

Rapport de recherche

Faciliter la traçabilité des matériaux et des produits de construction par le développement et la mise en œuvre d'un cadre de fil numérique dans le secteur de l'environnement bâti au Québec

Équipe solution 8A – Faciliter la traçabilité des matériaux et des produits de construction via le développement et l'implantation du fil numérique dans le secteur québécois de l'environnement bâti

Étape : Partager

Date : Novembre 2023



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

Équipe de recherche:

Érik Poirier, Ph. D.

Directeur du projet

Professeur

École de technologie supérieure

Directeur, Groupe de Recherche en Intégration et Développement Durable en Environnement Bâti (GRIDD)

Adam Yousfi, M.Sc.

Étudiant au doctorat

École de technologie supérieure

Saman Davari, M.Sc.

Assistant de recherche

École de technologie supérieure

Meisam Jaberi

Étudiant à la maîtrise

École de technologie supérieure

Équipe solution 8A:

Hortense Montoux, CERIEC

Vincent Blanchard, FP Innovation

Ken Fallu, Groupe Optel

Li-Anne Sayegh, ARUP

Claudiane Ouellet-Plamondon, ÉTS

David Dinelle, APCHQ

Luc Morneau, RECYC-Québec

Nicolas Bellerose, RECYC-Québec

Raefer Wallis, GIGA

Bechara Helal, Université de Montréal

Alexandre Landry, Alexandre Landry Architecte

Table des matières

Sommaire.....	3
1. Introduction.....	4
2. Revue de la littérature.....	5
2.1 L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE DANS L'ENVIRONNEMENT BÂTI.....	5
2.2 LE CONCEPT DE TRAÇABILITÉ DANS DIFFÉRENTS DOMAINES.....	8
2.3 LA TRAÇABILITÉ DANS L'INDUSTRIE DES ACTIFS BÂTIS.....	10
3. Le projet de recherche.....	14
3.1 OBJECTIF DE RECHERCHE.....	14
3.2 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE.....	15
3.3 Élaboration du cadre de traçabilité.....	15
3.4 CAS D'USAGES.....	17
3.5 ÉTUDE DE CAS : LE DUPLEXE CIRCULAIRE.....	17
4. Résultats.....	18
4.1 LE CADRE DE RÉFÉRENCE.....	18
4.1.1. <i>Pourquoi : la proposition de valeur de la traçabilité dans le contexte du développement durable</i>	21
4.1.2. <i>Quoi : Les principaux types de données permettant la traçabilité</i>	23
4.1.3. <i>Quand : Le rôle de la traçabilité à travers les étapes du cycle de vie</i>	24
4.1.4. <i>Qui : Une collaboration et une coordination efficaces</i>	25
4.1.5. <i>Comment : Facilitateurs et moteurs de la traçabilité</i>	26
4.2 LES CAS D'USAGES.....	27
4.2.1 <i>Cas d'usage 01</i>	28
4.2.2 <i>Cas d'usage 02</i>	34
4.3 LA MISE EN ŒUVRE.....	36
4.3.1 <i>Mise en œuvre technique</i>	36
4.3.2 <i>Opérationnalisation des indicateurs de circularité</i>	38
5. Discussions.....	48
6. Conclusion.....	51
Références.....	53

Sommaire

Le laboratoire d'accélération en économie circulaire pour le secteur de la construction (le lab construction), porté par le CERIEC, a pour mission de démontrer, par des projets d'expérimentation innovants et cocréés avec les parties prenantes, comment intégrer puis généraliser des stratégies d'économie circulaire dans le secteur de la construction au Québec. Dans ce cadre, des ateliers de travail ont permis de faire émerger une vision d'un secteur de la construction circulaire, puis d'identifier et de prioriser les freins à l'économie circulaire pour le secteur et enfin d'imaginer des solutions pour lever ces freins. Cette démarche a été menée en cocréation avec l'ensemble des parties prenantes du secteur, issues du milieu académique et du secteur privé et institutionnel.

