel illustrant le paradoxe de l'écoconception inspiré et basé sur des schémas existants (Miyamoto et al., 2020 ; Roberts et al., 2020)

D'une part, la capacité à atténuer les impacts environnementaux d'un projet (sans que cela n'implique des dépenses de temps et d'argent considérables) est maximal au démarrage de ce dernier et diminue tout au long du processus (Roberts et al., 2020), tout comme illustré par le trait bleu du paradoxe de l'écoconception sur la [figure 2](#) ci-dessus. Cela est notamment dû au fait que les décisions prises au début de la conception, tout comme le parti architectural établi dès les phases de programmation et d'esquisse, entraînent déjà de nombreux impacts environnementaux sur le cycle de vie du bâtiment (SETAC-Europe, 2003 cité dans Miyamoto et al., 2020 ; Kovacic & Zoller, 2015 ; ADEME, 2018 ; Zimmermann et al., 2019).

D'autre part, il y a l'exigence propre de l'ACV qui nécessite une quantité importante de données précises (tels que le type et les quantités de matériaux) pour assurer la validité de ses résultats. Cependant, il n'est pas possible d'assurer la disponibilité de ces données aux stades précoces du projet

puisque la majorité des variables sont encore non définies ou changeantes et c'est un obstacle de taille (Marsh, 2015 ; ADEME, 2018 ; Zimmermann et al., 2019 ; Roberts et al., 2020). Évidemment, la disponibilité de ces données augmente tout au long du projet, comme le montre le trait noir ascendant sur la *figure 2*, cependant l'intégration de l'évaluation environnementale reste difficile au stade d'avant-projet.

Le paradoxe de l'écoconception s'explique donc par une incompatibilité entre deux éléments :

- D'une part, l'influence décroissante de l'ACV sur les choix de conception plus le projet évolue et se précise.
- D'autre part, le niveau de détail qu'il est possible de prendre en compte dans la modélisation ; nul au début du projet, mais qui augmente jusqu'à être maximum à la fin de ce dernier, le tout avec un compromis insatisfaisant.

Puisque des décisions entraînant des conséquences significatives sur le plan environnemental peuvent être prises lors des premières phases de conception, il est essentiel que la réalisation de l'ACV soit aisée et rapide à effectuer lors de ces premières phases (Zimmermann et al., 2019). Il y a donc un réel intérêt à développer des outils d'ACV simplifiés. Cela permettra d'aider et d'inciter les concepteurs experts ou non à réaliser de façon plus systématique des ACV au moment le plus opportun, afin d'éclairer et d'accompagner leurs choix de conception sur le plan environnemental.

1.3 Objectifs

L'objectif principal de ce mémoire est d'évaluer la pertinence des **méthodes d'analyse en cycle de vie simplifiées de bâtiments** pour une utilisation en écoconception au stade de l'avant-projet. Pour ce faire, cette étude commence par redéfinir clairement cette notion d'analyse en cycle de vie simplifiée à l'aide d'une revue de la littérature, synthétisant et discutant les principaux résultats de recherche dans ce domaine. À la fin de cet état de l'art, est également proposée une étude de l'évolution du processus de conception et plus particulièrement, du type de données disponibles à différentes phases de conception.

Ensuite, mon évaluation se fera à travers une **étude comparative** des résultats d'ACV obtenus sur un même cas d'étude avec différentes méthodes d'ACV simplifiées, choisies selon la définition préalablement établie et les résultats d'une ACV complète déjà réalisée et publiée sur ce cas d'étude. L'étude de cas choisie est la résidence Arola, un immeuble à appartements de l'écoquartier du Sart-Tilman achevé en 2018, dont une ACV complète a été réalisée a posteriori dans un mémoire de master

de Charline Malmedy (Malmedy, 2020). Ainsi, il sera possible de comparer le niveau de détails nécessaire et la précision des résultats des méthodes d'ACV simplifiées avec ceux de la méthode complète pour une référence fiable et documentée.

Enfin, à partir des résultats de l'état de l'art, une seconde étude propose de reconstituer l'évolution du processus de conception du projet étudié afin de tester les ACV simplifiées selon un état intermédiaire de conception pour lequel le niveau de détail atteint est moins élevé. Cela a permis d'analyser, pour ce cas d'étude, le potentiel d'intégration des différentes méthodes d'ACV simplifiées en tant qu'outil d'aide à la conception.

1.4 Questions de recherche

Au vu du paradoxe de l'écoconception et de la mise en évidence de l'intérêt des outils d'ACV simplifiées, ce mémoire vise à répondre aux trois questions de recherche suivantes :

- Qu'est-ce qu'une analyse en cycle de vie simplifiée utile pour l'écoconception de bâtiments ? Quelle est sa définition précise et quelles sont ses caractéristiques ?
- Quelle est la performance quantitative de différentes méthodes simplifiées d'ACV de bâtiments ? Quelle est la fiabilité et la précision de leurs résultats au regard d'une modélisation ACV complète ? Quelle méthode d'ACV simplifiée produit les meilleurs résultats et qu'en est-il de son efficacité au stade d'avant-projet ?
- Quelle est la performance qualitative des méthodes simplifiées d'ACV choisies comme outil d'aide à l'écoconception de bâtiments ? Que nécessitent-elles en termes de données, de temps et d'itérations ? Quelles méthodes semblent les plus adéquates pour l'écoconception de bâtiments et qu'en est-il de la pertinence des résultats produits pour les architectes et concepteurs ?

1.5 Structure et méthodologie de l'étude

Ce mémoire est donc structuré en trois parties, comme schématisé dans la [figure 3](#). La première, plus théorique, est un état de l'art basé sur une recherche documentaire concernant les ACV simplifiées des bâtiments et la production de données utiles pour l'écoconception durant les différentes phases du processus de conception d'un bâtiment. Cette partie permet de créer une typologie des méthodes existantes d'ACV simplifiées.

La seconde est l'expérimentation pratique sur un cas d'étude, comprenant la description de la méthodologie et du cas d'étude, ainsi que trois analyses comparatives : l'analyse générale et fonctionnelle des ACV des bâtiments utilisées dans cette étude ainsi que les analyses quantitatives et qualitatives des résultats des ACV simplifiées.

Enfin, une discussion fera appel aux deux premières parties pour mettre en évidence les forces et les faiblesses des méthodes d'ACV simplifiées testées sur le cas d'étude, souligner les limites liées au cas d'étude et à la méthodologie utilisée, avant de conclure sur le potentiel d'intégration des ACV simplifiées dans le processus de conception des bâtiments au stade de l'avant-projet et de proposer quelques pistes futures de recherche en lien avec la thématique de ce travail de fin d'étude.

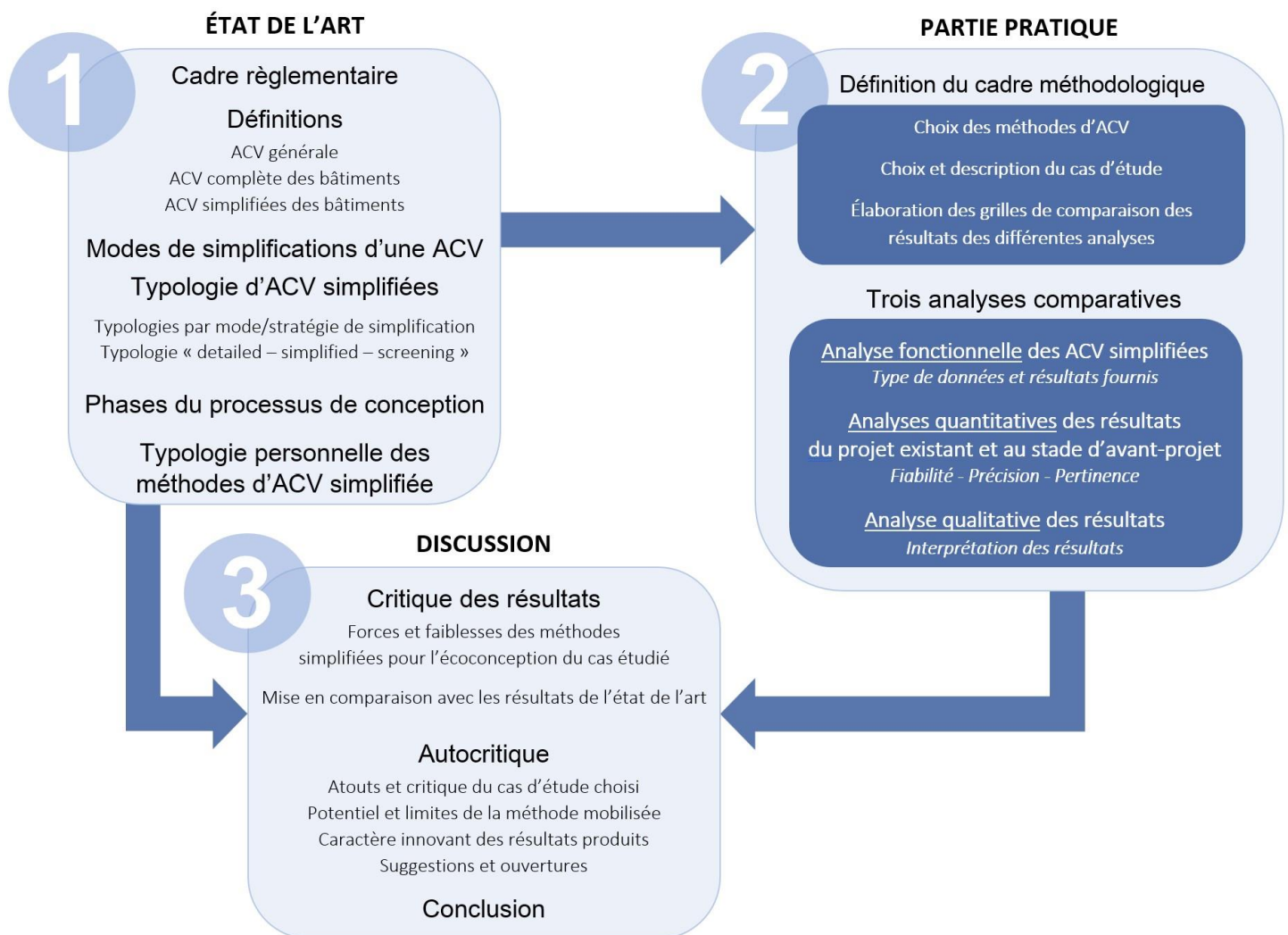


Figure 3 : Structure et méthodologie de l'étude

2. Etat de l'art

2.1 Cadre réglementaire général

Avant de définir ce qu'est l'analyse en cycle de vie simplifiée des bâtiments, il est nécessaire de comprendre l'ACV détaillée des bâtiments, l'ACV en général et surtout dans quel contexte réglementaire elles s'inscrivent. Cette section présente donc un aperçu du cadre normatif des exigences concernant l'ACV des bâtiments à travers six références représentatives. Elle introduit quatre normes : l'ISO 14040, l'ISO 14044, la NBN EN 15978 et la NBN EN 15804 et en complément, le ILCD Handbook et l'EebGuide fournissent des directives et recommandations pour l'application pratique de ces normes.

La [figure 4](#) propose une vue synthétique du cadre réglementaire de l'ACV. Lorsqu'une référence sert de base à une autre, son cadre est intégré dans le cadre de cette dernière. Par exemple, l'EebGuide utilise les cinq autres références. Il se base sur les normes qu'il complète avec le ILCD Handbook.

Cadre réglementaire de l'ACV (non exhaustif)

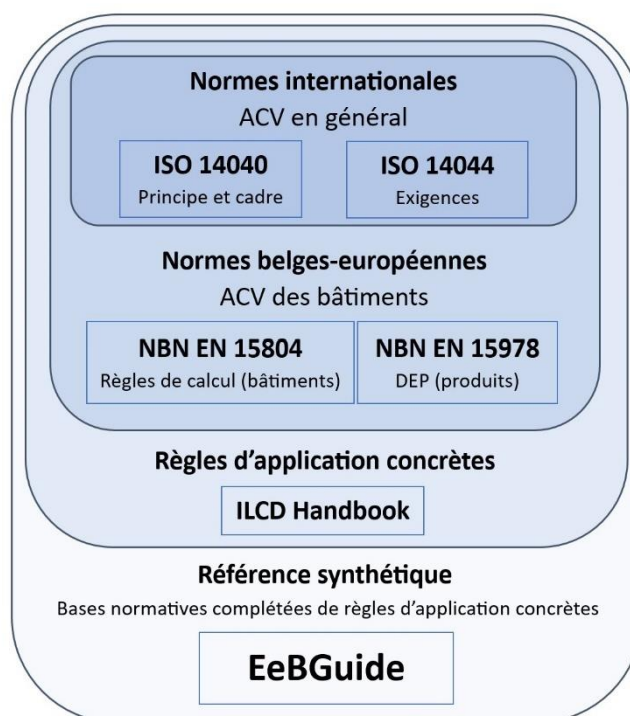


Figure 4 : Vue synthétique du cadre réglementaire de l'ACV et des guides pratiques d'aide à sa mise en œuvre selon six références

Des efforts importants ont été déployés à travers ces normes et lignes directrices pour clarifier les aspects fondamentaux à la base de la réalisation des ACV. Elles ont pour but d'harmoniser la méthodologie et la terminologie de façon transparente (Wittstock et al., 2012 ; Tasala Gradin & Björklund, 2021).

2.1.1 Normes internationales

Les dernières versions de l'ISO 14040 et de l'ISO 14044 datent de 2006. Elles ont été réalisées par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et portent le statut de norme internationale. Elles sont donc applicables dans tous les pays, qu'ils soient membres de l'ISO ou non. Ces normes visent à unifier les méthodologies et à harmoniser les normes nationales entre elles. Elles regroupent un ensemble de règles qui établissent les conditions de réalisation d'une ACV en général (ISO, 2006a ; ISO, 2006b).

Bien qu'elles ne soient pas obligatoires, les ACV doivent respecter ces normes pour assurer la qualité, la fiabilité et la complétude de leurs résultats (ISO, 2006a ; ISO, 2006b). Elles n'ont pas de portée juridique en soi ; ces normes ne sont pas destinées à être utilisées à des fins contractuelles, réglementaires ou de certifications (ISO, 2006a ; ISO, 2006b).

Comme son nom l'indique, l'ISO 14040 décrit les principes et le cadre de l'ACV : « Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre ». En particulier, elle décrit son domaine d'application, définit les termes spécifiques, établit une description générale de l'ACV (ses principes, phases, caractéristiques et concepts généraux), ainsi que le cadre méthodologique (objectif/champ de l'étude, inventaire, évaluation de l'impact et interprétation) et termine avec la communication des résultats, ainsi que la revue critique (ISO, 2006a).

Quant à l'ISO 14044 « Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Exigences et lignes directrices » qui annule et remplace les ISO 14041 à 14043 avec la dernière version de l'ISO 14040, elle détaille les exigences qui s'appliquent à la conduite d'une ACV. Elle suit la même structure que l'ISO 14040, sans la description générale. Il est important de noter qu'elle ne détaille pas de techniques ou méthodologies spécifiques de l'ACV. Cela ne fait pas partie de son domaine d'application (ISO, 2006b).

2.1.2 Normes belges (européennes)

Ensuite, il y a les normes NBN EN 15978 (2011) et NBN EN 15804 (2012 et révisée en 2019). Elles ont le statut de norme belge (norme européenne adoptée par la Belgique). Elles se basent sur les normes ISO 14040 et 14044 et définissent plus spécifiquement l'approche de l'ACV dans l'industrie de la construction, donc adaptée au bâtiment (Wittstock et al., 2012 ; Soust-Verdaguer et al., 2016).

La NBN EN 15978 est intitulée « Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Évaluation de la performance environnementale des bâtiments - Méthode de calcul ». À l'aide de règles de calculs, cette norme quantifie la performance environnementale des bâtiments en termes d'impacts et d'aspects environnementaux, qu'ils soient neufs ou existants. Elle est organisée en

modules du cycle de vie des bâtiments, c'est-à-dire selon les étapes de son cycle de vie (produit, construction, utilisation, fin de vie). C'est dans cette norme qu'on retrouve une liste d'indicateurs environnementaux à prendre en compte, voir [tableau 1](#) (CEN, 2011).

Concernant la norme NBN EN 15804 « Déclarations environnementales des produits de construction - Règles de base pour le développement de déclarations environnementales de produits de construction », elle se focalise sur les Déclarations Environnementales de Produits (DEP). Les DEP mettent à disposition des données environnementales quantifiées d'un produit de construction selon des indicateurs prédéterminés (CEN, 2019).

2.1.3 Autres références

Enfin, il y a le ILCD Handbook (2010) et l'EeBGuide (2012), qui ont tous deux été rédigés à l'initiative de la Commission européenne. Le système international de données sur le cycle de vie (ILCD Handbook) est un manuel de référence qui se base sur les normes décrites précédemment et qui met à disposition une documentation détaillée sur les méthodes et directives pour réaliser une ACV (Commission européenne - IES, 2010).

Le Guide Energy-Efficient Buildings Initiative (EeBGuide) a, quant à lui, été réalisé dans le cadre d'un projet de recherche européen. Il fournit des conseils sur la façon d'appliquer les normes citées ci-dessus et autres règles existantes. Il apporte également une aide aux praticiens sur l'applicabilité en proposant des solutions aux problèmes recueillis (définitions, règles de calcul, paramètres, hypothèses, etc.). Son objectif principal est de conseiller les praticiens pour leur permettre de produire des ACV aux résultats comparables et significatifs. Il se base donc essentiellement sur les quatre normes décrites ci-dessus. Si elles ne mentionnent pas un certain aspect ou si elles ne sont pas claires, ce sont alors les dispositions et les conseils du ILCD Handbook qui sont fournis et enfin, si rien n'existe, de nouvelles dispositions sont proposées par l'EeBGuide (Wittstock et al., 2012).

Parmi ces six références, il n'y a que dans le ILCD Handbook et l'EebGuide que l'ACV simplifiée se distingue d'une ACV complète. Cette appellation n'est pas explicitement présentée dans les normes mais elle est étudiée par de nombreux autres chercheurs. Leurs classifications seront étudiées dans la partie « [2.4 Typologies d'ACV simplifiées](#) » de ce mémoire.

2.2 Définitions

2.2.1 ACV Générale

La norme internationale ISO 14040 définit l'analyse du cycle de vie (ACV) comme suit : « *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, 2006a, p.2), le système étant le modèle étudié remplissant une/des fonction(s) et défini par un ensemble de processus. Il y a trois idées qui se dégagent de cette définition : documenter les flux d'énergie et de matière qui entrent et sortent du système, mesurer les impacts potentiels sur l'environnement, la santé et l'épuisement des ressources et enfin considérer le cycle de vie complet du produit ou du service en question (Salmon et al., 2011 ; Wittstock et al., 2012). À cet aspect multiétape peut s'ajouter un aspect multicritère, c'est-à-dire la considération de plus d'un domaine environnemental préoccupant, se distinguant d'une évaluation ciblée (Wittstock et al., 2012). L'ACV ne consiste donc pas en une méthode unique ; il y a une certaine flexibilité pour mettre en pratique l'ACV conformément aux normes (ISO, 2006a).

La réalisation d'une ACV peut posséder des buts variés. Tout d'abord, elle permet de dégager des pistes d'amélioration des performances environnementales des produits ou services en remédiant à leurs impacts environnementaux une fois qu'ils ont été identifiés. Elle informe ainsi les ingénieurs, concepteurs et organismes gouvernementaux ou non, ayant chacun leurs propres objectifs (établissement de politiques, priorités ou encore planification de stratégies). Elle permet également de comparer des technologies innovantes ou encore d'officialiser une revendication environnementale et écologique (ISO, 2006a ; ISO, 2006b). En revanche, elle ne tient pas compte des aspects économiques ou sociaux ; elle se devra d'être accompagnée d'autres outils pour les envisager tels que les normes sur l'ACV sociale et LCC du point de vue économique.

Une étude d'ACV est structurée en quatre phases comme schématisée à la [figure 5](#) : la définition des objectifs et du champ de l'étude, l'inventaire (collecte des données nécessaires à l'étude), l'évaluation de l'impact et l'interprétation (discussion et recommandations). L'étude est accompagnée d'un rapport de communication et peut être complétée d'une revue critique par des experts pour appuyer sa crédibilité (ISO, 2006a). Les phases seront détaillées plus spécifiquement dans la section suivante « [2.2.2 ACV complète des bâtiments](#) ».

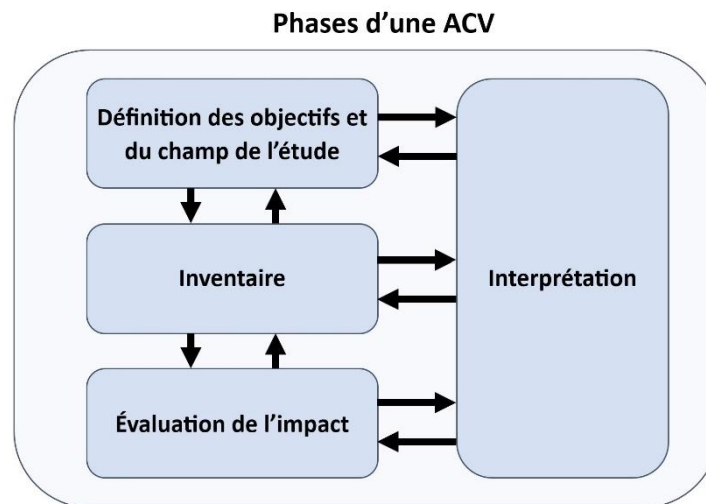


Figure 5 : Phases d'une ACV selon l'ISO 14040 (ISO, 2006a, p.8)

Cette étude consiste en une approche itérative car chaque phase dépend des précédentes (ce qui est symbolisé par les doubles flèches sur le schéma). Elle se veut transparente, complète (considérant tous les aspects de l'environnement naturel, santé humaine et des ressources) et privilégie une approche scientifique (ISO, 2006a).

Un certain nombre de limitations peuvent être mises en évidence. Par exemple, il est intéressant de préciser que l'ACV ne fournit pas des résultats réels, précis ou absolus ; il évalue des impacts potentiels. En effet, ses résultats sont des expressions relatives à une unité de référence et il y a notamment des incertitudes au niveau des données. C'est pourquoi des exigences de qualité telles que la précision, la complétude, la représentativité et bien d'autres sont requises (ISO, 2006b).

2.2.2 ACV complète des bâtiments

L'ACV s'est originellement développée en réponse aux préoccupations croissantes liées aux impacts environnementaux causés par les activités des processus industriels dans les années 1960 et 1970 (Baumann & Tillman, 2004 ; Verbeeck & Hens, 2010). Elle s'est progressivement adaptée à d'autres secteurs dont celui du bâtiment, passant par l'évaluation des impacts environnementaux des matériaux et produits de construction, puis de l'ensemble des impacts environnementaux générés par un bâtiment tout au long de son cycle de vie pour former l'ACV des bâtiments (Lasvaux, 2010).

La norme NBN EN 15978 et l'EeBGuide définissent l'analyse du cycle de vie des bâtiments comme la méthode pour évaluer quantitativement la performance environnementale d'un bâtiment sur l'ensemble de son cycle de vie (CEN, 2011 ; Malmqvist et al., 2011 ; Wittstock et al., 2012). Dans les paragraphes suivants, l'ACV des bâtiments est décrite plus précisément selon la norme NBN EN 15978 (CEN, 2011), en suivant les quatre étapes présentées à la [figure 5](#) : objectifs et champ de l'étude, inventaire, évaluation de l'impact et interprétation.

2.2.2.1 Etape 1 : Objectifs et champ de l'étude

La première étape consiste à définir le but et l'objectif de l'évaluation, la spécification de l'objet d'évaluation et l'élaboration du scénario du cycle de vie (CEN, 2011). Les buts de l'ACV des bâtiments sont les mêmes que l'ACV générale, mais ils sont plus focalisés sur ce secteur. L'ACV des bâtiments permet d'améliorer la performance environnementale d'un bâtiment après l'avoir évaluée quantitativement en termes d'impacts et d'aspects environnementaux. Elle peut donc aider à la prise de décision de l'ensemble des acteurs du projet et en particulier des concepteurs ; elle peut soutenir le développement de politiques ou stratégies constructives ; elle permet la comparaison de différentes options de conception ; enfin, elle permet de participer à l'évaluation de la performance environnementale d'un bâtiment dans le cadre du processus de certification (comme par exemple BREEAM) et autres revendications environnementales (CEN, 2011 ; Malmqvist et al., 2011 ; Roy, 2017).

En ce sens, pour répondre à ces objectifs divers, différents types d'approches d'ACV ont été définies (Lasvaux, 2010 ; Salmon et al., 2011 ; Wittstock et al., 2012 ; Commission européenne - IES, 2010). Les plus récurrentes sont les approches attributionnelles et conséquentielles, mais des approches plus hybrides existent également. L'approche attributionnelle étudie le système tel qu'il est ; elle détermine la contribution de l'impact environnemental attribué à un produit ou processus individuel par rapport à l'impact total, tandis que l'approche conséquentielle évalue les conséquences d'un changement et donc l'impact des décisions consécutives prises au long du cycle de vie (Commission européenne - IES, 2010).

En ce qui concerne la spécification de l'objet, l'étude se limite au bâtiment (ou une partie d'un bâtiment si l'évaluation est limitée) avec ses fondations et ouvrages extérieurs sur son périmètre, pour l'ensemble de son cycle de vie (CEN, 2011). De cet objet, il est nécessaire de définir son équivalent fonctionnel. Il réduit les caractéristiques d'un bâtiment à une courte description reprenant notamment les informations suivantes : type de bâtiment (neuf/transformation, usine/bureaux), profil d'utilisation (habitat/commercial), durée de vie requise et autres exigences pertinentes (CEN, 2011).

Les frontières du système établissent les processus élémentaires qui seront pris en compte. Le processus élémentaire est une étape ou activité individuelle faisant partie d'un système pour lequel on recueille les données (CEN, 2011). C'est la plus petite unité d'analyse au sein des phases de l'ACV (par exemple, tous les impacts et aspects liés à la production de ciment lors de la phase de construction).

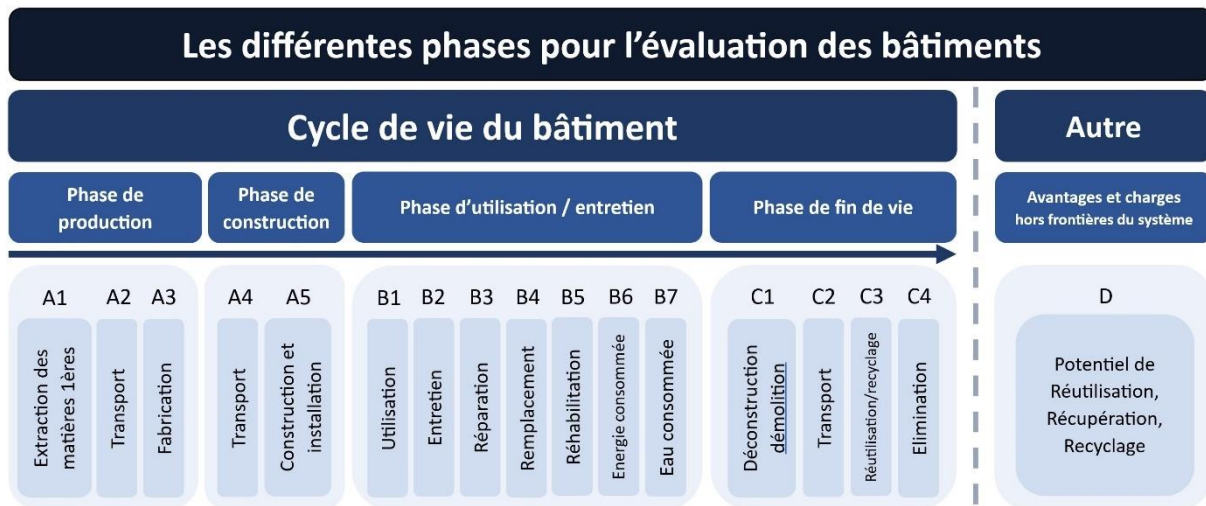


Figure 6 : Illustration des différentes phases de l'évaluation du bâtiment. Ce schéma a été créé sur base d'une illustration de la norme EN 15978 (CEN, 2011, p.22)

La **figure 6** illustre l'organisation des phases utilisées pour l'évaluation de l'ACV des bâtiments (conformément à l'EN 15804, pour les informations de DEP). Elles sont regroupées en modules allant de A à D, comme suit :

- De **A1 à A3**, c'est la production, qui comprend les processus « cradle to gate », du berceau à la sortie d'usine (extraction des matières premières, transport et fabrication) ;
- De **A4 à A5**, c'est la construction (avec stockage, ouvrages provisoires et gestion des déchets) ainsi que le transport des produits depuis l'usine et des équipements (grues, échafaudages, etc.) ;
- De **B1 à B7**, c'est l'utilisation et l'entretien du bâtiment (la climatisation, l'éclairage, l'eau, la ventilation, le remplacement, la réhabilitation), jusqu'à sa déconstruction/démolition ;
- De **C1 à C4**, c'est la fin de vie (déconstruction, transport, traitement des déchets et élimination) ;
- **D** évalue les avantages et charges hors frontière (recyclage/récupération/réutilisation).

En plus de la description physique d'un bâtiment (forme et taille, nombre d'étages, fondations, structure, enveloppe, etc.), l'ACV se base sur des scénarios (CEN, 2011). Ils permettent de fournir des informations sur les caractéristiques temporelles du projet et de ses composantes, telles que sa durée de vie, période de remplacement ou utilisation normale, etc. C'est un ensemble d'hypothèses et de données liées à d'éventuels événements futurs ayant un impact environnemental durant les phases A4 à C4 (de la construction à la fin de vie) et éventuellement D (recyclage/récupération/réutilisation). Ils doivent être décrits et documentés sur base des réglementations existantes, des exigences du maître d'ouvrage ou d'un code de pratiques reconnues (CEN, 2011).

2.2.2.2 Etape 2 : Inventaire

La deuxième étape est l'inventaire (LCI ou Life Cycle Inventory), c'est-à-dire la collecte de deux types de données : celles pour quantifier le bâtiment (tous ses matériaux, leurs pertes, et l'énergie et l'eau consommée en phase d'utilisation) et celles de leurs impacts environnementaux respectifs.

Concernant la qualité de ces données, elles doivent être les plus précises et aussi actuelles que possible (pas plus de 10 ans selon la norme) pour refléter fidèlement l'objet au moment où l'évaluation a lieu (CEN, 2011). Les données bâtiment sont a priori spécifiques pour chaque produit (brique, plâtre, châssis, etc.). Elles peuvent être parfois agrégées (soit en parties de bâtiment/élément/composant, soit par l'objet dans son ensemble, défini par son volume, sa hauteur, l'aire du plancher, etc.), mais cela ne relève plus alors d'une ACV complète (voir partie « 2.3 Modes de simplifications d'une ACV »). Ces données sont issues de la description du bâtiment (mesures du bâtiment réel existant ou des plans d'étude, avec ou sans logiciels de modélisation 3D/outils de conception). Quant aux données d'impact environnementaux, a priori, elles sont issues des DEP ou de bases de données génériques (CEN, 2011 ; Malmqvist et al., 2011), mais cette dernière source peut déjà constituer une simplification. Les données de calcul doivent être moyennées sur un an, sinon il est nécessaire de justifier le maintien de la qualité (CEN, 2011). D'autres exigences plus spécifiques sont précisées dans cette même norme.

2.2.2.3 Etape 3 : Evaluation de l'impact

La troisième étape est l'évaluation de l'impact. Cela passe par le calcul des indicateurs environnementaux. Il en existe un très grand nombre, mais seulement certains d'entre eux possèdent des méthodes de calcul approuvées. Le [tableau 1](#) présente les 22 indicateurs mentionnés dans la Norme Européenne NBN EN 15978, ainsi que leurs unités respectives. Ces indicateurs décrivent les 7 impacts environnementaux reconnus, 8 modes d'utilisation des ressources et différents types d'informations environnementales complémentaires (comprenant les catégories de déchets et les flux sortant du système).

Indicateurs décrivant les impacts environnementaux	
Indicateurs des impacts environnementaux de référence	Unité
Potentiel de <u>réchauffement climatique</u> (GWP)	kg de CO ₂ éq.
Potentiel de destruction de la <u>couche d'ozone</u> (ODP)	kg de CFC 11 éq.
Potentiel d' <u>acidification</u> du sol et de l'eau (AP)	kg de SO ₂ ⁻ éq.
Potentiel d' <u>eutrophisation</u> (EP)	kg de (PO ₄) ³⁻ éq.
Potentiel de formation d' <u>oxydants photochimiques</u> de l'ozone troposphérique (POCP)	kg d'éthylène éq.
Potentiel de <u>dégradation</u> abiotique des <u>ressources pour les éléments</u> (ADP_éléments)	kg de Sb éq.
Potentiel de <u>dégradation</u> abiotique des <u>combustibles fossiles</u> (ADP_combustibles fossiles)	MJ, val cal nette

Indicateurs décrivant l'utilisation des ressources	
Utilisation de <u>l'énergie primaire renouvelable</u> (PERT) (<u>sans</u> les ressources d'énergie employées utilisées comme <u>matière</u>)	MJ, pouv cal int
Utilisation de <u>l'énergie primaire renouvelable</u> employées utilisées comme <u>matière</u>	MJ, pouv cal int
Utilisation de <u>l'énergie primaire non renouvelable</u> (PENRT) (<u>sans</u> les ressources d'énergie employées utilisées comme <u>matière</u>)	MJ, pouv cal int
Utilisation de <u>l'énergie primaire non renouvelable</u> utilisées comme <u>matière</u>	MJ, pouv cal int
Utilisation de <u>matières secondaires</u>	kg
Utilisation de <u>combustibles secondaires renouvelables</u>	MJ
Utilisation de <u>combustibles secondaires non renouvelables</u>	MJ
Utilisation nette d' <u>eau douce</u>	m ³
Indicateurs complémentaires (catégories de déchets et flux sortants du système)	
Déchets <u>dangereux</u> éliminés	kg
Déchets <u>non dangereux</u> éliminés	kg
Déchets <u>radioactifs</u> éliminés	kg
Composants destinés à la <u>réutilisation</u>	kg
Matières pour le <u>recyclage</u>	kg
Matières pour la <u>récupération</u> (sauf incinération)	kg
<u>Energie</u> fournie à l' <u>extérieur</u> (pour chaque vecteur énergétique)	MJ

Tableau 1 : Indicateurs de l'ACV des bâtiments mentionnés dans la norme NBN EN 15978 (CEN, 2011).

La majorité des publications scientifiques se focalise sur le calcul d'un ou plusieurs des 7 impacts environnementaux de référence, ainsi que l'utilisation nette d'eau douce. Le potentiel de réchauffement climatique est l'indicateur le plus étudié individuellement.

La méthode de calcul utilisée par la norme NBN EN 15978 pour évaluer la contribution des indicateurs pour une phase du cycle de vie choisie est le principe du calcul matriciel. Il suffit de multiplier chaque produit d'une phase « i » choisie (de A1 à C4, mais aussi D) par la valeur respective de l'indicateur environnemental en question. Par exemple, pour quantifier le potentiel de réchauffement climatique pour la phase « i » (GWP_i), on a :

$$GWP_i = a_{1,i} * GWP_{a1,i} + a_{2,i} * GWP_{a2,i} + a_{3,i} * GWP_{a3,i} + \dots + a_{N,i} * GWP_{aN,i}$$

Avec $a_{n,i}$ la quantité de produit « n » dans la phase « i » ($n=1, 2, 3, \dots, N$).

2.2.2.4 Etape 4 : Interprétation

Enfin, la quatrième étape de l'ACV des bâtiments est l'interprétation. C'est une discussion sur les résultats marquants sous la forme d'une conclusion qui rassemble les recommandations et qui permettent d'aider à la prise de décision. Un contrôle de cohérence, de complétude et de sensibilité des résultats est attendu (ISO, 2006a).

Il est utile de rappeler les limites des résultats de l'ACV, tel que le fait qu'ils ne reflètent pas la performance réelle et future du bâtiment (CEN, 2011). De plus, les résultats quantifiés ne sont pas des informations directement utilisables à eux seuls ; ils ne donnent notamment pas d'indications sur l'importance relative des différents impacts. Ainsi, l'interprétation est essentiellement relative et consiste en une comparaison par rapport à une référence (Roy, 2017).

Cette dernière étape permet d'identifier les points faibles environnementaux donc, les potentiels d'amélioration à réaliser. Comme des données imprécises peuvent être données au début de la conception, les résultats des premières itérations s'en verront entachés de façon plus ou moins importante. C'est en augmentant le nombre de cycles d'itération qu'on peut progressivement affiner les résultats de l'ACV. Ce type d'utilisation exige une grande flexibilité de l'évaluateur et de tous les autres intervenants, ainsi que pour le déroulement du projet de conception en lui-même (Wittenstock et al., 2012). L'ACV simplifiée définie dans le point suivant pourrait être une piste pour pouvoir répondre à cette exigence.

2.2.3 ACV simplifiée des bâtiments

Comme développée dans l'introduction, la complexité intrinsèque d'une d'ACV et le paradoxe de l'écoconception ne permettent pas aux concepteurs de réaliser aisément une étude d'ACV des bâtiments dans son entièreté et d'en tirer des conclusions pertinentes avec les résultats produits. Cela peut les dissuader d'intégrer cette étude dans leur projet de construction.

