

Revue de Littérature Synthèse : Appliquer la circularité dans l'ACV

Équipe solution #4 – Revue de
littérature sur l'ACV circulaire

ARUP

**STUDIO
CARBONE**

Auteurs : Mathieu Bendouma,
Leopold Wambersie

Date : 21 décembre 2022



CERIEC
Centre d'études
et de recherches
intersectorielles
en économie
circulaire



Le lab construction est un projet du Centre d'études et de recherches
intersectorielles en économie circulaire de l'ÉTS (CERIEC).

Table des matières

1	Mise en contexte	2
2	Portée.....	2
3	Pratiques actuelles.....	2
4	Défis et solutions	6
5	Réflexions et prochaines étapes	11
6	Références	12

1 Mise en contexte

Le secteur de la construction représente une source importante d'émissions de gaz à effet de serre qui contribuent aux changements climatiques. À l'échelle du secteur du bâtiment, une quantité considérable de ces émissions provient des matériaux et produits qui sont généralement générés sous un modèle économique linéaire, « du berceau au tombeau ». Les principes d'économie circulaire sont donc peu intégrés au cycle de vie d'un bâtiment, tant au niveau de sa conception que sa construction. Dans le but de quantifier les impacts environnementaux d'un bâtiment, l'analyse de cycle de vie (ACV) est une méthodologie standardisée communément utilisée par l'industrie. Ainsi, le but de la recherche est d'étudier l'intégration des notions d'économie circulaire dans l'outil de l'ACV et d'y approfondir les connaissances et approches.

2 Portée

Ce document est une synthèse de la revue de littérature réalisée dans le cadre du projet d'expérimentation « Appliquer la circularité dans l'analyse du cycle de vie des bâtiments » porté par Arup et l'ÉTS avec le support technique de Studio Carbone. Cette synthèse vise à identifier les pratiques actuelles de l'ACV, ainsi que les défis, problématiques et lacunes liées à l'intégration des principes d'économie circulaire dans cet outil de pratique.

3 Pratiques actuelles

3.1 L'OUTIL DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Les analyses du cycle de vie de bâtiments sont généralement divisées en une série de modules A1-C4, représentant les étapes du produit, de la construction, de l'utilisation et de la fin de vie. Le module C se décompose en C1 (déconstruction), C2 (transport vers le traitement des déchets), C3 (traitement des déchets) et C4 (élimination). Les ACV qui se concentrent sur la réutilisation, la récupération et d'autres principes de circularité peuvent également inclure un module D représentant les impacts, tant positifs que négatifs, au-delà des limites du système. Cela inclut les bénéfices de la production primaire évitée si le matériau est réutilisé [1]. En pratique, le module D est rarement inclus dans une étude ACV typique, même si la contribution relative du module D peut varier de -50% à +35% de l'impact total du cycle de vie, selon la catégorie d'impact [2].

Le domaine des ACV de bâtiments est caractérisé par un ensemble distinct d'outils, de méthodologies et de normes. Parmi les outils couramment utilisés, on peut citer Athena Impact Estimator, le plug-in Tally pour Revit, One Click LCA et Simapro, qui sont tous basés sur des inventaires du cycle de vie et des déclarations environnementales de produits (DEP) [3]. Les

normes générales pour l'ACV sont données par les normes ISO 14040-14044, et les normes spécifiques aux bâtiments par la norme EN 15978, et ces deux ensembles de normes sont suivis par des organismes de certification tels que LEED et ILFI, bien qu'avec des exigences légèrement différentes. La définition d'une base de référence à laquelle le bâtiment évalué peut être comparé fait également l'objet de la norme ASTM E2921-16a [3]. Cependant, malgré cette normalisation, il subsiste un manque de cohérence autour de l'unité fonctionnelle, de la définition des limites du système et des choix de modélisation de la fin de vie [4].