À la suite de l'identification des solutions, une équipe s'est réunie autour de la solution intitulée 'Développer un outil de traçabilité des matériaux' (solution #8), ensuite scindée en deux, une équipe sur la traçabilité amont des matériaux (#8A), qui fait l'objet du présent projet et rapport, et une équipe sur la traçabilité des résidus (#8B), afin de développer un projet d'expérimentation autour de cette solution. Bien que prometteur, l'application du modèle d'économie circulaire et de ses principes fait face à de nombreux défis. Parmi ceux-ci, les pratiques soutenant l'économie circulaire dans l'environnement bâti nécessitent la mise en œuvre d'une approche holistique ainsi qu'une vue d'ensemble sur le cycle de vie des matériaux et des produits qui composent l'environnement bâti. À cet effet, les applications pratiques de l'économie circulaire à des étapes clés dans le cycle de vie, soit l'utilisation de matériaux recyclés / réutilisés dans la conception, la planification et la conception pour supporter le désassemblage et la déconstruction, l'intégration des acteurs clés tout au long du cycle de vie du projet pour supporter la prise de décision efficace en lien avec la circularité constituent des défis majeurs pour l'implantation des principes et des pratiques supportant l'économie circulaire. En parallèle, le manque de compétences et d'expertise portant sur le recensement et la traçabilité des matériaux tout au long du cycle de vie du bâtiment constitue un frein au déploiement de ces pratiques. Au cœur des défis mentionnés ci-haut, le manque de données et d'information sur les matériaux, leur entretien, et leur réemploi représente un des freins principaux pour la mise en œuvre des principes et applications de l'économie circulaire.

À cet effet, une des pistes de solutions émergentes permettant d'adresser cette problématique est la constitution et la mise en œuvre d'un fil numérique des produits et des matériaux de construction pour le secteur québécois de l'environnement bâti. Le fil numérique, soit le Digital Thread en anglais, est défini comme « [...] le dépôt définitif d'informations faisant autorité et contenant tout ce qu'il y a à savoir sur un système à un instant [donné]. [...] Le fil numérique n'est [donc] pas seulement un modèle, ou une collection de modèles » (West and Pyster, 2015) mais bien un écosystème informationnel intégré qui permet de suivre la performance et l'évolution d'un élément, d'un groupe d'éléments, d'un système, d'un actif ou d'un portefeuille d'actifs. Dans le contexte de la circularité des matériaux et produits de construction, il est possible de considérer que ce concept d'une source d'information unique, réutilisable, traçable, et faisant autorité, tout au long du cycle de vie des éléments, permettrait d'assurer la traçabilité de ceux-ci, en plus de soutenir une panoplie d'autres usages et de décisions en lien avec l'application des principes et pratiques de l'économie circulaire mentionnés ci-haut.

Tandis que certains aspects du fil numérique sont définis ou en cours de définition, et sont déployés dans certaines sphères de la pratique actuelle dans le domaine des actifs bâtis, il reste encore beaucoup de travail à faire afin de bien cadrer, développer, étendre, implanter et déployer le fil numérique dans le domaine pour soutenir l'économie circulaire. Il est notamment question du développement de stratégies, de processus et de

pratiques, d'outils et de technologies numériques pour soutenir la mise en œuvre et le déploiement du fil numérique dans le domaine pour soutenir l'économie circulaire.

Dans ce contexte, le projet de recherche présenté dans ce rapport vise à développer et opérationnaliser la notion de fil numérique dans un contexte de traçabilité pour l'EC. Cette approche permettra d'identifier et de suivre les matériaux, les produits et leur valeur associée tout au long de leur cycle de vie. Cependant, la mise en œuvre de la traçabilité peut s'avérer difficile dans le secteur des actifs bâtis en raison de la nature fragmentée des projets de construction, des longs cycles de vie des actifs et de l'implication de multiples parties prenantes. Malgré les études et les efforts récents, il n'existe actuellement aucun cadre formel ni aucune ligne directrice pour soutenir la traçabilité dans l'industrie de la construction. Ainsi un cadre de traçabilité soutenant la mise en œuvre de stratégies de circularité à travers les cycles de vie des matériaux, des produits et des systèmes est proposé. S'appuyant sur les principes, les stratégies, les normes et les lignes directrices de l'EC, le cadre proposé offre une solution pratique aux défis de la mise en œuvre de la traçabilité dans l'industrie de la construction.

Afin d'opérationnaliser ces concepts, et une fois le cadre de traçabilité établi, des cas d'usages spécifiques à l'appui de la traçabilité rencontrant des propositions de valeur sont développés et opérationnalisés sur une étude de cas. L'opérationnalisation des cas d'usage permet de détailler les aspects techniques et opérationnels de la mise en œuvre de stratégies permettant d'atteindre des objectifs de circularité. Il est notamment question de tracer le cycle de vie d'un projet dans le contexte où un produit est retiré du bâtiment, remis à neuf, puis utilisé dans un autre bâtiment. L'autre étude de cas vise l'agrégation des passeports matériaux effectuée à différentes fins, par exemple en fonction des produits, des bâtiments et des propriétés. Une étude de cas a été ciblée afin d'opérationnaliser les cas d'usages. Divers indicateurs de circularité ont été pilotés sur cet étude de cas.