C'est dans ce contexte délicat que l'ACV simplifiée trouve une place d'importance. Elle permet la réinsertion d'une réflexion sur un cycle de vie sans nécessairement entreprendre une ACV détaillée à l'aide de simplifications de la démarche complète (Roberts et al., 2020). Les objectifs de simplification sont divers. Voici les quatre objectifs les plus récurrents :

- **Limiter la collecte de données** (Lasvaux, 2010 ; Wittstock et al., 2012 ; Lebert, 2014 ; Marsh, 2015 ; Soust-Verdaguer et al., 2016 ; Beemsterboer, 2019 ; Miyamoto et al., 2020) car une partie d'entre elles est incertaine et inaccessible ou parce que les quantités d'éléments et de flux sont trop importantes ;

- **Insérer l'ACV au début du projet** (Malmqvist et al., 2011 ; Marsh, 2015 ; Roy, 2017 ; ADEME, 2018 ; Miyamoto et al., 2020) pour permettre à ses utilisateurs d'avoir un premier aperçu rapide des impacts et une estimation des performances environnementales d'un projet en plein développement (Wittstock et al., 2012). Même s'il n'est pas possible de produire des résultats détaillés, il est toujours intéressant de pouvoir identifier les priorités pour orienter les décisions tout au long de la conception ;
- **Limiter les compétences requises** (Malmqvist et al., 2011 ; Wittstock et al., 2012 ; Lebert, 2014 ; Marsh, 2015) afin de permettre un usage aisé de l'outil par des acteurs non experts de l'ACV et l'ensemble des autres intervenants du projet ;
- **Réaliser une analyse ciblée** (Kellenberger & Althaus, 2009 ; Lasvaux, 2010 ; Malmqvist et al., 2011 ; Wittstock et al., 2012 ; Soust-Verdaguer et al., 2016 ; Roy, 2017) car selon les objectifs fixés, une analyse complète n'est pas toujours nécessaire. Elle peut se focaliser sur un indicateur cible, une partie du bâtiment ou une technologie en particulier à analyser.

Les différentes normes et les lignes directrices de l'ILCD détaillent très peu les simplifications (Tasala Gradin & Björklund, 2021). On n'a donc pas de définition « officielle » pour l'ACV simplifiée comme on avait pu les citer pour l'ACV générale et l'ACV complète des bâtiments. Bien que les normes ne parlent pas directement de l'ACV simplifiée sous ce nom, des recommandations implicites sur les simplifications peuvent y être identifiées. Ces recommandations seront développées dans la suite de cette section, en les complétant de principes et d'aspects issus de divers guides officiels et études.

Avant de les décrire, il est important de souligner la corrélation étroite entre une simplification et son impact sur les résultats de l'ACV. Il y a une vraie question concernant l'impact qui découle des choix de simplifications sur la qualité des résultats ; un réel compromis entre la simplicité d'une méthode et sa précision (ISO, 2006b) afin de trouver des niveaux d'incertitude acceptables (Jensen, 1998 ; Hellweg & Mila i Canals, 2014 cité dans Beemsterboer, 2019). C'est l'utilité de la méthode même qui peut être remise en question selon la précision, la validité et donc les choix et hypothèses de simplification par extension (ISO, 2006b).

La simplification de l'ACV est une approche multidimensionnelle, comme l'ACV l'est elle-même car elle peut agir sur diverses données d'entrée, mais aussi sur les différentes phases du cycle de vie, ou encore sur le nombre d'indicateurs étudiés (Todd et al, 1999 cité dans Lasvaux, 2010). Elle dépend de plusieurs éléments qui sont liés au contexte de l'étude dont les trois principaux sont : le domaine d'application de l'étude, le moment où elle est réalisée (en lien avec l'indisponibilité des données) et enfin, l'importance relative des éléments considérés (CEN, 2011).

2.2.3.1 Influence du domaine d'application et la portée de l'étude

Initialement, la simplification du modèle de l'ACV générale a été discutée dans un travail de la SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry), une organisation internationale qui joue un rôle prépondérant sur les avancées de l'ACV (Todd et al, 1999 cité dans Lasvaux, 2010). D'après eux et d'autres références (Lasvaux, 2010 ; CEN, 2011 ; Malmqvist et al., 2011 ; Tasala Gradin & Björklund, 2021), les simplifications doivent être liées aux objectifs de l'étude.

Les normes précisent que l'évaluation complète devrait être réalisée avec les informations les plus précises possible, mais que le choix de son niveau de détail dépend de l'objet étudié et du domaine d'application (CEN, 2011 ; ISO, 2006b). En laissant une variabilité dans le niveau de détail, une simplification de l'approche détaillée est déjà sous-entendue. De plus, si le niveau de détail de l'ACV dépend du sujet et de ses limites, la portée et la profondeur de l'ACV peuvent grandement varier (Tasala Gradin & Björklund, 2021 ; Malmqvist et al., 2011). Enfin, c'est justement parce que le degré d'incomplétude est fixé par les objectifs et la portée de l'étude que toute simplification est, dans le principe, acceptable et n'entraîne aucune conséquence sur la validité de l'ACV (Commission européenne - IES, 2010 ; Tasala Gradin & Björklund, 2021).

2.2.3.2 Influence du moment de l'évaluation

Ensuite, les simplifications peuvent dépendre du moment où l'évaluation du bâtiment est réalisée dans le processus de prise de décision, que ce soit au début de l'esquisse, à la fin de la conception, lors de la construction ou de l'utilisation (CEN, 2011). Cela fait directement appel au paradoxe de l'écoconception (décrit dans l'introduction) qui est étroitement lié à la disponibilité des informations au moment de l'évaluation. Le niveau de précision des informations utilisées pour représenter l'objet de l'évaluation déterminera le degré de confiance pouvant être attribué aux résultats et à l'évaluation (CEN, 2011).

La résolution de ce paradoxe nécessite essentiellement l'obtention d'informations précises sur les alternatives dans les premières phases de conception, ainsi que l'accélération des calculs de résultats. Cela peut être fait en utilisant des données préalablement calculées avec la modélisation des informations que peut offrir le BIM, en simplifiant la création de données avec des composants prédéfinis plus gros (Malmqvist et al., 2011), avec l'utilisation de repères, de valeurs cibles et autres informations préremplies (Roberts et al., 2020). Ces modes de simplifications sont détaillés dans la section « **2.3 Modes de simplifications d'une ACV** ». Ainsi, l'indisponibilité des données peut amener l'évaluateur à faire des estimations assez approximatives ce qui, pour certains chercheurs, est toujours mieux que d'ignorer des données, phases ou impacts (Malmqvist et al., 2011). Une omission peut cependant être justifiée selon son importance dans l'étude, ce qui est détaillé dans le point suivant.

2.2.3.3 Influence de l'importance relative des éléments considérés

Finalement, la simplification peut dépendre du poids relatif des données les unes par rapport aux autres, de leurs impacts sur les différents indicateurs environnementaux ainsi que de la répartition de ce poids dans les phases qu'elles affectent. Sous cet angle et avec une analyse de sensibilité (identification des données ayant le plus contribué au résultat d'un indicateur), on peut constater que certaines parties du processus sont négligeables par rapport à l'étude dans sa globalité (Rochon, 2013 ; CEN, 2011). C'est pourquoi il peut s'avérer raisonnable de décider de ne pas considérer certaines parties du processus. La loi de Pareto adopte un raisonnement allant dans ce sens en affirmant que 80% des effets sont liés à 20% des causes (Lebert, 2014). Elle justifie l'usage d'une analyse de sensibilité pour exclure certaines parties de l'analyse (ISO, 2006b ; Lebert, 2014). On peut également faire des rapprochements entre les deux autres paramètres d'influence identifiés. Par exemple, avec le premier paramètre d'influence (domaine d'application et portée de l'étude), si les objectifs limitent l'étude à trois indicateurs, des omissions supplémentaires peuvent être réalisées si elles sont non significatives pour ces trois indicateurs choisis (Wittstock et al., 2012).

On peut citer des exemples plus concrets prouvant qu'il y a de sérieuses raisons de considérer l'importance relative des éléments à considérer. D'après Coline Blaison et Julien Mirofle (EGIS CONSEIL Bâtiment, Département Performance des Ouvrages, AMO QEB), « *la performance énergétique et carbone du bâtiment, [d'après nos recherches], représente 80% de l'impact environnemental d'un bâtiment sur sa durée de vie.* » (ADEME, 2018, p.38). Ensuite, l'EeBGuide a également identifié les principaux contributeurs au système dans l'ACV des bâtiments : les matières premières, la consommation en énergie et la consommation en eau (Wittstock et al., 2012), même s'il faut rester conscient que cela peut varier selon les spécificités du cas étudié. De même, pour les indicateurs environnementaux principaux, Malmqvist et al. (2011) souligne l'importance des trois indicateurs suivants : l'utilisation totale des ressources énergétiques primaires non renouvelables (PENRT), le potentiel de réchauffement planétaire (GWP) et l'utilisation totale des ressources énergétiques primaires renouvelables (PERT).

2.2.3.4 Contenu d'une ACV simplifiée

Il est possible de dresser la structure de l'ACV simplifiée en reprenant les exigences minimales à considérer, sur base d'une proposition de l'EeBGuide (Wittstock et al., 2012, p.37) :

- Objectif et champ de l'étude ;
- Définition claire des limites du système ;
- Étapes du cycle de vie à inclure ;
- Matériaux/produits inclus et exclus ;
- Processus pour l'énergie, l'eau, etc. inclus et exclus ;
- Règles de calcul et commentaires sur le degré d'approximation/d'incertitude ;
- Catégories d'impact prises en compte ;
- Résultats de l'impact du cycle de vie et interprétation ;
- Déclaration sur base d'une analyse de sensibilité (et une éventuelle revue externe).

2.2.3.5 Autres caractéristiques

Un des aspects primordiaux et récurrents à prendre en compte dans une ACV simplifiée est le signalement, la documentation ainsi que la justification des choix et des hypothèses qui sont pris. La justification et la transparence étaient déjà des exigences de l'ACV complète et de ses éventuelles comparaisons (Malmqvist et al., 2011), mais elle prend d'autant plus de sens ici pour les simplifications posées. Chaque aspect de simplification doit reposer sur des preuves scientifiques solides (Wittstock et al., 2012) ou du moins, elles doivent être clairement définies, expliquées ou documentées pour assurer leur cohérence (ISO, 2006b). Cette transparence totale est une façon de contrebalancer la couche de subjectivité inhérente à la simplification qui entache l'objectivité caractérisant l'ACV complète (ISO, 2006a). C'est le cas pour les étapes d'inclusion et d'exclusion des phases du cycle de vie, des intrants (matériaux/produits/processus) dont l'ensemble des données inconnues, manquantes ou nulles (ISO, 2006b ; CEN, 2011) ou des catégories d'impact (Wittstock et al., 2012).

Ensuite, malgré les précautions prises et assurées par l'ensemble des justifications exigées, il est vivement conseillé de ne pas publier les résultats d'une ACV simplifiée publiquement et de les conserver exclusivement à un usage interne (Malmqvist et al., 2011). Ils peuvent être transmis en communication interne pour des concours, mais pas pour des comparaisons publiques de matériaux ou de solutions technologiques (Wittstock et al., 2012).

Enfin, l'ACV simplifiée se doit d'être adaptée selon l'effort que le praticien souhaite fournir pour chaque indicateur et étape du cycle de vie (Malmqvist et al., 2011). Cela peut donc être un choix de l'utilisateur lui-même, ce qui est lié à la définition du champ de l'étude (premier facteur d'influence).

L'étude peut être simplifiée pour un professionnel de l'ACV, un architecte expert ou non, ou encore des consultants clients, urbanistes et tout intervenant non spécialisé (Malmqvist et al., 2011). C'est pourquoi on retrouve une diversité de principes et d'outils d'ACV simplifiées : pour certains outils d'ACV des bâtiments, la simplification proposée pour l'aide à la décision se veut être simple à manipuler par un non expert, alors que d'autres outils n'ont pas cette même ambition (Lasvaux, 2010).

2.2.3.6 Validité des résultats selon quatre études

Avant de décrire les modes de simplifications et les classifications existantes, il serait pertinent de questionner concrètement la validité des résultats que fournit une telle approche de critiquer la vision parfaite du facilitateur idéal qu'on pourrait se faire d'une ACV simplifiée une fois que l'on en connaît les principes.

Il n'existe pas une seule façon de simplifier l'ACV. Par conséquent, il n'y a pas une seule et unique affirmation tranchée quant à sa validité. Les résultats de différentes méthodes n'ont pas tous la même valeur et peuvent être à la fois fidèles pour certains indicateurs, mais moins fiables pour d'autres. Pour illustrer cette variabilité, les résultats de quatre études sont explorés ici (Kellenberger & Althaus, 2009 ; Salmon et al., 2011 ; Lebert, 2014 ; Decorte et al., 2021).

Decorte et al. (2021) étudient la stratégie de simplification d'un modèle par une approche unidimensionnelle (la volumétrie du bâtiment, son plan, les fixations et tous les ponts thermiques sont négligés). L'ACV simplifiée est réalisée avec le logiciel SimaPro et la base de données Ecoinvent. L'analyse simplifiée est comparée avec une ACV détaillée sur un même cas d'étude : la rénovation d'un immeuble résidentiel à Anvers, en Belgique, avec une durée de vie de 60 ans. Ces simplifications ont des impacts plus ou moins importants sur les résultats : elles entraînent une sous-estimation de l'utilisation de matériaux environnementaux (6-50%), de la consommation d'énergie opérationnelle (10-36%) et de l'impact de la durée de vie (10-30%) par rapport aux résultats de l'ACV détaillée (Decorte et al., 2021).

Kellenberger & Althaus (2009) examinent l'importance de certains matériaux et étapes du cycle de vie qui sont souvent négligés dans les ACV simplifiées pour obtenir des résultats similaires à ceux d'une ACV complète, avec moins d'efforts. L'étude porte sur un bâtiment théorique d'une durée de vie de 80 ans (en maçonnerie et son équivalent en ossature bois) dans un contexte suisse. L'outil d'ACV utilisé est LTE-OGIP avec la base de données Ecoinvent. Les chercheurs adoptent une approche simplifiée négligeant successivement le transport des matériaux de l'usine au site, les matériaux auxiliaires, le processus de construction et les déchets générés lors de la construction. Quantitativement, les résultats diffèrent de 15 à 30% entre la version complète et simplifiée, mais la

conclusion n'est pas unanime pour les différentes simplifications. D'une part, on constate que le processus de construction et les déchets de découpe sont effectivement négligeables dans ce cas. D'autre part, le transport des matériaux de l'usine au site est tout de même important lorsque les matériaux sont lourds avec un temps de trajet long et l'importance des matériaux auxiliaires est significative dans le cas de l'ossature bois, dû à l'usage de connecteurs métalliques (Kellenberger & Althaus, 2009).

Ensuite, on peut retrouver des résultats plus encourageants dans le projet BENEFIS « Bilan Energétique et Environnemental Fiable, Simple et reproductible des bâtiments » (Lebert, 2014). Il a été réalisé par la CSTB en collaboration avec Bouygues. Dans ce projet, c'est le logiciel ELODIE qui est utilisé sur deux immeubles résidentiels en France. Trois modes de simplifications sont exploités : la loi de Pareto (comme détaillée dans la partie *« 2.2.3.3 Influence de l'importance relative des éléments considérés »*, pour ne considérer que les plus forts contributeurs), le chiffrage rapide (usage des paramètres globaux du bâtiment, définis dès les premiers stades de conception, pour estimer les quantités) et l'usage de macro-composants (familles de façades, planchers, cloisons, etc. pour éviter de devoir décrire chaque élément). Les écarts obtenus sont faibles entre les méthodes simplifiées et l'ACV détaillé. Ces méthodes possèdent une bonne précision ainsi qu'une bonne reproductibilité par différents acteurs non experts de l'ACV. Pour le temps consacré à cette étude, il a été réduit de plus de 30% avec le chiffrage rapide et jusqu'à 75% avec la loi de Pareto. Le compromis en fidélité, exactitude, besoins et efforts fournis s'avère concluant pour inciter les concepteurs et les différents intervenants à intégrer une approche en cycle de vie dans leur projet (Lebert, 2014).

Enfin, on constate que même entre plusieurs outils d'ACV complètes qui étudient un même cas d'étude, on peut déjà retrouver des différences importantes dans les résultats. C'est le cas du projet COIMBA « Connaissances de l'Impact environnemental des Bâtiments » (Salmon et al., 2011), un projet de recherche qui date de 2011 (donc, avant la proposition de la méthode standardisée d'ACV des bâtiments décrite dans la norme EN 15804) et qui a été mené par Nobatek en collaboration avec ARMINES, la CSTB, IZUBA énergies et Enertech. La partie pratique de cette étude compare trois outils d'ACV complètes (ELODIE, EQUER et SimaPro) avec trois bases de données (Ecoinvent, DEAM et INIES). Les trois études se basent sur un même cas d'étude : un logement individuel neuf de 150 m² près de Lyon en France, en ossature bois et avec des capteurs solaires thermiques et photovoltaïques. On constate des décalages importants entre les résultats délivrés par rapport à la moyenne des résultats des trois outils pour certains indicateurs. Des écarts relativement faibles sont observés pour la consommation d'énergie et d'eau (10 à 20% maximum) mais les différences s'amplifient avec des indicateurs qui dépendent de nombreux flux tout au long du cycle de vie, tels que le GWP et

l'acidification atmosphérique (presque 50%). Cet article l'explique par trois types d'incertitudes : l'usage de différents inventaires, les variations entre les logiciels entre eux et les évaluateurs eux-mêmes (Salmon et al., 2011). Si déjà avec des méthodes complètes on obtenait des résultats quantitatifs si différents, on ne peut s'attendre qu'à des variations plus importantes avec l'usage de méthodes simplifiées. Il sera dès lors surtout intéressant d'étudier si les différents outils permettent d'identifier les mêmes meilleures stratégies environnementales.

Avec ces quatre exemples, on se rend compte de la diversité des résultats d'ACV simplifiées selon les éléments analysés :

- Premièrement, les simplifications ont tendance à sous-estimer les impacts de façon assez variable selon les indicateurs étudiés ;
- Deuxièmement, des critiques sont à apporter quant aux éléments qui sont négligés de façon récurrente, ils doivent être discutés au cas par cas ;
- Troisièmement, le choix d'une baisse de précision peut réellement permettre de réduire les efforts à fournir tout en proposant des résultats fidèles et utilisables ;
- Quatrièmement, des variations importantes sont déjà constatées entre différentes méthodes d'ACV complètes ; on peut s'attendre à des variations plus importantes avec les ACV simplifiées.

Il y a donc de bonnes raisons de démultiplier la réalisation d'études d'évaluation comparatives d'ACV simplifiées pour comprendre davantage les différences et incertitudes d'éléments de simplifications précis. C'est pourquoi ma recherche s'inscrit dans cette démarche.

2.3 Modes de simplifications d'une ACV

La description de l'ACV simplifiée présentée précédemment montre bien qu'il existe une très grande variété de simplifications possibles et qu'il serait opportun de les répertorier et ensuite de les classer. Toutefois, on observe toujours un réel manque de clarté dans la terminologie et la typologie de la simplification (Tasala Gradin & Björklund, 2021). De nombreux chercheurs se sont penchés sur cette question et leur travail a été synthétisé ci-après, mais cet aspect manque cruellement dans les normes qui la définissent (Wittstock et al., 2012 ; Tasala Gradin & Björklund, 2021).

Plusieurs modes de simplifications ont déjà été énoncés précédemment dans des exemples, mais ils seront rassemblés dans cette section de la façon la plus représentative possible de ce qui existe. Certains modes se recouvrent les uns les autres, chacun ayant tout de même des spécificités propres.

Le premier mode de simplification identifié est la **modélisation simplifiée de l'information**. Cela consiste bien en une simplification car elle permet de réduire le temps d'acquisition des données grâce

à une prise en compte systématique et automatique des caractéristiques et données d'un projet évoluant (Soust-Verdaguer et al., 2016) telles que les quantités de matériaux de construction mis en œuvre. Divers moyens peuvent être mis en place à travers des programmes de CAO et notamment, le BIM (Building Information Modeling), utilisé lors des phases de conception (Malmqvist et al., 2011 ; Soust-Verdaguer et al., 2016 ; Hollberg et al., 2018 cité dans Beemsterboer, 2019). Ce dernier permet également (et de façon paradoxale) d'augmenter le niveau de détail d'un modèle sans nécessairement demander beaucoup plus d'efforts (Beemsterboer, 2019).

L'**optimisation de l'interface d'un outil d'ACV** est également vue comme un mode de simplification par de nombreux chercheurs (Malmqvist et al., 2011 ; Lebert, 2014 ; Miyamoto et al., 2020). Il existe plusieurs façons de renforcer l'intuitivité et l'ergonomie d'un programme, notamment en minimisant le nombre d'entrées, en simplifiant celles-ci ou encore en intervenant sur la manière de présenter ses résultats (Miyamoto et al., 2020). Il est par exemple possible de les présenter visuellement avec différentes représentations graphiques, en croisant les impacts, les phases et les éléments impactant pour les rendre plus facilement interprétables (Miyamoto et al., 2020). À travers ce mode de simplification de l'interface de l'ACV, certains chercheurs voient un intérêt supérieur à celui de la simplification des calculs en eux-mêmes car ces derniers sont automatisés dans tous les cas (Malmqvist et al., 2011). Cet avis n'est pas partagé par tous les chercheurs, notamment parce que les outils plus conviviaux et faciles à utiliser cachent finalement toute la complexité des calculs (effet « boîte noire ») ; cela limite la compréhensibilité pour les évaluateurs. Sous cet angle, on pourrait également considérer l'utilisation d'un score global unique (Malmqvist et al., 2011 ; Miyamoto et al., 2020 ; Decorte et al., 2021). Le principe consiste en une pondération des indicateurs, ce qui permet de les agréger en une valeur globale, utilisant donc une unité commune. Par exemple, monétiser les impacts permet de les rendre plus interprétables (Miyamoto et al., 2020 ; Decorte et al., 2021). Toutefois, il est nécessaire de préciser qu'il n'existe aucune justification objective et scientifiquement établie pour réduire les résultats d'une ACV en un seul score (ISO, 2006). En effet, le choix du type de pondération est une opération subjective et donc controversée (Decorte et al., 2021).

La **simplification des méthodes de calcul** est évidemment un mode de simplification de l'ACV. Elle peut être automatisée ou non (Lebert, 2014 ; Roy, 2017 ; Miyamoto et al., 2020). Par exemple, l'outil d'ACV simplifiée « Impact Estimator » de l'Institut Athena permet de calculer automatiquement la quantité d'armatures requises une fois les surfaces de béton entrées avec leurs portées (Roy, 2017). Les calculs énergétiques peuvent se baser sur des degrés-jour de chauffage équivalents plutôt que des simulations énergétiques dynamiques avec des programmes tels que EnergyPlus (Miyamoto et al., 2020). On peut également citer le principe du « chiffrage rapide », une méthode de calcul permettant de réaliser un

métré des quantités d'éléments sur base de paramètres globaux, de la même façon que les deviseurs pour faire des approximations de la réalité (Lebert, 2014). On constate que ce mode de simplification peut se confondre et englober plusieurs autres approches de simplification telles que l'optimisation de l'interface, l'utilisation de paramètres globaux, etc.

La **simplification des méthodes de récolte de données** à est à bien distinguer de la simplification de la donnée en elle-même. C'est notamment le cas des données de performances énergétique et thermique de l'ACV à travers l'utilisation de programmes de simulation énergétique ou thermique. Avec les simulations, la donnée est effectivement plus détaillée et complexe par rapport à un calcul à l'aide des coefficients de transmission thermique (U) des différentes parois qui composent un bâtiment (Salmon et al., 2011 ; Soust-Verdaguer et al., 2016), mais son automatisation rend la collecte de données plus simple. Ce mode de simplification est donc lié à la substitution de données (Beemsterboer, 2019), détaillé ci-dessous, mais de manière focalisée sur la consommation d'énergie et la performance thermique du bâtiment. Une fois les caractéristiques du bâtiment et de ses équipements définies, il est possible de réaliser différents scénarios d'utilisation opérationnelle, prenant en compte de façon très précise les variations annuelles (saisons), hebdomadaires (semaine – weekend) ou journaliers (heure par heure, jour-nuit).

Le **changement de type de donnée** est un des modes de simplifications le plus récurrents ; cela peut s'expliquer par le fait que certains chercheurs considèrent que l'utilisation de bases de données génériques est déjà une forme de simplification en soi (Janin, 2000 cité dans Alain, 2015 ; Lasvaux, 2010 ; Soust-Verdaguer et al., 2016 ; Beemsterboer, 2019 ; Tasala Gradin & Björklund, 2021). La précision des données d'entrée a une grande importance sur les résultats d'une ACV (Nehasilová et al., 2014). Tout d'abord, la mesure de la donnée réelle est la façon la plus fiable d'obtenir une information, mais ce n'est pas toujours possible selon l'avancement du projet. Ensuite, pour une ACV complète, les normes recommandent l'utilisation de DEP (CEN, 2011). Cependant, leur utilisation est loin d'être généralisée étant donné leur nombre limité (Soust-Verdaguer et al., 2016). Lorsqu'une DEP est disponible, il se peut que les informations qui y figurent ne concernent que la seule phase de production avec, parfois, certaines phases ultérieures du cycle de vie (CEN, 2011). Si la DEP d'un produit n'existe pas, il est possible d'utiliser la DEP d'un autre produit de façon adaptée, à condition de prouver qu'elle est bien représentative, fiable et précise (CEN, 2011). Dans les autres cas, on utilise des bases de données génériques ou d'autres solutions moins précises telles que des estimations basées sur l'expérience des évaluateurs, des recherches antérieures, des sources de données régionales, moyennes ou statistiques, etc. (Salmon et al., 2011 ; Soust-Verdaguer et al., 2016).

Ces données se doivent d'être représentatives notamment au niveau géographique (du même pays ou d'un pays voisin si le réseau électrique ou les technologies de fabrication sont similaires, sinon une moyenne pour l'Europe ou encore une moyenne mondiale) et technologique (elle doit refléter une technologie de pointe équivalente) et doivent assurer une certaine précision et consistance (Wittstock et al., 2012). Par exemple, pour étudier la consommation en eau, il est possible d'utiliser des modèles d'estimation sur base des données d'organismes de gestion des eaux (Salmon et al., 2011).

Les données peuvent également être agrégées en parties de bâtiment, éléments ou composants appelés **macro-composants** ou assemblages prédéfinis (Malmqvist et al., 2011 ; Lebert, 2014 ; Soust-Verdaguer et al., 2016 ; Roy, 2017). Voici quelques exemples : un mur extérieur multicouche, un plancher, une cloison intérieure, le toit, etc. Cette simplification épargne l'évaluateur d'opérations fastidieuses dans la collecte des données, c'est-à-dire considérer chaque élément singulier constituant le bâtiment (Roy, 2017).

Voici un tableau récapitulatif des différents types de données et des moments opportuns pour leur utilisation. L'aspect temporel sera discuté dans la partie « **2.5 Phases du processus de conception** ».

Données recommandées	Moment de l'évaluation				
	Esquisse / Projet	Conception détaillée Projet final	Fabrication	Phase d'utilisation	Fin de vie du bâtiment
Données génériques	X	X	X	X	X
Données agrégées	X	X			
Données moyennes	X	X	X	X	X
Données collectives du produit	O	X	X	X	X
Données moyennes du produit	O	X	X	X	X
Données spécifiques du produit	O	X	X	X	X
Modèles de scénarios pour la phase d'utilisation	X	X	X	X	
Données mesurées			X	X	X
Autres données	O	O	O	O	O
NOTE La croix représente les données recommandées et le cercle représente les autres sources éventuellement disponibles.					

Figure 7 : Type de données pouvant être utilisées aux différentes phases de l'évaluation (CEN, 2011, tableau 1, p.41)

Il est possible d'effectuer une simplification de l'ACV en n'utilisant que les **données globales** du projet, soit son volume, sa hauteur, son aire du plancher, etc. En insérant les dimensions générales et les coupes du bâtiment, des programmes peuvent estimer la quantité de matériaux nécessaires avec leur impact ; ils estiment grossièrement l'énergie utilisée en début de conception (Malmqvist et al., 2011).

Enfin, les derniers modes de simplifications identifiés sont ceux qui consistent à **négliger ou omettre des parties de l'ACV**. C'est également une simplification très récurrente parmi les études sur les ACV simplifiées (Kellenberger & Althaus, 2009 ; Lasvaux, 2010 ; Malmqvist et al., 2011 ; Wittstock et al., 2012 ; Soust-Verdaguer et al., 2016 ; Roy, 2017 ; Beemsterboer, 2019 ; Tasala Gradin & Björklund, 2021). L'idée est de déterminer les éléments qui contribuent le plus à la performance environnementale ou, à l'inverse, ceux qui sont négligeables, pour savoir où placer le curseur des pistes d'amélioration (Scheuer et al., 2003 cité dans Kellenberger & Althaus, 2009). Compte tenu de cet objectif, trois sous-catégories de simplifications principales sont identifiables :

- **Négliger des matériaux/produits** en se concentrant sur les plus grands éléments de construction, les éléments les plus importants (Malmqvist et al., 2011 ; Soust-Verdaguer et al., 2016 ; Roy, 2017), ceux qui contribuent à une catégorie d'impact en particulier (Malmqvist et al., 2011) ou encore ceux qui appartiennent à une partie du bâtiment tels que l'enveloppe, la structure, les toits, les fenêtres, etc. pour une évaluation partielle (Soust-Verdaguer et al., 2016). C'était le cas dans les deux premières études (Kellenberger & Althaus, 2009 ; Decorte et al., 2021) décrites au point « **2.2.3.6 Validité des résultats selon quatre études** » (elles négligent les ponts thermiques et les matériaux auxiliaires/déchets de découpe). Cependant, il existe un "paradoxe de coupure" (Tasala Gradin & Björklund, 2021) car afin de déterminer si un élément peut être éliminé, il est nécessaire de connaître son poids dans les impacts totaux. Afin de contourner ce paradoxe, certains évaluateurs se basent sur la sensibilité des résultats ou des seuils prédéterminés. Cependant ce n'est pas toujours possible si les données ne sont pas accessibles (Tasala Gradin & Björklund, 2021).
- **Négliger des étapes/phases du cycle de vie**. Il n'est pas courant qu'une étude d'ACV étudie les modules d'A1 à D (selon la définition de la NBN EN 15978), c'est-à-dire toutes les étapes du cycle de vie, allant de l'extraction des matières premières à la gestion de la fin de vie ainsi que les avantages et charges hors frontières du système (Soust-Verdaguer et al., 2016). Les premières simplifications sont souvent réalisées dans les étapes de fin de vie (Malmqvist et al., 2011). Cependant c'est surtout une question de manque de données plutôt que de poids de l'impact associé en soi. Pour illustrer ce mode de simplification, on peut à nouveau citer les études décrites précédemment comprenant l'omission de la phase de construction (Kellenberger & Althaus, 2009) ou d'autres phases du cycle de vie (Decorte et al., 2021) comme l'illustre la **figure 8**.

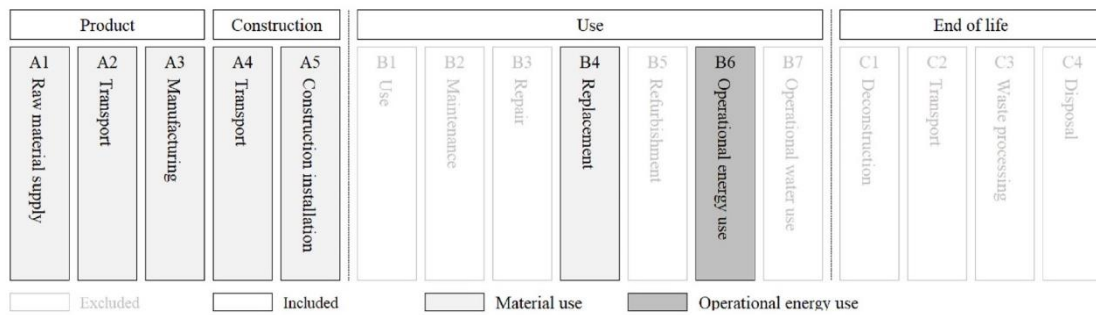


Figure 8 : Etapes de cycle de vie exclue d'un exemple d'étude d'ACV simplifié (basé sur une vue de la norme EN 15978 adaptée dans l'article Decorte et al., 2021, figure 3, p.5)

- Négliger des indicateurs/catégories d'impact.** Selon les objectifs fixés par l'étude, il n'est pas toujours nécessaire d'évaluer l'ensemble des indicateurs et catégories d'impact environnementaux d'un bâtiment (Malmqvist et al., 2011 ; Wittstock et al., 2012 ; Soust-Verdaguer et al., 2016). On rappellera les trois indices principaux à considérer selon l'EeBGuide (Wittstock et al., 2012) : l'utilisation totale des ressources énergétiques primaires non renouvelables (PENRT), le potentiel de réchauffement planétaire (GWP) et l'utilisation totale des ressources énergétiques primaires renouvelables (PERT).

À nouveau, ces modes de simplifications ne sont pas mutuellement exclusifs ; au contraire, ils sont rarement utilisés seuls, ils se chevauchent et se recouvrent le plus souvent.

2.4 Typologies d'ACV simplifiées

Avant de présenter les classifications existantes, il est important de savoir qu'il n'est pas possible de concevoir de manière exhaustive une seule et unique approche de la simplification de l'ACV (Weitz & Sharma, 1998 cité dans Tasala Gradin & Björklund, 2021). Le champ des simplifications, sa portée et son niveau de détail varient principalement en fonction des objectifs fixés ; il peut donc être très large (Wittstock et al., 2012 ; Soust-Verdaguer et al., 2016). C'est la raison pour laquelle on ne peut pas raisonnablement parler d'une typologie, mais bien de typologies, au pluriel. De plus, plusieurs approches de simplification peuvent être utilisées dans une même étude (Wittstock et al., 2012 ; Tasala Gradin & Björklund, 2021), elles peuvent se recouvrir et s'influencer mutuellement (une simplification dans l'inventaire influera l'étape d'évaluation des impacts), ce qui peut compliquer davantage l'interprétation des résultats. Enfin, à cause de l'hétérogénéité des stratégies de simplification, il n'est toujours pas possible d'assurer la comparabilité des résultats (Soust-Verdaguer et al., 2016). Cela impose une parfaite transparence en ce qui concerne l'explication de la démarche simplificatrice, avec toutes les hypothèses qui impactent la validité et les limites de ses résultats (Tasala Gradin & Björklund, 2021).

2.4.1 Typologies par mode de simplification

Dans la plupart des cas, les typologies existantes tiennent compte d'un ou plusieurs modes d'omissions. Les trois modes décrits dans la section précédente sont souvent distingués en types distincts, comme l'ont notamment fait différents chercheurs (Lasvaux, 2010 ; Alain, 2015 ; Tasala Gradin & Björklund, 2021). Pour rappel, il s'agit de négliger des matériaux ou produits, les étapes du cycle de vie ou les indicateurs d'impact.

Des nuances sont à apporter pour certains cas. En effet, certains types sont parfois plus spécifiques et possède une terminologie légèrement différente. Dans les cinq simplifications de Janin (2000) que Sylvie Alain cite dans son mémoire de maîtrise (Alain, 2015), « se limiter à l'impact de fabrication des matériaux (cradle to gate) » est défini comme un type alors qu'il peut être inclus dans le type plus général « négliger des étapes du cycle de vie ». Un autre exemple de cette même référence est « se limiter à 1 seul critère » inclus dans « négliger des indicateurs d'impact ». Ces mêmes types peuvent également être combinés. Par exemple « se limiter à certains problèmes environnementaux à des étapes particulières du cycle de vie » combine « négliger des indicateurs d'impact » et « négliger des étapes du cycle de vie » (Janin, 2000 cité dans Alain, 2015).

De la même façon que pour les omissions, un seul mode de simplification est souvent considéré comme un type particulier. C'est de cette façon qu'est notamment construite la typologie de Katja Tasala Gradin et Anna Björklund (Tasala Gradin & Björklund, 2021), qui ont identifié dix types de simplifications (avec leur mode d'application) listés sur la [figure 9](#).

Simplification category	Application	Reason for implementation
1 Partly or fully ignoring upstream and/or downstream processes	Limit the system boundaries and subsequent inventory analysis	<ul style="list-style-type: none"> • Lack of data • Focus on specific life cycle phase(s)
2 Narrowing the range of environmental impacts considered	Limit impact assessment categorisation	<ul style="list-style-type: none"> • Lack of data • Focus on specific impact(s)
3 Mixing qualitative and quantitative data	Quantitative inventory translated to qualitative indicators or qualitative inventory and impact assessment	<ul style="list-style-type: none"> • Lack of data • Assess the impacts that are difficult to quantify
4 Using surrogate process data	Use of database or software for LCI	<ul style="list-style-type: none"> • Lack of data
5 Establishing showstopper criteria	Analysis of key material and process parameters in LCI, related to a set threshold criterion	<ul style="list-style-type: none"> • Identifying critical issues
6 Limiting the constituents studied to those meeting a threshold volume	Limit material and energy inventory analysis to a set threshold volume	<ul style="list-style-type: none"> • Lack of data
7 Cut-off	Limit material and energy inventory analysis, excluding processes, limit impact assessment according to a set threshold volume	<ul style="list-style-type: none"> • Lack of data • Elements with insignificant impacts
8 Tool/database	Use database, tool or software for LCI, LCIA or Interpretation	<ul style="list-style-type: none"> • Lack of data • Screening • Area-specific tools/modules available
9 Comparative LCA with the omission of identical elements	Limit comparative inventory analysis	<ul style="list-style-type: none"> • Lack of data • Strict comparison allows omission of identical parts
10 Screening	Assess complete LC, lower data quality in LCI, several impact categories	<ul style="list-style-type: none"> • Lack of data • Find key issues

Figure 9 : Exemple d'approches de simplification décrites en termes d'application et de raison d'utilisation (Tasala Gradin & Björklund, 2021, table 2, p.58).