Tableau 1. Impact des approches circulaires dans chaque module

Module	Impact sur l'analyse du cycle de vie
A	• <u>Direct</u> : L'utilisation de composants recyclés ou réutilisés remplace l'empreinte de la production de matières premières par celle des activités de recyclage. • <u>Indirect</u> : Les systèmes et techniques de construction qui facilitent la circularité, comme la construction modulaire, la construction en bois massif ou les techniques de "conception pour la déconstruction" (DfD), ont des impacts différents pendant la phase de construction.
B	• <u>Indirect</u> : Les systèmes et techniques de construction qui facilitent la circularité peuvent entraîner des quantités différentes d'émissions ou de consommation d'énergie dans la phase d'utilisation.
C	• <u>Direct</u> : Les activités de déconstruction entraînent des impacts différents de ceux de la démolition traditionnelle.
D	• <u>Direct</u> : La réduction de l'utilisation de matières premières dans les projets futurs doit être examinée en conjonction avec le module A pour éviter un double comptage. • <u>Direct</u> : La séquestration de CO₂ dans les produits du bois et la carbonatation du béton réduisent l'impact de ces produits.

3.2 APPROCHES ACTUELLES POUR AMÉLIORER L'INTÉGRATION DE LA CIRCULARITÉ DANS LA CONSTRUCTION ET LA CONCEPTION

La quantité croissante de ressources consacrées à la modélisation des impacts du module D (impacts au-delà des limites du système) est le résultat direct des tendances vers l'incorporation accrue des principes de circularité dans la construction. Il existe une variété d'approches qui améliorent l'intégration de la circularité dans un projet, notamment l'utilisation de matériaux et de composants réutilisables [5], et l'adoption de systèmes de construction en bois massif [6], [7]. La « conception pour la déconstruction » (Design for Deconstruction, DfD) est le nom donné à toute une catégorie de principes qui mettent l'accent sur la réduction de la complexité d'un projet afin de garantir un désassemblage et une réutilisation faciles en fin de vie, comme l'utilisation de conceptions modulaires simples, la minimisation du nombre de matériaux, de connexions et de composants différents, l'utilisation de joints mécaniques plutôt que chimiques, la séparation claire des différents systèmes de construction (mécanique, électrique, plomberie) et la possibilité de déconstruction à l'aide d'outils non spécialisés [8], [9].

Tableau 2. Résumé des défis et solutions

	Défis identifiés dans la littérature	Méthodes et solutions dans la littérature	Recommandations et leviers
Défis organisationnels	#1 Réticence du secteur de la construction à prendre en compte le module D dans les ACV	• Rendre l'inclusion du module D obligatoire pour participer aux programmes de certifications (LEED, ILFI) • Trouver des moyens incitatifs (crédits d'impôt, etc.)	• Législation • Normes et certifications
Manque de données	#2 Manque de données sur les propriétés des matériaux secondaires, qui ne sont pas forcément les mêmes de matériaux primaires.	• Meilleur partage d'informations sur la provenance des matériaux secondaires • Inclusions de matériaux secondaires 'typiques' dans les bases de données ICV (inventaire de cycle de vie)	• Traçabilité des matériaux • Mise en commun des données
	#3 Manque de données sur le potentiel de réutilisation/recyclage (quantité, qualité, contexte)	• Supposer que les conditions actuelles se maintiendront à l'avenir • ACV probabilistes • Comparaison de scénarios où les différents traitements sont appliqués à 100%	• Développement et popularisation de normes universelles • Développement d'une feuille de route • Traçabilité des matériaux
	#4 Mauvaise intégration des données dans les outils d'ACV et manque d'expertise.	• Développer le partage d'informations • Formation des acteurs • Meilleure intégration du module D dans les outils d'ACV • Développer les bases de données et leur accessibilité	• Collaboration • Législation • Normes et certifications
Défis conceptuels	#5 Fixer clairement les limites des systèmes et comment sont alloués les impacts environnementaux (cas de matériaux communs à plusieurs projets).	• Mettre tous les impacts sur le projet initial : ISO 14044 • Séparer clairement le module D : normes EN 15643 EN 15978 • Allouer les impacts entre divers projets • Agrandir les frontières du système	• Développement et popularisation de normes universelles • Intégration des normes dans les outils d'ACV • Traçabilité des matériaux

4 Défis et solutions

Plusieurs défis se posent face à l'intégration de la circularité dans l'ACV, ceux-ci ont pu être observés par différents auteurs et relèvent souvent des questions liées aux considérations et aux hypothèses, en plus d'un manque général de connaissance.