Ainsi, le projet de recherche développé dans ce rapport permet de mieux comprendre la notion de traçabilité pour supporter l'économie circulaire dans l'industrie des actifs bâtis et de l'opérationnaliser à travers des cas d'usages précis supportés par la mise en œuvre de nouvelles technologies de l'information en construction, notamment la modélisation des données sur les infrastructures (BIM). En revanche, plusieurs défis d'implantation de ces stratégies demeurent dont l'interopérabilité, la robustesse des systèmes d'évaluations disponibles et la disponibilité et la fiabilité des données.

1. Introduction

L'industrie des actifs bâtis contribue de manière significative à la production de déchets et à l'épuisement des ressources à l'échelle mondiale. Selon le World Green Building Council, la construction et la démolition des bâtiments représentent 40 % de la consommation mondiale d'énergie, 30 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre et produisent 25 % des déchets (Laski & Burrows, 2017). La transition vers une économie circulaire (EC) présente une alternative viable qui vise à maintenir les matériaux et les produits en usage le plus longtemps possible, réduisant ainsi les déchets et favorisant l'utilisation durable des ressources (Geissdoerfer et al., 2017). Un aspect essentiel de l'EC est la traçabilité, qui permet d'identifier et de suivre les matériaux, les produits et leur valeur associée tout au long de leur cycle de vie. En garantissant une transparence totale de la provenance, de l'utilisation et de la maintenance tout au long du cycle de vie des matériaux, des produits et des systèmes, la traçabilité peut faciliter la récupération et la réutilisation des matériaux à la fin de leur vie utile, suivre et réduire les déchets, permettre un approvisionnement responsable (RS) ainsi que promouvoir une utilisation durable des ressources (Katenbayeva et al., 2017).

Malgré les efforts et les études récents, la mise en œuvre de systèmes de traçabilité peut s'avérer difficile dans l'industrie des actifs bâtis, compte tenu de la nature fragmentée des projets de construction, des cycles de vie très longs des actifs et du grand nombre de parties prenantes impliquées (Watson et al., 2019). En outre, il n'existe actuellement aucun cadre formel ou ligne directrice fournissant des suggestions pratiques pour mettre en œuvre la traçabilité dans le domaine de la construction. En tant que domaine d'étude naissant, de nombreuses publications universitaires soulignent la nécessité de développer et de mettre en œuvre des cadres de traçabilité intégrés pour permettre la circularité des produits, des matériaux et des systèmes dans l'industrie des actifs bâtis (Katenbayeva et al., 2017), (Watson et al., 2019), (Karlsen et al., 2013), (Falleri et al., 2006). Cependant, de tels cadres, et leur mise en œuvre, font actuellement défaut.

La modélisation des données sur les infrastructures (Building Information Modeling, BIM) offre des solutions potentielles à la question de la traçabilité de l'information liés aux matériaux, produits et systèmes de construction. Le BIM est défini comme un « ensemble de politiques, processus et de technologies en interactions qui génère une méthodologie pour gérer les données essentielles d'une conception et d'un projet en format digital tout au long du cycle de vie du bâtiment » (Succar, 2009)

Le programme de recherche décrit dans ce document avait pour objectif de développer une approche intégrée pour faciliter la traçabilité des matériaux et des produits de construction dans le but d'accroître et d'optimiser leur réutilisation/réemploi, dans une logique d'économie circulaire dans le secteur québécois de l'environnement bâti. Plus spécifiquement, le projet visait à bien cadrer, développer, étendre, implanter et déployer le fil numérique dans le domaine pour soutenir l'économie circulaire. Il est notamment question du développement de stratégies, de processus et de pratiques, d'outils et de technologies numériques pour soutenir la mise en œuvre et le déploiement du fil numérique dans le domaine pour soutenir l'économie circulaire via des cas d'usages précis impliquant la traçabilité des matériaux et des produits de construction.