Cette typologie a la particularité de mettre en évidence les raisons de la simplification (tels que le manque de données, la volonté de se focaliser sur un impact spécifique, etc.).

- Les deux premiers, le cinquième, le sixième et le septième sont des omissions (respectivement : suppression d'étapes de cycle de vie, d'impacts, d'éléments non pertinents selon les objectifs, des matériaux/produits insignifiants, de processus unitaire) ;
- Le troisième, le quatrième et le huitième sont des modes de changement de type de donnée (respectivement avec des données qualitatives, des données similaires de remplacement ou selon des bases de données génériques) ;
- Le neuvième est une omission particulière, elle est comparative (se focalisant sur des éléments identiques et donc comparables qualitativement). Ce mode de simplification est aussi fréquent (Janin, 2000 cité dans Alain, 2015 ; Roy, 2017) ;
- Enfin, la dixième introduit le « screening », qui est également un type de simplification que l'on retrouve régulièrement et qui sera détaillé à la fin de cette section.

2.4.2 Typologies par stratégie de simplifications

D'autres chercheurs adoptent des approches plus synthétiques, ne considérant plus un seul mode de simplification comme un type lui-même, mais bien en regroupant un ensemble de modes similaires en un type. C'est le cas de Sjouke Beemsterboer (2019) qui en propose cinq :

- Exclusion (limitation dans les matériaux/produits, phases ou indicateurs d'impacts) ;
- Substitution de données manquantes (données d'inventaire, estimation) ;
- Jugement qualitatif d'experts (jugement du poids des catégories/problèmes par des experts) ;
- Standardisation (recommandations des normes et des guides, outils standardisés) ;
- Automatisation (ACV computationnelle et intégration automatisée, avec l'exemple du BIM).

Soust-Verdaguer et al. proposent eux aussi une typologie selon des stratégies regroupant chacune plusieurs modes de simplifications (Soust-Verdaguer et al., 2016). Pour eux, les simplifications se rapportent à la définition des limites du système, aux étapes du cycle de vie et à la communication des résultats, des aspects à réduire ou à optimiser. Elle s'articule donc en trois types :

- Réduire la quantité de données, en limitant les frontières de la définition du système (très lié à la partie « **2.2.3.1 Influence du domaine d'application et la portée de l'étude** ») ;
- Optimiser les étapes du cycle de vie et des scénarios (omissions d'étapes principalement et usage de bases de données génériques ou estimations, faute de DEP) ;
- Simplifier le calcul d'impact et la communication des résultats (omissions d'indicateurs d'impact et organisation des résultats par classifications de matériaux ou par étapes d'ACV).

2.4.3 Typologie « detailed – simplified – screening »

La dernière typologie abordée dans cette section est une typologie souvent évoquée (Jensen, 1998 ; Malmqvist et al., 2011 ; Wittstock et al., 2012 ; Soust-Verdaguer et al., 2016) et notamment décrite dans l'EebGuide (Wittstock et al., 2012). Elle catégorise les ACV en 3 types (dans un ordre de niveau de détail décroissant) : l'ACV complète, l'ACV simplifiée et l'ACV « screening ». Elle est très similaire à celle des lignes directrices du projet de recherche ENSLIC (ENergy Saving through promotion of Life Cycle Analysis) avec les trois types équivalents : « Advanced », « Medium » et « Basic » (Malmqvist et al., 2011). Cette typologie est pensée selon 4 critères (Soust-Verdaguer et al., 2016) : les limites du système, la disponibilité des données, l'état d'avancement du projet et l'expérience des utilisateurs, car les niveaux simplifiés et de screening permettent aux non-experts d'expérimenter une première fois l'approche en cycle de vie en adaptant la méthodologie à leurs besoins, tout en restant un maximum précis (Malmqvist et al., 2011).

L'ACV complète de cette typologie n'a pas changé. C'est toujours la même que celle définie dans la section « **2.2.2 ACV complète des bâtiments** » qui porte, en théorie, sur l'ensemble du cycle de vie (Wittstock et al., 2012). Concrètement, elle nécessite l'utilisation de programmes d'ACV tels que SimaPro, Gabi, Pleiades ACV, etc. qui demandent plus d'expérience et une compréhension profonde de ce qu'est une ACV. Elle n'est évidemment pas adaptée pour les premières phases de conception, comme le prouve le paradoxe de l'écoconception.

L'ACV screening est une ACV « très » simplifiée qui prend le plus souvent la forme d'un tableur Excel, avec des encodages simples et ce, pour quelques impacts seulement. Leur utilisation ne requiert pas ou peu d'expérience (Malmqvist et al., 2011). Elle permet un premier aperçu rapide non détaillé des résultats aux premiers stades de conception (Wittstock et al., 2012). Les règles de calculs sont assez simples, notamment basées sur des cibles de performance PEB (énergie primaire en kWh/m²).

Enfin, l'ACV simplifiée est, dans cette configuration, une étape intermédiaire entre l'ACV complète et l'ACV screening. De nombreux outils existent tels que « Ecosoft, TOTEM, Enslic, Legep, Envest, etc. » ; il faut de l'expérience et de l'entraînement pour pouvoir les utiliser (Malmqvist et al., 2011). Elle permet aussi une évaluation rapide aux premiers stades de conception mais de façon un peu plus avancée et détaillée que l'ACV screening (Wittstock et al., 2012). Tout est globalement identique à l'ACV screening, mais de manière plus précise. On utilisera notamment des méthodologies nationales de calculs, parfois des simulations thermiques et on tiendra compte des moyennes des consommations d'eau.

En ce qui concerne les étapes incluses, pour les ACV de type screening et simplifiées, plusieurs phases et modules sont dits « optionnels », en fonction de leur pertinence et de la disponibilité des données. (Soust-Verdaguer et al., 2016).

La **figure 10** présente une vue schématique des étapes obligatoires à prendre en compte pour les 3 types d'ACV de cette typologie. Pour l'ACV screening (en rouge sur la **figure 10**), toutes les phases de production sont prises en compte (A1, A2, A3 selon la norme EN 15978) ainsi que la consommation d'énergie et d'eau dans la phase d'exploitation (B6 et B7). Pour l'ACV simplifiée (en orange), en plus des modules obligatoires de l'ACV screening (A1, A2, A3, B6 et B7), sont également pris en compte : le remplacement dans la phase d'exploitation (B4), le traitement des déchets, l'élimination dans la phase de fin de vie (C3 et C4). L'ACV complète (en jaune) prend en compte tout le reste, c'est-à-dire la phase de construction (A4 et A5), l'utilisation, la maintenance et la rénovation dans la phase d'exploitation (B1, B2, B3 et B5), la déconstruction ainsi que le transport pour élimination dans la phase de fin de vie (C1 et C2) (Wittstock et al., 2012). Les avantages et charges hors frontières (D) sont optionnels pour tous les types d'ACV.

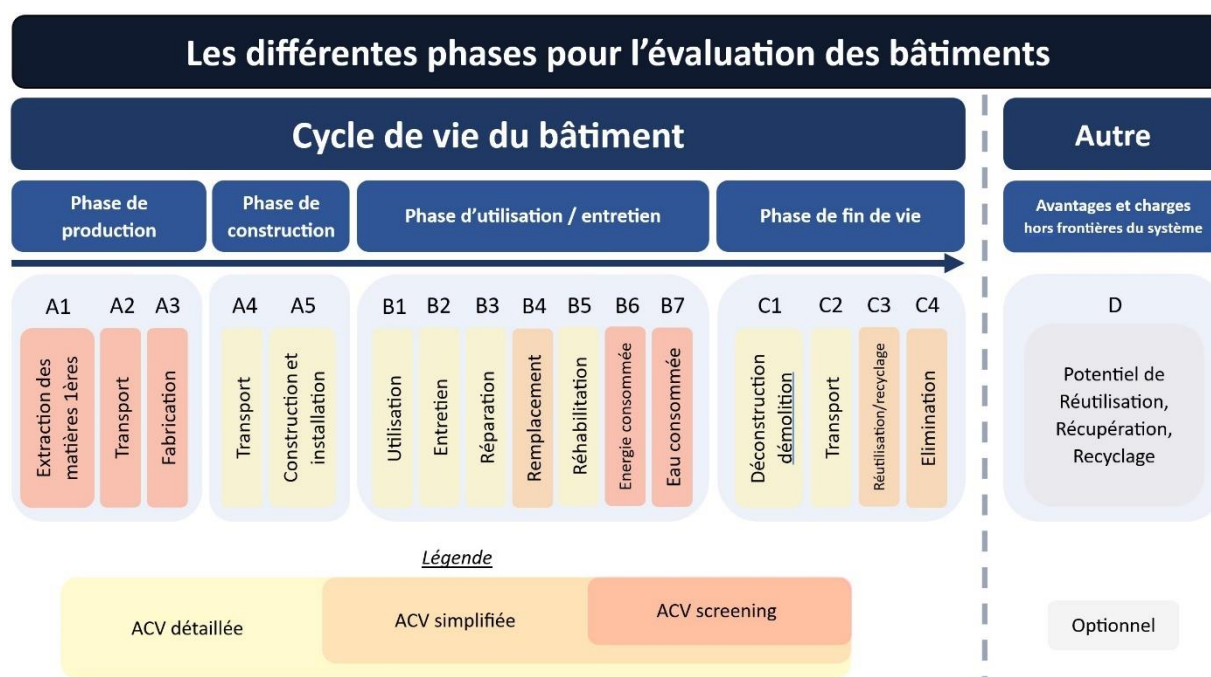


Figure 10 : Vue schématique des étapes obligatoires à prendre en compte pour la typologie « detailed – simplified – screening ». Ce schéma a été créé sur base d'une illustration de la norme EN 15978

Une réflexion critique sur ces modes de simplifications et typologies ainsi qu'une proposition personnelle de typologie d'ACV simplifiées basée sur celles-ci seront proposées à la fin de la partie « 2.6 Synthèse et réflexion personnelle sur l'état de l'art ».

2.5 Phases du processus de conception

2.5.1 Interaction avec le processus d'écoconception

Comme cela a été démontré avec le paradoxe de l'écoconception dans l'introduction ([figure 2](#)), une ACV complète est difficilement réalisable au début de la conception car elle requiert une grande quantité d'informations qui ne sont pas accessibles au début du projet. En effet, ces données augmentent progressivement tout au long du projet, mais en partant de zéro. Il a également été observé que certains modes de simplifications de l'ACV permettent de combler ce manque de données à partir de très peu de données en entrée. L'objectif de cette section est d'en savoir un peu plus sur l'évolution des données au cours du projet, le type d'information disponible à tel moment pour connaître le mode de simplification qui sera le plus pertinent à chacun des stades du projet.

2.5.2 Types de données produites aux différents stades de développement du projet

Cette section est structurée selon les six phases usuelles du projet de construction : les études préalables, les esquisses, l'avant-projet sommaire, l'avant-projet détaillé, la construction et l'exploitation. Les deux dernières étapes sont beaucoup moins intéressantes dans notre cas puisque la conception y est terminée.

La première phase identifiée correspond aux études préalables et la préconception, c'est-à-dire le montage du projet, le choix du site et ses caractéristiques, ainsi que la préparation de la conception. Cette phase cible déjà des performances qui auront un impact sur tous les choix qui suivront dans le déroulement futur du projet (Malmqvist et al., 2011). Aucun calcul n'est possible, mais c'est à ce moment que sont explorés les objectifs environnementaux du projet ainsi que les systèmes et procédés constructifs. Des objectifs programmatiques et seuils d'impact peuvent être fixés (ADEME, 2018 ; Miyamoto et al., 2020). On peut considérer que dans la préconception, au niveau géométrique, la volumétrie du bâtiment est indéfinie, mais on connaît les surfaces moyennes de plancher, les hauteurs, une approximation de la compacité. Au niveau technique, le niveau d'isolation et l'efficacité du système de chauffage sont connus. Enfin, pour ce qui est de l'utilisation, le nombre d'occupants et les stratégies de ventilation sont estimés (Miyamoto et al., 2020).

La seconde phase est l'esquisse, c'est à ce moment que le processus de conception démarre vraiment (Malmqvist et al., 2011). Le bâtiment y est défini de façon sommaire. C'est une phase très importante où de grandes décisions qui influencent les fondements du projet sont prises (ADEME, 2018 ; Miyamoto et al., 2020) et qui fixent souvent les 20% de causes qui sont responsables des 80% des

impacts si on suit la loi de Pareto (ADEME, 2018). En particulier, beaucoup d'estimations peuvent être faites sur base d'une géométrie « en boîtes » avec dimensions, emplacements et compacité, ainsi qu'un rapport de proportions d'ouvertures par rapport aux murs pleins sur les 4 façades (ADEME, 2018 ; Miyamoto et al., 2020). Au niveau technique, des choix sont pris sur la structure (légère ou lourde), les matériaux et épaisseurs d'isolation (un U peut être estimé) (Malmqvist et al., 2011 ; Miyamoto et al., 2020). Enfin, le comportement des utilisateurs peut être plus détaillé et les gains internes peuvent être estimés (Miyamoto et al., 2020).

La troisième phase correspond à l'avant-projet sommaire qui permet de confirmer l'esquisse. À ce stade, la plupart des principes de construction ont été identifiés, les impacts sont donc déjà bien définis. Néanmoins, il reste encore une marge de manœuvre considérable dans le choix des matériaux et produits (ADEME, 2018). Les orientations, la typologie du bâtiment et sa volumétrie sont fixées ; les impacts des gains solaires et ombrage sont donc connus (Malmqvist et al., 2011 ; Miyamoto et al., 2020). Au niveau technique, le type de vitrage et leur ratio par orientation sont connus, tout comme les éventuels systèmes d'ombrages. Les matériaux d'isolation sont choisis pour chaque élément de l'enveloppe mais le système HVAC n'est pas encore défini en détail (Malmqvist et al., 2011). Enfin, les gains internes sont déterminés précisément avec les appareils électriques et les lumières selon les zones chauffées, les classes d'équipement et les heures ou cycles d'utilisation (Miyamoto et al., 2020).

La quatrième phase est l'avant-projet détaillé, il s'agit de la conception finale pour la soumission. Cette phase marque définitivement la fin du projet architectural répondant au programme demandé par le maître d'ouvrage (ADEME, 2018). Les dernières décisions et le degré de flexibilité restant ne seront plus du ressort du concepteur ; ils seront laissés aux entrepreneurs (ADEME, 2018). Les composantes sont parfaitement définies, que ce soit la structure finale, les matériaux de construction employés ou les systèmes mis en œuvre (Malmqvist et al., 2011 ; ADEME, 2018).

L'avant-dernière phase est la construction (le chantier) ; il y a toujours la possibilité de choisir le meilleur entrepreneur selon leur force de proposition et leur conscience environnementale (ADEME, 2018). Enfin, la dernière phase est l'exploitation. Les quantités sont parfaitement connues car l'objet étudié est devenu la réalité. On a les matériaux réels et les systèmes mis en œuvre pour réaliser une ACV complète si les DEP sont toutes disponibles et complètes. L'intérêt est de disposer d'une meilleure connaissance des impacts et d'avoir un retour objectif sur ceux qui sont réellement évités (ADEME, 2018).

Pour terminer, voici deux illustrations qui mettent en relation la disponibilité de l'information le long des phases du projet en abscisse :

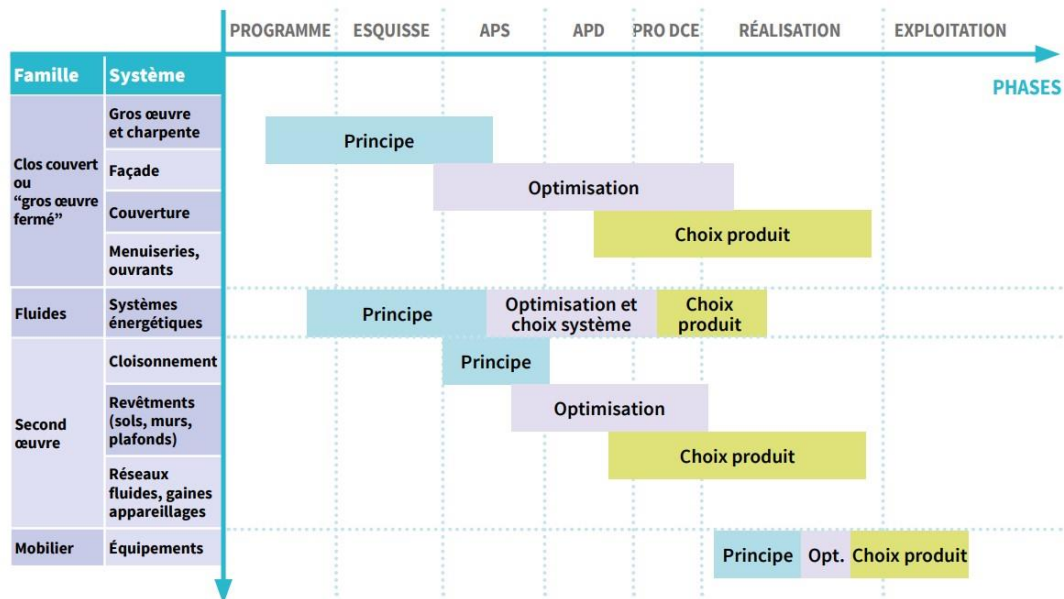


Figure 11 : « Relation aux lots » (ADEME, 2018, p.38)

Cette figure met habilement en évidence l'évolution de l'information de quatre lots (gros œuvre fermé, fluides, second œuvre et mobilier en ordonnée) selon trois niveaux de détail (dans l'ordre croissant : principe, optimisation et choix produit) tout au long des phases d'un projet de construction visibles en abscisse. Pour illustrer son fonctionnement, on peut par exemple observer que dans les premières phases de programme et d'esquisse, le principe de données du gros œuvre et des fluides est déjà disponibles afin d'éventuellement servir d'estimations pour une ACV simplifiée.

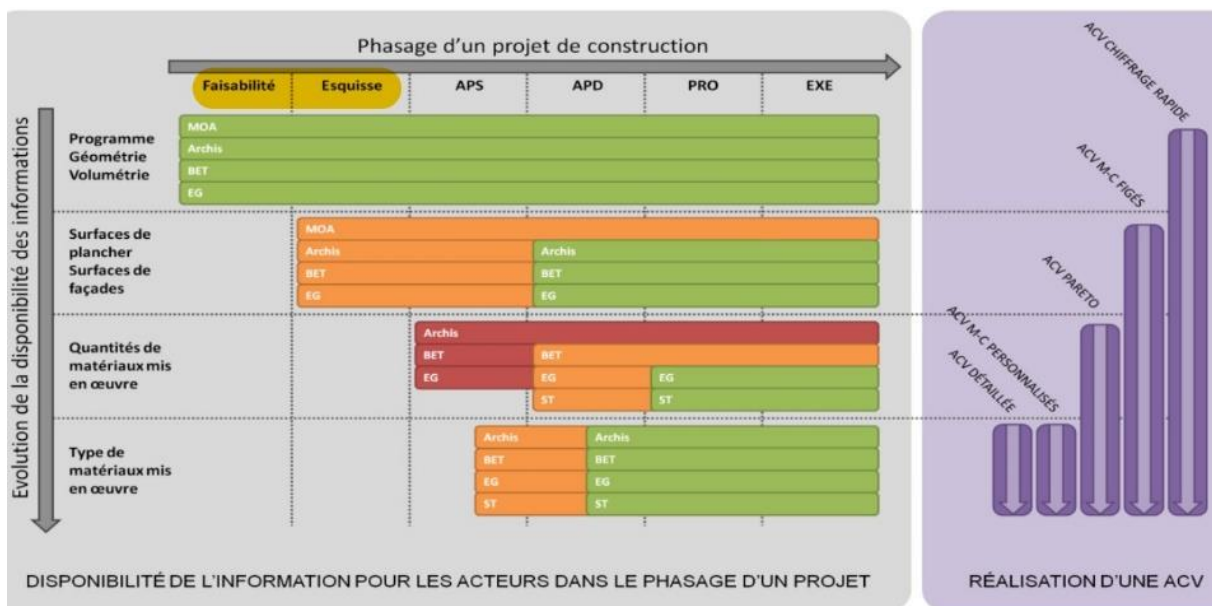


Figure 12 : Disponibilité de l'information pour les acteurs dans le phasage d'un projet et lien avec les différents types d'ACV (Lebert, 2014, p.8)

Cette seconde illustration croise des informations intéressantes dont il n'a pas encore été question. Elle met quatre types d'informations primordiales dans les ACV simplifiées (la volumétrie du bâtiment, les surfaces de plancher/façades, la quantité des matériaux et le type de matériaux) en relation avec les six phases d'un projet de construction, à nouveau en abscisse. Ces données sont aussi reliées aux acteurs du projet en vert, orange et rouge, mais surtout avec quatre niveaux de détail de l'ACV à droite.

2.6 Synthèse et réflexion personnelle sur l'état de l'art

Pour commencer, deux problématiques de l'ACV des bâtiments ont été identifiées : sa complexité qui dissuade les concepteurs d'utiliser une étude d'ACV dans leur projet et le paradoxe de l'écoconception qui les empêche de l'intégrer tôt dans le processus de conception. Des efforts importants sont à apporter à l'ACV pour pallier à ces problèmes. Il faudrait clarifier de nombreuses sources d'incertitudes liées à la précision des inventaires (hétérogénéité des données), aux logiciels en eux-mêmes (effet « boîte noire »), à la pratique des utilisateurs (niveau de maîtrise, choix et hypothèses formulés). Beaucoup d'aspects de l'ACV dans le secteur de la construction ne sont pas bien établis (Salmon et al., 2011).

Ensuite, il a été observé que des travaux d'harmonisation et de clarification de la démarche ont été élaborés à travers des guides issus de projets européens et d'autres recherches (Wittstock et al., 2012 ; Commission européenne - IES, 2010). Ils visent à développer des méthodologies conviviales et communes pour encourager tous les utilisateurs, experts ou non, à utiliser l'ACV pour évaluer la performance environnementale de leurs bâtiments.

Actuellement, au niveau législatif, rien n'est obligatoire en Belgique. Les normes n'ont pas de portée juridique, elles assurent uniquement un gage de qualité, de fiabilité et de complétude des résultats de l'ACV (ISO, 2006a ; ISO, 2006b). Imposer ces normes n'est pas une solution simple et sans risque, car cela risquerait d'augmenter la charge administrative dans le processus de construction qui est déjà conséquent. Toutefois, dans d'autres pays européens, il est déjà obligatoire d'évaluer et d'analyser les impacts environnementaux des nouveaux bâtiments soumis au permis d'urbanisme à l'aide d'une ACV, comme, par exemple, aux Pays-Bas.

2.6.1 Un problème de définition

La piste de solution envisagée dans ce mémoire est l'ACV simplifiée, qui consiste à appliquer une/des simplification(s) de l'approche détaillée de l'ACV des bâtiments. L'ACV simplifiée n'est pas un concept officialisé du point de vue des normes en vigueur. En effet, le terme n'est jamais cité dans

celles-ci ; elle ne possède donc pas de définition « officielle ». Elle est cependant suggérée implicitement à plusieurs reprises. Pour mieux comprendre cette approche, de nombreuses études ont été publiées sur ce sujet.

Selon le manuel ILCD (Commission européenne - IES, 2010), toutes les simplifications sont tout à fait acceptables et n'entraînent aucune conséquence sur la validité de l'ACV si le degré d'incomplétude est fixé en fonction de l'objectif et du champ de l'étude. Cependant, il ne faut pas prendre cette affirmation pour acquise. Il est crucial de comprendre leurs limites et la façon dont elles affectent la fiabilité, la transparence et la comparabilité des résultats et cela passe par de nombreuses exigences et précautions, comme décrit dans la partie « **2.2.3 ACV simplifiée des bâtiments** » des définitions.

Au vu de son manque de cadre, il apparaît que l'ACV simplifiée n'est pas définie de façon cohérente entre les différentes références et on constate même des conflits entre les différents points de vue. Pour citer quelques exemples, selon certaines références (Jensen, 1998 ; Lamnatou et al., 2015 cité dans Sous-Verdaguer et al., 2016), la simplification implique nécessairement une baisse de qualité et de détails alors que d'autres considèrent des simplifications qui permettent d'augmenter le niveau de détail de l'étude, telle la modélisation BIM (Malmqvist et al., 2011 ; Soust-Verdaguer et al., 2016 ; Beemsterboer, 2019). Ensuite, il est avancé par certains (Malmqvist et al., 2011) que la simplification est essentiellement un problème d'interface et pas de simplification de calculs puisqu'ils sont de toute façon automatisés ; d'autres (Salmon et al., 2011) défendent la simplification des calculs qui permet une meilleure interprétation, évitant l'effet « boîte noire » d'une interface trop travaillée. Il y a aussi le fait que l'ACV simplifiée peut être ciblée sur un seul critère, ou selon certaines étapes du cycle de vie, alors que certains chercheurs la définissent comme nécessairement multicritères (contrairement à une évaluation ciblée) ou couvrant le cycle de vie complet (de façon moins précise) (Jensen et al., 1998).

2.6.2 Distinguer la démarche de l'outil

Toujours dans cette idée de problème de définition, il est intéressant de faire une distinction importante au sein des ACV simplifiées (distinction qui n'est jamais vraiment claire dans la littérature) : c'est la différence entre la simplification d'une méthode d'ACV complète et un outil d'ACV simplifié. La simplification d'une méthode complète est réalisée avec un outil d'ACV des bâtiments traditionnel et complet. L'évaluateur fait lui-même des choix et hypothèses simplificatrices afin de court-circuiter certaines parties de la démarche d'ACV complète en prenant quelques raccourcis (c'est assez flexible, selon les besoins). Quant à l'outil simplifié, il est bien plus contraignant car c'est l'interface qui impose le niveau de simplification, sans s'adapter au cas et à ses particularités. En revanche, moins

d'hypothèses doivent être prises, ce qui peut rendre l'usage plus aisé et rapide. Certains outils sont plus spécifiques que d'autres et dans l'idéal, il faudrait choisir son outil simplifié en fonction de ses besoins. Toutefois, dans la réalité, un outil se voit plutôt imposé au concepteur, selon ses disponibilités.

Pour illustrer cette distinction, on peut opposer deux cas concrets. D'une part, l'usage de SimaPro avec une approche unidimensionnelle et en supprimant certaines étapes du cycle de vie : on a donc un logiciel d'ACV détaillée qui est utilisé selon une méthodologie qui a subi plusieurs simplifications. C'était d'ailleurs le cas du premier exemple décrit dans la section « **2.2.3.6 Validité des résultats selon quatre études** » (Decorte et al., 2021). D'autre part, il y a l'usage de l'outil simplifié « Impact Estimator » d'Athena décrit dans le mémoire de maîtrise de Sylvie Alain (Alain, 2015). Cet outil permet de réaliser une ACV en quelques heures. La version utilisée dans son article (version 4.2.0140) était assez rigide selon Sylvie Alain : elle se limite à la structure, l'enveloppe, et utilise sa propre base de données nord-américaines assez limitée (impossible de modéliser des éléments spécifiques). Certaines hypothèses sont non modifiables (impact du transport, de la phase de construction), etc.

2.6.3 La frontière entre l'ACV complète et l'ACV simplifiée

Une réflexion intéressante peut être faite quant à la frontière qui sépare une ACV complète d'une ACV détaillée. Actuellement, il est rare qu'une étude d'ACV se revendique simplifiée (dans le meilleur des cas, elle se dit « plus simple à utiliser »). Or, si on considère l'ensemble des modes de simplifications présentés dans la section « **2.3 Modes de simplifications d'une ACV** », on se rend compte que l'ACV simplifiée est plus présente qu'on ne pourrait le penser ; inversement, l'ACV complète devient rare, voire n'existe plus du tout (tout est une question de définition). Si on considère qu'en faisant une quelconque simplification on est dans le cas d'une ACV simplifiée, alors il n'y a effectivement plus d'ACV complète. Toutefois, il est raisonnable de penser que la méthode d'ACV implique nécessairement une simplification de la réalité. Cela s'explique par plusieurs raisons : aucune ACV des bâtiments ne décrit parfaitement et exactement chacun des matériaux employés, l'usage d'une base de données décrivant les impacts des matériaux en composants qui peut être considéré comme une simplification (sachant que les DEP ne sont pas disponibles pour tous les matériaux). Concernant les indicateurs d'impact, la norme NBN EN 15978 rassemble les 22 indicateurs dont la méthode de calcul est approuvée. Il est déjà rare qu'une ACV considère effectivement les 22 indicateurs cités ; de plus, cela n'exclut pas l'existence d'autres indicateurs (dont on n'a même peut-être pas encore conscience, il y a toujours une part d'inconnue insolvable). Autrement dit, il n'y aura jamais une ACV complète à 100%.

Pourtant, il y a toujours des ACV qui sont plus précises que d'autres ; il serait intéressant de les catégoriser. Cela peut être considéré comme des ACV simplifiées qui se veulent plus complètes ou des ACV complètes avec exclusions. Cependant, il est assez compliqué de lister toutes ces simplifications. Il n'y a pas de réponse fixée à cette question. Il faut peut-être considérer des frontières moins rigides entre les deux concepts, selon une gradation qui permet de les situer les uns par rapport aux autres, et même plusieurs gradations suivant plusieurs caractéristiques (d'où l'intérêt de créer une nouvelle typologie de simplification d'ACV).

Pour aller encore plus loin, on pourrait se dire que l'avenir de l'ACV serait peut-être justement l'ACV simplifiée. Si le but est de rendre plus efficace et plus transparente la démarche de l'ACV, connue pour être complexe, cela aurait plus de sens pour les utilisateurs choisir une méthode simplifiée plutôt que de tenter de tout considérer théoriquement, sans nécessairement en tirer de meilleures conclusions. Le risque, c'est de se perdre et de s'épuiser inutilement face à la quantité des données et l'ampleur du travail qui en résulterait. La simplification serait peut-être au prix de l'aspect quantitatif et parfaitement objectif qui caractérise l'ACV. Il faudrait voir l'ACV simplifiée comme une méthode de comparaison qualitative qui parlerait au plus grand nombre plutôt que la méthode permettant de générer des quantifications exactes d'impacts environnementaux à prendre à la lettre.

Enfin, il ne faut pas non plus exclure l'ACV détaillée. Une démarche évolutive qui mêle les deux approches est d'autant plus intéressante. En effet, pour commencer, rien n'empêche d'utiliser une ACV simplifiée en interne avec les premières phases de conception et déceler les générateurs d'impacts les plus conséquents afin de guider les décisions les plus importantes. Ensuite, il sera possible d'augmenter progressivement le niveau de détail tout au long du projet pour enfin, éventuellement aboutir à une ACV complète à partir de la phase d'exploitation pour vérifier et confirmer les impacts réellement évités.

2.6.4 Limites des phases de conception établies

Avant de critiquer les modes et typologies de simplifications existantes, il est nécessaire de discuter des limites à énoncer concernant la section « *2.5 Phases du processus de conception* ». L'intérêt de cette section était de pouvoir évaluer l'ACV simplifiée au niveau temporel et donc de juger de l'importance du moment de l'évaluation vis-à-vis des résultats. Il est ressorti de cet état des lieux une description assez peu détaillée de six étapes de développement d'un projet, très générales et espacées dans le temps. Au sein de celles-ci, on a une série de données qui sont censées être fixées à ce moment. Elles sont classées en trois types : géométriques, techniques et selon le comportement des usagers. Cela permet notamment de savoir ce qu'il est possible de faire, ou ce qu'il est possible de

simplifier à quelle étape (par exemple, cela ne sert à rien d'essayer de faire une simulation thermique dynamique d'un bâtiment quand on n'a que des boîtes). Enfin, il aurait été intéressant de pouvoir subdiviser un peu plus ces étapes (notamment l'esquisse et l'avant-projet sommaire), mais cela relève plus du cas par cas. La façon de concevoir est propre à chaque architecte et à ses interactions avec les autres auteurs du projet.

2.6.5 Critique des modes de simplifications et typologies existantes

Pour terminer cette section et avant de décrire la typologie que je propose sous la forme d'un schéma, il serait utile de critiquer les modes de simplifications et typologies existantes. Comme précisé précédemment, il n'y a pas une typologie mais bien des typologies au pluriel vu le caractère multidimensionnel de l'approche de simplification (Lasvaux, 2010).

Tout d'abord, grâce à la conclusion du second exemple (Kellenberger & Althaus, 2009) de la section « **2.2.3.6 Validité des résultats selon quatre études** », on a constaté que les simplifications « les plus récurrentes » étaient à critiquer selon le cas étudié. Cette réflexion est à appliquer à l'ensemble des simplifications effectuées. Cela peut paraître évident, mais une simplification doit toujours être justifiée dans la partie « objectifs et champs de l'étude » ; c'est la condition principale pour la valider (Tasala et al., 2021). De nombreuses simplifications (qui bien souvent ne sont pas annoncées) sont toutefois réalisées non pas suivant une justification valable liée aux objectifs et champ de l'étude, mais bien pour palier à un manque de données, remettant en cause la validité des résultats de l'étude.

La typologie « detailed – simplified – screening » est très intéressante par sa simplicité. Cette typologie se veut rigide en trois catégories et le paramètre de distinction évident est la considération des différentes phases du cycle de vie qui sont obligatoirement prises en compte dans la simplification des ACV (voir **figure 10**). Les limites des autres types de simplifications ne sont pas clairement définies, en particulier entre screening et simplifiée. En effet, bien souvent, la description de l'ACV simplifiée est la même que celle du screening avec la mention, « *mais en plus précis que le screening* ». Toutefois, on peut constater que cette typologie manque de souplesse. Derrière cette terminologie très simpliste se cachent en réalité de nombreux choix de simplification qui ne sont pas clairement exposés par son appellation. D'autre part, si par exemple une étude ne considère pas toutes les phases requises pour un screening ou une ACV simplifiée, on n'est ni une ACV screening, ni une ACV simplifiée, mais on ne peut pas dire non plus qu'elle décrit une ACV détaillée ; des hypothèses devront être prises.

2.6.6 Proposition d'une nouvelle typologie des ACV simplifiées

Au-delà des caractéristiques intrinsèques à l'ACV générale (étapes de l'étude, l'approche en cycle de vie, etc.), la typologie semble être un bon moyen de compléter la définition et caractériser de façon synthétique ce qu'est une ACV simplifiée. Ainsi, cette partie constitue un peu en une extension personnelle de la définition de l'ACV simplifiée. C'est une façon de restructurer le paysage des modes de simplification existants mais aussi et surtout, de compléter la réponse à la première question de recherche qui était pour rappel : « Qu'est-ce qu'une analyse en cycle de vie simplifiée utile pour l'écoconception de bâtiments ? Quelle est sa définition précise et quelles sont ses caractéristiques ? »

La proposition de typologie que je propose est synthétisée dans la [figure 13](#) (p.45) et décrit les différents types de simplifications en fonction des objectifs visés par le processus de simplification. Cette figure est accompagnée d'une description pour illustrer son utilisation. De nombreuses typologies existent à ce jour et finalement, peu d'entre elles sont flexibles et utiles pour aider à sélectionner les types de simplifications adaptées à un projet précis, alors qu'on a pu constater que les modes de simplifications se recouvraient mutuellement et n'étaient bien souvent pas utilisés seuls.

Ma philosophie de création de cette typologie ne se veut pas exhaustive. L'idée était de rassembler un maximum de simplifications pertinentes sur base des articles de mon corpus en combinant les caractéristiques de certaines typologies existantes. Il en a résulté un tableau à double entrée :

- Trois stratégies de simplification en ordonnée : l'automatisation, la substitution et l'exclusion. Ce choix est basé sur les 3 stratégies les plus pertinentes de la typologie de Sjouke Beemsterboer (Beemsterboer, 2019) ;
- Quatre objectifs en abscisse : la simplification de la collecte de données, l'insertion au début du projet, la limitation des compétences requises et la réalisation d'une analyse ciblée (ces quatre objectifs sont décrits au début de la section « [2.2.3 ACV simplifiée des bâtiments](#) »).

Dans ce tableau se répartissent les dix modes de simplifications identifiés qui sont tous décrits dans la section « [2.3 Modes de simplifications d'une ACV](#) ».

L'organisation de ma typologie laisse la possibilité à ces modes de simplifications de chevaucher plusieurs objectifs ou stratégies en se positionnant à cheval sur deux zones (les limites sont flexibles). Elle peut trouver un certain intérêt dans le choix des modes de simplifications les plus pertinents à sélectionner selon les objectifs fixés. De plus, cette représentation typologique des ACV simplifiées restera pertinente malgré l'évolution de l'ACV au fil des ans : des objectifs ou stratégies supplémentaires peuvent être ajoutés pour couvrir les différents modes de simplifications futurs et/ou manquants.