4.1 DÉFI #1 RÉTICENCE DU SECTEUR DE LA CONSTRUCTION À PRENDRE EN COMPTE LE MODULE D DANS LES ACV

Les directives actuelles prônent la mise en place de pratiques visant à réduire au minimum la consommation énergétique des bâtiments. Cependant l'introduction de matériaux très performants peut aussi avoir un impact environnemental non négligeable, notamment au regard de leur énergie grise. Ainsi, de mauvaises décisions de conception environnementale, pouvant être influencées par certaines certifications vertes (ex. LEED), induisent des biais lors de la conception, notamment entre les impacts lors de la phase d'usage et le carbone intrinsèque [10]. Ainsi, le développement d'incitations pour développer l'économie circulaire doit permettre d'améliorer la considération des produits en fin de vie et améliorer la prise en compte de la circularité dans les ACV [11].

La résistance générale à la réalisation d'ACV circulaires peut aussi être due à une réticence générale à risquer de gonfler davantage l'impact d'un projet. Celle-ci peut être traitée par une combinaison d'un meilleur partage de l'information, de meilleurs outils et de meilleurs systèmes de certification (voir **#Défi 2**, **#Défi 3** et **#Défi 4**). D'autre part, le cas financier des matériaux en fin de vie est peu clair, ce qui rend la viabilité commerciale risquée tant que les pratiques actuelles ne sont pas modifiées [12].

Actuellement, l'inclusion des impacts en fin de vie liés à la réutilisation et au recyclage, représentés par le module D, n'est qu'optionnelle pour les programmes de certification des bâtiments tels que LEED et ILFI [13]. Bien qu'il soit probable que la déclaration de l'option D devienne de plus en plus obligatoire au niveau du produit, compte tenu des modifications apportées à la norme EN 15804 [1], [14], son inclusion explicite dans les programmes de certification des bâtiments encouragerait considérablement les investissements dans les outils et les méthodologies et leur normalisation.

4.2 DÉFI #2 : MANQUE DE DONNÉES SUR LES PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX SECONDAIRES, QUI NE SONT PAS FORCÉMENT LES MÊMES DE MATÉRIAUX PRIMAIRES.

On peut favoriser l'approche circulaire de deux manières différentes : soit en récupérant et en réexploitant directement les matériaux, soit en les recyclant. Pour le premier cas, une [15]bonne partie des éléments d'un bâtiment, et les métaux en général, en fin de vie peut être

récupérée de manière efficace et peut être compétitive par rapport à l'achat de nouveaux matériaux [25]. Dans le second cas, on peut se concentrer sur le choix initial des matériaux : ceux qui méritent d'être recyclés, comme le bois ou la brique.

Cependant, le recyclage ou la réutilisation des matériaux mènent souvent au downcycling de la matière première, de ce fait les propriétés des matériaux primaires et secondaires sont différentes [14]. Pour assurer la même unité fonctionnelle, des quantités de matériaux secondaires plus importantes (par rapport à la quantité de matériaux primaires) sont parfois nécessaires, du fait d'une perte de performances. Cela rend ainsi les résultats d'ACV fortement dépendant des hypothèses liées à la fin de vie et des approches considérées (voir **#Défi 3**, **#Défi 5**).

Il est alors possible d'alimenter les bases de données ICV en caractérisant ces nouveaux matériaux ou d'utiliser les données présentes dans les déclarations environnementales de produits, par exemple.

4.3 DÉFI #3 : MANQUE DE DONNÉES SUR LE POTENTIEL DE RÉUTILISATION/RECYCLAGE (QUANTITÉ, QUALITÉ, CONTEXTE)

La projection de l'impact des matériaux actuels dans des temps futurs (avec un environnement différent) est difficile, amenant des incertitudes supplémentaires : les ACV sont réalisées en tenant compte des conditions actuelles et ne reflètent pas la réalité [16] (voir **#Défi 2**). Les considérations sur la fin de vie des matériaux stockant du CO₂ durant leur développement, comme le bois, posent aussi la question de son traitement. Pour reprendre l'exemple du bois, s'il est brûlé, il réémet à l'environnement le carbone biogénique qu'il a accumulé durant sa croissance [7], [17].