Le document qui suit présente une revue de la littérature sur les notions de traçabilité dans divers domaines et aborde les lacunes actuelles en matière d'écoconception, ainsi que le concept de traçabilité dans celle-ci. Un cadre de traçabilité pour l'industrie des actifs bâtis est ensuite proposé. Ce cadre vise à faciliter l'application de la traçabilité pour soutenir la mise en œuvre des principes d'EC dans les cycles de vie des matériaux, des produits et des systèmes. Le cadre de traçabilité proposé est basé sur les principes, stratégies, normes et lignes directrices existants en matière d'EC et est articulé à la lumière des exigences de traçabilité. Par la suite, le cadre est opérationnalisé dans le contexte d'une étude de cas portant sur la rénovation d'un duplex situé à Montréal. Pour ce faire, une série de cas d'usages ont été développés. La mise en œuvre de ces cas d'usages, les défis et les résultats sont présentés. Finalement, des recommandations pour des travaux futurs sont proposées sur les bases des résultats de cette recherche.

2. Revue de la littérature

2.1 L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE DANS L'ENVIRONNEMENT BÂTI

Selon le dernier rapport sur la gestion des déchets de Recyc-Québec, les déchets de construction et de démolition (CRD) représentaient près d'un tiers des matériaux envoyés en centre de tri en 2021, soit 1 800 000 tonnes. Cette part ne représente pourtant que la moitié de ce qui est réellement produit par le secteur, dont il est estimé que 1 600 000 tonnes additionnelles sont acheminées directement à l'élimination. Pour détourner cette quantité importante de déchets des sites d'enfouissement, le gouvernement canadien pousse l'industrie des actifs bâtis vers le modèle de l'économie circulaire (EC) visant à remplacer le concept de fin de vie par la réduction, la réutilisation et la récupération des matériaux dans les étapes du cycle de vie de la construction et

de l'exploitation (Kirchherr et al., 2017). L'EC est définie par l'Office Québécois de la langue française comme un « Système de production, d'échange et de consommation qui repose sur des stratégies permettant d'optimiser l'utilisation des ressources à chacune des étapes du cycle de vie des produits, dans le but de réduire les impacts environnementaux et d'améliorer le bien-être des individus et des collectivités ». Alors que le corpus de connaissances relatives à un avenir circulaire se développe rapidement, de nombreux chercheurs et praticiens industriels ont souligné les défis importants que pose la transition vers ce nouveau modèle économique. Outre les nombreux défis stratégiques et politiques qui entravent cette transition, les défis techniques comprennent la gestion efficace des informations sur le cycle de vie pour accroître la circularité des matériaux et des produits au sein et entre les différentes parties prenantes impliquées dans l'industrie des actifs bâtis (Honic, Kovacic, Sibenik, et al., 2019). La réalisation de la circularité repose fortement sur des données pertinentes, fiables, facilement disponibles et accessibles décrivant les propriétés des matériaux, des produits et des systèmes qui sous-tendent les principes de l'EC et ses cas d'usages (Debacker & Manshoven, 2016).

Il existe différents moyens pour consigner, gérer et rendre disponible les données pertinentes dans un contexte d'EC. Les passeports matériaux (PPM) représentent une avenue intéressante (Kedir et al., 2021). Les PPM sont un ensemble de documents numériques contenant des données sur la composition, les déclarations environnementales et la provenance des matériaux et produits de construction et montrant leur potentiel de récupération et de réutilisation (Heinrich & Lang, 2019) (Honic, Kovacic, & Rechberger, 2019). Un nombre croissant de types de passeports ont été proposés par les chercheurs et les praticiens, ce qui, d'un côté, est une bonne chose car cela montre la demande dans le domaine, mais cela peut entraîner des difficultés dans la collecte et la mise en correspondance de données incohérentes provenant de plusieurs PPM (Holla, 2017). Parmi les exemples de PPM, on peut citer :

- **Building As Material Banks (BAMB)** : ce PPM décrit les données et leurs stratégies de mise en œuvre dans l'environnement bâti. Toutes les informations nécessaires sur les matériaux et les produits relatifs à l'EC sont classées hiérarchiquement en plusieurs niveaux (Figure 1) tels que les propriétés des matériaux, les certifications, la logistique, etc. Le projet a également mis en place une plateforme numérique qui relie les composants individuels des bâtiments en affichant leurs utilisations et leurs valeurs sur le marché (Heinrich & Lang, 2019).
- **3XN Architects** : ce PPM fournit des lignes directrices pour la collecte de données d'EC à toutes les étapes du cycle de vie du bâtiment. Les données collectées doivent être reliées à une base de données permettant la traçabilité de tous les composants et parties du bâtiment avec leurs spécifications techniques et fonctionnelles (3XN Architects, 2018).
- **Madaster** : ce projet encadre les données du PDE en fonction des couches du bâtiment (par exemple, la structure, la peau, les services, etc.). Le PPM fournit également des indicateurs de circularité pour calculer la quantité de matériaux vierges, recyclés, réutilisés et renouvelables qui sont incorporés dans un bâtiment. La plateforme nuagique de Madaster peut se connecter aux modèles basés sur la modélisation des informations du bâtiment (BIM) et permet aux utilisateurs de créer et de développer un passeport unique pour les bâtiments ou les objets.