Description de l'utilisation de la *figure 13* ; elle peut être utilisée de plusieurs façons :

- Tout d'abord, on souhaite choisir des modes de simplifications selon des objectifs fixés.

Exemple : Je souhaite réaliser une ACV en début de projet. Dans ce cas, la typologie me renseigne neuf modes de simplifications de l'ACV. Pour faciliter l'intégration en début de projet, je peux utiliser le BIM pour automatiser la collecte de données au plus tôt, optimiser l'interface de mon outil en minimisant le nombre d'entrées, simplifier les calculs de quantités en valorisant les données globales du projet (emprise au sol, hauteur) dans ces calculs d'estimation, utiliser des macros-éléments prédéfinis et/ou des données globales du projet, sélectionner des données estimées au lieu de les rechercher dans des DEP, ou encore négliger des matériaux non connus, des étapes du cycle de vie ou des indicateurs d'impacts pour lesquels je n'ai pas encore accès aux données.

- Ensuite, il peut être utile d'en savoir davantage sur un mode de simplification si on connaît la stratégie de simplification qu'il adopte et les objectifs auxquels il peut répondre.

Exemple : Utiliser un macro-élément de mur-multicouche, c'est une stratégie de substitution (dans ce cas, on remplace l'isolant, les blocs et les briques, etc. par un élément « mur » qui les agrège). Cela répond aux quatre objectifs de simplification des ACV :

- En utilisant des composants de murs, on simplifie la collecte de données en évitant de récupérer individuellement les quantités distinctes d'isolant, de blocs et de briques ;
- On peut l'utiliser en début de projet pour éviter de devoir choisir aussi tôt des matériaux pour chaque couche ;
- Cela épargne à un non professionnel de devoir choisir un type d'isolant adéquat selon le type de paroi ou le type de structure mis en œuvre ;
- Cela permet de se focaliser sur la sélection du type de parois.

- Enfin, si on veut connaître tous les modes de simplifications qui décrivent une stratégie.

Exemple : Toutes les stratégies d'automatisation se retrouvent dans la colonne qui lui correspond, il y en a quatre ici : modéliser l'information (CAO, BIM), rendre l'interface plus intuitive, simplifier les méthodes de calcul et réaliser des simulations thermiques.

Cette nouvelle typologie possède aussi ses limites. Notamment, elle ne laisse pas la possibilité d'y placer un outil d'ACV simplifié pour le décrire (la démarche ne fonctionne que dans un seul sens). Il y a aussi des limites plus pratiques liées à la mise en page. Si un mode de simplification suivait à la fois la stratégie d'automatisation et celle d'exclusion, il ne serait pas possible de le représenter en une fois car les colonnes ne sont pas côte à côte.

Dans cette première partie théorique d'état de l'art, des descriptions de l'ACV simplifiée ont servi de base théorique pour l'élaboration d'une typologie personnelle. Divers points de vue existants de différentes références ont été confrontés et critiqués. Cela a permis de déceler un problème de définition de l'ACV simplifiée, de clarifier certaines distinctions fondamentales, ainsi que de nourrir cette même proposition de typologie.

Enfin, pour conclure cet état de l'art et au vu de la variabilité des résultats produits dans les études et les quatre exemples analysés dans la section « **2.2.3.6 Validité des résultats selon quatre études** », on peut affirmer qu'il y a de bonnes raisons de démultiplier la réalisation d'études d'évaluation comparatives d'ACV simplifiées pour comprendre davantage les différences et incertitudes d'éléments de simplifications précises. C'est pourquoi la seconde partie de ma recherche, plus pratique, s'inscrit dans cette démarche.

Typologie des simplifications de l'ACV

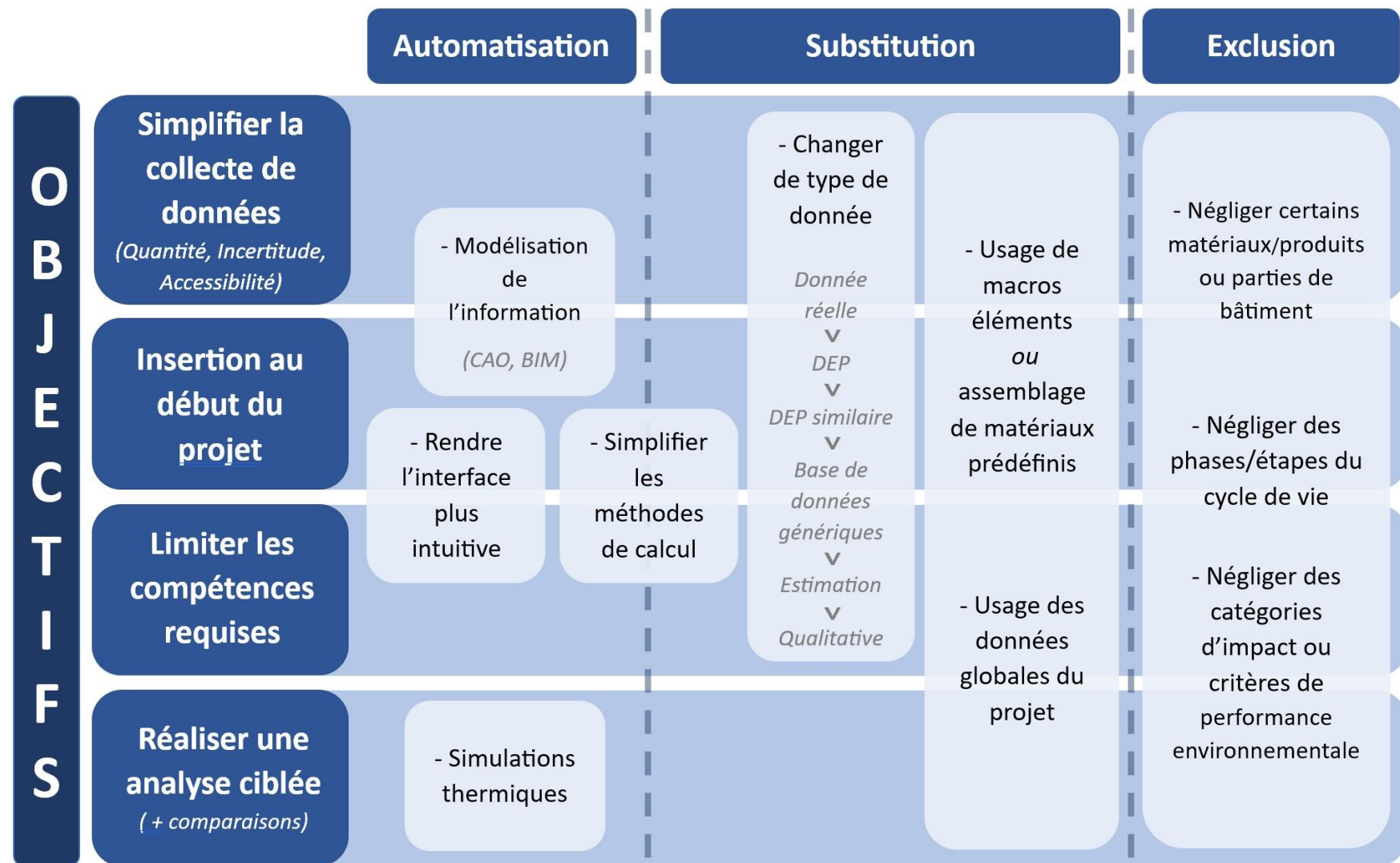


Figure 13 : Proposition personnelle d'une nouvelle typologie des simplifications de l'ACV pertinentes en fonction de quatre objectifs de simplification

3. Méthodologie

3.1 Description de la méthodologie

Cette étude se concentre sur l'analyse de deux outils d'ACV simplifiées : TOTEM et EcoEffect. Trois analyses comparatives seront réalisées.

Tout d'abord, une **analyse générale et fonctionnelle** sera effectuée sur les deux outils simplifiés en les comparant aux caractéristiques d'un outil d'ACV complète : Pleiades ACV. Les principaux objectifs sont de comprendre ces outils, les resituer vis-à-vis de la définition de l'ACV simplifiée ainsi que des typologies d'ACV étudiées, de déterminer le type de données requis et les résultats que ces outils sont capables de fournir pour les deux analyses suivantes.

Ensuite, une **analyse quantitative** sera réalisée sur les résultats de l'ACV simplifiée du cas d'étude tel qu'il existe aujourd'hui, en les comparant avec ceux de l'étude d'ACV complète. Cette analyse a pour but d'évaluer la fiabilité et la précision des résultats produits par ces outils simplifiés, ainsi que d'identifier et de comprendre les principales sources des différences constatées.

Enfin, une **analyse qualitative** permettra d'apporter un regard critique sur les outils d'ACV simplifiée comme outils d'aide à la décision pendant la conception du projet. L'analyse sera effectuée d'une part sur les résultats d'une ACV simplifiée à un stade de conception intermédiaire du même projet, en utilisant un mode de simplification spécifique : l'usage de macro-composants. Une fois les résultats comparés à ceux produits par l'outil simplifié, l'analyse qualitative se focalisera sur les indications que l'on peut en retirer : les stratégies et les choix de conception qui en découlent. D'autre part, les aspects liés à l'utilisateur seront étudiés à travers notamment la prise en main des ACV simplifiées, la complexité de l'encodage au stade d'avant-projet ou encore le temps nécessaire pour réaliser une modélisation.

Ces trois analyses permettront d'évaluer, pour un même cas d'étude, la performance des ACV simplifiées ainsi que leur potentiel d'intégration en écoconception à un stade d'avant-projet. Le cas d'étude qui nous concerne est la résidence Arola, un immeuble à appartements de l'écoquartier du Sart-Tilman. Ce dernier n'a pas été choisi au hasard puisqu'une étude d'ACV complète a déjà été réalisée dans un mémoire de master datant de 2020 (Malmedy, 2020) et validée deux ans plus tard par d'autres chercheurs à travers un article scientifique dédié (Nematchoua et al., 2022), prouvant sa fiabilité. Une description de ce cas d'étude est fournie dans la partie « **3.1.2.1 Description du projet, Résidence Arola** ». Les résultats de cette étude complète serviront ainsi de base de comparaison entre les trois outils, mais surtout d'évaluation des outils simplifiés.

La méthodologie de recherche utilisée dans ce travail de fin d'études est synthétisée dans le schéma méthodologique de la [figure 14](#). Elle comprend trois phases principales : la définition du cadre méthodologique, la modélisation et l'analyse des résultats, et une discussion.

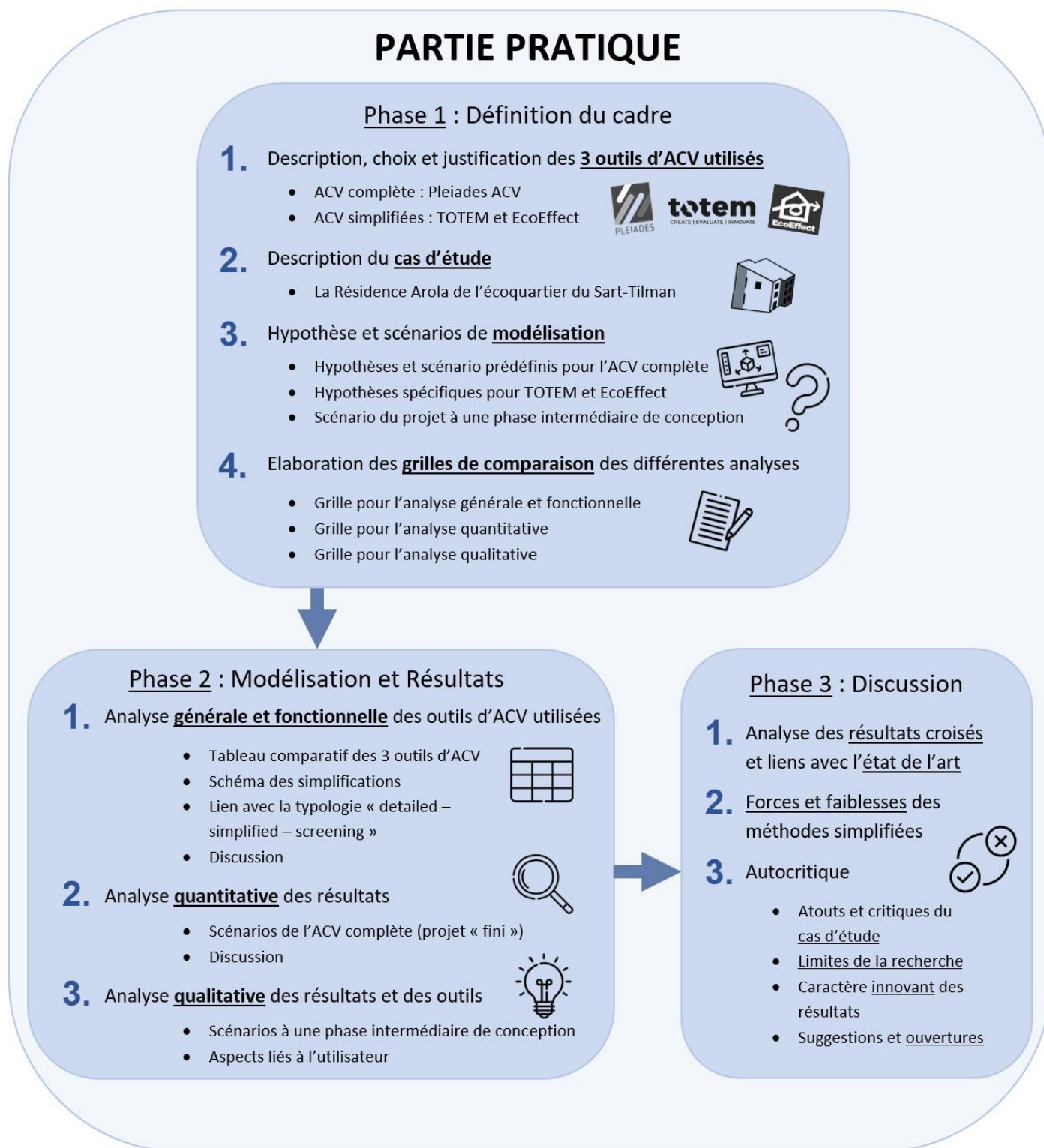


Figure 14 : Schéma synthétique du cadre méthodologique

Voici une description plus détaillée de ce schéma méthodologique :

Phase 1 : Définition du cadre méthodologie

1. Description et choix des trois outils d'ACV utilisés

Cette première partie de la méthodologie comprend les descriptions complètes des outils utilisés dans cette étude : Pleiades ACV, TOTEM et EcoEffect. C'est dans cette partie que se trouvent les indicateurs environnementaux et les phases du cycle de vie considérés. Enfin, une justification de leur choix sera donnée pour chacun des outils utilisés.

2. Description du cas d'étude

Cette seconde partie consiste à préciser de façon synthétique toutes les caractéristiques de la résidence Arola et les informations relatives au projet d'écoquartier dans lequel il s'inscrit : son site, le programme et toutes autres informations nécessaires. L'ensemble des informations complémentaires sont disponibles [en annexe](#).

3. Hypothèses et scénarios de modélisation

Cette troisième partie introduit d'une part les hypothèses de modélisation introduites par Charline Malmedy dans son étude (2020), les hypothèses spécifiques qui ont été prises pour les outils simplifiés utilisés et d'autre part, la définition et la description du scénario intermédiaire de conception qui a été créé.

4. Élaboration des grilles de comparaison des outils d'ACV simplifiées et des résultats

Pour comparer les résultats des ACV simplifiées et de l'ACV complète, il est nécessaire d'établir les critères d'évaluation les plus objectifs possibles pour évaluer les outils et les résultats des études. Notamment au niveau quantitatif, il faut définir ce qu'est la fiabilité, la précision et la pertinence des résultats. L'ensemble des justifications de ces grilles est également détaillé dans cette partie.

Phase 2 : Modélisation et présentation des résultats

Une fois la méthodologie établie, il est possible de réaliser la partie pratique consistant en trois analyses comparatives entre les ACV simplifiées et l'ACV complète et d'en présenter les résultats pour les comparer et les discuter. Les trois analyses réalisées sont :

1. Analyse générale et fonctionnelle des outils simplifiés

À travers trois documents synthétiques (un tableau comparatif, une figure reprenant les phases de la typologie « detailed – simplified – screening » et un schéma synthétique des simplifications des ACV) plusieurs éléments seront analysés tels que :

- Le type des ACV utilisées ;
- Leurs interface et caractéristiques ;
- Les types de données requises et de résultats produits par celles-ci.

2. Analyse quantitative

- Présentation des résultats quantitatifs des impacts environnementaux sur le projet « fini » dans Pleiades ACV, TOTEM et EcoEffect ;
- Comparaison et discussion des résultats.

3. Analyse qualitative

- Présentation des résultats sur le projet à un stade intermédiaire de conception ;
- Elaboration de scénarios alternatifs et discussion des résultats d'ACV simplifiées comme outils d'aide à la décision en phase d'avant-projet ;
- Étude des aspects liés au point de vue utilisateur. Cette partie reprend notamment la prise en main des ACV simplifiées, la complexité de l'encodage au stade d'avant-projet ou encore le temps nécessaire pour réaliser une modélisation.

Phase 3 : Discussion

Enfin, cette partie pratique se terminera avec une discussion générale, portant sur l'ensemble de l'étude. Elle permettra de croiser les discussions des trois analyses réalisées, de faire un retour sur l'état de l'art, d'analyser les forces et les faiblesses des méthodes simplifiées et enfin, de réaliser une autocritique de la recherche avant de conclure.

3.1.1 Description et choix des méthodes d'ACV utilisées

3.1.1.1 Outil n°1 : Pléiades ACV

Pléiades ACV est un logiciel français d'analyse en cycle de vie des bâtiments développé par l'entreprise IZUBA Energies. C'est un programme constitué de trois outils intégrés :

- ALCYONE, pour la description du bâtiment (sa géométrie et la composition de ses parois) ;
- STD COMFIE, pour la Simulation Thermique Dynamique, simulant les comportements thermiques et énergétiques avec la description de ses équipements ;
- EQUER, pour les impacts environnementaux, avec base de données environnementales Ecoinvent version 2.2 (2012). C'est un outil développé par le Centre Efficacité énergétique des Systèmes de Mines ParisTech.

Le couplage des trois outils relie automatiquement les caractéristiques et autres données du bâtiment pour le calcul de ses impacts (sa structure, les quantités, les éléments entrant en jeu dans les calculs thermiques, les besoins et consommations énergétiques, etc.).

Pleiades ACV propose des compositions déjà prêtes de murs, planchers et toitures usuels, mais il est possible de composer sa propre paroi avec les matériaux proposés dans sa bibliothèque ou même en créant de nouveaux matériaux.

Les indicateurs environnementaux de Pleiades ACV sont les suivants :

- Effet de serre [t CO₂ eq.] ;
- Acidification [kg SO₂ eq.] ;
- Demande cumulative d'énergie [GJ] ;
- Eau utilisée [m³] ;
- Déchets inertes produits [t] ;
- Épuisement des ressources abiotiques (minérales et fossiles) [kg Sb eq.] ;
- Eutrophisation (eaux douces uniquement) [kg PO₄³⁻ eq.] ;
- Production d'ozone photochimique [kg C₂H₄ eq.] ;
- Dommage à la biodiversité [PDF.m².an] ;
- Déchets radioactifs [dm³] ;
- Dommage à la santé humaine [DALYs] ;
- Odeurs [Mm³ air] ;
- Énergie primaire [GJ].

Pleiades ACV propose une normalisation des indicateurs environnementaux par rapport aux valeurs moyennes des impacts par habitant et par an (données françaises de 1997 du GIEC – Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat et du CITEPA – Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique). Cela permet de présenter les résultats sur un même diagramme nommé « éco-profil ». Elle ne sera pas considérée ici vu le contexte français et trop ancien.

Quatre phases sont définies dans Pléiades ACV : « Construction », « Utilisation », « Rénovation » et « Démolition ». On peut les relier directement aux phases décrites selon la norme européenne l'EN 15804 (voir [figure 6](#)) :

- Construction (A1 – A5) ;
- Utilisation (B1 – B3 et B5 – B7) ;
- Rénovation (B4) ;
- Démolition (C1 à C4).

On constate que les avantages et charges hors frontières du système (recyclage, récupération et réutilisation), c'est-à-dire la phase « D », n'est pas reprise parmi les phases de cette liste. En réalité, elle est tout de même considérée partiellement dans la phase C3 (réutilisation/recyclage).

Pleiades ACV a été choisi d'une part pour disposer de résultats d'un outil d'ACV que l'on peut considérer comme complet. D'autre part, cet outil est sélectionné car nous disposons des résultats d'une étude de cas validé préalablement par un mémoire de master (Malmedy, 2020) et un article au sein d'une revue scientifique internationale (Nematchoua et al., 2022) ; il a donc été révisé par des pairs. Ainsi, les résultats proviennent d'une référence solide et fiable, ce qui est nécessaire pour servir de base de comparaison afin d'évaluer les outils d'ACV simplifiées. Enfin, c'est un outil qui est souvent utilisé dans la littérature scientifique et avec TOTEM, il est fréquemment employé en Belgique pour réaliser des ACV de bâtiments (Malmedy, 2020).

3.1.1.2 Outil n°2 : TOTEM

TOTEM, (Tool to Optimise the Total Environmental impact of Materials) est un outil belge gratuit, disponible depuis 2018. Il a été développé par les Régions flamande, wallonne et de Bruxelles-capitale pour accompagner le secteur de la construction belge dans leur démarche de réduction d'impact environnemental des bâtiments. Sa méthodologie se veut être la plus transparente possible. Cet outil continue d'évoluer ; il propose deux mises à jour par an (Demesmaecker & Vannerom, 2020).

Contrairement à Pleiades ACV, TOTEM n'est pas un logiciel à télécharger mais bien un site internet à utiliser en ligne (TOTEM, s. d.). Il est possible d'importer les données d'un bâtiment à partir d'un fichier au format IFC, Excel ou CSV. Par contre, il n'est pas possible de modéliser un bâtiment directement sur TOTEM. La durée de vie du bâtiment n'est pas modifiable ; elle est fixée à 60 ans.

TOTEM dispose des données génériques de Ecoinvent version 3.6, contextualisée en Belgique et datant de 2019. Cependant, depuis octobre 2020, des DEP provenant directement de producteurs de matériaux sont également disponibles. Au total, 65 DEP sont intégrées, provenant de 17 producteurs. De plus, TOTEM propose une série de macro-composants (actuellement 86 planchers, 144 murs et 82 toitures) dont les couches peuvent être modifiées avec les matériaux de la bibliothèque proposée.

Les indicateurs environnementaux de TOTEM sont les suivants (Lam & Trigaux, 2021) :

- Changement climatique [kg CO₂ eq.] ;
- Appauvrissement de la couche d'ozone [kg CFC 11 eq.] ;
- Acidification [mol H⁺ eq.] ;
- Eutrophisation (eaux douces - eaux marines - terrestre) [kg P eq., kg N eq., mol N eq.] ;
- Formation d'ozone photochimique [kg NMVOW eq.] ;
- Épuisement des ressources abiotiques (minérales, fossiles) [kg Sb eq., MJ] ;
- Besoins en eau [m³] ;
- Émissions de particules fines [Incidence des maladies] ;
- Effets de rayonnement ionisant sur l'homme [kBq U235 eq.] ;
- Écotoxicité [CTUe : « Comparative Toxic Unit ecotoxicity »] ;
- Toxicité humaine [CTUh : « Comparative Toxic Unit for human »] ;
- Impacts liés à l'occupation des sols, qualité du sol [adimensionnel] ;
- Consommation d'énergie primaire (renouvelable et non-renouvelable) [MJ].

Dans un premier temps, TOTEM a proposé une pondération des impacts environnementaux en un score unique dit « coût environnemental » à l'aide de la méthode MMG (Milieugerelateerde Materiaalimpact van Gebouw elementen = impact matériel des éléments de construction sur l'environnement). Elle estime le coût nécessaire à la société pour réparer le dommage environnemental engendré (facteurs de pondération [en annexe](#)). Depuis juillet 2021, dans le but de s'aligner aux recommandations européennes, le score agrégé est exprimé en Milli Point, une unité sans dimension issue de la méthode PEF (Product Environmental Footprint = empreinte environnementale des produits). Ce changement de pondération a été accompagné d'un changement des unités des indicateurs environnementaux (les unités actuelles étant celles mentionnées ci-dessus). Le Milli point est obtenu par normalisation et pondération de chaque indicateur environnemental. Cela consiste en la division de chaque impact environnemental (chacun dans sa propre unité) avec l'impact par habitant mondial moyen pour ce même indicateur environnemental. Ils sont ensuite multipliés par des facteurs de pondération (disponibles [en annexe](#)) pour ajuster leur importance relative.

Ici, cinq phases sont définies : « Production », « Construction », « Utilisation du bâtiment », « Fin de vie » et « Recyclage/réaffectation ». Il est possible de faire un lien direct avec les phases définies par la norme européenne l'EN 15804, comme schématisé à la [figure 15](#).

Il est très clairement annoncé que les étapes B1, B3, B5 et D ne sont pas prises en compte dans la version actuelle de TOTEM (Demesmaecker & Vannerom, 2020). De plus, B6 ne considère les consommations d'énergie qu'à travers le chauffage pour sa méthode de calcul simplifiée proposée.

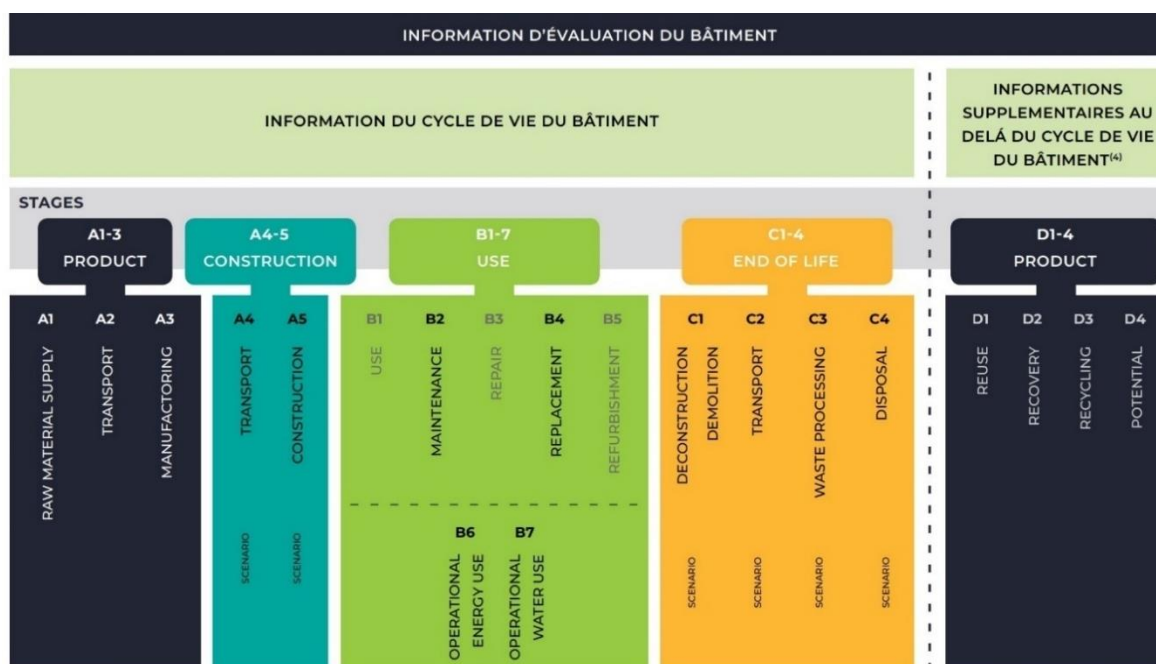


Figure 15 : Phases du cycle de vie et limites du système selon la norme européenne (Demesmaecker & Vannerom, 2020, p.29)

Le choix de TOTEM comme premier outil simplifié à évaluer se justifie par plusieurs éléments. Tout d'abord, c'est un outil qui a été réalisé en Belgique, créé et donc recommandé par la région wallonne. Il y a donc une prise en compte directe de toutes les spécificités de la Belgique (mix énergétique, scénarios de transport et de fin de vie des matériaux) adaptées au contexte du cas d'étude. De plus, c'est un outil qui est libre et surtout, qui laisse l'opportunité aux concepteurs de l'utiliser gratuitement. Enfin, comme annoncé précédemment, c'est un outil qui, avec Pleiades ACV, est principalement utilisé en Belgique pour réaliser des ACV de bâtiments (Malmedy, 2020).

3.1.1.3 Outil n°3 : EcoEffect

EcoEffect a été cofondé par Mauritz Glaumann, un ancien professeur de l'Université de Gävle, avec la collaboration d'autres chercheurs de la KTH (Royal Institute of Technology), White architects et la SLU (Swedish University of Agricultural Sciences). L'objectif visé par cet outil était de combiner un degré élevé d'exhaustivité avec une approche facile à comprendre, le tout dans une interface conviviale (Assefa et al., 2007 ; Glaumann & Malmqvist, 2009).

Ecoeffect est un programme à télécharger au format « .mbd », il fonctionne donc sous Microsoft Access (système de gestion de base de données). Le fichier d'exécution du programme s'accompagne ainsi d'une base de données globales intégrée et en principe non modifiable. Dans ce programme, de nombreuses valeurs générales sont fixées à l'avance dont notamment les durées de vie des matériaux. La durée de vie des bâtiments est fixée à 50 ans par défaut, mais peut être modifiée. Les catégories d'impact couvertes par cette version de l'outil EcoEffect sont les suivantes :

- Changement climatique [g CO₂ eq.] ;
- Appauvrissement de la couche d'ozone [g CFC11 eq.] ;
- Acidification [g SO₂ eq.] ;
- Eutrophisation [g NO₃⁻ eq.] ;
- Production d'ozone [g C₂H₄ eq.] ;
- Toxicité pour l'homme [m³ dans l'air, dans l'eau et dans le sol] ;
- Écotoxicité [m³ dans le milieu] ;
- Épuisement des ressources naturelles [g CU] ;
- Déchets radioactifs [kWh] ;
- Déchets de construction, de démolition, déchets dangereux et scories/cendres [g de déchets].

Il est important de préciser que les unités présentées ici ont été trouvées directement dans la base de données. Elles ne sont pas accessibles depuis l'interface de l'outil. De plus, les impacts environnementaux calculés par EcoEffect sont normalisés et ne sont jamais montrés sous cette forme.

En plus de ces impacts sur l'environnement global, des impacts dits « internes » sont également évalués. Ils concernent l'évaluation du risque d'inconfort et de mal-être dû aux caractéristiques et aux propriétés de l'environnement intérieur et de l'environnement extérieur dans les limites de propriété du bâtiment (calculs basés sur des méthodologies de sciences sociales et sur des enquêtes d'expérience subjective). Avec ces impacts internes, l'idée est de fournir une vision globale des préoccupations liées aux caractéristiques des bâtiments : il s'agit de concilier le confort des espaces avec la réduction des impacts environnementaux du bâtiment. En ce sens, on évite les problèmes de distinction par parties en adoptant une approche d'optimisation de l'ensemble (Assefa et al., 2007). Toutefois, ces impacts « internes » sortent du cadre de l'analyse ACV standardisée et s'éloignent donc de nos questions de recherche.

La documentation de l'outil EcoEffect (Assefa et al., 2007) déclare prendre en compte quatre phases du cycle de vie : l'extraction des matières premières, leur transport, la fabrication des matériaux de construction et l'énergie consommée lors de la phase d'exploitation. Selon la norme européenne l'EN 15804, cela correspond aux phases A1, A2, A3 et B6 (comprenant les consommations thermiques et électriques).

EcoEffect a la particularité de réaliser directement une double transformation de l'expression de ses résultats dans un but de simplification pour ses utilisateurs.

La première transformation est une normalisation. Il s'agit d'une division de l'impact par une valeur normale. Elle fournit les valeurs d'impact environnemental sans dimension pour faciliter la comparaison pondérée qui va suivre. Des valeurs mondiales de normalisation sont utilisées pour les impacts de changement climatique et d'appauvrissement de la couche d'ozone. Pour les autres impacts, des valeurs nationales ou régionales sont utilisées, donc contextualisées en Suède ou au Danemark (Glaumann & Malmqvist, 2009). Ces valeurs sont disponibles [en annexe](#).

La seconde transformation utilise une pondération anthropocentrée pour présenter ses résultats. En effet, un impact environnemental posera des problèmes pour l'homme dans le futur. Ainsi, tous les impacts environnementaux sont traduits en « problèmes finaux pour l'homme ».

$$IE = p * s$$

Avec « p » la probabilité que l'homme soit affecté et « s » la gravité de l'impact

L'outil EcoEffect a été choisi car il représente une forme d'ACV davantage simplifiée que celle de l'outil TOTEM. L'idée initiale était de disposer de l'outil développé à travers le projet ENSLIC, abordé dans un article datant de 2009 et publié en 2011 (Malmqvist et al., 2011). Ce projet a été co-fondé par la Commission européenne et souvent évoqué dans la littérature (Zabalza et al., 2009 ; Glaumann et al., 2010 ; Lasvaux, 2010 ; Malmqvist et al., 2011 ; Wallhagen et al., 2011 ; Wittstock et al., 2012 ; Alain, 2015 ; Soust-Verdaguer et al., 2016 ; Beemsterboer, 2019). En contactant les chercheurs de ce projet, il a été possible d'obtenir cet outil. L'outil présenté dans le projet ENSLIC était basé sur l'outil EcoEffect et a aujourd'hui repris ce nom. EcoEffect a été mis à jour jusqu'en 2020, Mauritz Glaumann étant désormais retraité. La dernière version d'EcoEffect est un tableur Excel disponible gratuitement sur le site internet du même nom (EcoEffect, s. d.). Cependant, cette version est intégralement en suédois et les données sont également contextualisées en Suède. C'est pourquoi c'est la version utilisée à l'époque de cet article qui a été demandée (Malmqvist et al., 2011), donc développé en Europe mais non contextualisée à un pays spécifique ; et c'est une version de l'outil datant de 2008 qui a été obtenue.

3.1.2 Description du cas d'étude

La Résidence Arola est un bâtiment qui fait partie d'un projet d'écoquartier de 2,84 hectares. Il est qualifié d'écoquartier car il répond aux critères du Référentiel quartiers durables développé pour la Wallonie (Teller et al., 2014). Ce quartier (point rouge sur la [figure 16](#)) est situé au Sart-Tilman (Angleur), au sud de la ville de Liège, en Belgique. Il est encadré par la rue du Sart-Tilman, la rue de l'Aunaie, la rue de Hômes et le chemin du Trèfle. Il bénéficie d'un emplacement stratégique étant donné sa proximité avec de nombreux services et infrastructures, tels que l'Université de Liège et le Centre hospitalier universitaire de Liège (CHU). Il est également bien desservi pour le réseau de transport en commun et des pistes cyclables qui permettent des liaisons rapides vers Boncelles (section de la ville de Seraing) et le centre de Liège.

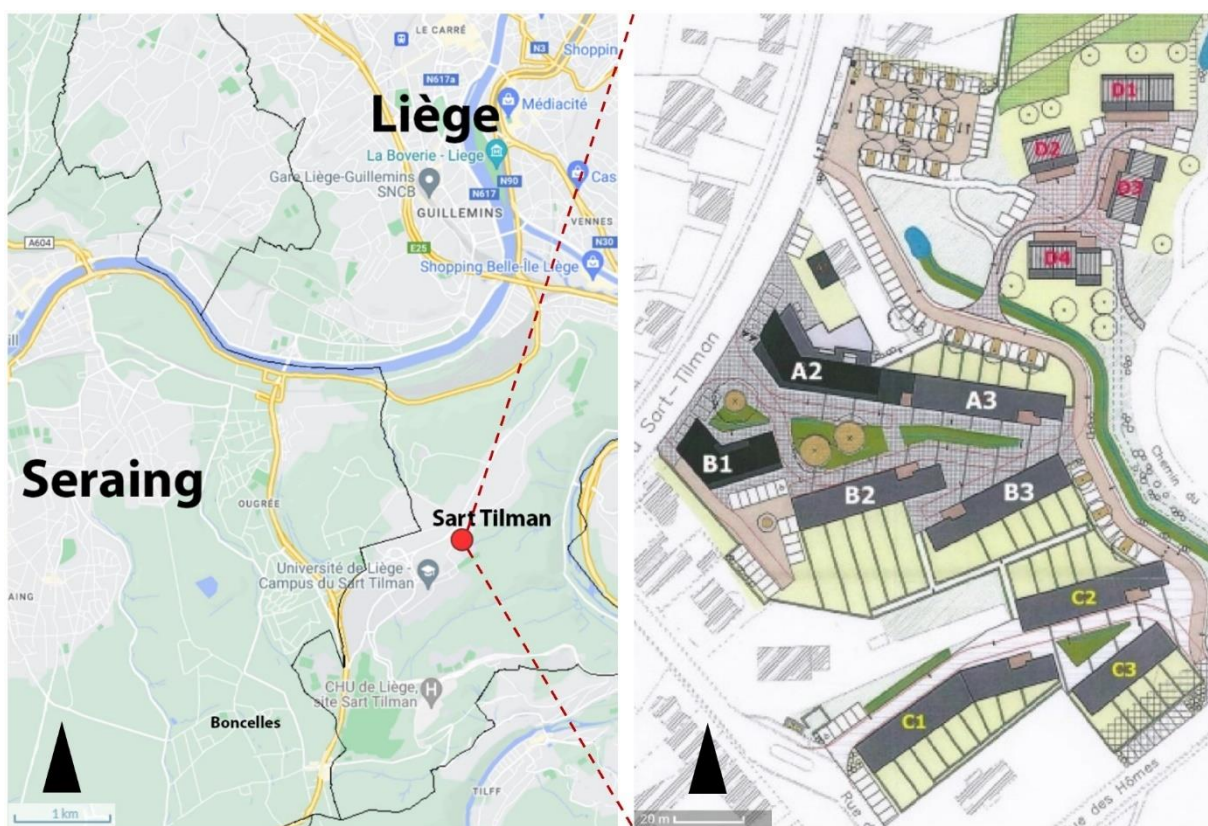


Figure 16 : Localisation de l'écoquartier du Sart-Tilman
A gauche, plan Google maps 2023 annoté et à droite, plan masse provenant du CQST flash (Dozin, 2015, p.5)

L'architecte en charge du projet est Damien Franzen, associé au promoteur immobilier Thomas & Piron. Le chantier a été divisé en trois phases successives, commençant par la partie sud et se déplaçant vers le nord. Le bâtiment étudié (D4 sur le plan masse de la [figure 16](#)) fait partie de la seconde phase de ce chantier. Cette phase a débuté en 2015 et s'est achevée en 2018.