L'approche principale pour traiter l'incertitude future autour des modules C et D (fin de vie et impacts au-delà du système) est de considérer les conditions actuelles et de supposer que ces conditions se maintiendront à l'avenir. Dans le cas du recyclage, cela signifie faire des hypothèses sur ce qui peut être recyclé, à quel niveau de qualité, et en quelle quantité, qui reflètent les conditions et les technologies actuelles [6], [14], [18]. Dans le cas du bois, on suppose que la totalité, ou une proportion spécifique de celui-ci, ne sera ni brûlée ni désintégrée et maintiendra donc indéfiniment son carbone incorporé séquestré. Le traitement peut être différent selon les logiciels, à titre d'exemple l'outil d'ACV Athena suppose que les conditions actuelles de recyclage seront maintenues dans le futur et qu'une partie du bois restera indéfiniment séquestrée [6].

Une autre approche pour gérer l'incertitude sur les conditions futures est de concevoir intentionnellement l'ACV comme une analyse probabiliste, avec des résultats présentés sous forme de distribution de probabilité [19]. On peut également considérer les différents scénarios à 100 % (par exemple : 100 % enfouissement / 100 % recyclage / 100 % réutilisation) afin de fournir des indications sur les potentiels impacts futurs [1].

4.4 DÉFI #4 MAUVAISE INTÉGRATION DES DONNÉES DANS LES OUTILS D'ACV ET MANQUE D'EXPERTISE.

Il y a un manque d'expertise des acteurs de la construction (chercheurs, consultants, entrepreneurs, clients, fabricants de produits, entrepreneurs de démolition et concepteurs) et de données pour la réalisation d'ACV [10], [12], [20], [21]. Dans le cas du recyclage et de la réutilisation, la tâche est d'autant plus complexe puisque des variations entre les propriétés des matériaux peuvent varier après une transformation (voir **#Défi 2**) [22].

Une étude de cas utilisant le BIM et l'ACV souligne qu'augmenter la synergie entre les parties prenantes, les techniciens et les clients doit permettre d'améliorer l'économie circulaire à l'aide d'une meilleure modélisation de la fin de vie des bâtiments. Cela passe aussi par l'amélioration de leur expérience pour réaliser des automatisations complètes des calculs ou du transfert d'informations entre les logiciels [22]. Le manque d'informations concernant les processus de récupération et de recyclage des produits de construction contribue également à la difficulté d'implémenter la circularité dans les ACV [23]. La norme EN 15978 spécifie que les scénarios et les hypothèses utilisées pour calculer le module D doivent refléter de la technologie actuelle, ce qui n'est pas représentatif des conditions futures, où de plus grandes incertitudes se posent.

Il existe un manque de bases de données ICV compatibles avec toutes les méthodes d'ACV et comprenant tous les produits de construction [23]. Les hypothèses liées à la fin de vie et les approches (recyclage ou incinération, approches cut-off/substitution) peuvent fortement influencer les résultats d'ACV des matériaux de construction – en particulier en termes absolus. C'est pourquoi des recommandations sur la prise en compte des incertitudes liées à la fin de vie de produits à longue durée de vie sont nécessaires. Jusqu'à présent, celles-ci n'ont pas été suffisamment prises en compte, ce qui peut entraver la prise de décisions judicieuses en faveur du développement durable [24].

4.5 DÉFI #5 : FIXER CLAIREMENT LES LIMITES DES SYSTÈMES ET COMMENT SONT ALLOUÉS LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Augmenter la circularité des matériaux d'un projet de construction signifie soit 1) augmenter l'utilisation de matériaux recyclés ou de composants réutilisés pendant la construction, 2) concevoir un projet de sorte que ses matériaux et composants puissent être facilement recyclés et réutilisés à l'avenir, ou (le plus probablement) les deux. Les analyses ACV requièrent des limites bien définies, et celles-ci sont floues lorsque les matériaux et les composants sont partagés avec d'autres systèmes de produits [4], [25].

Le module D d'une analyse ACV vise à saisir les avantages associés au déplacement des matériaux vierges dans le module A des projets futurs lorsque ces derniers réutilisent des matériaux et des composants du projet étudié. Cependant, cela peut ouvrir la porte à l'incohérence et au double comptage. Lorsque des matériaux et des composants d'un projet A sont réutilisés dans un projet

B, les deux peuvent à juste titre revendiquer le crédit des impacts évités associés à la production d'un deuxième ensemble de matériaux vierges. La manière dont les bénéfices de ces impacts évités sont répartis entre les deux projets affectera les pratiques encouragées par la réduction de l'impact : des pratiques telles que la conception pour la déconstruction (DfD) dans le premier projet, ou l'utilisation de matériaux recyclés et de composants réutilisés dans le second projet [25].