Outre l'application des PPM, la transition vers une EC avancée nécessite un degré élevé de numérisation et d'automatisation (Kintscher et al., 2021). Les principaux obstacles qui entravent ce potentiel résident dans ce que l'on peut appeler un "déficit d'information" entre le producteur et le consommateur (concepteur, propriétaire, utilisateur final) (Lawrenz et al., 2021). Ce déficit d'information apparaît lorsqu'il n'y a pas de compréhension transparente et commune de ce qui, quand, quoi, où, pourquoi et comment les données d'EC circulent et sont échangées entre les acteurs impliqués dans un projet. Il devient important de combler cette

lacune en assurant la traçabilité de toutes les données pertinentes relatives à l'EC et en les reliant à une base de connaissances structurée (Saaksvuori & Immonen, 2008), (Agence européenne pour l'environnement., 2016). En outre, alors que les systèmes d'information numérisés sont de plus en plus répandus dans la pratique, plusieurs problèmes subsistent qui empêchent une interopérabilité totale. Il en résulte un "fossé numérique" entre les phases du cycle de vie et les parties prenantes du projet (de Lange et al., 2020). Enfin, les pratiques traditionnelles d'exécution des projets tendent à créer des barrières entre les parties prenantes du projet, ce qui entraîne un "fossé de collaboration" (Poirier et al., 2016). La figure 2 illustre ces lacunes dans les différentes phases du cycle de vie des actifs. Pour combler ces lacunes, une solution intégrée et automatisée est indispensable pour relier et mettre en relation les éléments clés de la circularité.

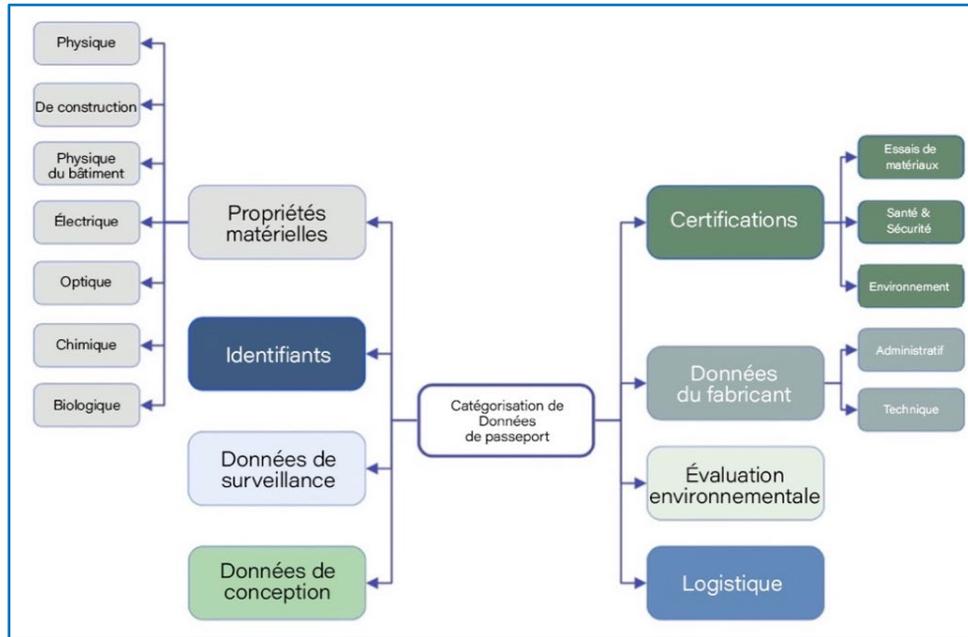


Figure 1: Catégorisation des données de passeports matériels (adapté de BAMB (Heinrich & Lang, 2019))