Dans ce quartier, la moitié des logements respectent la norme « passive ». De plus, chaque bâtiment dispose d'une citerne de récupération d'eaux pluviales et un réseau séparatif des eaux usées et des eaux de pluie a été mis en œuvre.

La résidence Arola ([figure 17](#)) est un immeuble à appartements de quatre niveaux comprenant :

- 3 duplex de 3 chambres ;
- 1 duplex de 2 chambres ;
- 2 appartements d'1 chambre.

Elle totalise ainsi 6 appartements (4 appartements de 4 personnes et 2 appartements de 2 personnes), une occupation de 20 personnes pour une superficie de 468 m² habitable. Les plans, coupes et façades de ce bâtiment sont disponibles [en annexe](#).



Figure 17 : Photo de la résidence Arola (Photo Google Street View, avril 2021)

3.1.3 Hypothèses et scénarios de modélisation

3.1.3.1 Hypothèses et scénario prédéfinis pour l'ACV complète

Bien que plusieurs ACV sont réalisées sur la Résidence Arola, la recherche effectuée dans le cadre de cette étude n'a pas pour but d'évaluer la qualité environnementale de ce bâtiment, mais bien d'évaluer des outils d'ACV simplifiées à travers plusieurs types d'analyses. Ainsi, vu que notre étude comparative se base sur une ACV complète qui a déjà été réalisée, publiée et révisée par les pairs, il n'est pas nécessaire de recréer un ensemble d'hypothèses de modélisation pour cette évaluation environnementale. Au contraire, il est utile de récupérer les hypothèses et choix qui ont été pris dans l'étude d'ACV complète pour minimiser les biais de modélisation qui pourraient provenir du choix d'hypothèses différentes. Cette partie a donc pour but de rappeler ces choix de modélisation qui ont été posés par les précédents chercheurs (Malmedy, 2020 ; Nematchoua et al., 2022). La pertinence de ces choix n'est pas remise en cause ici, mais elle sera évaluée et critiquée dans la partie discussion.

Pour rappel, cette étude réalisée par Charline Malmedy (2020), et pour laquelle nous récupérons les résultats de l'ACV complète de la résidence Arola, évalue les impacts environnementaux de cet immeuble sur tout son cycle de vie. Le but de cette étude était d'abord de réaliser une évaluation énergétique car son premier objectif était de savoir si la résidence respectait le standard Q-ZEN (Quasi Zéro Energie Q-ZEN) exigé en Wallonie depuis 2021 (qui n'était donc pas encore en application au moment de sa conception et de sa construction).

Dans un second temps, divers scénarios ont été créés afin que le bâtiment respecte un standard plus exigeant, le NetZEB (Net Zéro Énergie), c'est-à-dire une autonomie énergétique. Malmedy (2020) teste ainsi plusieurs nouvelles technologies pour l'atteindre : la performance des menuiseries utilisées, Le type et le niveau d'isolation (façade et toiture), l'usage d'une pompe à chaleur (PAC) et d'énergies renouvelables. Toutefois, elle souhaite que les technologies choisies soient les plus respectueuses de l'environnement. C'est la raison pour laquelle elle introduit une évaluation environnementale dans son étude, à travers l'ACV des bâtiments.

L'étude énergétique a donc peu d'intérêt ici. La présente étude se focalise uniquement sur l'ACV complète qui a été réalisée sur le scénario initial.

Cette ACV a été effectuée pour une durée de vie du bâtiment fixée à 50 ans. Neuf indicateurs sont étudiés et ont été choisis car ils sont communs à l'outil TOTEM et à Pleiades ACV au moment de l'étude.

- Effet de serre [t CO₂ eq.] ;
- Acidification [kg SO₂ eq.] ;
- Demande cumulative d'énergie [GJ] ;
- Eau utilisée [m³] ;
- Épuisement des ressources abiotiques (minérales et fossiles) [kg Sb eq.] ;
- Eutrophisation (eaux douces uniquement) [kg PO₄³⁻ eq.] ;
- Production d'ozone photochimique [kg C₂H₄ eq.] ;
- Dommage à la biodiversité [PDF.m2.an] ;
- Dommage à la santé [DALYs] ;
- Énergie primaire [GJ].

Trois indicateurs ne sont donc pas considérés dans son étude : les déchets inertes produits [t], les déchets radioactifs [dm³] et les odeurs [Mm³ air]. Tous les matériaux sont considérés comme des déchets inertes en fin de vie du bâtiment. Cette simplification est justifiée par un manque de données précises à ce sujet (Malmedy, 2020, p 44.). Toutefois, les déchets pour le remplacement des éléments et les déchets de construction sont bien considérés par l'outil Pleiades ACV.

En ce qui concerne l'encodage géographique, l'adresse de la Résidence Arola a été enregistrée comme étant « Rue des Demoiselles n°4, 4031, Liège, Belgique ». Ses coordonnées géographiques sont N 50° 35' 20 " et E 5°34'18" pour une altitude de 237m. L'activité sismique de la zone est très faible.

Les données météo qui ont été choisies sont celles de Uccle (d'après le site EnergyPlus, sous format TRY) mais elles ont été adaptées à la situation exacte de l'immeuble. Ces données sont utiles pour plusieurs calculs : les besoins de chauffage, le calcul solaire thermique, l'humidité relative, le calcul de l'eau chaude sanitaire (ECS) et le calcul aérodynamique (vitesse du vent et sa direction). L'adaptation dont il est question est une correction des températures selon la différence d'altitude entre Uccle et le Sart-Tilman. Concrètement, on retire 0,6°C tous les 100m pour les températures, les rayonnements globaux et diffus horizontaux, le rayonnement direct et la température de l'eau froide.

En ce qui concerne la modélisation, elle a été réalisée par parois. Les documents de l'architecte précisent la composition des différentes parois. Sur cette base, Charline Malmedy en a défini neuf types pour sa modélisation. Ce sont ceux qui seront utilisés dans notre modélisation. La [figure 18](#) présente les neuf types de parois prédéfinis, leur composition, leur épaisseur et leur résistance thermique.

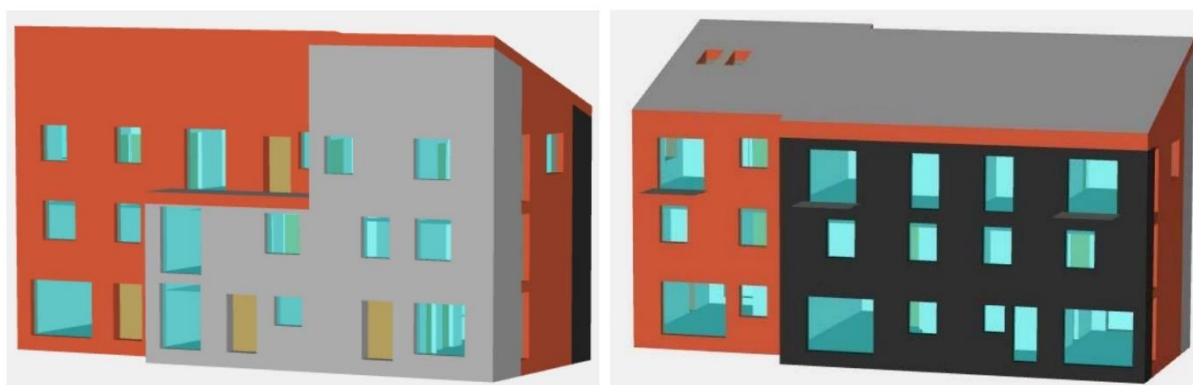
			e (cm)	ρ e (kg/m ²)	λ (W/m.K)	R (m ² .K/W)
PAROIS EXTERNES	MUR EXTÉRIEUR ENDUIT	Enduit extérieur	1.5	26	1.15	0.01
		Polystyrène expansé	32	8	0.032	10
		Bloc silico-calcaire	15	270	0.136	1.1
		Plafonnage	1.3	11	0.325	0.04
	MUR EXTÉRIEUR BARDÉ	Bardage fibre-ciment	2	32	0.65	0.03
		Lame d'air	1.2	0	0.08	0.15
		PUR	24	7	0.025	9.6
		Bloc silico-calcaire	15	270	0.136	1.1
PAROIS INTERNES	MUR PORTEUR	Plafonnage	1.3	11	0.325	0.04
		Bloc silico-calcaire	15	270	0.136	1.1
		Polystyrène expansé	4	1	0.032	1.25
		Bloc silico-calcaire	15	270	0.136	1.1
	CLOISON	Plafonnage	1.3	11	0.325	0.04
		Plâtre gypse	1	12	0.42	0.02
		Laine de roche	8	2	0.041	1.95
		Plâtre gypse	1	12	0.42	0.02
PLANCHER BAS	PLANCHER RDC	Dalle en BA	25	588	2.3	0.11
		Poluylréthane	25	8	0.025	10
		Isolant acoustique	1	12	0.36	0.03
		Chape + revêtement	8	144	0.7	0.11
PLANCHERS INTERMÉDIAIRES	PLANCHER +1	Plafonnage	1.3	11	0.325	0.04
		Hourdis béton	18	234	1.286	0.14
		Béton cellulaire	8	48	0.22	0.36
		PUR	1	0	0.025	0.4
	PLANCHER +2	Chape + revêtement	8	144	0.7	0.11
		Plafonnage	1.3	11	0.325	0.04
		Pré-dalle	22	286	1.358	0.16
		Béton cellulaire	8	48	0.22	0.36
	PLANCHER +3	PUR	1	0	0.025	0.4
		Chape + revêtement	8	144	0.7	0.11
		Plafonnage	1.3	11	0.325	0.04
		Hourdis béton	18	234	1.286	0.14
TOITURE	TOITURE	Couverture PVC	1	12	0.14	0.07
		Isolation PIR ¹³	24	7	0.025	9.6
		Laine minérale	18	5	0.039	4.62
		Plaques de finition	2	9	0.333	0.03

Figure 18 : Tableau de la composition de l'ensemble des parois de la résidence Arola (Malmedy, 2020, p.34)

Les châssis extérieurs sont en PVC, double vitrage peu émissif avec gaz argon, conforme au U_{\max} de la PEB de 2014 = $1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ (U_{\max} étant le coefficient de transfert de chaleur global châssis + vitrage). Quant aux portes intérieures isolantes, elles sont en bois.

En ce qui concerne l'étanchéité à l'air, le débit d'infiltration d'air est fixé à 0.25 volumes par heure dans toute les zones de l'immeuble, sauf l'entrée et les escaliers, où il est fixé à 1 volume par heure.

Pour ce qui est de la récupération des quantités, elle a été réalisée à l'aide d'une modélisation 3D (*figure 19*) sur ALCYONE, un outil directement intégré à Pleiades ACV. Cette dernière permet également de préciser les masques lointains (relief, bâtiments proches et végétation).



(a) Façades nord et ouest

(b) Façades sud et est

Figure 19 : Modélisation 3D de la résidence Arola sur Pleiades ACV (Malmedy, 2020, p.36)

La production de chaleur pour le chauffage est assurée par trois chaudières standard à condensation au gaz (PCI 92,38%) ayant une durée de vie de 20 ans. Une ventilation mécanique contrôlée (VMC) double flux est utilisée. Elle possède un échangeur thermique pour récupérer la chaleur de l'air vicié (rendement : 90%).

Des consignes précises de chauffage par zone sont définies pour la simulation thermique dynamique. Cependant, vu les simplifications des outils d'ACV choisis, ces données ne sont pas nécessaires dans le cas de notre modélisation. Il en va de même pour la puissance dissipée par les équipements d'éclairage et d'autres auxiliaires (électroménager, ordinateurs, lavage, ect.) ainsi que les débits de ventilation dans les différentes pièces de la résidence.

Enfin, Pleiades ACV étant un logiciel français, de nombreuses données ont dû être adaptées pour recontextualiser l'étude en Belgique. C'est le cas pour les valeurs du mix de production d'électricité, la consommation moyenne d'eau en Wallonie, le rendement du réseau de distribution d'eau, les moyennes de production de déchets résiduels et triés en Région wallonne et enfin les distances moyennes de transport (démolition – centre de tri/collecte – décharge/incinérateur).

3.1.3.2 Hypothèses spécifiques pour les ACV simplifiées

Les données qui ont été présentées dans la partie précédente sont donc celles qui ont été utilisées pour réaliser les ACV simplifiées sur TOTEM et EcoEffect. Cependant, de nouveaux choix et hypothèses ont dû être pris pour réaliser ces nouvelles évaluations dans leur entièreté, selon les demandes spécifiques de ces outils.

3.1.3.2.1 TOTEM :

Un paramètre général important demandé dans TOTEM et qui n'a pas été calculé dans l'ACV complète sur Pleiades ACV est la surface de plancher utile (SPU). Selon la définition de la PEB (Demesmaecker & Vannerom, 2020), c'est la surface brute chauffée du volume protégé, mesurée au nu extérieur des murs de façade pour une hauteur libre de minimum 2,20 m. Cette dernière comprend les pièces chauffées/non-chauffées, les escaliers, ascenseurs, puits techniques et ouvertures de plancher de plus de 4 m². Cette dernière est différente de la surface hors œuvre nette (SHON) dans Pleiades (qui ne comprend notamment pas les garages, caves, locaux techniques en sous-sol). Quant au volume chauffé, il a été calculé en additionnant les valeurs de volume des zones renseignées dans le rapport Pleiades ACV, en y déduisant les zones pour lesquelles le besoin annuel en chauffage a été fixé à 0kWh (c'est-à-dire les zones WC, combles et local technique).

N'ayant pas accès à la modélisation qui a été effectuée sur ALCYONE dans Pleiades ACV, il a été nécessaire de recréer une maquette 3D pour la modélisation sur TOTEM. Cette modélisation ([figure 20](#)) a été réalisée pour être la plus fidèle possible aux plans, coupes et façades de la résidence, fournis [en annexe](#). Pour des raisons de facilité d'usage, c'est le programme Revit (2022) qui a été utilisé pour cette modélisation. Les neuf familles de parois ont été encodées comme décrit dans la [figure 18](#) et les quantités ont pu être récupérées dans TOTEM grâce à une exportation au format IFC.

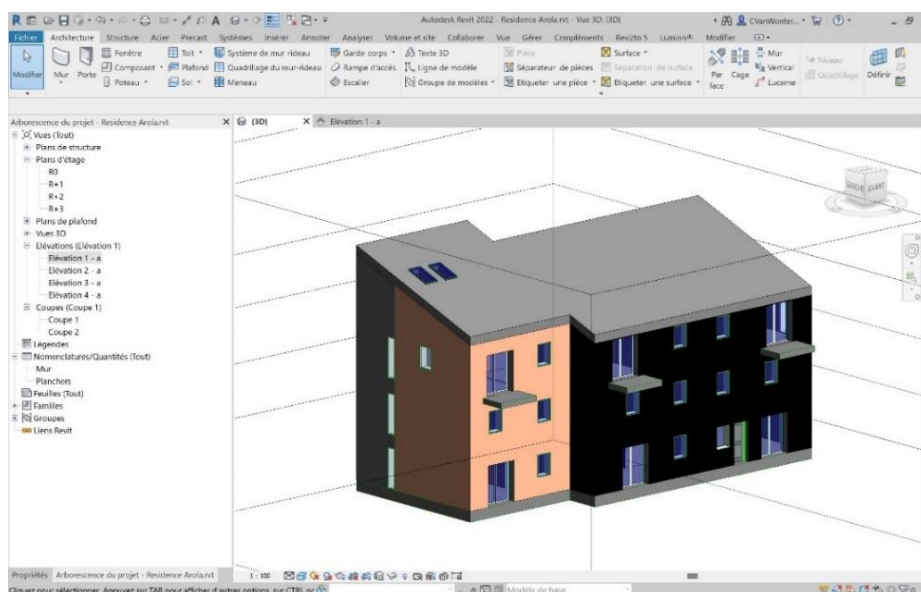


Figure 20 : Maquette Revit personnelle de la Résidence Arola

Concernant les éléments à modéliser indisponibles dans TOTEM, ou dont certaines caractéristiques n'étaient pas données, plusieurs hypothèses ont été prises et sont détaillées ci-dessous. TOTEM laisse la possibilité aux professionnels d'ajouter des composantes sur demande, mais cela prend du temps et l'ajout n'est pas assuré.

Les balcons (4 m² et 22 cm d'épaisseur) sont en béton, mais aucune information n'est donnée quant à leur mise en œuvre. Ils pourraient être en béton préfabriqué, mais dans la base de données de TOTEM, il n'y a pas de béton précontraint de 22 cm (ce sont soit des prédalles de 5 cm, soit du béton coulé sur site, soit des hourdis). Le béton coulé sur site ($\rho = 2380 \text{ kg/m}^3$, seul choix disponible) a donc été choisi.

Pour les hourdis, l'épaisseur a été fixée à 20 cm car ni 18 cm ni 22 cm ne sont disponibles dans TOTEM. Pour ce qui est du béton cellulaire de nivellement, il n'y avait pas d'élément moins épais que 15 cm dans TOTEM alors que le bâtiment comprend une couche de 8 cm seulement. La couche de nivellement est déjà comprise dans la couche « hourdis » ; à la place, c'est donc une chape traditionnelle de 8 cm qui a été choisie (totalisant donc 28 cm d'épaisseur au lieu de 26 cm).

Pour les portes extérieures, elles sont uniquement disponibles en 900x2050 mm. Leur nombre a donc été multiplié par 2 si elles sont double (idem pour les portes triple). De même, pour l'enduit extérieur, il a été modélisé en deux couches de 7 mm (car non disponible en 15 mm demandé).

Deux types d'éléments d'installation technique ont été encodés : les trois chaudières à gaz avec ballon d'eau chaude sanitaire (ECS) et une unité de ventilation double flux système D comprenant, par défaut, un ensemble d'éléments détaillé [en annexe](#).

Pour la partie « consommation d'énergie », dans un premier temps, l'approche simplifiée en degrés-jours équivalents a été sélectionnée. Le type de système de ventilation a pu être choisi (« Ventilation mécanique avec récupération de chaleur »).

Ensuite, pour rectifier la sous-estimation de l'énergie consommée dans cette première méthode, un second scénario est créé sur base du premier où l'approche basée sur les résultats PEB est utilisée. La demande cumulative d'énergie [GJ] de la phase d'utilisation calculée dans Pleiades ACV est utilisée afin de comparer les différences avec la méthode simplifiée. Plus particulièrement, ce sont les valeurs pour le chauffage, l'ECS et l'électricité spécifique qui ont été récupérées. Ces valeurs doivent être converties en [MJ/an], les années correspondent à la durée de vie du bâtiment dans ce scénario, c'est-à-dire 50. Enfin, comme il s'agit d'une énergie primaire, le Guide PEB en vigueur (SPW Energie, 2021, p.117) demande de diviser ces valeurs par un facteur de conversion qui dépend du vecteur énergétique. Il n'y a que le facteur du vecteur de l'électricité qui est différent de 1, ainsi, la valeur pour l'électricité sera divisée par 2,5. Les résultats intermédiaires sont donnés [en annexe](#).

3.1.3.2 ECOEFFECT :

L'encodage dans EcoEffect s'est fait d'une façon tout à fait différente. En effet, l'outil ne se base pas sur un encodage par paroi mais par matériau, en encodant directement les quantités. C'est une autre partie du rapport Pleiades ACV qui a été utile pour cet outil « Liste de matériaux : Quantité » comme présenté [en annexe](#). Dans ce cas, les matériaux étaient tous disponibles à quelques exceptions près, ou des alternatives similaires ont été trouvées dans la base de données intégrée.

Les principales hypothèses sont :

- Les plaques de plâtre de 10 mm ont été remplacées par de plaques de 13 mm en faisant une règle de trois sur les quantités ;
- Le béton cellulaire et les blocs silico-calcaires ont été considérés tous deux comme du « Concrete, light » ;
- Les hourdis ont été encodés comme « Concrete element, hollow » ;
- L'élément fibre-ciment a été encodé comme « Cement 2003 ».

L'encodage complet est disponible [en annexe](#).

Pour l'utilisation de l'énergie, il était demandé d'encoder une valeur pour la consommation électrique annuelle et les consommations en chauffage. Ce sont à nouveau les résultats du rapport Pleiades ACV qui ont été utilisés.

3.1.3.3 Scénario du projet à une phase intermédiaire de conception

Le scénario dont il est question ici concerne une phase intermédiaire de conception du projet. Il s'agit d'une phase théorique et représentative du projet lors de laquelle la conception n'est pas encore terminée. C'est une phase où les caractéristiques et les choix de conception ne sont volontairement pas tous fixés.

Le but de ce scénario fait écho au paradoxe de l'écoconception présenté dans l'introduction de ce mémoire. En effet, ce scénario peut être assimilé à l'une des premières phases de conception, qui, pour rappel, présente un grand potentiel en termes d'intégration de l'ACV et de son efficacité sur les impacts environnementaux finaux de bâtiment étudié. La question est de savoir si un concepteur peut (ou non) réaliser une ACV simplifiée ayant du sens au stade de l'avant-projet.

Cette « phase intermédiaire » peut être assez aléatoire, allant des esquisses peu concrètes, sans matérialité ni épaisseur, jusqu'à des plans très détaillés, approchant le résultat final. Pour cadrer et baliser ce scénario, sa définition s'appuie sur une recherche documentaire qui a été présentée dans la partie « **2.5.2 Types de données produites aux différents stades de développement du projet** » de l'état de l'art. La philosophie de modélisation de ce scénario est de veiller à ce que le bâtiment, non terminé, soit en bonne voie pour aboutir à sa forme actuelle. Dans cette perspective, les choix et hypothèses de la modélisation viseront à s'approcher de la proposition finale, tout en tenant compte du niveau limité d'informations disponibles à ce stade. Ce scénario sera uniquement testé sur TOTEM.

À titre d'exemple, l'outil d'ACV simplifié TOTEM offre la possibilité de choisir des parois prédéfinies, que l'on peut appeler « macro-composants ». Le choix de ce type de parois lors de l'évaluation de cette phase intermédiaire permettra de sélectionner celle qui s'approche le plus de la proposition finale. Ainsi, on pourra déterminer si les résultats obtenus reflètent bien la proposition finale ou, au contraire, s'ils sont aberrants et ne correspondent pas à ce à quoi ils auraient dû aboutir, conformément au projet fini.

Parmi les six phases du processus de conception identifiées dans l'état de l'art (études préalables, esquisse, avant-projet sommaire, avant-projet détaillé, construction et exploitation), quatre peuvent déjà être supprimées. En effet, les études préalables ne relèvent pas de la responsabilité du concepteur, et à partir de l'étape d'avant-projet détaillé, nous sommes déjà trop avancés dans la conception pour envisager une différence significative vis-à-vis du scénario « fini ». En se focalisant sur la description des données disponibles à l'avant-projet sommaire, on peut constater que la majorité de ces données correspondent déjà à ce qui est demandé dans une ACV simplifiée. C'est pourquoi la phase de conception intermédiaire créée ici se rapprochera davantage de la description correspondant à la phase de l'esquisse.

L'état d'avancement choisi est donc le suivant : sa géométrie consiste en une boîte (le bâtiment possède donc une toiture plate) dont les dimensions sont celles de l'emprise totale de la résidence, c'est-à-dire un rectangle de 22x10m avec une hauteur de 11m (la hauteur intermédiaire entre le niveau haut et le niveau bas de la toiture en pente).

En ce qui concerne les percements, l'état de l'art affirme qu'à la phase d'esquisse, le rapport de percement par façade est connu. Ainsi, la surface totale actuelle des percements sera récupérée. Les dalles et murs porteurs sont considérés, mais pas les cloisons intérieures.

Voici l'ensemble des hypothèses prises dans l'outil simplifié TOTEM :

- La surface de plancher utile (SPU) est fixée à 1 m² afin de se concentrer sur les conséquences de l'usage des macro-composants. En effet, comme la SPU n'est utilisée que pour rediviser l'ensemble des résultats présentés dans le rapport final (faisant office d'unité fonctionnelle), lui donner une valeur (inconnue à ce stade et forcément différente de la surface finale) est une source supplémentaire de différence ;
- Pour le choix de la dalle de sol, 24 macro-composants étaient proposés. Seul 12 étaient neufs, en béton coulé sur site et avec un isolant en polyuréthane. C'est l'élément « *PS_Coulé sur site_Béton armé_BIB_Neuf_04* » qui a été sélectionné ; c'est le plus proche de l'original.
- Pour les planchers d'étage, 44 macro-composants étaient proposés. Seul 8 étaient constitués de hourdis. C'est l'élément « *PE_Hourdis_Béton précontraint_BIB_Neuf_08* » qui a été sélectionné. Il possède la même épaisseur de hourdis que l'original ;
- Pour le plancher du grenier, 18 macro-composants étaient proposés. Seul 1 était fait de hourdis. C'est l'élément « *PG_Hourdis_Béton précontraint_BIB_Neuf_01* » qui a été sélectionné. L'isolation a été supprimée de ce macro-élément ;
- Pour les murs extérieurs, 78 macro-composants étaient proposés. Seul 5 étaient en briques silico-calcaires. Pour les murs en crépi, c'est l'élément « *ME_Briques creuses_Silico-calcaire_BIB_Neuf_04* » qui a été sélectionné, car c'est le seul avec de l'enduit en finition extérieure. Le type et l'épaisseur d'isolant ont été corrigés. Pour les murs en fibre-ciment, rien ne correspondait parmi ces 5 éléments. C'est donc l'élément « *ME_Briques creuses_Silico-calcaire_BIB_Neuf_03* » qui a été choisi, en adaptant l'isolant et le revêtement extérieur ;
- Pour les murs intérieurs porteurs, 17 macro-composants étaient proposés. Seul 1 était fait de blocs silico-calcaires. C'est l'élément « *MIP_Briques creuses_Silico-calcaire_BIB_Neuf_01* » qui a été sélectionné ;
- Pour le toit, 49 macro-composants étaient proposés. Seuls 20 étaient neufs, en pannes – chevrons. C'est donc l'élément « *TI_Pannes_Bois résineux_BIB_Neuf_04* » qui a été choisi, en adaptant le type d'isolant ;
- Pour les châssis, puisque dans TOTEM, l'impact d'un châssis ne dépend pas de leur nombre mais uniquement du nombre de mètres carrés, 1 seul châssis de la surface vitrée totale sera encodé. Pour les portes extérieures, le même nombre sera encodé ;
- Les installations techniques sont les mêmes que dans le scénario « fini ».

3.1.4 Élaboration des grilles pour les trois analyses

3.1.4.1 *Grille d'analyse générale et fonctionnelle des outils simplifiés choisis*

L'idée de cette analyse est de fournir une vue d'ensemble sur les trois outils utilisés, mettant en évidence les caractéristiques représentatives et distinctives des trois types d'ACV qu'ils représentent. En quoi Pleiades ACV est considéré comme une ACV complète, TOTEM comme une ACV simplifiée et EcoEffect comme une ACV très simplifiée selon leurs caractéristiques respectives ?

C'est pourquoi cette analyse prend la forme d'un tableau comparatif, où les trois outils sont disposés verticalement et les caractéristiques étudiées sont présentées horizontalement. Cette présentation offre une vue claire et concise pour présenter cette analyse générale et fonctionnelle.

Ce tableau a également pour but de mettre en évidence les causes potentielles des différences entre les résultats qui seront produits par ces outils. C'est pourquoi il présente les lignes « Contexte », « Calcul énergétique » ou encore « Base de données ». De plus, cette analyse permettra de faire le point sur les éléments qui sont comparables dans les analyses quantitatives et qualitatives qui suivent, grâce aux lignes « Types de données requis », « Indicateurs » et « Types de résultats produits ».

Enfin, en complément de ce tableau et pour répondre au premier objectif de cette analyse, la nouvelle typologie créée dans les résultats de l'état de l'art ainsi que la figure des phases de la typologie « detailed – simplified – screening » seront remployée pour caractériser les trois outils d'ACV utilisés.

3.1.4.2 *Grille de comparaison des résultats quantitatifs*

L'analyse quantitative de cette étude consiste en une comparaison des résultats des critères environnementaux des trois outils étudiés, c'est-à-dire les résultats de l'ACV complète sur Pleiades ACV, comme référence de comparaison, ainsi que ceux produits par les deux outils d'ACV simplifiés TOTEM et EcoEffect. Le choix des critères environnementaux étudiés se basera sur les premiers résultats de l'analyse générale et fonctionnelle. En effet, ces derniers permettront de dire quels sont les résultats comparables et donc quels impacts pourront être étudiés (moyennant des modifications détaillées dans cette section).

L'un des aspects les plus importants à considérer est la durée de vie de 60 ans (non modifiable) fixée par l'outil TOTEM. En effet, l'étude complète (Malmedy, 2020), a démontré que cette variable avait une influence significative sur les résultats produits. Comme les ACV complètes ont seulement été effectuées sur 50 ans et 80 ans, une conversion s'impose. Cette dernière ne concerne que les phases d'utilisation et de rénovation, étant donné que la durée de vie du bâtiment n'affecte pas les phases de

construction et de démolition, comme le souligne cette même étude (Malmedy, 2020). Pour la phase d'utilisation, on constate une relation directement proportionnelle entre les résultats sur 50 et 80 ans. Une règle de trois sera donc effectuée pour passer des résultats de 50 ans à 60 ans. Pour la phase de rénovation en revanche, la relation semble plus complexe. C'est probablement dû à la prise en compte de la durée de vie d'un élément avant son remplacement, différente selon la catégorie de l'élément de construction considéré. Par conséquent, une interpolation linéaire sera effectuée entre les résultats sur 50 et 80 ans afin d'estimer ceux pour la durée de vie de 60 ans.

Cela peut paraître surprenant, mais dans cette étude, les résultats ne seront pas exprimés selon une unité fonctionnelle au m². En effet, le même bâtiment étant évalué dans les trois outils d'ACV, il n'est pas nécessaire de diviser les résultats par sa surface. De plus, comme annoncé précédemment, la surface utilisée dans les outils d'ACV n'est pas définie de la même manière par les différents outils. Ainsi, étant donné que TOTEM exprime ses résultats en m² de surface de plancher utile, il sera nécessaire de les remultiplier par cette surface.

Enfin, comme la plupart des facteurs de normalisation d'EcoEffect sont contextualisés en Suède ou au Danemark, il est nécessaire de remultiplier ces résultats par les valeurs de normalisation puisque EcoEffect ne présente jamais les résultats des impacts environnementaux sous une forme non normalisée. Les valeurs de normalisation ont été trouvées dans la base de données fournie avec le programme (le tableau de ces valeurs par indicateur est disponible [en annexe](#)).

Il y a donc deux scénarios principaux qui seront analysés :

- Le scénario « fini » : Comparaison des résultats pour un même impact entre l'ACV complète et les ACV simplifiées ;
- Le scénario à une étape de conception intermédiaire (sur TOTEM uniquement) : Comparaison du score unique et des impacts par catégories d'élément de ce scénario avec ceux du scénario « fini » et élaboration de scénarios alternatifs.

Les impacts calculés seront évalués en termes de fiabilité, de précision et de performance :

- Le test de fiabilité est un premier filtre. Il évalue tout d'abord si les résultats ne sont pas aberrants, s'ils sont cohérents et d'un ordre de grandeur similaire à la valeur de référence (résultat de Pleiades ACV). Une limite sera définie dans cette même section ;
- La précision mesure l'exactitude des résultats obtenus avec la valeur de référence (résultat de Pleiades ACV). Des limites seront également définies ;

- Enfin, la performance des résultats fait ici référence à son aptitude à produire des résultats utiles et satisfaisants selon les objectifs fixés. Cette évaluation correspond à l'analyse qualitative.

Pour rappel, dans le projet COIMBA (Salmon et al., 2011) présenté dans la section « **2.2.3.6 Validité des résultats selon quatre études** » de l'état de l'art, on avait des différences dites « faibles » entre 10 et 20% lors de la comparaison des résultats produits par différents outils d'ACV. D'autres allaient jusqu'à 50% de différence. Le seuil de fiabilité est donc fixé à 50% de différence.

Évaluation de la fiabilité	Fiable	Non fiable
Différence avec la valeur de référence	≤ 50%	> 50%

Tableau 2 : Échelle d'évaluation de la fiabilité des résultats quantitatifs des ACV simplifiées, basée sur le projet

La précision des résultats sera évaluée plus précisément en termes de différence entre les résultats des outils simplifiés et ceux récupérés de l'étude complète sur Pleiades ACV. Ces différences sont exprimées en pourcentages. Des limites ont été établies en fonction de deux références et ajustées selon les observations de l'état de l'art.

Tout d'abord, il y a la logique du travail par itération de TOTEM. En effet, cet outil propose de considérer une différence de 20% pour assurer une réduction significative de l'impact environnemental à la suite d'une modification d'encodage afin d'optimiser le bâtiment étudié (par exemple en changeant son volume, le type de système constructif, ses matériaux, etc.), tout en tenant compte de l'incertitude de l'évaluation environnementale.

Ensuite, EcoEffect propose dans son outil une comparaison des résultats (et donc des performances environnementales) de l'évaluation du bâtiment étudié avec celles d'un bâtiment de référence pré-encodé. Cette comparaison se fait à partir de trois classes définies en pourcentages. Lorsque la différence est inférieure à 10%, les résultats sont considérés comme équivalents. Lorsqu'ils sont compris entre 10 et 25%, le bâtiment est dit « mieux ou pire » que la référence et pour une différence supérieure à 25%, le bâtiment est dit « vraiment mieux ou vraiment pire ».

Ainsi, la grille de comparaison retenue prend en considération des ordres de grandeurs présentés ci-dessus, tenant compte des observations de l'état de l'art. Cette grille n'est applicable que si le résultat a été évalué comme fiable selon le **tableau 2**.

Évaluation de la précision	Très précis	Précis	Peu précis
Différence avec la valeur de référence	[0 – 10%]]10 – 25%]]25 – 50%]

Tableau 3 : Échelle d'évaluation de la précision des résultats quantitatifs des ACV simplifiées, basée sur les ordres de grandeurs estimés par EcoEffect et le projet COIMBA

Enfin, les résultats seront également présentés par étape du cycle de vie pour Pleiades ACV et TOTEM sous la forme de diagrammes circulaires (EcoEffect ne fournit pas ses résultats pour les quelques étapes du cycle de vie qu'il considère). Dans le rapport Pleiades ACV, les résultats par étape du cycle de vie sont donnés par indicateur environnemental puisqu'ils ne sont ni pondérés, ni normalisés. Ainsi, pour pouvoir comparer les phases entre elles et entre les deux outils d'ACV, une moyenne a été réalisée. Cette moyenne permet d'obtenir la proportion globale de chaque phase sur base de leur proportion respective pour chaque indicateur environnemental considéré. Il est toutefois nécessaire de noter que ces moyennes considèrent que tous les indicateurs ont un poids équivalent. En effet, les méthodes de pondération MMG et PEF sont spécifiques aux unités de leurs outils respectifs, Pleiades ACV et TOTEM. Il est donc impossible d'utiliser la pondération d'un outil pour l'autre (les résultats pondérés pour chaque outil sont tout de même donnés [en annexe](#)).

Les étapes du cycle de vie de TOTEM ont été agrégées suivant les quatre étapes définies dans Pleiades ACV afin de faciliter leur comparaison :

- Construction : A1, A2 et A3 ;
- Utilisation : B2 et B6 ;
- Rénovation : B4.1 et B4.2 ;
- Démolition : C1, C2, C3 et C4.

Les indicateurs environnementaux qui sont exprimés selon plusieurs unités dans TOTEM n'ont évidemment pas été additionnés ; ils ont été considérés comme des indicateurs environnementaux différents, supplémentaires. Il s'agit de l'eutrophisation des eaux douces [kg P eq.], des eaux marines [kg N eq.] et l'eutrophisation terrestre [mol N eq.] ainsi que l'épuisement des ressources abiotiques minérales [kg Sb eq.] et fossiles [MJ].