La norme ISO 14044 fournit des recommandations qui visent à organiser les approches possibles de l'attribution des impacts et des bénéfices lorsque les matériaux sont utilisés dans des systèmes multiples. Cependant, elles ne constituent pas des exigences explicites. Les recommandations peuvent être organisées en 3 catégories d'approches :

4.5.1 Agrandissement des frontières du système

Cette approche évite toute allocation, mais est plus pertinente pour les processus de fabrication industrielle qui impliquent des produits et des coproduits, mettant ainsi en évidence les limites de la norme ISO14044 lorsqu'il s'agit d'ACV de bâtiments. Dans le contexte de la construction, cela impliquerait d'inclure les bâtiments précédents et/ou ultérieurs dans le même système d'ACV, ce qui serait très difficile si les matériaux et les composants finissent par être réutilisés dans des dizaines de projets. Cette approche peut être utile si plusieurs projets sont planifiés simultanément avec l'intention de réutiliser des matériaux et des composants, mais elle est surtout pertinente dans le contexte des rénovations, qui peuvent être considérées comme un type de réutilisation des matériaux et des composants. Les rénovations entraînent nécessairement un chevauchement important entre les "anciens" et les "nouveaux" bâtiments, qui peuvent être réunis en un seul système. Hasik et al. résument 4 approches légèrement différentes pour définir et étendre les systèmes d'ACV dans le cas de projets de rénovation [26].

4.5.2 Attribuer 100% des impacts matériels à leur utilisation initiale

C'est ce qu'on appelle l'approche 100 : 0. Il s'agit de l'approche la plus simple pour répartir les impacts et les bénéfices : lorsque des matériaux et des composants sont partagés entre deux projets, l'intégralité de l'empreinte matérielle est comptabilisée dans le module A du premier projet. Le second projet ne compte pas les impacts de la production initiale de matériaux, autres que les impacts potentiels des activités de recyclage intermédiaires, dans son module A et bénéficie donc d'un impact global réduit. Cela élimine essentiellement le module D du premier projet, qui ne reçoit aucun avantage des approches qu'il a pu adopter pour augmenter le potentiel de réutilisation de ses matériaux et composants, comme la mise en œuvre des principes de conception pour la déconstruction.

1) Autres types d'allocations

Il peut s'agir de rapports 50 : 50, 0 : 100 et de tous les autres rapports de répartition entre deux systèmes de produits. Ces allocations sont principalement évoquées dans le contexte du

processus de fabrication industrielle, où les impacts de la production de matériaux et tous les impacts des activités de recyclage ultérieures peuvent être alloués par la masse, la valeur économique ou toute autre propriété. Dans le contexte de la circularité dans la construction, cela signifie que l'impact de la production de matériaux, ou à l'inverse les bénéfices des impacts évités dans les projets ultérieurs peuvent être alloués entre les projets de différentes manières selon le contexte, comme le projet le plus "responsable" de la réutilisation des matériaux, ou le nombre de cycles de vie prévus pour les composants individuels. Joensuu et al. examinent plusieurs des façons dont les impacts des composants réutilisables peuvent être alloués [4].

Il n'y a donc pas de consensus sur la méthode d'allocation à utiliser pour les impacts des matériaux vierges et les bénéfices de leur substitution entre projets [4], [25]. Une solution proposée par les normes EN 15643 et EN 15978 est de toujours séparer clairement le module D du reste de l'ACV, afin d'éviter un double comptage avec le module A des projets ultérieurs. L'élimination du double comptage résultant de la séparation du module D facilite également une approche d'allocation 100 : 0 dans la plupart des cas, en allouant la totalité de l'empreinte de production d'un matériau à sa première utilisation, et en la retirant entièrement des réutilisations ultérieures. Bien que cette approche encourage principalement l'utilisation de matériaux et de composants réutilisés plutôt que la conception en vue de la déconstruction (puisque seuls les projets qui utilisent, plutôt que de produire, des matériaux réutilisés ou réutilisables obtiennent une empreinte globale plus faible), le module D, bien que séparé, doit tout de même être mis en évidence et traité comme un transfert d'avantages aux projets futurs.