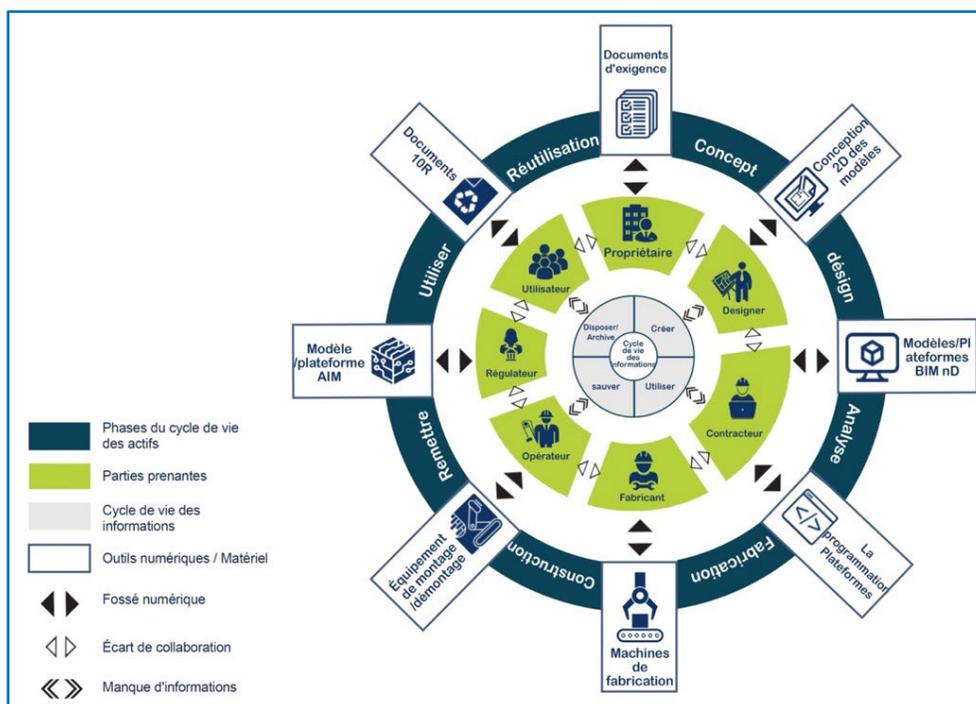


Figure 2: Aperçu des écarts actuels dans les phases du cycle de vie des actifs

2.2 LE CONCEPT DE TRAÇABILITÉ DANS DIFFÉRENTS DOMAINES

La traçabilité des matériaux et des produits est reconnue comme une préoccupation dans un nombre croissant d'études et de pratiques d'EC dans divers domaines (O. C. Z. Gotel & Finkelstein, 1994). Bien que la notion de "traçabilité" ait été définie, il n'existe pas de définition commune qui englobe tous les aspects de la traçabilité (Watson et al., 2019). Le tableau 1 énumère certaines des définitions existantes de la traçabilité qui ont été élaborées dans la littérature.

Tableau 1 : Définitions de la traçabilité

Référence	Définition	Contexte	Année
(K.-S. Wang, 2014)	L'aptitude à retracer l'historique, l'application ou la localisation d'une entité au moyen d'identifications enregistrées.	ISO8402	1994
(Saaksvuori & Immonen, 2008)	La capacité d'accéder à tout ou une partie des informations relatives à ce qui est considéré, tout au long de son cycle de vie, au moyen d'identifications enregistrées.	Industrie agro-alimentaire	2018
(Kamara et al., 2000)	Les exigences du client doivent être présentées de manière à faciliter : (...) la traçabilité des décisions de conception par rapport aux exigences initiales tout au long du cycle de vie de l'installation	AIC ¹	2000
(Brandín & Abrishami, 2021)	La traçabilité consiste à connaître l'origine du produit ou de la matière première, sa localisation en temps réel tout au long de la chaîne d'approvisionnement et ses conditions de qualité prédéfinies à chaque étape de la feuille de route	AIC	2021

(Katenbayeva et al., 2017)	La capacité à suivre les informations relatives à un produit tout au long de sa chaîne d'approvisionnement offre un certain nombre d'utilisations : qualité et sécurité, minimisation des scandales qui nuisent à la réputation des entreprises, amélioration des chaînes d'approvisionnement et renforcement de la confiance	AIC	2017
----------------------------	---	-----	------

La plupart des publications universitaires soulignent l'importance des modèles de traçabilité autour desquels les processus, outils et méthodes de traçage peuvent être définis et organisés (Pinheiro, n.d.). Certains des modèles de traçabilité les plus courants sont décrits dans le tableau 2. Ces modèles peuvent être mis en œuvre de différentes manières, mais leur utilisation spécifique dépend de l'industrie, du secteur et de l'application.