3.1.4.3 Grille d'analyse qualitative

Cette partie comporte tout d'abord une analyse des résultats du scénario décrit dans la section « **3.1.3.3 Scénario à une phase intermédiaire de conception** », où le mode de simplification spécifique choisi est l'usage de macro-composants. Le résultat global de ce scénario pour l'ensemble des matériaux utilisés dans la résidence (agrégé en Milli point) est rapidement comparé à celui du scénario « fini », calculé lors de l'analyse quantitative. Comme le mode de simplification étudié est l'usage de macro-composants, une analyse comparative sera effectuée par catégorie d'éléments (planchers, murs, toit, etc.), avec toujours la même unité [mPt].

Ensuite, une certaine distance sera prise vis-à-vis des résultats quantitatifs produits pour étudier un aspects plus subjectif lié à l'utilisateur : la simplicité d'encodage de ce scénario à une phase intermédiaire dans TOTEM. Ce scénario aurait pu utiliser d'autres hypothèses selon les types de données qui ont été analysées dans l'état de l'art. Une discussion permettra d'évaluer la possibilité d'utiliser ce type de données dans TOTEM. Quelques variantes du scénario seront également étudiées pour pouvoir tester la simplicité d'une approche de conception par itération. Dans ce cas, les scénarios alternatifs permettront de comparer trois macro-composants de toiture :

- Scénario 1, cas initial : Toiture en pente n°1 avec le macro-composant le plus proche du cas réel « *TI_Pannes_Bois résineux_BIB_Neuf_04* » adapté avec de l'isolant en laine de roche ;
- Scénario 2 : Toiture en pente n°2 avec le même macro-composant « *TI_Pannes_Bois résineux_BIB_Neuf_04* » adapté avec un autre isolant possédant un coefficient de conductivité thermique similaire, la laine de verre ;
- Scénario 3 : Toiture plate en structure bois avec le macro-composant « *TP_Solives et arbalétriers_Bois résineux_BIB_Neuf_02* » adapté avec un isolant en laine de roche, pour se rapprocher au plus près du cas réel dans une toiture plate.




Pour rappel, le but de cette analyse qualitative, et plus généralement de cette étude, n'est pas de trouver les meilleurs choix de conception (ou le meilleur macro-composant de toiture dans ce cas) au niveau environnemental pour la Résidence Arola. Ces scénarios sont un prétexte pour tester des itérations dans TOTEM, analyser la facilité d'usage de cet outil à une phase intermédiaire de conception.

Après l'analyse dans TOTEM, la possibilité d'utiliser EcoEffect pour un scénario à une phase intermédiaire de conception sera étudiée. Enfin, une analyse sera réalisée sur la prise en main des ACV étudiées à travers un ressenti subjectif, une description des interfaces et des moyens mis à la dispositions des utilisateurs pour les aider à utiliser les outils d'ACV simplifiés. Un « nombre d'étapes avant le premier résultat » est estimé pour permettre une estimation rapide et grossière de la charge de travail pour les outils d'ACV étudiés. C'est une façon d'évaluer approximativement la durée d'une évaluation sur ces outils. Toutefois, il est essentiel de rester critique face à cette valeur chiffrée estimée car toutes les étapes n'ont pas le même poids. Par exemple, l'encodage des parois peut grandement différer entre TOTEM et Pleiades ACV. En effet, dans Pleiades ACV, il est possible d'encoder manuellement une paroi qui n'est pas répertoriée dans la bibliothèque intégrée de l'outil, ce qui peut considérablement allonger le temps d'encodage. Par conséquent, une brève description des étapes est également fournie.

4. Résultats

4.1 Analyse générale et fonctionnelle des outils simplifiés

4.1.1 Tableau comparatif des 3 outils

	 Pleiades ACV (2020)	 TOTEM (2023)	 EcoEffect (2008)
Type d'outil d'ACV	ACV complète	ACV simplifiée	ACV très simplifiée
Contexte	Français	Belge	Européen
Interface	Programme à télécharger, licence payante	En ligne uniquement, site internet, gratuit	Fichier utilisable sous Microsoft Accès, sur demande
CAO ou BIM intégré	Oui, intégré sous ALCYONE (3D)	Non, mais importation sous format .ifc/.xls/.csv possible	Non, encodage des quantités par matériau
Calcul énergétique	STD COMFIE (<i>simulation thermique dynamique : chauffage, ECS et électricité</i>)	Calcul simplifié (<i>valeurs U, basé uniquement sur le chauffage</i>) ou encodage valeurs PEB (<i>chauffage, refroidissement, ECS et auxiliaire</i>)	Non, mais encodage valeurs de consommation (<i>chauffage, électricité</i>)
Base de données	Ecoinvent v.2.2 contextualisée en Belgique (2010)	Ecoinvent v.3.6 contextualisée en Belgique (2019) + 65 DEP intégrées	Base de données intégrée (2008)
Ajout de matériaux possible	Oui, par encodage personnel	Oui, mais uniquement sur demande	Non, base de données intégrée seulement
Durée de vie	Au choix (<i>Cas d'étude : fixée à 50 ans</i>)	Fixée à 60 ans	Au choix
Pondération	Normalisation (éco-profils) (<i>Cas d'étude : ajout de la pondération MMG, en coûts environnementaux</i>)	Pondération PEF, score unique (<i>Milli point [mPt]</i>)	Pondération spécifique en problèmes finaux
Type de données requises (obligatoires pour obtenir un résultat)	- <u>Composition des parois</u> par défaut (au minimum plancher/mur/toiture) : <i>Encodage manuel/choix dans la liste d'éléments proposés.</i> - <u>Dimensions</u> du bâtiment : <i>Modélisation en pièces fermées.</i> -Autres : <u>Durées de vie</u> , <u>surplus</u> lors du chantier, <u>déchets inertes</u> en fin de vie, <u>distances</u> , nombre d' <u>étages</u> , <u>occupants</u> , prise en compte <u>transport des usagers</u> , zone <u>sismique</u> , <u>type</u> de bâtiment.	- <u>Localisation</u> du projet ; - <u>Surface</u> de plancher utile ; -Au minimum <u>1 élément</u> : <i>Plancher/mur/toiture/fenêtre : surface, nbr, type (choix dans la liste des types proposés ou encodage manuel) et type d'environnement.</i> <i>Élément de structure : dimensions, nbr et type.</i> <i>Porte int/ext ou installation technique (chauffage ou ventilation) : nbr et type.</i>	- <u>Usage</u> (bureaux, logements, école, public/privé) ; -Nombre d' <u>étages</u> , d' <u>occupants</u> et d' <u'appartements< u=""> ; -<u>Surface</u> de la zone évaluée ; -<u>Durée de vie</u> ; -Au minimum <u>1 matériau</u> (quantité).</u'appartements<>

Types de résultats produits		- Impacts environnementaux (unités spécifiées ci-dessous) <i>Exprimés également par m², par habitant, par étape du cycle de vie et par catégorie d'élément. Ils sont aussi présentés en éco-profil normalisés.</i>	- Impacts environnementaux (unités spécifiées ci-dessous) <i>Exprimés également par étape du cycle de vie, par catégorie d'élément + comparaison de l'impact matériaux vs. énergie.</i> - Pondération PEF [mPt/m ² SPU].	- Impacts normalisés <i>Exprimés également par matériau.</i> - Résultats comparés avec une référence ; - Pondération en problèmes finaux.
INDICATEURS	Effet de serre (100 ans)	✓ [t CO ₂ eq.]	✓ [kg CO ₂ eq.] par m ² SPU	✓ [g CO ₂ eq.]
	Acidification	✓ [kg SO ₂ eq.]	~ [mol H ⁺ eq.] par m ² SPU	✓ [g SO ₂ eq.]
	Énergie primaire	✓ [GJ]	✓ [MJ] par m ² SPU	✗
	Eau utilisée	✓ [m ³]	✓ [m ³] par m ² SPU	✗
	Épuisement des ressources abiotiques	✓ [kg Sb eq.]	~ [kg Sb eq. et MJ] par m ² SPU	~ [g CU]
	Eutrophisation (eau douce seule)	✓ [kg PO ₄ ³⁻ eq.]	~ [kg P eq.] par m ² SPU	~ [g NO ₃ ⁻ eq.]
	Production d'ozone	✓ [kg C ₂ H ₄ eq.]	~ [kg NMVOC eq.] par m ² SPU	✓ [g C ₂ H ₄ eq.]
	Dommage à la biodiversité	✓ [PDF.m ² .an]	✗	✗
	Dommage à la santé	✓ [DALYs]	✗	✗

Tableau 4 : Synthèse comparant les 3 outils choisis pour cette étude

- Légende :**
- ✓ Cas de référence, indicateurs de l'étude d'ACV complète + indicateurs disponibles dans l'ACV simplifiée, possédant des unités identiques ;
 - ~ Indicateur disponible dans l'ACV simplifiée mais dont les unités sont différentes ;
 - ✗ Indicateur indisponible ou défini différemment dans l'ACV simplifiée ;
 - Indicateur qu'il est possible de comparer quantitativement.

Le dommage à la biodiversité est défini différemment dans Pleiades ACV et TOTEM. Dans Pleiades ACV, c'est le nombre d'espèces perdues par m² par an, alors que dans TOTEM, c'est un changement d'affectation du sol. Pour le dommage à la santé, Pleiades ACV fournit un résultat global [DALYs] selon la méthode Eco-indicator 99 (EI99) qui tient compte principalement des substances cancérigènes, des effets respiratoires, du changement climatique, des radiations ionisantes et de la détérioration de la couche d'ozone (Goedkoop & Spriensma, 2001). TOTEM utilise d'autres méthodes de calcul et le subdivise en trois indicateurs : la toxicité humaine (effets cancérigènes ou non) [CTUh], les émissions de particules fines [Incidence des maladies] et les rayonnements ionisants sur la santé humaine [kBq U235 eq.]. EcoEffect ne considère que la toxicité humaine [m³ dans l'air, dans l'eau et dans le sol].

4.1.2 Schéma de simplification des trois outils d'ACV utilisés

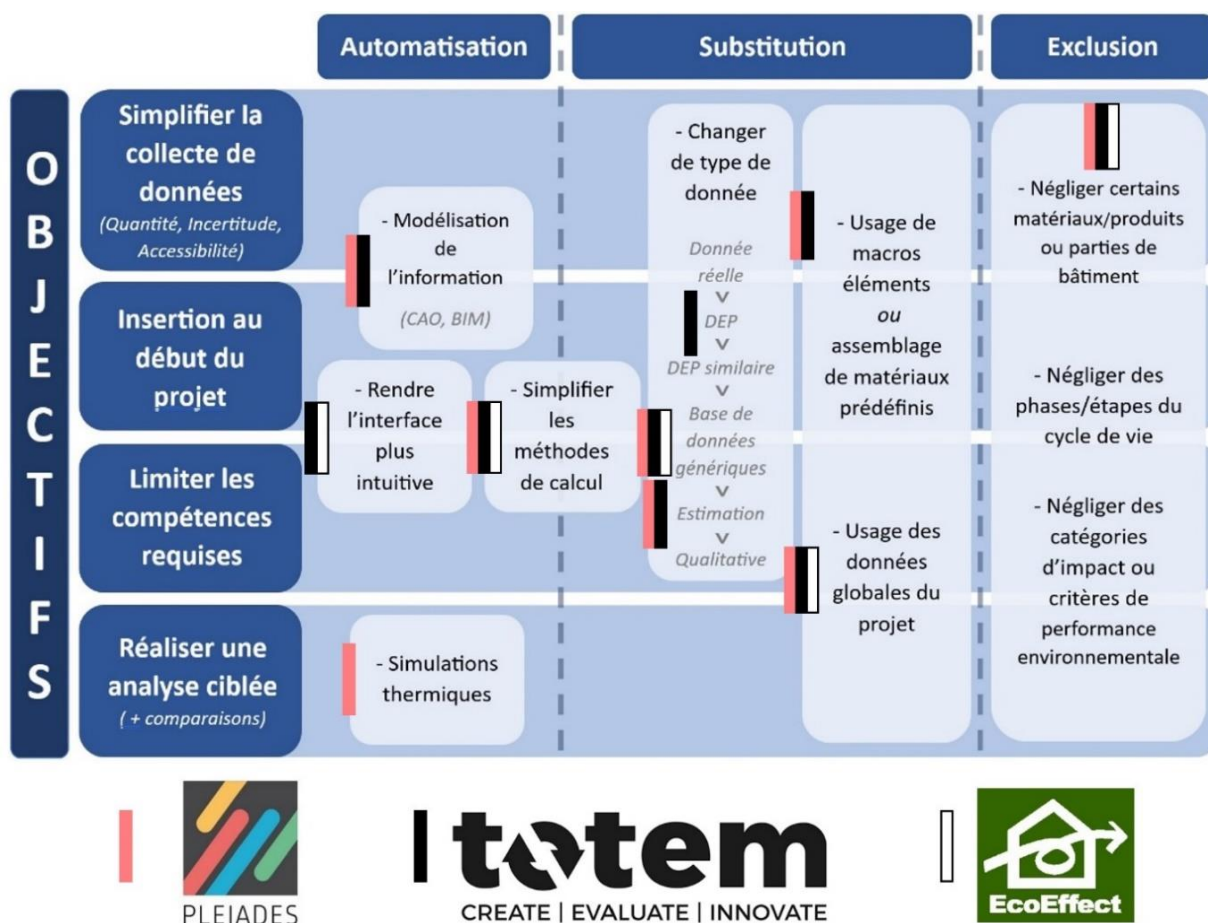


Figure 21 : Simplifications dans les trois outils étudiés selon la typologie des simplifications créées

Cette **figure 21** permet de comprendre quels types de simplifications les trois outils d'ACV étudiés utilisent. Des barrettes colorées ont été ajoutées à ce schéma : les rouges désignent Pleiades ACV, les noires TOTEM et les blanches EcoEffect. Lorsqu'une barrette est ajoutée à gauche d'un type de simplification, cela signifie que l'outil l'utilise.

Voici quelques exemples pour illustrer sa lecture :

- Pleiades ACV est le seul outil à proposer des simulations thermiques (automatisation) grâce à STD COMFIE, alors que TOTEM prend en compte l'aspect énergétique à l'aide d'une approche par simplification de la méthode de calcul (approche degrés-jours équivalents selon les valeurs U des parois, l'étanchéité à l'air, le type de chauffage et les pertes par ventilation si applicable).
- Pleiades ACV et TOTEM mettent à la dispositions de ses utilisateurs des macros-éléments de parois multicouches toutes prêtes tandis que EcoEffect ne considère que des quantités de matériaux à encoder manuellement. Par exemple, dans TOTEM, on peut sélectionner le macro-élément « ME_Blocs creux – Remplissage sur site_Béton_BIB_Neuf_01 », un mur extérieur de blocs creux en béton, avec isolation en polyuréthane et un parement en briques.

- Les trois barrettes qui couvrent toutes les simplifications d'exclusion expriment le fait que ces simplifications sont davantage du ressort de l'utilisateur. Par exemple, peu importe l'outil d'ACV, l'utilisateur peut décider de ne pas considérer les pièces d'assemblage d'une structure.

De manière plus transversale, ce tableau montre que les trois outils étudiés offrent des opportunités couvrant les trois types de simplification d'une ACV : l'automatisation, la substitution et l'exclusion, ainsi que les quatre objectifs de simplification identifiés : simplifier la collecte de données, réaliser une ACV en début de projet, limiter les compétences requises et réaliser une étude ciblée.

4.1.3 Lien avec la typologie « detailed – simplified – screening »

Cette section rassemble des étapes du cycle de vie considérées par les trois outils suivant les étapes définies par la norme EN 15978 et selon la définition de la typologie « detailed – simplified – screening » décrite dans l'EeBGuide (Wittstock et al., 2012). Sur la [figure 22](#) suivante, chaque barrette correspond à un outil (Pleiades ACV en rouge, TOTEM en noir et EcoEffect en blanc). Lorsqu'une barrette se situe à gauche sur l'étape du cycle de vie considérée, cela signifie que cet outil prend en compte cette étape dans son évaluation. Le reste de cette figure correspond à la [figure 10](#) ; cette dernière a déjà été expliquée dans l'état de l'art. La [figure 22](#) met clairement en évidence le fait que Pleiades ACV est un outil d'ACV détaillée, que TOTEM est un outil d'ACV simplifiée et EcoEffect un outil d'ACV « screening » auquel il manque toutefois la prise en compte de la consommation d'eau. Il est important de rappeler que la phase B6 de TOTEM ne considère les consommations électriques qu'à travers le chauffage pour la méthode de calcul simplifiée.

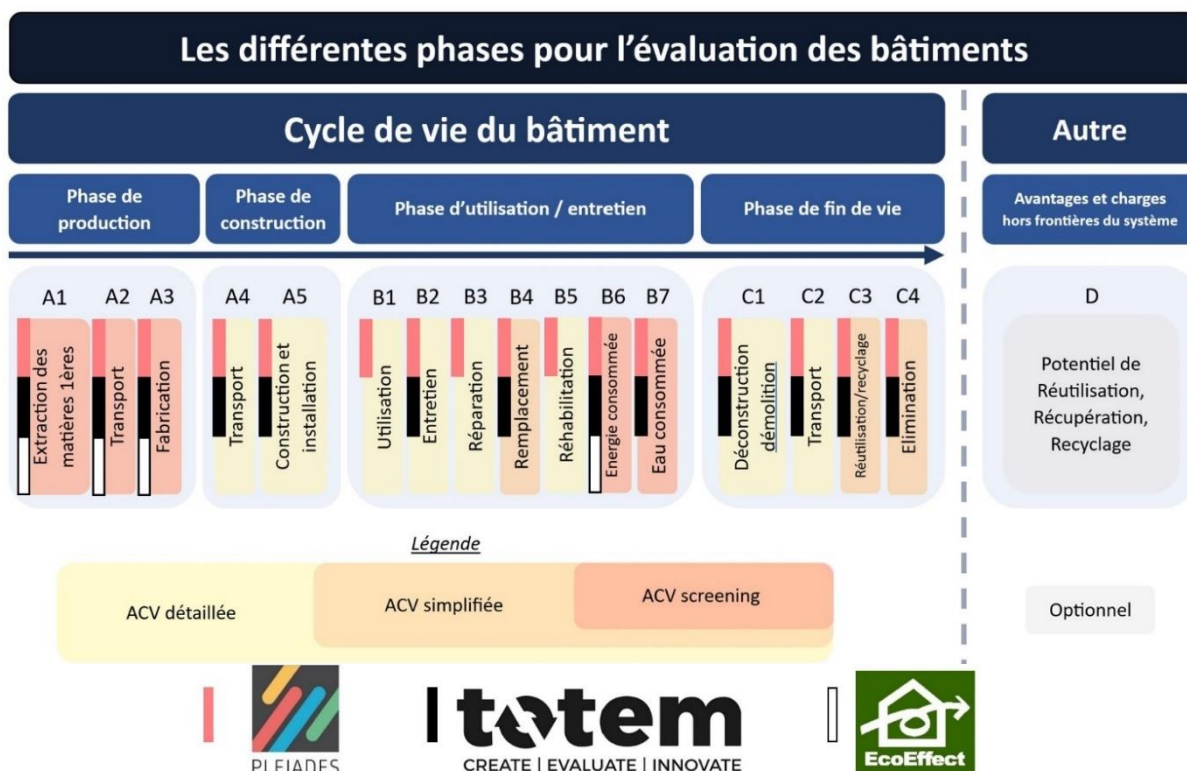


Figure 22 : Étapes du cycle de vie considérées par les trois outils selon les étapes obligatoires à prendre en compte dans la typologie « detailed – simplified – screening ». Ce schéma a été créé sur base de la [figure 10](#)

4.1.4 Discussion de l'analyse générale et fonctionnelle

De façon générale, dans cette analyse générale et fonctionnelle, on comprend bien en quoi TOTEM et EcoEffect ne sont pas des outils générateurs d'ACV complètes par comparaison avec l'outil Pleiades ACV. De plus, EcoEffect semble être l'outil d'ACV le plus simplifié. Plusieurs éléments justifient ces observations dans le [tableau 4](#) tels que les modes de calcul des consommations énergétiques (beaucoup moins complet dans TOTEM ou inexistant dans EcoEffect), l'ajout de matériaux par encodage personnel (impossible dans ces deux outils d'ACV simplifiées) ou encore le type de données requis (le nombre très faible de données d'entrée dans EcoEffect).

Cela se vérifie également dans la [figure 22](#), où le nombre d'étapes du cycle de vie exclues est supérieur pour les ACV simplifiées. D'ailleurs, les trois outils étudiés semblent correspondre à la typologie « detailed – simplified – screening ». Pleiades ACV prend en compte l'ensemble des étapes du cycle de vie (à l'exception de la partie D qui est optionnelle) et correspond donc à une ACV détaillée. TOTEM respecte l'ensemble des étapes de l'ACV simplifiée (l'étape B6 peut être contestée si l'on utilise la méthode simplifiée du calcul énergétique, excluant la phase d'utilisation). Enfin, EcoEffect comprend seulement les étapes de l'ACV screening, à l'exception de la consommation en eau qui est manquante.

Dans la [figure 21](#) qui présente les différents types de simplifications et d'objectifs de simplifications d'une ACV pour aider l'utilisateur, on constate que les trois outils étudiés utilisent tous les types et les objectifs de simplifications. En outre, le logiciel Pleiades ACV propose un grand nombre de simplifications visibles sur cette figure, presque autant que TOTEM et même plus que EcoEffect, l'outil d'ACV qui semblait le plus simplifié. En réalité, toutes les simplifications n'ont pas le même poids. Derrière certaines simplifications de l'ACV complète se cachent des éléments complexes. Par exemple, comme cela a déjà été mentionné, la simulation thermique et la modélisation de l'information sont bien des simplifications de collectes de données, mais en réalité, cela permet d'obtenir des informations beaucoup plus complètes et précises en phase de conception, lorsque la consommation réelle du bâtiment n'est pas encore connue. Un autre exemple est celui de la simplification des méthodes de calculs dans Pleiades ACV. Cet outil simplifie effectivement des méthodes de calcul telles que le calcul de surconsommation liée à la longueur des réseaux (en négligeant la longueur de distribution d'eau chaude sanitaire, si elle est inférieure à 8 m). Cependant cette simplification est négligeable comparée notamment à l'encodage par quantité de matériau et non par élément comme le fait EcoEffect. De plus, ce calcul n'est même pas considéré dans TOTEM et EcoEffect, tout comme la prise en compte des ponts thermiques, des masques solaires, des propriétés optiques des fenêtres, etc. Ainsi, le niveau de détail est largement supérieur dans Pleiades ACV, qui vise à produire des ACV détaillées, mais les trois outils utilisent des formes de simplification pour aider les utilisateurs.

Pour en revenir à EcoEffect, de nombreuses et importantes simplifications sont prises, déjà avec la méthode d'encodage très simplifiée, ou l'interface présentant très peu de valeurs d'entrées. On sent également une volonté de simplifier la présentation des résultats, notamment avec la comparaison de la performance du bâtiment étudié selon un bâtiment de référence. EcoEffect ne présente même plus ses impacts avec ses unités usuelles, mais seulement sous forme normalisée ou pondérée (en %).

Le [tableau 4](#) met en évidence les nombreuses caractéristiques qui différencient les trois outils d'ACV étudiés. Elles seront décrites et utilisées dans la section suivante pour expliquer les différences entre les résultats quantitatifs produits par ces trois outils.

Pour terminer avec l'analyse générale et fonctionnelle, il est nécessaire de discuter du type de résultats que ces outils sont capables de produire et, en particulier, des impacts environnementaux qu'il sera possible d'étudier dans l'analyse quantitative de la section suivante.

Pour rappel, dans l'étude d'ACV complète, neuf indicateurs environnementaux de Pleiades ACV ont été sélectionnés car ils étaient communs à TOTEM (Malmedy, 2020, p.13). Cependant, on peut constater que dans le [tableau 4](#), une partie de ces indicateurs environnementaux qui sont définis de la même façon sont exprimés dans des unités différentes entre les trois outils d'ACV étudiés ; cela les rend incomparables.

La conversion directe des unités avec un simple facteur de conversion est irréalisable dans ce cas. Pour le comprendre, il faut revenir au principe du calcul des indicateurs environnementaux. En effet, ce calcul dépend d'un ensemble de facteurs de caractérisation spécifique à chaque unité existante. Ces facteurs de caractérisation sont propres à chaque substance qui contribue à un indicateur environnemental donné et déterminent le poids relatif de ces substances dans l'unité équivalente calculée.

Exemple : Pour calculer l'indicateur d'acidification, il faut multiplier les substances de NH_3 , NO_x et SO_2 par trois facteurs de caractérisation respectifs. On obtient ainsi des valeurs équivalentes en [kg SO_2 eq.] additionnables. Cependant, ces facteurs diffèrent si on veut l'exprimer en [mol H^+ eq.].

Malheureusement, en plus de la complexité de cette opération, les outils simplifiés ne fournissent pas la répartition détaillée des substances produites, rendant cette conversion impossible. Toutefois, vu le nombre réduit d'impacts environnementaux comparables, on peut tenter de convertir ces indicateurs (c'est-à-dire l'acidification, l'eutrophisation des eaux douces et la production d'ozone) avec des estimations personnelles qui semblaient suffisamment raisonnables pour tenter de résoudre en partie ce problème d'harmonisation (bien qu'elles ne soient pas reconnues en soi). Ces conversions sont uniquement réalisées dans TOTEM, car les méthodes de calcul d'impact sont données (voir [annexes](#)).

La méthode de calcul de l'acidification renseignée dans la documentation de TOTEM (Lam & Trigaux, 2021, p.34) est « Accumulated Exceedance ». Nous souhaitons passer de l'unité utilisée dans TOTEM [mol H⁺ eq.] à celle utilisée dans Pleiades ACV [kg SO₂ eq.]. Sur le site de la Commission européenne (Commission européenne, s. d.), on peut trouver le facteur de caractérisation de cette méthode pour « Sulfur dioxide (Mass, kg, Emissions) ». En Belgique, il vaut 1,58. Ainsi, la masse de substances SO₂ émises par un produit est normalement multipliée par 1,58 pour obtenir un équivalent en [mol H⁺ eq.]. Dès lors, on peut diviser l'impact environnemental de l'acidification calculé dans TOTEM en [mol H⁺ eq.] par **1,58** pour tenter de récupérer sa valeur en [kg SO₂ eq.].

Le même raisonnement est appliqué à l'eutrophisation des eaux douces. La méthode utilisée est « EUTREND model » de 2009 et le facteur de caractérisation « Phosphate (Mass, kg, Emissions to fresh water) » utilisé vaut 0,33 (Commission européenne, s. d.). On divisera donc le résultat de TOTEM par **0,33** pour passer des [kg P eq.] aux [kg PO₄³⁻ eq.], comme exprimé dans Pleiades ACV.

Enfin, pour la production d'ozone, c'est la méthode « LOTOS-EUROS » de 2008 qui est utilisée, avec le facteur pour « Ethylene (Mass, kg, Emissions) » qui vaut 1,69 (Commission européenne, s. d.). On divisera donc le résultat de TOTEM [kg NMVOC eq.] par **1,69** pour passer en [kg C₂H₄ eq.], comme exprimé dans Pleiades ACV.

Ainsi, comme deux indicateurs sur les neuf sont définis différemment dans les trois outils (dommage à la biodiversité et à la santé), ils sont incomparables et ne peuvent pas être étudiés quantitativement. Six indicateurs sur les neuf sont comparés directement aux résultats de l'ACV complète car ils sont exprimés dans la même unité (quatre pour TOTEM et trois pour EcoEffect) :

- Les émissions de gaz à effet de serre [t CO₂ eq.] (**TOTEM** et **EcoEffect**) ;
- L'acidification [kg SO₂ eq.] (**EcoEffect**) ;
- L'utilisation de l'énergie primaire [GJ] (**TOTEM**) ;
- L'eau utilisée [m³] (**TOTEM**) ;
- L'épuisement des ressources abiotiques [kg Sb eq.] (**TOTEM**) ;
- La formation d'ozone [kg C₂H₄] (**EcoEffect**).

Avec l'approximation décrite ci-dessus, il est possible de comparer les sept indicateurs dans TOTEM. Toutefois, même si la conversion semble raisonnable, les valeurs estimées ne sont pas calculées de façon parfaitement rigoureuse ; il faut rester prudent par rapport à ces résultats supplémentaires :

- L'acidification « [kg SO₂ eq.] » (**TOTEM**) ;
- L'eutrophisation des eaux douces « [kg PO₄³⁻ eq.] » (**TOTEM**) ;
- La production d'ozone « [kg C₂H₄ eq.] » (**TOTEM**).

4.2 Analyse quantitative des résultats

4.2.1 Résultats pour le scénario du projet « fini »

Pour le scénario « fini », le projet est décrit tel qu'il existe aujourd'hui et la durée de vie de la Résidence Arola est fixée à 60 ans. On analyse donc sept indicateurs sur les neuf étudiés dans l'analyse complète, comme présentés dans le [tableau 5](#). En rouge, on peut retrouver les résultats dont la conversion d'unités a été estimée. L'ensemble des calculs intermédiaires réalisés (c'est-à-dire l'adaptation des résultats de Pleiades ACV à une durée de vie 60 ans par phase du cycle de vie et l'ensemble des conversions d'unités pour les résultats des trois outils) est disponible [en annexe](#).




	 Pleiades ACV	 TOTEM (2023)	 EcoEffect (2008)
Effet de serre [t CO ₂ eq.]	1 039, 36	656, 92	786,78
Acidification [kg SO ₂ eq.]	4 203, 87	920,39	4 422,40
Energie primaire [GJ]	34 655, 81	9 583, 95	/
Eau utilisée [m ³]	79 119, 25	97 369, 58	/
Épuisement des ressources abiotiques [kg Sb eq.]	10 573, 56	1,14	/
Production d'ozone [kg C ₂ H ₄]	249, 89	446,58	10,57
Eutrophisation des eaux douces [kg PO ₄ ³⁻ eq.]	2067,50	21,07	/

Tableau 5 : Résultats pour le premier scénario du projet « fini », pour les trois outils étudiés
En rouge, les résultats dont les méthodes de conversion ont été estimées

Pour commencer avec l'outil TOTEM dans le [tableau 6](#), on ne constate qu'aucun de ses sept impacts ne possède une différence inférieure à 10% par rapport aux résultats de Pleiades ACV. Aucun résultat n'est donc « très précis », comme défini dans la grille d'analyse quantitative des résultats. L'effet de serre calculé par TOTEM est peu précis et la quantité d'eau utilisée est précise pour cet outil simplifié. Les autres résultats sont « non fiables » car ils possèdent une différence supérieure à 50% en valeur absolue par rapport à la référence. Parmi eux, il y a les trois indicateurs dont la conversion a été estimée (l'acidification, la production d'ozone et l'eutrophisation des eaux douces), prouvant les limites de l'approche. Enfin pour l'épuisement des ressources abiotiques, dans TOTEM, seule l'épuisement des ressources abiotiques (minéraux et métaux) est exprimé en [kg Sb eq.] et pas l'épuisement des ressources (combustibles fossiles) en [MJ], ce qui justifie cette forte sous-estimation.



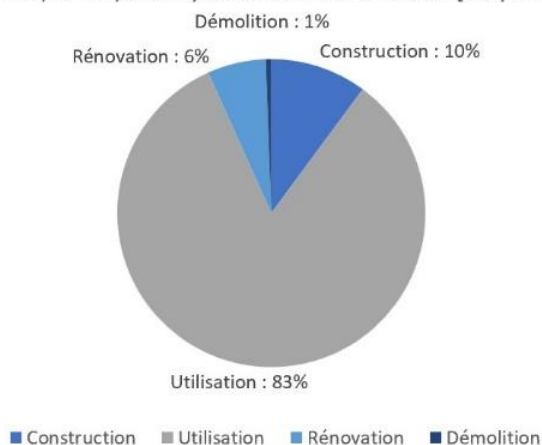
	 Pleiades ACV	 TOTEM CREATE EVALUATE INNOVATE	Différence	Fiabilité Précision
Effet de serre [t CO ₂ eq.]	1 039, 36	656, 92	-37%	Fiable Peu précis
Acidification [kg SO ₂ eq.]	4 203, 87	920,39	-78%	Non fiable
Energie primaire [GJ]	34 655, 81	9 583, 95	-72%	Non fiable
Eau utilisée [m ³]	79 119, 25	97 369, 58	+23%	Fiable Précis
Epuisement des ressources abiotiques [kg Sb eq.]	10 573, 56	1,14	-99%	Non fiable
Production d'ozone [kg C ₂ H ₄]	249, 89	710,84	>100%	Non fiable
Eutrophisation des eaux douces [kg PO ₄ ³⁻ eq.]	2067,50	21,07	-99%	Non fiable

Tableau 6 : Résultats pour le premier scénario du projet « fini », analyse de TOTEM

On peut directement établir un lien entre la minimisation des impacts d'énergie primaire ainsi que l'effet de serre dans TOTEM et le fait que dans sa méthode simplifiée du calcul de consommation d'énergie, l'électricité en phase d'utilisation ne soit pas considérée. Lorsqu'on observe la proportion de l'impact environnemental par phase ([figure 23](#)), on constate que la phase d'utilisation est effectivement largement minimisée dans TOTEM comparé à Pleiades ACV. Il est important de rappeler que dans ce cas, chaque indicateur environnemental a le même poids, ces résultats sont non pondérés mais comparables (la version pondérée de ces graphiques est disponible [en annexe](#), tout comme le détail du calcul de la moyenne).

Impact par étape du cycle de vie PLEIADES ACV [moyennes]



Impact par étape du cycle de vie TOTEM [moyenne]

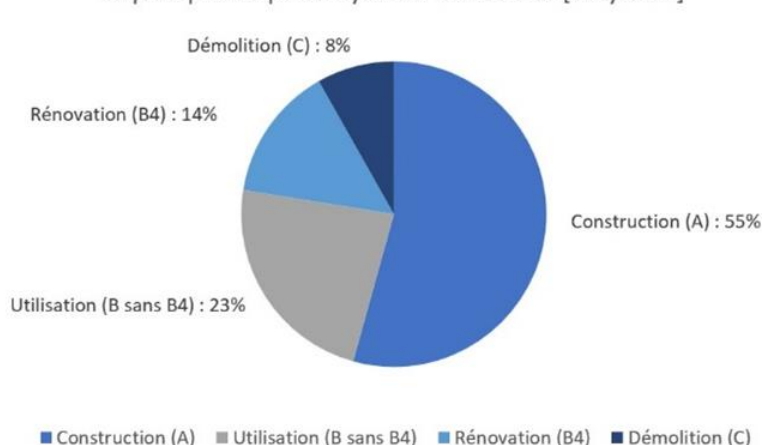


Figure 23 : Proportion de l'impact par étape du cycle de vie pour le scénario « fini » du projet

Un second scénario a donc été réalisé pour tenter de tenir compte de cette consommation d'énergie supplémentaire dans TOTEM. Les résultats de ce scénario sont disponibles dans le tableau suivant :



	 Pleiades ACV	 TOTEM	Différence	Fiabilité Précision
Effet de serre [t CO₂ eq.]	1 039, 36	959,79	-8%	Fiable Très précis
Acidification [kg SO₂ eq.]	4 203, 87	1280,55	-70%	Non fiable
Energie primaire [GJ]	34 655, 81	20233,90	-42%	Fiable Peu précis
Eau utilisée [m³]	79 119, 25	171 345,17	>100%	Non fiable
Epuisement des ressources abiotiques [kg Sb eq.]	10 573, 56	1,64	-99%	Non fiable
Production d'ozone [kg C₂H₄]	249, 89	972,72	>100%	Non fiable
Eutrophisation des eaux douces [kg PO₄³⁻ eq.]	2067,50	36,40	-98%	Non fiable

Tableau 7 : Résultats pour le scénario avec encodage PEB de la consommation d'énergie, analyse de TOTEM

Dans ce second scénario, on voit que les résultats de l'effet de serre et de l'énergie primaire ont pu être améliorés en encodant directement la consommation énergétique dans l'encodage PEB proposé par TOTEM. Ils sont désormais fiables : respectivement très précis et peu précis. Cependant, on constate que l'indicateur environnemental de l'eau utilisée est désormais non fiable. Tous les autres indicateurs sont toujours non fiables.

Pour l'eau utilisée, en se renseignant sur la méthode de calcul « AWARE – Available Water Remaining, 2016 » annoncée dans la documentation TOTEM (Lam & Trigaux, 2021, p.34), on constate que celle-ci se base sur l'évaluation du potentiel de privation d'eau pour d'autres êtres humains ou écosystèmes dans une zone donnée, cette privation étant la conséquence de la consommation d'eau dans cette zone (Boulay et al., 2018). Ce n'est donc pas simplement une approche additive d'eau consommée ; elle dépend de plusieurs facteurs tels que la demande et la disponibilité de l'eau selon la zone considérée. Dans la documentation en ligne de Pleiades ACV (IZUBA énergies, s. d.), la définition est moins élaborée, elle correspond simplement à la consommation totale d'eau sur l'ensemble du cycle de vie de l'ouvrage et est mesurée en m³ d'eau puisée. Cela peut justifier une minimisation de l'impact par Pleiades ACV dans une certaine mesure, mais pas d'un ordre de grandeur aussi important. Ce second scénario a permis de trouver une différence supplémentaire entre les définitions des indicateurs environnementaux calculés dans Pleiades ACV et TOTEM.