4.6 RECOMMANDATIONS ET LEVIERS

Les méthodologies observées dans la revue de littératures mettent en avant un manque de connaissance, qui pourrait facilement être palliée avec une collaboration et un partage des connaissances entre les différents acteurs et notamment avec les entrepreneurs de la démolition pour déverrouiller les marchés, et pour pallier l'appréhension des industriels sur les coûts [27].

Les pressions politiques peuvent aussi permettre de développer l'intégration de la circularité dans l'analyse de cycle de vie. Des propositions législatives ont été adoptées avec succès en Europe, mais les progrès pour le secteur de la construction ont été lents à cause de l'absence d'indicateurs environnementaux spécifiques et de cibles/objectifs pour le secteur de la construction [16], [28]. Dans certains pays (comme la Belgique et les Pays-Bas), la législation a permis de se diriger vers l'élimination de la mise en décharge via une augmentation des taxes et des frais [29]. Ces propositions auraient ainsi le pouvoir d'influencer les organismes de certifications pour tenir compte de cet aspect dans leurs démarches.

En considérant le recyclage et la réutilisation, une traçabilité doit permettre d'avoir une meilleure connaissance géospatiale des matériaux mis en œuvre dans les bâtiments, d'avoir un suivi et d'assurer le maintien des performances ou encore définir si la récupération n'est pas préférable à la réutilisation. Cette traçabilité peut s'effectuer à l'aide de puces RFID ou encore à l'aide des

passesports de matériaux [27], [29], [30]. La traçabilité aura aussi pour avantage de pouvoir estimer les quantités de bois réellement brûlées ou désintégrées par exemple, avec pour autre avantage de réduire les incertitudes sur la fin de vie de ce type de matériaux.

La stratégie pour améliorer l'économie circulaire au Canada serait d'établir une feuille de route, de développer des solutions potentielles et de suivre les progrès accomplis vers les objectifs [28]. Ce qui pourrait permettre de réduire les incertitudes sur la prise en compte du recyclage et de la réutilisation pour des conditions futures. La traçabilité des matériaux est d'autant plus un levier pour lever certaines incertitudes vis-à-vis de la double prise en compte des impacts environnementaux.

Enfin, le BIM, notamment le BIM 6D bien qu'encore jeune, semble être une stratégie prometteuse pour intégrer tous ces points, en particulier pour le partage d'informations entre les différents acteurs et la traçabilité [12], [27], [31], [32].

5 Réflexions et prochaines étapes

Dans le cadre de ce projet d'expérimentation, quelques réflexions se posent quant à l'application de la circularité dans l'ACV, suite à la revue de littérature.

Premièrement, il n'existe pas de méthode standardisée pour réaliser une ACV circulaire, étant donné que la manière dont les impacts et les bénéfices des composants et matériaux réutilisables sont répartis entre plusieurs systèmes peut dépendre du contexte du projet. Les normes ISO et EN ne fournissent que des recommandations qui peuvent être interprétées et ajustées selon les critères du projet et de l'ACV. Ainsi, la capacité de comparaison avec d'autres études d'ACV circulaires est limitée étant donné la diversité des hypothèses liées à la circularité et la méthodologie de l'ACV.

La qualité et les résultats de l'ACV dépendent de la qualité des données sur les matériaux, pour lesquels il est difficile d'obtenir des données sur les matériaux secondaires (propriétés, potentiel de substitution avec des matériaux vierges). Il y a aussi un manque d'informations sur les états actuels et futurs des marchés de réutilisation et de recyclage au Québec, ce qui rend l'estimation réaliste de la disponibilité des matériaux pour ces flux de gestion très difficile. Ces problématiques limitent l'impact réel de la considération des étapes C et D de l'ACV.

Les prochaines étapes du projet nécessitent de recadrer et d'examiner les approches d'application de stratégies circulaires dans l'ACV pour un terrain d'expérimentation précis, tout en considérant les limites que posent les divers défis identifiés dans cette synthèse, afin de quantifier les avantages d'un bâtiment plus circulaire.