Tableau 2 : Modèles de traçabilité

Modèle	Description	Références
Traçabilité physique	Ce modèle est axé sur le suivi et la traçabilité des produits physiques, tels que les aliments et les produits manufacturés, tout au long de la chaîne d'approvisionnement	(Folinas et al., 2006), (Zhou & Piramuthu, 2015), (Bougdira et al., 2020).
Traçabilité de l'information	Ce modèle est axé sur le suivi et la traçabilité du flux d'informations, telles que les données et les enregistrements, au sein de la chaîne d'approvisionnement.	(Jansen-Vullers et al., 2003), (Li et al., 2020), (Aiello et al., 2015), (Mader et al., 2009)
Traçabilité génétique	Ce modèle est axé sur le suivi et la traçabilité de la composition génétique des produits biologiques, tels que les semences, le bétail et les cultures	(Dalvit et al., 2007), (Dalvit et al., 2008), (Bonizzi et al., 2007).
Traçabilité des processus	Ce modèle est axé sur le suivi et la traçabilité des processus et des étapes impliqués dans la production de produits, tels que les processus de fabrication et les procédures de contrôle de la qualité	(Lago et al., 2009), (Cleland-Huang et al., 2014).
Traçabilité des événements	Ce modèle est axé sur le suivi et la traçabilité d'événements ou d'activités spécifiques, tels que les livraisons, les expéditions et les rappels de produits	(Cleland-Huang et al., 2003), (Cleland-Huang, Chang, & Yujia Ge, 2002), (Cleland-Huang, Chang, Sethi, et al., 2002).
Traçabilité systémique	Ce modèle est axé sur le suivi et la traçabilité des interactions et des relations entre les différents éléments de la chaîne d'approvisionnement, tels que les fournisseurs, les fabricants, les distributeurs et les consommateurs	(Pauzi & Capiluppi, 2023), (Cleland-Huang et al., 2008).
Traçabilité hybride	Ce modèle combine des éléments de différents modèles de traçabilité pour fournir un système de traçabilité complet et intégré.	(Islam et al., 2021), (J. Wang et al., 2018), (S. Wang et al., 2019)

Dans le contexte du développement durable, des études récentes ont souligné le rôle de la traçabilité de l'information pour atténuer les problèmes de qualité et de sécurité, optimiser l'utilisation des ressources, faciliter la recherche d'informations pour les pratiques de gestion et améliorer la chaîne d'approvisionnement en renforçant la confiance entre les fournisseurs et les consommateurs (Karlsen et al., 2013). La traçabilité de l'information aide également les organisations à identifier les sources d'erreurs ou de divergences dans leurs données et à conserver un enregistrement précis des modifications apportées au fil du temps (de Lusignan et al., 2011). Un système d'information fonctionnel devrait être en mesure de fournir aux organisations une vue d'ensemble de l'historique et de l'utilisation d'informations telles que l'identité du créateur d'un produit, de son évaluateur, de son modificateur, de son fournisseur, etc. (Pearson et al., 2019). Moe (1998) a mené une étude sur la traçabilité alimentaire et a décrit ses avantages sous deux angles : la traçabilité interne et la traçabilité de la chaîne. La traçabilité interne offre des avantages au sein d'une étape de la chaîne d'activités et de processus impliqués dans la livraison d'un produit (par exemple, une meilleure planification pour optimiser l'utilisation des matières premières, une indication de cause à effet pour se conformer aux normes du produit, etc.) La traçabilité de la chaîne permet de suivre les informations relatives au produit tout au long de son cycle de vie. La traçabilité de la chaîne d'un produit est nécessaire si l'on a besoin d'informations dès les premières étapes (par exemple, la planification, la conception) jusqu'à la fin du cycle de vie.

Diverses méthodes de traçabilité ont été proposées dans différents domaines pour améliorer le suivi et le flux d'informations. Par exemple, Katenbayeva et al. (2017) ont intégré certains des concepts clés liés à la traçabilité en ce qui concerne la durabilité (figure 3), y compris leur relation et l'étendue de leur application. Dans cette approche, la traçabilité est étroitement liée à la transparence et à l'approvisionnement responsable. Au niveau de la gestion, les organisations utilisent la traçabilité comme une tactique pour accroître la transparence de leurs décisions commerciales. En outre, toutes les opérations au sein d'une organisation peuvent être activement tracées afin de garantir une utilisation responsable des ressources naturelles, financières et humaines (Glass et al., 2012). En fin de compte, la mise en œuvre continue de la traçabilité dans les prises de décision et les pratiques peut conduire à une éthique et à une croissance accrue pour les entreprises et les industries, ainsi qu'à des pratiques commerciales durables.