En ce qui concerne l'outil EcoEffect, qui est un outil d'ACV très simplifié de type screening, on peut voir dans le [tableau 8](#) que les résultats sont très variables, avec un résultat totalement erroné (-95%) et un résultat très précis. L'acidification est l'indicateur le plus précis de tous ceux étudiés (même en considérant les résultats de TOTEM), avec une différence de 4%. L'effet de serre est dans ce cas considéré comme précis et il est plus proche de la valeur de l'ACV détaillée que le résultat produit par TOTEM. Enfin, la production d'ozone calculée par EcoEffect est non fiable.



	 Pleiades ACV	 EcoEffect	Différence	Précision
Effet de serre [t CO ₂ eq.]	1 039, 36	774,14	-25%	Fiable Précis
Acidification [kg SO ₂ eq.]	4 203, 87	4 422,40	+4%	Fiable Très précis
Production ozone [kg C ₂ H ₄ eq.]	249, 89	10,53	-95%	Non fiable

Tableau 8 : Résultats pour le scénario du projet « fini », analyse d'EcoEffect

La production d'ozone est sensible aux matériaux tels que les peintures et revêtements, les colles ou encore les produits d'étanchéité. Comme une partie de ces éléments n'était pas dans la liste des quantités du rapport d'ACV complet, cela peut expliquer partiellement la minimisation de son impact. De même, les équipements pour le chauffage émettent des NOx qui contribuent à la production d'ozone. EcoEffect ne prend en compte que les matériaux des éléments modélisés, l'impact des chaudières n'est donc pas pris en compte. De façon générale, la simplification importante de l'encodage et des éléments pris en compte minimise l'importance de cet impact. La différence reste toutefois trop importante pour le justifier, elle doit également être liée aux méthodes de calcul employées, mais ces dernières ne sont pas fournies comme dans TOTEM.

Un dernier résultat est donné dans EcoEffect à la [figure 24](#), il correspond à une comparaison de l'impact énergétique et de l'impact des matériaux par rapport ceux d'un bâtiment de référence « Bostadsreferens » (logement de référence en suédois). On constate que l'impact de l'énergie est dit « bien meilleur » pour la Résidence Arola, mais pour l'impact des matériaux, notre cas d'étude est bien pire que la référence pré-encodée dans EcoEffect.

Peu d'informations sont données par rapport à cette référence dans l'interface utilisateur. En cherchant dans la base de données intégrée, on constate que le bâtiment se situe à Stockholm, ce qui pourrait expliquer la différence pour l'énergie, vu le climat froid de la Suède. De plus il possède des matériaux en maçonnerie, mais également une grande quantité de bois. On peut donc supposer que le bâtiment de référence est en ossature bois et cela explique le meilleur impact environnemental. Les

informations sur ce bâtiment restent toutefois très faibles pour l'affirmer avec certitude. Ce résultat a peu d'intérêt dans notre cas vu la spécificité de la référence utilisée. Comme cette référence est peu documentée, elle pourrait induire les utilisateurs en erreur.

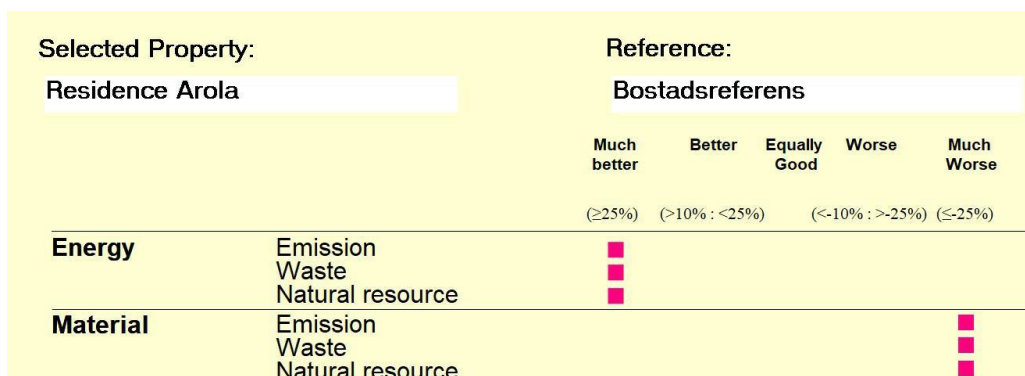


Figure 24 : Résultat supplémentaire de EcoEffect

4.2.2 Discussion de l'analyse quantitative

L'analyse quantitative des résultats numériques des ACV simplifiées révèle plusieurs défis complexes liés aux caractéristiques mêmes des outils d'ACV. Tout d'abord, le fait que certaines phases du cycle de vie ne soient pas prises en compte a un effet très important sur la différence constatée (notamment avec le calcul énergétique qui influe sur l'effet de serre et sur l'énergie dans TOTEM). Ensuite, outre les nombreuses disparités d'unités entre une partie des indicateurs d'impacts environnementaux, d'autres difficultés se manifestent. En effet, même lorsque les unités sont identiques, on obtient un grand nombre de résultats qui sont « peu précis » ou « non fiables ». Des recherches plus approfondies ont été réalisées sur les résultats « non fiables » et ont révélées que les méthodes de calcul pouvaient différer, même pour des unités équivalentes, ce qui complique davantage la comparaison et génère des sources d'erreurs supplémentaires. C'est le cas par exemple de l'épuisement des ressources abiotiques et de l'eau utilisée. Un utilisateur non expert a de bonnes raisons de croire que lorsqu'un indicateur porte le même nom et possède la même unité, les résultats pourraient être comparables.

De façon générale, tout cela met en évidence un manque d'harmonisation important dans les outils d'ACV ; il faut donc être extrêmement prudent lorsque l'on compare les résultats quantitatifs d'ACV différentes, et d'autant plus s'il s'agit d'ACV simplifiées.

Il est également surprenant de constater que la comparaison d'un même cas d'étude, avec trois outils d'ACV différents, s'est révélée anormalement longue et fastidieuse. Cela s'explique en raison des étapes supplémentaires de recherches sur les définitions et les méthodes de calcul des indicateurs environnementaux, ainsi que toutes les étapes de conversion et d'uniformisation des résultats (qui engendrent également des sources d'erreurs supplémentaires).

Des méthodes de conversion ont été testées pour les indicateurs environnementaux qui sont définis de la même façon dans TOTEM et Pleiades ACV, mais qui possèdent des unités différentes. Celles-ci se sont avérées non concluantes. Pourtant, elles semblaient relativement raisonnables puisqu'elles se basaient sur les facteurs de caractérisation issus des méthodes de calcul renseignées par TOTEM. Cette estimation ne permet toutefois pas d'obtenir des résultats significatifs dans les unités utilisées par Pleiades ACV. Il est donc nécessaire de revenir directement aux quantités des substances produites, mais ces dernières ne sont pas fournies par TOTEM.

Établir un lien précis et immédiat entre les différences calculées et des causes directement associées n'est pas toujours simple. Les variables à prendre en compte sont nombreuses et leur importance varie énormément. Ainsi, il est pertinent de présenter les principales causes de ces différences afin de mieux cerner les enjeux associés. Une partie de ces causes est notamment reprise du [tableau 4](#) de l'analyse fonctionnelle.

Principales causes des différences analysées

L'analyse des résultats quantitatifs pour le scénario « fini », avec l'approche simplifiée pour le calcul des consommations d'énergie, révèle de l'ACV détaillée et des ACV simplifiées des disparités significatives entre les résultats. En examinant les données indépendamment de leur contexte, on pourrait supposer que le fait que les impacts environnementaux soient généralement inférieurs aux résultats de l'ACV complète est dus à l'usage d'ACV simplifiées. En effet, celles-ci considèrent moins d'éléments et moins de détails ; cela pourrait minimiser les impacts, comme le soulignait la première conclusion de la section [« 2.2.3.6 Validité des résultats selon quatre études »](#). Cependant, cette hypothèse n'est pas entièrement vraie, car les méthodes de simplification peuvent également émettre des hypothèses qui surestiment les impacts (par exemple, en utilisant des valeurs par défaut ou des valeurs globales du projet). De plus, de nombreuses autres variables entrent en jeu et doivent être prises en compte.

Dans TOTEM, la source principale des différences est due au fait que la phase B6 (énergie consommée en phase d'utilisation) n'est pas entièrement considérée dans la méthode de calcul simplifiée qui est proposée. En effet, ne considérer que le chauffage et les pertes par ventilations sous-estime fortement les consommations (d'autant plus pour un bâtiment bien isolé, où l'éclairage et l'électricité des auxiliaires ont un impact relatif plus important). Pour rappel, c'est presque toujours la phase d'utilisation qui a l'impact le plus important dans l'ACV des bâtiments, d'où les différences constatées. Cela minimise notamment l'impact de l'énergie primaire et de l'effet de serre de façon importante.

EcoEffect semble d'ailleurs meilleur à ce niveau, puisqu'il se base sur l'encodage des valeurs de consommations calculées dans Pleiades ACV. La légère sous-estimation de l'effet de serre est certainement due à la différence du mix énergétique suédois, dépendant largement des énergies renouvelables à travers l'hydroélectricité.

Le second scénario tente de prendre en compte la consommation d'énergie manquante avec l'approche basée sur les résultats PEB (suivant le même principe d'encodage que dans EcoEffect). Bien que l'effet de serre et l'énergie primaire soient améliorés (et pas encore surpassés), on ne peut pas affirmer avec certitude que cette estimation soit fiable. En effet, le seul autre indicateur qui était fiable (eau utilisée) a été rendu non fiable et la sensibilité des autres indicateurs n'a pas pu être vérifiée (puisque'ils sont tous restés non fiables). Ainsi, cette estimation ne semble à première vue pas si déraisonnable pour pallier cette différence, mais il faudrait qu'elle soit vraiment intégrée à l'outil pour assurer sa validité.

Une autre cause qui explique les différences de résultats réside dans les variabilités des contextes des trois outils d'ACV étudiés (français pour Pleiades ACV, belge pour TOTEM et européen pour EcoEffect). Cela a pour conséquence d'utiliser certaines valeurs (en lien avec les matériaux et le contexte du cas d'étude) plus précises pour TOTEM que pour les autres outils (même si des adaptations sont faites dans Pleiades ACV pour s'approcher du contexte belge, notamment pour le mix énergétique, les consommations moyennes d'eau en Wallonie, etc.). Il en va de même pour les bases de données utilisées par les trois outils d'ACV étudiés. Ecoinvent est la base de données utilisée par Pleiades ACV et TOTEM, mais la version utilisée dans Pleiades ACV est plus ancienne et contextualisée en Belgique. Quant à TOTEM, elle est contextualisée en Belgique. Pleiades utilise la version 2.2 datant de 2012 et TOTEM, la version 3.6 de 2019, complétée de 65 DEP. Il serait nécessaire d'analyser les mises à jour spécifiques pour comprendre en quoi elles consistent. Quant à EcoEffect, sa base de données de matériaux date d'avant 2008 et est très incomplète (seulement 52 éléments sont proposés). Cela introduit une incertitude supplémentaire.

En outre, plusieurs hypothèses ont été prises dans Pleiades ACV, qui diffèrent des valeurs par défaut des deux autres outils, notamment pour les durées de vie des éléments. Charline Malmedy a fixé des valeurs différentes de celles utilisées dans les autres outils. Par exemple, les revêtements intérieurs et extérieurs ont une durée de vie de 10 ans dans Pleiades ACV (40 ans pour les revêtements extérieurs dans TOTEM), les portes intérieures ont une durée de vie de 30 ans dans Pleiades ACV (60 ans dans TOTEM), ou encore les équipements ont une durée de vie de 20 ans (60 ans dans TOTEM). Les différentes durées de vie renseignées dans le rapport Pleiades ACV sont comparées avec celles de TOTEM dans le [tableau 9](#). Cette divergence notable pour certains éléments contribue également aux

différences observées. On constate que les durées de vie fixées dans Pleiades ACV sont, dans la plupart des cas, sous-estimées comparées à celles de TOTEM. Pourtant, on constate dans la [figure 23](#) que l'impact de la rénovation pour Pleiades ACV (6%) est inférieur à celui calculé dans TOTEM (14%). Cela s'explique par le fait que les proportions sont biaisées par l'impact de l'utilisation, comme expliqué plus tôt. Ainsi, quand on compare l'impact relatif sans considérer l'utilisation (poids relatif avec la démolition et la construction), la rénovation correspond à 35% dans Pleiades ACV, ce qui est bien supérieur à 18% dans TOTEM.



	 Pleiades ACV, <u>cas d'étude</u>	 TOTEM
Éléments de structure	50 ans	60 ans
Revêtements intérieurs (peintures)	10 ans	10 ans
Revêtements extérieurs	10 ans	40 ans
Portes et fenêtres extérieures	30 ans	30 ans
Portes intérieures	30 ans	60 ans
Durée de vie des équipements	20 ans	60 ans

Tableau 9 : Comparaison des durées de vie des éléments fixées dans le cas d'étude sur Pleiades ACV et sur TOTEM

4.3 Analyse qualitative des résultats

4.3.1 Résultats pour le scénario à une phase intermédiaire de conception

Le [tableau 10](#) ci-dessous présente les résultats agrégés en Milli point pour le scénario du projet « fini » tel qu'il existe aujourd'hui et pour le scénario du projet à une phase intermédiaire de conception, où le mode de simplification par macro-éléments a été utilisé.

TOTEM	Scénario du projet « fini »	Scénario du projet à une phase intermédiaire de conception
Score unique [mPt]	21 999	34 489

Tableau 10 : Résultats pour le scénario du projet à une phase intermédiaire de conception, analyse sur TOTEM

On constate que l'impact environnemental évalué à une phase intermédiaire de conception à l'aide de macro-éléments est significativement plus élevé que l'évaluation du scénario sur le projet « fini ».

En effet, on a un résultat de 34 489 mPt pour ce nouveau scénario, ce qui représente une augmentation de plus de 50%. Le résultat quantitatif pour ce scénario à une phase intermédiaire de conception est donc totalement erroné et non fiable. En phase d'esquisse, il n'est pas possible de prendre en compte les valeurs quantitatives d'une ACV simplifiée sur base des macro-éléments. Toutefois, il est nécessaire de prendre du recul par rapport aux résultats quantitatifs d'une ACV simplifiée en réalisant une analyse plus qualitative de ceux-ci. Commençons par comprendre cette différence quantitative.

On aurait pu s'attendre à ce que l'impact environnemental total soit inférieur à celui du scénario « fini », puisque tous les choix ne sont pas fixés et l'ensemble des éléments ne sont tout simplement pas encore connus. Ce n'est pas le cas. Il faut rappeler la définition de ce scénario et la philosophie de modélisation qui l'a accompagné. En effet, le bâtiment est en bonne voie pour aboutir à sa forme actuelle. Ainsi, les choix et hypothèses de la modélisation visent à s'approcher au plus de la proposition finale. C'est pourquoi, par exemple, les installations techniques ont été intégrées à cette modélisation dans le but de se focaliser sur les différences provoquées par les choix de simplification.

C'est l'usage des macro-composants qui justifie cette différence. En effet, ils sont beaucoup plus précis que les hypothèses de modélisation de l'étude d'ACV complète sur Pleiades ACV et par extension, celles utilisées dans TOTEM pour le scénario « fini ». La prise en compte d'éléments précis (tels que des chevilles d'isolant pré-encodées dans une couche) surévalue les impacts environnementaux en comparaison avec le scénario « fini ».

Comme le scénario à une phase intermédiaire de conception se concentre principalement sur l'usage de macro-éléments, il est intéressant d'analyser les impacts par catégories d'éléments. La [figure 25](#) montre une comparaison de ceux-ci entre les deux scénarios étudiés.

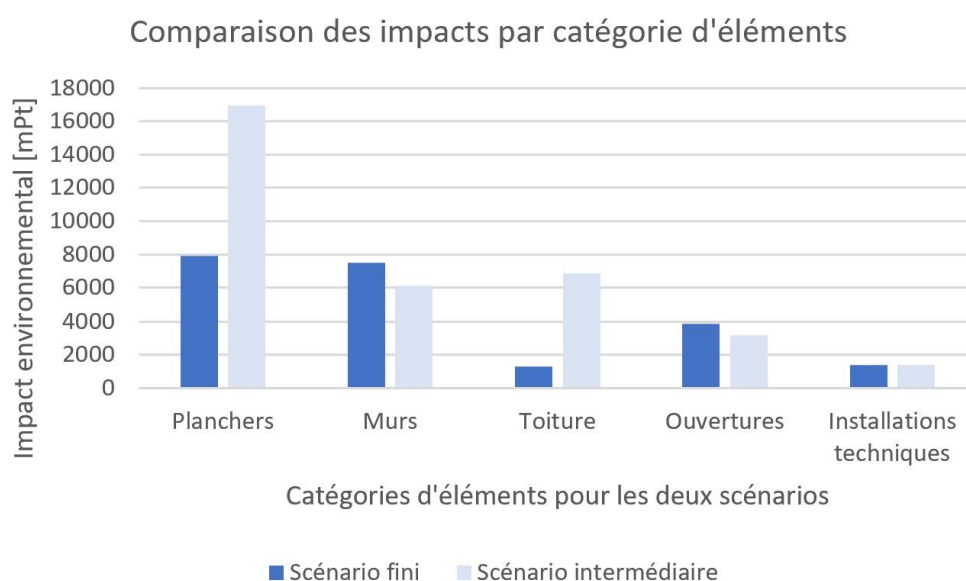


Figure 25 : Comparaison des impacts par catégorie d'éléments entre les deux scénarios étudiés

On peut voir que ce sont les planchers et la toiture qui génèrent les plus grandes différences d'impact entre les deux scénarios étudiés. Quant aux murs et aux ouvertures, on constate que c'est le scénario « fini » qui surpasse légèrement les impacts du scénario intermédiaire.

La **figure 25** permet de mettre en évidence les principales sources de cette divergence selon le macro-composant considéré. Par exemple, l'impact du plancher du scénario intermédiaire est beaucoup plus élevé car il prend en compte le processus d'excavation, de nivellement, le remblai, etc. (en effet, ces processus sont définis comme des couches supplémentaires pré-encodées dans le macro-élément). De même, pour la toiture, les chevrons ne sont pas considérés dans la modélisation de l'ACV complète, d'où l'importante différence. Cependant, les murs et les ouvertures présentent un impact moins élevé dans ce scénario. Cela s'explique par le fait que les cloisons intérieures et les portes intérieures ne sont pas prises en compte dans le scénario intermédiaire alors qu'elles valent respectivement 2000 mPt et 680 mPt dans le scénario initial. Il est important de noter que ces différences ne sont pas des erreurs en soi, mais plutôt des hypothèses et choix de simplifications propres à la personne qui réalise l'ACV. Il est donc toujours important de comparer les résultats d'ACV basées sur les mêmes hypothèses de simplification et les mêmes méthodes de calcul.

Ces observations montrent qu'il n'est pas aisé de résoudre le paradoxe de l'écoconception. Il est nécessaire de poser des simplifications fortes dans les ACV pour pallier le manque d'informations. L'impact de ces méthodes de simplification dépend fortement de l'outil utilisé (dans ce cas spécifique, l'impact est surévalué car TOTEM propose des macros composantes très précis).

4.3.2 Analyse qualitative du point de vue utilisateur

Cette analyse, plus subjective, permet de faire un lien entre les caractéristiques des outils d'ACV simplifiés et l'impact qu'elles peuvent avoir sur les utilisateurs, à commencer par la simplicité d'encodage par macro-éléments qui a été testée dans le dernier scénario analysé.

Retour sur le scénario à une phase intermédiaire de conception

Tout d'abord, l'encodage à l'aide d'éléments pré-encodés trouve un certain intérêt dans la rapidité de la modélisation. En effet, les couches et leurs caractéristiques ne doivent pas être ajoutées par une logique additive, l'approche d'encodage est différente. Après avoir choisi le macro-élément le plus satisfaisant, il s'agit uniquement de corriger ou d'adapter les couches au besoin. En ce qui concerne le scénario à une phase intermédiaire de conception, il y avait effectivement beaucoup de choix parmi les macro-éléments proposés (86 planchers, 144 murs et 82 toitures), mais avec contraintes fixées par les objectifs, il restait seulement un à deux éléments adéquats. Sinon, l'élément le plus proche a été choisi et modifié.

De plus, cela permet de prendre en compte l'ensemble des couches et d'éviter d'oublier certains éléments importants (qu'on pourrait omettre dans la logique additive, sans macro-élément).

Dans une logique de recherche itérative, les macro-éléments proposés permettent de donner plusieurs alternatives à tester auxquelles on n'aurait pas forcément pensé. Ils permettent de comparer facilement différents choix pour trouver le meilleur compromis en phase d'avant-projet. Cela peut être très utile pour connaître l'impact relatif de plusieurs technologies pour des utilisateurs non experts. De plus, le choix ne se limite pas à ceux proposés dans l'outil puisqu'il est toujours possible de modifier les couches d'un macro-élément individuellement dans TOTEM (ou de créer un nouveau macro-élément sur base de ceux proposés).

Autres scénarios possibles à une phase intermédiaire de conception

Pour le scénario à une phase intermédiaire présenté précédemment, des hypothèses spécifiques ont été choisies pour choisir des macro-éléments qui correspondent le plus possible au cas réel étudié. Cependant, on peut questionner ces hypothèses par rapport à ce qui est connu à une phase d'esquisse, comme défini dans l'état de l'art.

Par exemple, concernant le choix du macro-élément de toiture, on ne sait pas encore si on a affaire à une toiture plate ou à une toiture en pente en phase d'esquisse et pourtant, les macro-éléments nous incitent à effectuer un choix entre des macro-éléments de toiture en pente ou de toiture plate. De plus, la performance peut être connue mais pas forcément le type d'isolant. Comme cela a été annoncé précédemment, TOTEM permet de faire des itérations facilement. Par exemple, voici les résultats pour les quatre macro-éléments qui ont été définis dans la section « **3.1.4.3 Grille d'analyse qualitative** » :

TOTEM	Scénarios du projet à une phase intermédiaire de conception		
	Scénario 1, cas initial : Toiture en pente n°1	Scénario 2 : Toiture en pente n°2	Scénario 3 : Toiture plate
Score unique [mPt]	34 489	34 575	29 738
Score de la toiture seule [mPt]	6 835	6920	2084

Tableau 11 : Résultats pour les trois scénarios du projet à une phase intermédiaire de conception, analyse sur TOTEM

La modélisation des deux scénarios supplémentaires a pris moins d'une demi-heure et permet d'avoir des résultats très éloquents. Dans ce cas, on constate qu'entre les scénarios 1 et 2 (toitures en pente, l'un avec de la laine de roche et l'autre avec de la laine de verre), la différence est infime (la toiture avec la laine de verre ayant un impact très légèrement supérieur à celle de la laine de roche). En ce qui concerne le scénario 3 de la toiture plate, il permet de réduire le score global d'un peu moins de 14%.

Pour rappel, le but de cette analyse qualitative n'est pas de trouver la toiture dont l'impact environnemental est le moins important ; c'est pourquoi l'analyse des scénarios de toiture s'arrête là. Ils sont simplement un prétexte pour tester l'approche par itération dans l'outil d'ACV simplifié.

On constate avec les résultats d'itération de ces nouveaux scénarios que pour un même outil et pour un même bâtiment, on retrouve de l'intérêt à utiliser les résultats quantitatifs, la comparabilité des résultats est rétablie. En effet, l'idée ici n'est pas de les comparer avec un résultat absolu correct, mais plutôt de faire des tests en interne pour choisir les stratégies dont l'impact environnemental est le « moins pire ».

En ce qui concerne les autres hypothèses de modélisation, comme on a pu le voir avec les scénarios de toiture, il est possible de modifier très rapidement et facilement la composition d'une paroi de macro-éléments (le type et pour certains matériaux de certains macro-éléments, l'épaisseur d'une de ses couches). De même pour les ouvertures, à une phase d'esquisse, seule la proportion de percements est connue mais pas le nombre d'éléments de châssis. Dans TOTEM, l'impact ne dépend pas du nombre de châssis, il ne dépend que de la surface totale au m². Enfin, l'hypothèse de considérer les systèmes d'installation de chauffage et de ventilation s'écarte d'une modélisation réelle à une phase d'esquisse puisqu'ils ne sont théoriquement pas encore connus à ce moment. Toutefois, si on regarde les éléments d'installation technique disponibles, il n'y a à l'heure actuelle pas beaucoup de choix (3 éléments de chauffage et 2 éléments d'unité de ventilation), l'utilisateur peut donc ne pas du tout les considérer, ou établir facilement un choix dans la liste et l'adapter selon l'évolution du projet.

EcoEffect à une phase intermédiaire de conception

EcoEffect ne propose pas de macro-éléments. Si un utilisateur souhaite tester plusieurs revêtements de façade, c'est évidemment possible, mais l'opération est beaucoup plus lourde. D'une part, il ne sera pas guidé par d'autres propositions de parois toutes prêtes du logiciel (rien ne met l'utilisateur sur d'autres voies, toutes les alternatives doivent venir de lui-même). D'autre part, il lui faudra soit modifier manuellement tous les encodages liés à l'ancien scénario, soit dupliquer le projet et refaire de nouvelles estimations. Cela prend du temps et limite fortement la capacité à réaliser des itérations. En effet, pour rappel, l'encodage dans EcoEffect est très différent de celui de Pleiades ACV et TOTEM. Il fonctionne par encodage direct des quantités de matériaux.

La modélisation pour le scénario du projet « fini » dans EcoEffect a été beaucoup plus rapide et facile que dans TOTEM car la plus grande partie de son encodage reprenait directement les quantités de matériaux données dans le rapport Pleiades ACV de l'étude de référence (Malmedy, 2020). Cependant,

dans un cas réaliste, ces données ne sont pas données. Le problème est qu'il est difficile (et pas toujours possible) pour un utilisateur, expert ou non, d'établir de bonnes estimations à une phase intermédiaire de conception ; les sources d'erreurs sont nombreuses, notamment pour les quantités à exprimer en masse. De plus, il y a une certaine distance entre le choix d'un élément/d'une technologie et les quantités des différents matériaux qui le constituent. Vu la quantité d'incertitudes cumulées et les difficultés d'une modélisation à un stade de modélisation liées aux contraintes d'encodage, il y a peu d'intérêt de modéliser un bâtiment complet sur EcoEffect à un stade intermédiaire de conception. En outre, le scénario spécifique utilisé dans TOTEM (où le bâtiment est en bonne voie pour aboutir à sa forme actuelle) ne permet pas de tester un encodage différent des matériaux. Ce sont les raisons pour lesquelles le scénario à une phase intermédiaire de conception n'a pas été modélisé avec EcoEffect.

Prise en main des outil d'ACV étudiés

On a pu voir que l'outil d'ACV complète Pleiades ACV possède un niveau de détail largement supérieur aux deux outils d'ACV simplifiés. Cela s'explique par la prise en compte de nombreux paramètres nécessitant un grand nombre d'étapes d'encodage. En effet, si la simulation thermique dynamique est réalisée, toutes les caractéristiques du bâtiment doivent être connues de façon très précise, augmentant la durée et la complexité de la modélisation. La difficulté est de récupérer toutes les données nécessaires en pleine phase de conception (ce que tentent de réduire TOTEM et EcoEffect).

Ainsi, dans l'outil d'ACV complète Pleiades ACV, **6 étapes** principales d'encodage ont été observées : la description des parois par défaut (en couches), l'encodage des menuiseries par défaut (le type, les dimensions, les propriétés optiques, la résistance thermique et l'orientation doivent être connus), la modélisation 3D (nécessitant l'ajout d'un fichier météo), l'ajout des ponts thermiques, la description des scénarios (l'occupation des zones, les consignes de température et de ventilation, les apports internes, etc.) et l'encodage de paramètres spécifiques pour l'ACV (durée de vie du bâtiment et autres hypothèses).

Dans l'outil simplifié TOTEM, **4-5 étapes** d'encodage ont été dénombrées : l'encodage des paramètres généraux (tels que la surface plancher utile SPU, le volume chauffé, le nombre d'étages et d'occupants, etc.), la modélisation 3D pour récupérer les quantités (cette étape étant optionnelle), la description des parois (en couches) et des menuiseries (uniquement le type) et enfin la consommation d'énergie (selon l'approche simplifiée ou l'encodage PEB).

Enfin, dans l'outil très simplifié EcoEffect, **3 étapes** ressortent : l'encodage des paramètres généraux (tels que la surface, le nombre d'étages, la durée de vie du bâtiment, le nombre d'appartements, l'occupation, etc.), l'encodage des quantités par matériau et l'énergie consommée (chauffage et électricité).

Comme cela a été mentionné plus tôt, le nombre d'étapes estimé permet de donner un nouvel ordre de grandeur de la durée et de la complexité de l'encodage dans les différents outils d'ACV, mais il faut rester critique avec cette valeur car toutes les étapes n'ont pas le même poids (l'encodage des menuiseries dans Pleiades ACV est beaucoup plus long que celui dans TOTEM et cette étape est elle-même plus longue qu'un encodage de paramètres généraux).

Pour guider les utilisateurs dans leur prise en main de l'outil TOTEM, de nombreux documents explicatifs et tutoriels en ligne sont disponibles en français, anglais et néerlandais. Ils sont régulièrement mis à jour (la dernière date de mai 2023 et concerne la nouvelle interface). Les trois vidéos de formation de prise en main datent d'avril 2022 et durent un peu plus d'une heure et demie. Les explications sont bien vulgarisées et peuvent s'adresser à tout acteur de la construction. L'interface est très intuitive et le site internet (TOTEM, s. d.) est très transparent (de nombreux documents sont disponibles en ressources, tels qu'une foire aux questions, des études sur l'outil et même des archives). Cela a permis une prise en main rapide de l'outil et un usage aisé de celui-ci. De même, une fonctionnalité qui permet de travailler à plusieurs sur un projet (avec système de notification des autres utilisateurs lors de modifications) est intégrée à l'outil. Cependant, elle n'a pas été testée dans le cadre de ce projet.

Pour terminer, en ce qui concerne EcoEffect, la prise en main de l'interface a été très aisée, en plus du fait du faible nombre d'entrées à encoder. Toutefois, aucun tutoriel, ni explication n'est disponible pour ses utilisateurs. Quelques articles scientifiques sont consultables en ligne pour décrire l'outil, mais ils n'expliquent jamais comment l'utiliser étape par étape. Il y a un réel manque de communication en général sur l'interface elle-même (par exemple, le fait de ne pas donner les impacts environnementaux dans leurs unités usuelles et de directement les « simplifier » sous leur forme normalisée et pondérée). De plus, il est très difficile d'obtenir des informations sur les facteurs de normalisation et de pondération. Ils sont trouvables dans le fichier de la base de données jointe à l'outil, mais celle-ci est peu conviviale et de nombreuses parties sont toujours en suédois. De même, peu d'informations sont données sur le logement de référence pour lesquels il est possible de comparer ses résultats (aucune description et même pas une image pour le visualiser). Cependant, cela concerne uniquement la version anglaise de 2008 qui a été utilisée.

5. Discussion

5.1 Analyse croisée : retour sur l'état de l'art et les résultats des trois analyses

L'état de l'art a tenté de répondre à la première question de recherche de ce mémoire qui questionnait ce qu'était une analyse en cycle de vie simplifiée utile pour l'écoconception de bâtiments, sa définition précise et ses caractéristiques. D'une part, il caractérise ce qu'est l'ACV simplifiée à travers différentes définitions et typologies existantes. Cela a permis la création d'une nouvelle typologie des simplifications de l'ACV, disponible à la [figure 13](#). D'autre part, il reconstitue l'évolution du processus de conception d'un projet en détaillant le type de données disponibles à différentes phases de développement du projet.

Cet état de l'art a permis d'enrichir la partie pratique de ce mémoire sur plusieurs aspects. De façon très concrète, trois éléments principaux ont été directement utilisés. Premièrement, cela a permis de comprendre en quoi Pleiades ACV était une ACV complète, TOTEM une ACV simplifiée et EcoEffect une ACV très simplifiée à partir de la nouvelle typologie des simplification créée ([figure 13](#)) ainsi que la typologie existante « detailed – simplified – screening » (Wittstock et al., 2012). Deuxièmement, les diverses études comparatives étudiées ont permis d'élaborer la grille d'évaluation quantitative des résultats selon une base fiable. Troisièmement, cela a aidé à cadrer et baliser le scénario à une phase intermédiaire de conception et les scénarios alternatifs. Ces scénarios ont permis d'étudier qualitativement un mode de simplification spécifique (l'usage de macro-éléments) ainsi que la facilité d'intégration des différents paramètres connus à une phase intermédiaire de conception. De façon plus générale, l'état de l'art a permis de me construire une bonne connaissance et un regard critique sur ACV simplifiées. Enfin, il m'a aidé pour la réalisation des modélisation et l'établissement des hypothèses mais également pour développer de ma capacité à interpréter des résultats.

Les trois analyses de la partie pratique ont, quant à elles, tenté de répondre aux deux autres questions de recherche concernant les performances qualitatives et quantitatives des méthodes simplifiées et des résultats d'ACV.

L'analyse des résultats du scénario « fini » met en évidence des défis complexes liés aux caractéristiques des outils d'ACV. Les disparités des unités et les différences de méthodes de calcul contribuent à des résultats peu précis, non fiables ou incomparables, en plus des différences dans les bases de données, les choix de simplification et autres spécificités. Cela souligne un manque d'harmonisation important entre les différents outils d'ACV.

Le premier scénario à une phase intermédiaire de conception était quant à lui plus qualitatif (en comparaison du scénario « fini », scientifiquement très cadré). Dans ce second scénario, la simplification par macro-éléments dans TOTEM et les hypothèses propres au concepteur entraînent des surestimations importantes dans les résultats ; cela les rend non fiables. Ces observations soulignent l'importance de toute la diversité des facteurs intervenant dans le calcul et les comparaisons approfondies à réaliser pour interpréter correctement les différences entre plusieurs outils d'ACV.

Toutefois, l'analyse qualitative a permis d'apporter un regard plus critique sur l'utilité des outils d'ACV simplifiés, au-delà des résultats numériques produits. L'importance du niveau de détail proposé dans Pleiades ACV peut être un frein réel à l'intégration de l'ACV des bâtiments en écoconception. La durée et la complexité de l'encodage ne permettent pas à tous les praticiens d'utiliser ce type d'outils. Bien qu'un résultat quantitatif d'une ACV simplifiée soit non fiable dans l'absolu, il permet tout de même de donner des grandes directions et stratégies afin de choisir de façon relative les technologies les « moins pires » au niveau environnemental. Ces résultats sont exclusivement utilisés en interne. Pour qu'ils soient publiés, il est nécessaire de choisir alors un autre type d'outil d'ACV. La plus grande force des outils d'ACV simplifiés est donc leur facilité de prise en main et d'utilisation, qui leur permet d'être employées plus en amont dans le processus de conception comparé aux ACV détaillées.

D'autres observations importantes ont été réalisées sur les outils spécifiques utilisés dans cette étude, telle que la facilité d'itération à travers TOTEM et EcoEffect, ou encore le biais énergétique dans TOTEM. Ces éléments sont discutés dans la partie suivante concernant les forces et faiblesses des ACV simplifiées.

5.2 Forces et faiblesses des ACV simplifiées pour le cas étudié

Le logiciel d'ACV simplifiée TOTEM présente une approche évolutive et très transparente grâce à plusieurs éléments. Notamment, ce logiciel laisse la possibilité aux professionnels d'ajouter des composants spécifiques manquants à la base de données intégrée via un formulaire de demande en ligne. Bien que cette démarche prenne du temps et limite le nombre d'éléments pouvant être utilisés par comparaison à l'encodage direct de n'importe quel matériau sur Pleiades ACV, elle démontre la volonté de mettre à jour régulièrement le logiciel ; cela renforce son aspect évolutif. Pour information, la dernière mise à jour effectuée date de mars 2023, revoyant le visuel de son interface, intégrant les installations techniques, étendant les bibliothèques, etc. De plus, la disponibilité en ligne et la gratuité de TOTEM contribuent à sa flexibilité et à sa transparence.

Pour ce cas précis, TOTEM avait l'avantage de proposer des déclarations environnementales de produits (DEP), ainsi que d'être un logiciel complètement contextualisé en Belgique, contrairement à Pleiades ACV (France) et EcoEffect (Europe). L'usage de macro-composants permet un encodage aisé dans les premières phases de conception. Cependant, il faut garder à l'esprit que ces éléments tiennent compte d'éléments précis. Ce sont des hypothèses de modélisation qu'il faut prendre en considération si une ACV complète venait à être réalisée a posteriori.

TOTEM permet également la réalisation d'ACV pour des bâtiments incomplets, ou simplement pour comparer des éléments seuls, ce qui prouve la flexibilité de son encodage et de ses évaluations. Dans le cas de notre étude, le bâtiment devait être entièrement modélisé tel qu'il existe aujourd'hui pour obtenir des résultats comparables à l'ACV complète. Cependant, dans d'autres études, TOTEM pourrait être utilisé pour explorer et tester différents scénarios faisant varier des choix de conception.