6 Références

- [1] J. Anderson, A. Rønning, et A. Moncaster, « The Reporting of End of Life and Module D Data and Scenarios in EPD for Building level Life Cycle Assessment », *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 323, n° 1, p. 012051, août 2019, doi: 10.1088/1755-1315/323/1/012051.
- [2] L. Delem et L. Wastiels, « Module D in the Building Life Cycle: Significance Based on a Case Study Analysis », *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 290, n° 1, p. 012042, juin 2019, doi: 10.1088/1755-1315/290/1/012042.
- [3] V. Herrero-Garcia, « Whole-Building Life Cycle Assessment: Comparison of Available Tools », *Technol. Des.*, vol. 4, n° 2, p. 248-252, juill. 2020, doi: 10.1080/24751448.2020.1804771.
- [4] T. Joensuu, R. Leino, J. Heinonen, et A. Saari, « Developing Buildings' Life Cycle Assessment in Circular Economy-Comparing methods for assessing carbon footprint of reusable components », *Sustain. Cities Soc.*, vol. 77, p. 103499, févr. 2022, doi: 10.1016/j.scs.2021.103499.
- [5] G. Finch, G. Marriage, A. Pelosi, et M. Gjerde, « Building envelope systems for the circular economy; Evaluation parameters, current performance and key challenges », *Sustain. Cities Soc.*, vol. 64, p. 102561, janv. 2021, doi: 10.1016/j.scs.2020.102561.
- [6] K. Allan et A. R. Phillips, « Comparative Cradle-to-Grave Life Cycle Assessment of Low and Mid-Rise Mass Timber Buildings with Equivalent Structural Steel Alternatives », *Sustainability*, vol. 13, n° 6, Art. n° 6, janv. 2021, doi: 10.3390/su13063401.
- [7] Z. Chen, H. Gu, R. D. Bergman, et S. Liang, « Comparative Life-Cycle Assessment of a High-Rise Mass Timber Building with an Equivalent Reinforced Concrete Alternative Using the Athena Impact Estimator for Buildings », *Sustainability*, vol. 12, n° 11, Art. n° 11, janv. 2020, doi: 10.3390/su12114708.
- [8] J. Kanters, « Design for Deconstruction in the Design Process: State of the Art », *Buildings*, vol. 8, n° 11, Art. n° 11, nov. 2018, doi: 10.3390/buildings8110150.
- [9] G. Bertino, J. Kisser, J. Zeilinger, G. Langergraber, T. Fischer, et D. Österreicher, « Fundamentals of Building Deconstruction as a Circular Economy Strategy for the Reuse of Construction Materials », *Appl. Sci.*, vol. 11, n° 3, Art. n° 3, janv. 2021, doi: 10.3390/app11030939.
- [10] R. Leoto et G. Lizarralde, « Challenges in evaluating strategies for reducing a building's environmental impact through Integrated Design », *Build. Environ.*, vol. 155, p. 34-46, mai 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.03.041.
- [11] M. Bilal, K. I. A. Khan, M. J. Thaheem, et A. R. Nasir, « Current state and barriers to the circular economy in the building sector: Towards a mitigation framework », *J. Clean. Prod.*, vol. 276, p. 123250, déc. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123250.

- [12] K. T. Adams, M. Osmani, T. Thorpe, et J. Thornback, « Circular economy in construction: current awareness, challenges and enablers », *Proc. Inst. Civ. Eng. - Waste Resour. Manag.*, vol. 170, n° 1, p. 15-24, févr. 2017, doi: 10.1680/jwarm.16.00011.
- [13] T. R. Miller, J. Gregory, et R. Kirchain, « Critical Issues When Comparing Whole Building & Building Product Environmental Performance », oct. 2016, [En ligne]. Disponible sur: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/104838>
- [14] L. Delem et L. Wastiels, « The practical use of module D in a building case study: assumptions, limitations and methodological issues », *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 323, n° 1, p. 012048, août 2019, doi: 10.1088/1755-1315/323/1/012048.
- [15] E. Quéheille, « Optimisation multi-objectif d'une stratégie de déconstruction de bâtiments », *Acad. J. Civ. Eng.*, vol. 37, n° 1, Art. n° 1, 2019, doi: 10.33557/ajce.37.1.8.
- [16] L. C. M. Eberhardt, H. Birgisdóttir, et M. Birkved, « Life cycle assessment of a Danish office building designed for disassembly », *Build. Res. Inf.*, vol. 47, n° 6, p. 666-680, août 2019, doi: 10.1080/09613218.2018.1517458.
- [17] F. C. Rios, W. K. Chong, et D. Grau, « Design for Disassembly and Deconstruction - Challenges and Opportunities », *Procedia Eng.*, vol. 118, p. 1296-1304, janv. 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.485.
- [18] Gouvernement du Canada Conseil national de recherches Canada, « Lignes directrices nationales en matière d'analyse du cycle de vie de l'ensemble du bâtiment - Archives des publications du CNRC ». <https://nrc-publications.canada.ca/fra/voir/objet/?id=f12f3c38-b7c4-42b6-934f-44a42b1bd88c> (consulté le 3 novembre 2022).
- [19] H. Lei, W. Yang, W. Wang, et C.-Q. Li, « A new method for probabilistic circular economy assessment of buildings », *J. Build. Eng.*, vol. 57, p. 104875, oct. 2022, doi: 10.1016/j.jobbe.2022.104875.
- [20] L. Á. Antón et J. Díaz, « Integration of Life Cycle Assessment in a BIM Environment », *Procedia Eng.*, vol. 85, p. 26-32, janv. 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.10.525.
- [21] S. Hellweg et L. Milà i Canals, « Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment », *Science*, vol. 344, n° 6188, p. 1109-1113, juin 2014, doi: 10.1126/science.1248361.
- [22] R. D. Bari, O. Jorgji, R. Horn, J. Gantner, et S. Ebertshäuser, « Step-by-step implementation of BIM-LCA: A case study analysis associating defined construction phases with their respective environmental impacts », *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 323, n° 1, p. 012105, août 2019, doi: 10.1088/1755-1315/323/1/012105.

- [23] S. Mirzaie, M. Thuring, et K. Allacker, « End-of-life modelling of buildings to support more informed decisions towards achieving circular economy targets », *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 25, n° 11, p. 2122-2139, nov. 2020, doi: 10.1007/s11367-020-01807-8.
- [24] W. Xing, V. W. Tam, K. N. Le, J. L. Hao, et J. Wang, « Life cycle assessment of recycled aggregate concrete on its environmental impacts: A critical review », *Constr. Build. Mater.*, vol. 317, p. 125950, janv. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125950.
- [25] « Avoiding GHG Emissions: Life Cycle Assessment of Circular Systems Guide and Case Studies », *International Council of Chemical Associations (ICCA)*. <https://icca-chem.org/resources/avoiding-ghg-emissions-life-cycle-assessment-of-circular-systems-guide-and-case-studies/> (consulté le 15 décembre 2022).
- [26] V. Hasik, E. Escott, R. Bates, S. Carlisle, B. Faircloth, et M. M. Bilec, « Comparative whole-building life cycle assessment of renovation and new construction », *Build. Environ.*, vol. 161, p. 106218, août 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106218.
- [27] S. Copeland et M. Bilec, « Buildings as material banks using RFID and building information modeling in a circular economy », *Procedia CIRP*, vol. 90, p. 143-147, janv. 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.02.122.
- [28] D. T. L. Almeida, C. Charbuillet, C. Marotte, A. Lebert, et N. Perry, « Environmental consequences of policies in construction sector: combining economic simulation with consequential LCA », *E3S Web Conf.*, vol. 349, p. 04011, 2022, doi: 10.1051/e3sconf/202234904011.
- [29] S. Giorgi, M. Lavagna, K. Wang, M. Osmani, G. Liu, et A. Campioli, « Drivers and barriers towards circular economy in the building sector: Stakeholder interviews and analysis of five European countries policies and practices », *J. Clean. Prod.*, vol. 336, p. 130395, févr. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.130395.
- [30] B. Gagnon, X. Tanguay, B. Amor, et A. F. Imbrogno, « Forest Products and Circular Economy Strategies: A Canadian Perspective », *Energies*, vol. 15, n° 3, Art. n° 3, janv. 2022, doi: 10.3390/en15030673.
- [31] A. Ajayebi, P. Hopkinson, K. Zhou, D. Lam, H.-M. Chen, et Y. Wang, « Spatiotemporal model to quantify stocks of building structural products for a prospective circular economy », *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 162, p. 105026, nov. 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105026.
- [32] I. Bertin, J.-M. Jaeger, et R. Le Roy, « Construction, déconstruction, réemploi de la structure: le numérique au service de l'économie circulaire », in *GC'2019, Le Génie Civil au coeur des mutations technologiques et numériques, Le BIM: un outil Multiservice*, 2019, p. 11p.

Partenaires financiers du lab construction :