Toutefois, plusieurs faiblesses ont également été mises en évidence dans TOTEM. Tout d'abord, le fait que la durée de vie du bâtiment soit fixée à 60 ans, cela contraint la comparabilité de ses résultats avec d'autres outils d'ACV, nécessitant des conversions supplémentaires. De plus, il y a le fait que TOTEM ne considère pas les consommations d'électricité en phase d'utilisation dans sa méthode simplifiée de calcul des consommations d'énergie. En effet, il ne considère que le chauffage et les pertes par ventilation, ce qui sous-estime largement les impacts liés à l'énergie primaire et aux gaz à effet de serre par rapport à ceux calculés dans Pleiades ACV. L'analyse quantitative a permis de prouver que ce n'était pas une simplification raisonnable. L'intégration des résultats PEB permet toutefois de forcer l'outil à prendre en compte cette consommation et d'améliorer le problème pour les indicateurs environnementaux concernés, mais cette étude à elle seule ne permet pas de valider cette estimation.

En ce qui concerne EcoEffect, son interface très simplifiée ne nécessite que de très peu d'étapes d'encodage pour modéliser un bâtiment complet. Cependant, la simplicité de son interface a pour conséquence de masquer de nombreuses informations essentielles à l'utilisateur. Dans le cas de notre étude, cela concernait les valeurs de normalisation, les unités des impacts environnementaux, les résultats intermédiaires ou encore les données du bâtiment de référence. Celles-ci sont cachées dans une base de données peu conviviale. En effet, cette base de données n'a pas été conçue pour être utilisée par des utilisateurs, on devine qu'elle était destinée à n'être utilisée que par les développeurs qui l'ont créée et organisée (certaines cellules contiennent même du texte en Suédois). Cette volonté de tout cacher pour simplifier traduit un certain manque de communication et de transparence générale.

La version EcoEffect de 2008 utilisée dans cette étude présente également des limitations au niveau de sa base de données de matériaux. Elle semble incomplète avec seulement 52 éléments répertoriés, il est difficile de savoir à quoi correspond chaque élément. Peu d'informations sont mises à notre disposition ; cela nous pousse à avoir une confiance aveugle dans ces données, sans pouvoir vérifier leur précision ou leur pertinence.

D'un autre côté, EcoEffect offre la possibilité d'obtenir des résultats à partir de n'importe quel état d'avancement de la modélisation. Il a été développé pour être utilisé dès les premières phases de conception, permettant même de tester indépendamment deux technologies différentes, en se basant sur les quantités de matériaux utilisés. Son approche d'encodage est assez réductive puisqu'elle limite les choix d'une technologie seulement à l'impact des matériaux qui le constituent et aux consommations énergétiques durant la phase d'utilisation. Les architectes et concepteurs auront plus facile à utiliser les macro-éléments de TOTEM que d'estimer des quantités de matériaux à une phase intermédiaire de conception. Une maquette BIM pourrait être utilisée pour récupérer facilement des quantités, mais cela n'est pas utilisé par tous les bureaux et encore moins les bureaux de petite taille, où il y a potentiellement moins de personnes spécialisées dans ce domaine. Cela consiste en une simplification forte, proche de l'ACV screening (qui demanderait d'ajouter les consommations d'eau).

Enfin, une faiblesse importante d'EcoEffect réside dans sa propre pondération des résultats. Bien qu'elle ait été conçue pour simplifier l'interprétation, cette pondération rend les résultats incomparables et non vérifiables sans les valeurs de normalisation. De plus, EcoEffect ne fournit pas la répartition des impacts par étapes du cycle de vie, ce qui peut limiter l'interprétation de l'ACV.

5.3 Autocritique

5.3.1 Atouts et critiques du cas d'étude choisi

Il est important de pouvoir apporter un regard critique sur le choix de l'étude d'ACV complète qui sert de référence pour notre recherche. En effet, les hypothèses de cette recherche se limitent strictement aux hypothèses qui y ont été fixées. Cette étude réalisée par Charline Malmedy (2020) présente des qualités indéniables telles que la complétude des informations données, la transparence de la démarche et des choix de modélisation, ou encore le fait qu'elle ait été validée et publiée dans un article scientifique deux ans plus tard avec d'autres chercheurs (Nematchoua et al., 2022), prouvant ainsi sa fiabilité. D'autres aspects moins favorables sont également à mettre en évidence tels que certaines hypothèses de modélisation, du fait que son étude date de trois ans et que la modélisation aurait peut-être été différente avec la version actuelle de Pleiades ACV (base de données des matériaux plus récente).

On pourrait reprocher le fait que cette étude n'est pas vraiment une ACV complète vu les simplifications qui ont été posées. Dans un idéal théorique, cela aurait pu effectivement supprimer quelques incertitudes liées aux choix de modélisation de Charline Malmedy. Cependant, comme expliqué dans l'état de l'art, réaliser un ACV complète à 100% est pratiquement impossible. Une ACV « presque » complète est plus représentative de la réalité et cela reste intéressant car Pleiades ACV prend en compte beaucoup plus d'éléments que TOTEM et EcoEffect. On peut raisonnablement considérer cette référence comme une ACV complète, comme cela a été prouvé avec la méthodologie « detailed – simplified – screening ».

Ensuite, pour ce qui est du bâtiment à proprement parler, il est assez récent et fait partie d'un projet d'écoquartier. Il est donc représentatif des constructions actuelles et de ce à quoi on tend au niveau des choix de conception, même s'il n'est pas irréprochable. Le choix d'un immeuble à appartements a plusieurs avantages tels que la considération d'une variété des usages et caractéristiques comparé à une école ou une maison unifamiliale par exemple. Ces complexités supplémentaires sont intéressantes à considérer dans le cas d'une étude sur la simplification des ACV. D'un autre côté, choisir un type de bâtiment moins complexe aurait pu simplifier ces paramètres en limitant les hypothèses, faciliter la comparabilité et permettre de focaliser l'analyse sur des éléments plus précis.

Le fait de se concentrer sur l'étude d'un bâtiment seul et non d'un ensemble de bâtiments (pour une étude statistique par exemple) permet de vraiment se plonger en profondeur dans le cas et les spécificités du choix des hypothèses sélectionnées pour les deux outils étudiés : TOTEM et EcoEffect. Les résultats de ce mémoire ne peuvent toutefois pas être généralisés. D'autres études similaires sur d'autres cas d'étude et d'autres outils d'ACV simplifiés devraient être réalisées dans ce but. Cependant, la Résidence Arola n'était qu'un prétexte de modélisation pour effectuer une première comparaison entre des outils d'ACV simplifiés et un outil d'ACV complète.

5.3.2 Limites de la recherche

Il est nécessaire de discuter de mon positionnement vis-à-vis du sujet choisi pour ce travail de fin d'études. Étant actuellement étudiant, je connais les principes des analyses en cycle de vie des bâtiments dans la théorie ; en pratique, je n'avais jamais eu l'occasion de l'expérimenter dans mon parcours académique. C'est donc la première fois que je réalise des analyses en cycle de vie, même si celles-ci sont simplifiées dans ce cas précis. Par conséquent, je n'ai pas le recul du praticien expert. Ce défaut de connaissance pratique a été en partie pallié par la recherche documentaire que j'ai réalisée à travers mon état de l'art, en consultant de nombreuses études d'ACV des bâtiments déjà réalisées. Cette démarche m'a permis de compléter mes connaissances théoriques et de m'appuyer sur des travaux existants pour orienter mes analyses. Il est également important de noter que je ne réalise pas

cette recherche à partir de rien. En effet, un grand nombre de choix et d'hypothèses de mes modélisations réalisées avec TOTEM et EcoEffect s'appuient sur les hypothèses formulées dans l'étude d'ACV complète de référence réalisée sur Pleiades ACV (Malmedy, 2020).

On pourrait critiquer le fait de suivre strictement les hypothèses de Charline Malmedy sans tenter de les adapter pour chercher à être le plus réaliste possible, remettant en question le caractère absolu de l'étude de référence. L'outil d'ACV TOTEM met en effet à disposition des données plus précises (DEP) et adaptées au contexte (belge) de la Résidence Arola. Cependant, ce n'était pas là l'objet de l'étude. Nous cherchons à comparer la performance et l'utilité des outils d'ACV simplifiées et non les choix subjectifs qui ont été fait dans l'étude complète de référence. Dans notre cas, il y a vraiment un intérêt de réutiliser toutes les hypothèses pour comparer des choses comparables, et ne pas fausser les résultats.

Enfin, il est également pertinent de souligner que l'accès aux outils d'ACV simplifiées est limité en raison du fait qu'ils ne sont pas accessibles publiquement ou du fait qu'ils sont payants. De plus, les méthodes de calcul des ACV des bâtiments sont encore loin d'être harmonisées. Face à cette non-harmonisation des outils d'ACV, j'ai été contraint de revoir ma méthodologie initiale. En effet, j'avais prévu une première analyse quantitative sans envisager la possibilité de rencontrer autant d'éléments pouvant entraver celle-ci. C'est pourquoi l'intégration d'une analyse générale et fonctionnelle s'est avérée indispensable pour clarifier les analyses possibles sur ces outils, en prenant en compte leurs contraintes spécifiques.

5.3.3 Caractère innovant de l'étude et des résultats produits

Tout d'abord, on constate une certaine rareté d'études comparatives entre plusieurs outils d'ACV selon leur degré de simplification. La recherche proposée s'inscrit dans cette démarche. De plus, c'est la première fois qu'une étude propose une comparaison simultanée entre un outil d'ACV complète, un outil d'ACV simplifiée et un outil d'ACV très simplifiée au regard de la typologie « detailed – simplified – screening » (Wittstock et al., 2012).

Ensuite, pour revenir à l'état de l'art, la nouvelle typologie proposée à la [figure 13](#) est un outil qui complète bien la plupart des typologies d'ACV existantes. Elles ont plutôt tendance à évaluer le degré de simplification d'un outil, telle que la typologie « detailed – simplified – screening » de l'EeBGuide (Wittstock et al., 2012), alors que la typologie proposée permet de dire comment un outil d'ACV peut profiter de modes de simplification existants, afin d'être plus facilement utilisable par les concepteurs, selon leurs objectifs.

Bien que les résultats quantitatifs soient assez peu encourageants dans l'absolu, ils ont permis de mettre en évidence des défis primordiaux liés au manque d'harmonisation important entre les différentes outils d'ACV étudiés. Cela se manifeste notamment dans la définition des indicateurs environnementaux, des unités employées ou encore des éléments pris en compte à travers les étapes du cycle de vie (notamment la consommation électrique pendant la phase d'utilisation dans TOTEM).

Pour tenter de résoudre ces problèmes, deux méthodes d'estimation ont pu être testées. La méthode de conversion d'unité simplifiée n'a pas permis de produire des résultats fiables. En ce qui concerne l'approximation qui a été réalisée pour essayer de prendre en compte la consommation électrique lors de la phase d'utilisation, elle n'a pas pu être contestée, mais d'autres études devraient être réalisées pour la valider.

5.3.4 Suggestions et ouvertures

De nombreuses suggestions et ouvertures sont possibles pour cette étude. Les plus intéressantes ont été rassemblées ici.

Pour prolonger la réflexion, il serait par exemple intéressant d'évaluer la sensibilité des résultats selon les hypothèses prises par les utilisateurs. En ce sens, l'ACV complète pourrait être réalisée par la même personne que celle qui réalise les ACV simplifiées, en testant différentes hypothèses de modélisation. Toujours pour aller plus loin, une étude pourrait être faite sur les facteurs de pondération et de normalisation des impacts environnementaux. En effet, la non-uniformité des unités utilisées par les outils ne permettait pas de les comparer, il pourrait être intéressant de trouver une méthode de normalisation commune aux trois outils et applicable dans le contexte belge. Cela demande une vraie recherche approfondie.

Pour revenir sur les limites de la définition du scénario à une phase intermédiaire de conception, il pourrait être intéressant d'avoir une analyse plus fine de l'évolution d'un projet et du type de données qu'il est possible de produire tout au long de son développement. En ce sens, l'analyse pourrait comporter des entretiens semi-dirigés avec les concepteurs du projet étudié pour pouvoir reconstituer l'évolution du processus de conception du projet en particulier et des principaux choix architecturaux et techniques qui l'ont façonné. Ils permettraient de préciser l'état d'avancement et le niveau de détails atteint à la fin de chaque phase.

La méthodologie en place peut être applicable à d'autres cas d'études pour enrichir les résultats. Par exemple, il pourrait être intéressant de comparer les mêmes outils (Pleiades ACV, TOTEM et EcoEffect) avec d'autres bâtiments résidentiels ou d'autres types de bâtiments tels que des maisons unifamiliales ou des écoles. Il pourrait aussi être intéressant de tester la sensibilité de matériaux seuls et la pertinence des résultats de cette simplification.

La méthodologie pourrait également être utilisée sur le même cas d'étude avec d'autres outils d'ACV tels que des outils de type screening (plus récents que EcoEffect) ou encore sur une même ACV complète en lui appliquant de modes de simplifications divers. Par exemple, il est apparemment possible d'utiliser Pleiades ACV sans la simulation thermique dynamique ; il serait alors utilisé à la fois en tant qu'outil d'ACV complète et simplifiée. Cela permettrait de s'épargner les problèmes d'unité ou de définition des indicateurs environnementaux puisqu'un seul outil est étudié.

6. Conclusion

Ce mémoire de fin d'études avait pour but d'évaluer la **pertinence des méthodes d'analyse en cycle de vie simplifiées de bâtiments** pour une utilisation en écoconception au stade de l'avant-projet.

Pour y répondre, il a d'abord été nécessaire d'étudier le concept d'ACV simplifiée à travers un **état de l'art**. Dans ce dernier, plusieurs problématiques ont été identifiées. Tout d'abord, il y a un réel problème de définition du concept à cause de l'absence de ce dernier dans les normes en vigueur, ce qui explique des incohérences entre plusieurs références. Ensuite, des confusions existent notamment entre la démarche de simplification et l'outil d'ACV simplifiée, ou encore, au niveau des limites qui séparent l'ACV complète de l'ACV simplifiée. L'étude des modes de simplification et des typologies existantes a permis la création d'une nouvelle typologie, complétant la définition de l'ACV simplifiée.

Une **analyse formelle et fonctionnelle** a été réalisée sur les trois outils étudiés pour préparer la comparaison des résultats des ACV. Elle a mis en évidence un réel manque d'harmonisation dans l'expression de leurs résultats. Des estimations ont été réalisées pour tenter de résoudre ce problème, mais elles n'ont pas été concluantes. Trois grands types ont été retenus : l'ACV détaillée, simplifiée et screening et pour chacun d'eux, on a toujours des simplifications très variées pour aider l'utilisateur.

L'**analyse quantitative** des résultats ne s'est pas limitée à présenter des valeurs numériques peu fiables, l'accent a été mis sur la recherche des causes principales qui justifient ces différences. En effet, comprendre l'impact des « mauvaises » simplifications permet d'être plus critique face à ces outils simplifiés et leurs résultats. Il a été observé que lorsqu'on emploie un outil simplifié, il y a un minimum d'éléments qui doivent être pris en compte pour avoir des résultats comparables et significatifs par rapport à une ACV complète. Cette étude nous indique qu'on ne pouvait pas faire l'impasse sur les consommations d'électricité en phase d'utilisation. L'estimation qui a été testée pour les prendre en compte ne semble pas déraisonnable. Enfin, les hypothèses et les choix de modélisation pris par l'utilisateur ont également un impact important sur les différences.

Pour terminer, des perspectives plus encourageantes ont été constatées dans l'**analyse qualitative**, à travers le scénario à une phase intermédiaire de conception et les aspects du point de vue de l'utilisateur. Bien que les résultats quantitatifs ne soient toujours pas concluants dans l'absolu, ils restent toutefois intéressants en interne, pour donner une direction plus ou moins environnementale aux bâtiments et aux choix architecturaux étudiés. Enfin, les outils d'ACV simplifiées permettent à l'ACV d'être plus accessible en phase de conception, à travers la simplicité de leur prise en main et la rapidité des itérations possible (avec des macro-composants par exemple, comme le propose TOTEM).

Bibliographie

- ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie. (2018). Pratique opérationnelle de l'ACV bâtiment en écoconception et aide à la décision : Retour d'expérience de la communauté francilienne d'expérimentation septembre 2012 - septembre 2016. ADEME Éditions, Puteaux, France.
- Assefa, G., Glaumann, M., Malmqvist, T., Eriksson, O. (2010). Quality versus impact : Comparing the environmental efficiency of building properties using the EcoEffect tool. *Building and Environment*, 45(5), 1095-1103. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.10.001>
- Assefa, G., Glaumann, M., Malmqvist, T., Kindembe, B., Hult, M., Myhr, U., Eriksson, O. (2007). Environmental assessment of building properties—Where natural and social sciences meet : The case of EcoEffect. *Building and Environment*, 42(3), 1458-1464. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.12.011>
- Alain, S. (2015). Évaluation d'outils d'analyse du cycle de vie pour étudier la performance environnementale de bâtiments en bois innovants, mémoire de master, Université de Laval, Québec, Canada. <http://hdl.handle.net/20.500.11794/26005>
- Basbagill, J., Flager, F., Lepech, M., Fischer, M. (2013). Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts, *Build. Environ.* 60 81e92, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.009>.
- Baumann, H., Tillman, A. M. (2004). The Hitch Hiker's Guide to LCA: An orientation in life cycle assessment methodology and application. Studentlitteratur AB.
- Beemsterboer, S. (2019). Simplifying LCA use in the life cycle of residential buildings in Sweden, thèse de doctorat, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden. <https://www.semanticscholar.org/paper/Simplifying-LCA-use-in-the-life-cycle-of-buildings-Beemsterboer/3bdb8d375f87a60ab4a87f095a8eb34a97a7ee3a>
- Boulay, A.-M., Bare, J., Benini, L., Berger, M., Lathuillière, M. J., Manzardo, A., Margni, M., Motoshita, M., Núñez, M., Pastor, A. V., Ridoutt, B., Oki, T., Worbe, S., Pfister, S. (2018). The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints : Assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(2), 368-378. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1333-8>
- Brick, K. (2008). Barriers for implementation of the Environmental Load Profile and other LCA-based tools, mémoire de license, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Suède.
- CEN (Comité européen de normalisation) (2011). EN 15978. Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Évaluation de la performance environnementale des bâtiments - Méthode de calcul. Bruxelles, Belgique.
- CEN (Comité européen de normalisation) (2019). EN 15804. Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction. Bruxelles, Belgique.

- Commission européenne (2019). Going Climate-Neutral by 2050: A Strategic Long-Term Vision for a Prosperous, Modern, Competitive and Climate-Neutral EU Economy, European Commission, Brussels, Belgium.
- Commission européenne (s. d.). European Platform on LCA | EPLCA – LCIA Method data sets. Consulté le 3 juin 2023, à l'adresse <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/SDPDB/LCIAMethodList.xhtml?stock=default>
- Commission européenne - IES (Institute for Environment and Sustainability) (2010). ILCD handbook: general guide to life cycle assessment – Detailed guidance. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Decorte, Y., Steeman, M., Van Den Bossche, N. (2021). Effect of a one-dimensional approach in LCA on the environmental life cycle impact of buildings : Multi-family case study in Flanders. Building and Environment, 206, 108381. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108381>
- Demesmaecker, P., Vannerom, A. (2020). TOTEM le guide : Une méthodologie belge pour évaluer les impacts environnementaux des bâtiments, OVAM, Bruxelles Environnement et SPW, Bruxelles, Belgique.
- EcoEffect. (s. d.). Miljöanpassat byggande. Consulté le 31 janvier 2023, à l'adresse <http://www.ecoeffect.se/>
- Goedkoop, M., Spriensma, R. (2001). The Eco-Indicator 99 : A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment. https://www.researchgate.net/publication/247848113_The_Eco-Indicator_99_A_Damage_Oriented_Method_for_Life_Cycle_Impact_Assessment
- Glaumann, M., Malmqvist, T., Peuportier, B., Wetzell, C., Scarpellini, S., Zabalza, I., Garayo, S. D. de, Staller, H., Krigsvoll, G., Stoykova, E., Horvath, S., Szalay, Z., Degiovanni, V. (2010). Guidelines for LCA calculations in early design phases, ENSLIC Building <https://www.semanticscholar.org/paper/GUIDELINES-FOR-LCA-CALCULATIONS-IN-EARLY-DESIGN-Glaumann-Malmqvist/616e78c89570e5befef5deecab50d2f9e6ba0717>
- Glaumann, M., Malmqvist, T. (2009). Miljövärdering av bebyggelse : Metodbeskrivning EcoEffect-metoden, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Suède.
- Han, G., Srebric, J. (2015). Comparison of survey and numerical sensitivity analysis results to assess the role of life cycle analyses from building designers' perspectives. Energy and Buildings, 108, 463-469. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.017>
- Hellweg, S., Mila i Canals, L. (2014). Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. Science, 344(6188), 1109-1113. doi:DOI: 10.1126/science.1248361
- Hollberg, A., Tschetwertak, J., Schneider, S., Habert, G. (2018). Design-Integrated LCA Using Early BIM. In E. Benetto, K. Gericke, M. Guiton (Eds.), Designing Sustainable Technologies, Products and Policies: From Science to Innovation, 269-279.
- Hollberg, A., Lützkendorf, T., Habert, G. (2019). Top-down or bottom-up? – How environmental benchmarks can support the design process. Building and Environment, 153, 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.02.026>

- ISO (international Standardization Organization). (2006a). International Standard ISO 14040. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.
- ISO (international Standardization Organization). (2006b). International Standard ISO 14044. Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines.
- IZUBA énergies. (s. d.). Base de données ACV. Consulté le 3 juin 2023, à l'adresse https://docs.izuba.fr/v4/fr/index.php/Base_de_donn%C3%A9es_ACV?toc-id=1088
- Janin, M. (2000). Démarche d'éco-conception en entreprise - Un enjeu : construire la cohérence entre outils et processus, thèse de Doctorat, ENSAM Université Chambéry, France.
- Jensen, A., Hoffman, L., Møller, B., Schmidt, A. (1998). Life cycle assessment (LCA)—A guide to approaches, experiences and information sources.
- Jusselme, T., Rey, E., Andersen, M. (2018). An integrative approach for embodied energy: Towards an LCA-based data-driven design method. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 88, 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.036>
- 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>
- Kovacic, I., Zoller, V. (2015). Building life cycle optimization tools for early design phases. Energy, 92, 409–419. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.027>
- Kumar Pal, S., Takano, A., Alanne, K., Siren, K. (2017). A life cycle approach to optimizing carbon footprint and costs of a residential building. Building and Environment, 123, 146-162. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.051>
- Lam, W.C., Trigauw, D. (2021). TOTEM - Environmental profile of buildings [update 2021], OVAM, Bruxelles Environnement et SPW, Bruxelles, Belgique
- Lamnatou, C., Chemisana, D., Mateus, R., Almeida, M.G., Silva, S. M. (2015). Review and perspectives on Life Cycle Analysis of solar technologies with emphasis on building-integrated solar thermal systems, Renewable Energy, 75, 833-846. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.057>.
- Lasvaux, S. (2010). Étude d'un modèle simplifié pour l'analyse de cycle de vie des bâtiments, thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris, France. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00712043>
- Lebert, A. (2014). Pour des analyses de cycle de vie (ACV) des bâtiments fiables, simples et reproductibles - Adapter la méthodologie ACV aux acteurs. Consulté 2 novembre 2022, à l'adresse <https://docplayer.fr/39320755-Pour-des-analyses-de-cycle-de-vie-acv-des-batiments-fiables-simples-et-reproductibles-adapter-la-methodologie-acv-aux-acteurs.html>
- Malmedy, C. (2020). Travail de Fin d'Etudes : Analyse des impacts environnementaux et calcul du coût environnemental d'un immeuble à appartements sur l'ensemble de son cycle de vie pour atteindre les objectifs quasi zéro énergie et net zéro énergie, mémoire de master, Université de Liège, Liège, Belgique. <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/8978>

- Malmqvist, T., Glaumann, M., Scarpellini, S., Zabalza, I., Aranda, A., Llera, E., Díaz, S. (2011). Life cycle assessment in buildings : The ENSLIC simplified method and guidelines. *Energy*, 36(4), 1900-1907. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.03.026>
- Marsh, R. (2015). LCA profiles for building components : Strategies for the early design process. *Building Research & Information*, 44, 1-19. <https://doi.org/10.1080/09613218.2016.1102013>
- Meex, E., Hollberg, A., Knapen, E., Hildebrand, L., Verbeeck, G. (2018). Requirements for applying LCA-based environmental impact assessment tools in the early stages of building design. *Building and Environment*, 133, 228-236. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.016>
- Miyamoto, A., Allacker, K., de Troyer, F. (2020). Design support tool for architects toward sustainable dwellings, acte de congrès de la conférence DS²BE 2020, Hasselt, Belgique.
- Nehasilová, M., Mancik, S., Železná, J., Lupisek, A. (2014, octobre 28). Simplified and Detailed Life Cycle Assessment of a Building Replacement with Re-use of Selected Materials, World SB14 Barcelona, Barcelone, Espagne. <https://doi.org/10.13140/2.1.3682.1449>
- Nematchoua, M. K., Sendrahasina, R. M., Malmedy, C., Orosa, J. A., Simo, E., Reiter, S. (2022). Analysis of environmental impacts and costs of a residential building over its entire life cycle to achieve nearly zero energy and low emission objectives. *Journal of Cleaner Production*, 373, 133834. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133834>
- Papamichael, K. (2000). Green building performance prediction/assessment. *Building Research & Information*, 28(5-6), 394-402. <https://doi.org/10.1080/096132100418546>
- Roberts, M., Allen, S., Coley, D. (2020). Life cycle assessment in the building design process – A systematic literature review. *Building and Environment*, 185, 107274. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107274>
- Rochon, M. (2013). Analyse du cycle de vie comparative de bâtiments résidentiels, essai de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Canada. <https://savoirs.usherbrooke.ca/handle/11143/7435>
- Rossi, B., Marique, A.-F., Glaumann, M., Reiter, S. (2012). Life-cycle assessment of residential buildings in three different European locations, basic tool. *Building and Environment*, 51, 395-401. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.11.017>
- Roy, N. (2017). ANALYSE DU CYCLE DE VIE de la Maison du développement durable, Équiterre, Montréal, Canada. https://legacy.equiterre.org/sites/fichiers/rapportacv_final_web.pdf
- Salmon, N., Duclos, L., Fillit, F., Peuportier, B., Herfray, G., Chevalier, J., Schiopu, N., Lasvaux, S., Lebert, A., Sénagás, J.L., Mikolase, R., Sidler, O., Riesler, T. (2011). COIMBA 2011, Développement des outils d'évaluation de la qualité environnementale des bâtiments par analyse de cycle de vie, SYNTHÈSE, Nobatek. <https://www.izuba.fr/wp-content/uploads/2017/09/Coimba-Synthese-NOBATEK.pdf>
- Scheuer, C., Keoleian, G. A., Reppe, P. (2003). Life cycle energy and environmental performance of a new university building: Modeling challenges and design implications. *Energy and Buildings*, 35(10), 1049-1064. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(03\)00066-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(03)00066-5)

- SETAC-Europe. (2003). Life-cycle Assessment in Building and Construction: A State-of-the-art Report, 2003. SETAC.
- Sevin, M. (2018). Analyse du cycle de vie à l'échelle du quartier, mémoire de master, Université de Liège, Liège, Belgique. <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/4676>
- 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>
- SPW Energie (2021). Guide PEB 2021. Disponible sur <https://energie.wallonie.be/fr/guide-peb.html?IDC=8824&IDD=97858>
- Sung, C. D., Hung-Chan, J., Ho, J. Y. (2013). Proposal of Simplified LCA Technique for Potential Environmental Impact Assessment of The Construction Materials. The Korean Society of Living Environmental System, 20(6), 755-768.
- Tasala Gradin, K., Björklund, A. (2021). The common understanding of simplification approaches in published LCA studies—A review and mapping. The International Journal of Life Cycle Assessment, 26, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01843-4>
- Teller, J., Marique, A.F., Loiseau, V., Godard, F., Delbar, C. (2014). Référentiel Quartiers Durables, laboratoire LEPUR de l'Université de Liège, Liège, Belgique
- Todd, J., Curran, M.A., Weitz, K., Sharma, A., Vigon, B., Price, E., Norris, G., Eagan, P., Owens, W., Veroutis, A. (1999). Streamlined Life-Cycle Assessment: A Final Report from the SETAC North America Streamlined LCA Workgroup. Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC).
- TOTEM. (s. d.). Bienvenue sur TOTEM. Consulté le 21 mars 2023, à l'adresse <https://www.totem-building.be/pages/welcome.xhtml>
- Trocmé, M., Peuportier, B. (2008). Analyse de cycle de vie d'un bâtiment, J3eA, 7, 0001. <https://doi.org/10.1051/j3ea:2008034>
- United Nations Environment Programme (2021). 2021 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi
- Verbeeck, G., Hens, H. (2010). Life cycle inventory of buildings: A calculation method. Building and Environment, 45(4), 1037-1041. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.10.012>
- Wadin, J., Luttropp, C., Lindfors, L.-G. (2003). Functional priorities in LCA and design for environment. The International Journal of Life Cycle Assessment, 8, 160-166. <https://doi.org/10.1007/BF02978463>
- Wallhagen, M., Glaumann, M., Malmqvist, T. (2011). Basic building life cycle calculations to decrease contribution to climate change – Case study on an office building in Sweden. Building and Environment, 46(10), 1863-1871. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.02.003>

- Weitz, K.A., Sharma, A. (1998). Practical life cycle assessment through streamlining. *Environmental Quality Management*, 7, 81–87. <https://doi.org/10.1002/tqem.3310070408>
- Wittstock, B., Gantner, J., Lenz, K., Saunders, T., Anderson, J., Carter, C., Gyetvai, Z., Kreißig, J., Braune, A., Lasvaux, S., Bosdevigie, B., Bazzana, M., Schiopu, N., Jayr, E., Nibel, S., Chevalier J., Hans, J., Fullana-i-Palmer, P., Gazulla, C., Mundy, J., Barrow-Williams, T., Sjöström, C. (2012). EeBGuide Guidance Document Part B: BUILDINGS, European Commission, https://www.eebguide.eu/eeblog/?page_id=704
- Zabalza, I., Aranda Usón, A., Scarpellini, S. (2009). Life cycle assessment in buildings : State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. *Building and Environment*, 44(12), 2510-2520. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.05.001>
- Zimmermann, R. K., Kanafani, K., Nygaard Rasmussen, F., Birgisdottir, H. (2019). Early Design Stage Building LCA using the LCAbyg tool : Comparing Cases for Early Stage and Detailed LCA Approaches. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 323, 012118. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/323/1/012118>

Figures et tableaux

FIGURE 1 : EMISSIONS DE GES PAR SECTEUR, 2021 (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2021, P.15)	1
FIGURE 2 : GRAPHIQUE CONCEPTUEL ILLUSTRANT LE PARADOXE DE L'ECOCONCEPTION INSPIRE ET BASE SUR DES SCHEMAS EXISTANTS (MIYAMOTO ET AL., 2020 ; ROBERTS ET AL., 2020)	4
FIGURE 3 : STRUCTURE ET METHODOLOGIE DE L'ETUDE	7
FIGURE 4 : VUE SYNTHETIQUE DU CADRE REGLEMENTAIRE DE L'ACV ET DES GUIDES PRATIQUES D'AIDE A SA MISE EN ŒUVRE SELON SIX REFERENCES	8
FIGURE 5 : PHASES D'UNE ACV SELON L'ISO 14040 (ISO, 2006A, P.8)	12
FIGURE 6 : ILLUSTRATION DES DIFFERENTES PHASES DE L'EVALUATION DU BATIMENT. CE SCHEMA A ETE CREE SUR BASE D'UNE ILLUSTRATION DE LA NORME EN 15978 (CEN, 2011, P.22)	14
FIGURE 7 : TYPE DE DONNEES POUVANT ETRE UTILISEES AUX DIFFERENTES PHASES DE L'EVALUATION (CEN, 2011, TABLEAU 1, P.41)	27
FIGURE 8 : ETAPES DE CYCLE DE VIE EXCLUE D'UN EXEMPLE D'ETUDE D'ACV SIMPLIFIE	29
FIGURE 9 : EXEMPLE D'APPROCHES DE SIMPLIFICATION DECRITES EN TERMES D'APPLICATION ET DE RAISON D'UTILISATION	30
FIGURE 10 : VUE SCHEMATIQUE DES ETAPES OBLIGATOIRES A PRENDRE EN COMPTE POUR LA TYPOLOGIE « DETAILED – SIMPLIFIED – SCREENING ». CE SCHEMA A ETE CREE SUR BASE D'UNE ILLUSTRATION DE LA NORME EN 15978.....	33
FIGURE 11 : « RELATION AUX LOTS » (ADEME, 2018, P.38)	36
FIGURE 12 : DISPONIBILITE DE L'INFORMATION POUR LES ACTEURS DANS LE PHASAGE D'UN PROJET ET LIEN AVEC LES DIFFERENTS TYPES D'ACV (LEBERT, 2014, P.8)	36
FIGURE 13 : PROPOSITION PERSONNELLE D'UNE NOUVELLE TYPOLOGIE DES SIMPLIFICATIONS DE L'ACV PERTINENTES EN FONCTION DE QUATRE OBJECTIFS DE SIMPLIFICATION	45
FIGURE 14 : SCHEMA SYNTHETIQUE DU CADRE METHODOLOGIQUE.....	47
FIGURE 15 : PHASES DU CYCLE DE VIE ET LIMITES DU SYSTEME SELON LA NORME EUROPEENNE (DEMESMAECKER & VANNEROM, 2020, P.29).....	53
FIGURE 16 : LOCALISATION DE L'ECOQUARTIER DU SART-TILMAN.....	56
FIGURE 17 : PHOTO DE LA RESIDENCE AROLA (PHOTO GOOGLE STREET VIEW, AVRIL 2021)	57
FIGURE 18 : TABLEAU DE LA COMPOSITION DE L'ENSEMBLE DES PAROIS DE LA RESIDENCE AROLA (MALMEDY, 2020, P.34)	59
FIGURE 19 : MODELISATION 3D DE LA RESIDENCE AROLA SUR PLEIADES ACV (MALMEDY, 2020, P.36).....	60
FIGURE 20 : MAQUETTE REVIT PERSONNELLE DE LA RESIDENCE AROLA	61
FIGURE 21 : SIMPLIFICATIONS DANS LES TROIS OUTILS ETUDIES SELON LA TYPOLOGIE DES SIMPLIFICATIONS CREEE	73
FIGURE 22 : ETAPES DU CYCLE DE VIE CONSIDEREES PAR LES TROIS OUTILS SELON LES ETAPES OBLIGATOIRES A PRENDRE EN COMPTE DANS LA TYPOLOGIE « DETAILED – SIMPLIFIED – SCREENING ». CE SCHEMA A ETE CREE SUR BASE DE LA FIGURE 10	74
FIGURE 23 : PROPORTION DE L'IMPACT PAR ETAPE DU CYCLE DE VIE POUR LE SCENARIO « FINI » DU PROJET	79
FIGURE 24 : RESULTAT SUPPLEMENTAIRE DE EcoEffect	82
FIGURE 25 : COMPARAISON DES IMPACTS PAR CATEGORIE D'ELEMENTS ENTRE LES DEUX SCENARIOS ETUDIES.....	86
 TABLEAU 1 : INDICATEURS DE L'ACV DES BATIMENTS MENTIONNES DANS LA NORME NBN EN 15978 (CEN, 2011).....	16
TABLEAU 2 : ECHELLE D'EVALUATION DE LA FIABILITE DES RESULTATS QUANTITATIFS DES ACV SIMPLIFIEES, BASEE SUR LE PROJET COIMBA	68
TABLEAU 3 : ECHELLE D'EVALUATION DE LA PRECISION DES RESULTATS QUANTITATIFS DES ACV SIMPLIFIEES, BASEE SUR LES ORDRES DE GRANDEURS ESTIMES PAR EcoEffect ET LE PROJET COIMBA.....	68
TABLEAU 4 : SYNTHESE COMPARANT LES 3 OUTILS CHOISIS POUR CETTE ETUDE	72
TABLEAU 5 : RESULTATS POUR LE PREMIER SCENARIO DU PROJET « FINI », POUR LES TROIS OUTILS ETUDIES	78
TABLEAU 6 : RESULTATS POUR LE PREMIER SCENARIO DU PROJET « FINI », ANALYSE DE TOTEM	79
TABLEAU 7 : RESULTATS POUR LE SCENARIO AVEC ENCODAGE PEB DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE, ANALYSE DE TOTEM	80
TABLEAU 8 : RESULTATS POUR LE SCENARIO DU PROJET « FINI », ANALYSE D'EcoEffect	81
TABLEAU 9 : COMPARAISON DES DUREES DE VIE DES ELEMENTS FIXEES DANS LE CAS D'ETUDE SUR PLEIADES ACV ET SUR TOTEM...	85
TABLEAU 10 : RESULTATS POUR LES TROIS SCENARIOS DU PROJET A UNE PHASE INTERMEDIAIRE DE CONCEPTION, ANALYSE SUR TOTEM	85

Annexes

Les annexes de ce mémoire sont consultables sur le site matheo.uliege.be

Elles sont organisées en cinq parties : Plans/coupes/façades, Calculs et résultats intermédiaires, ACV EcoEffect, ACV TOTEM et ACV Pleiades ACV