Chaque partie prenante joue un rôle essentiel pour assurer la traçabilité des produits et des processus (Wohlrab et al., 2016). Il est important qu'elles travaillent en étroite collaboration pour garantir l'efficacité du système et le maintien d'informations exactes tout au long du cycle de vie. Une mauvaise communication entre les parties prenantes peut entraîner des lacunes dans les informations et des malentendus susceptibles d'entraver la traçabilité. Ramesh & Jarke (2001) ont présenté un simple "modèle de référence de la traçabilité" qui met l'accent sur le quoi, le qui, le où, le comment, le pourquoi et le quand de la traçabilité des informations. Ces questions simples ont été catégorisées comme des dimensions clés qui doivent être prises en compte pour assurer la précision et l'efficacité des systèmes de traçabilité. L'utilisation de ces dimensions dans les pratiques de traçabilité peut accroître la transparence, réduire le risque de rappels de produits et renforcer la confiance des consommateurs dans les produits qu'ils achètent (Ramesh & Jarke, 2001).

2.3 LA TRAÇABILITÉ DANS L'INDUSTRIE DES ACTIFS BÂTIS

La mise en œuvre de systèmes d'information et de pratiques permettant la traçabilité dans l'industrie des actifs bâtis varie en fonction de la région, du secteur et de l'application spécifique. En général, l'industrie a été relativement lente à adopter ces systèmes et pratiques par rapport à d'autres industries (Hackitt, 2018, Watson et al., 2019). L'une des raisons en est la fragmentation notoire du secteur (Brandín & Abrishami, 2021). L'industrie des actifs bâtis est composée de diverses parties prenantes qui ont chacune leur propre ensemble d'exigences et de normes. Par conséquent, la mise en œuvre de la traçabilité et de la transparence tout au long

de la chaîne d'approvisionnement peut s'avérer un processus complexe et difficile. L'absence d'une approche normalisée est une autre raison de la lenteur de l'adoption. Contrairement à d'autres secteurs, tels que l'alimentation ou les produits pharmaceutiques, il n'existe pas de système, de lignes directrices ou de normes universellement reconnus pour le suivi et la traçabilité des matériaux de construction et des composants (Katenbayeva et al., 2017). En outre, la littérature académique sur la traçabilité dans l'industrie des actifs bâtis est limitée, ce qui entraîne une mauvaise compréhension de la traçabilité dans l'industrie (Katenbayeva et al., 2017).

Bien que la traçabilité soit un domaine d'étude émergent dans l'industrie des actifs bâtis, elle a fait l'objet d'une attention croissante ces dernières années en raison de son potentiel d'amélioration de la transparence dans la chaîne d'approvisionnement, de la gestion de la qualité et de la durabilité. Certaines organisations ont élaboré des normes, des réglementations et des lignes directrices pour le suivi et la traçabilité des matériaux et des produits de construction, comme le Building Research Establishment (BRE) au Royaume-Uni (BRE Global Ltd, 2014) et la Supply Chain Sustainability School du Green Construction Board (Norton et al., 2014). En 2014, le BRE a établi les exigences de la norme BES 6001 (figure 4) pour l'approvisionnement responsable en produits de construction, qui prend en compte des facteurs tels que les impacts environnementaux et sociaux, l'approvisionnement éthique et la gestion de la chaîne d'approvisionnement. La norme couvre une large gamme de produits de construction, y compris les métaux, le bois, les agrégats et les matériaux d'isolation. La traçabilité est un élément important de la norme BES 6001, car elle permet de garantir que les produits de construction utilisés proviennent d'une source responsable et durable. La norme BES 6001 exige que les entreprises de construction démontrent la traçabilité de leurs produits en identifiant les sources des matières premières, ainsi que les fournisseurs impliqués dans la production et la livraison des produits finis. Cela inclut l'identification de tout risque environnemental ou social potentiel associé à l'approvisionnement des matériaux, comme la déforestation, les violations des droits de l'homme ou d'autres pratiques non durables (BRE Global Ltd, 2014).

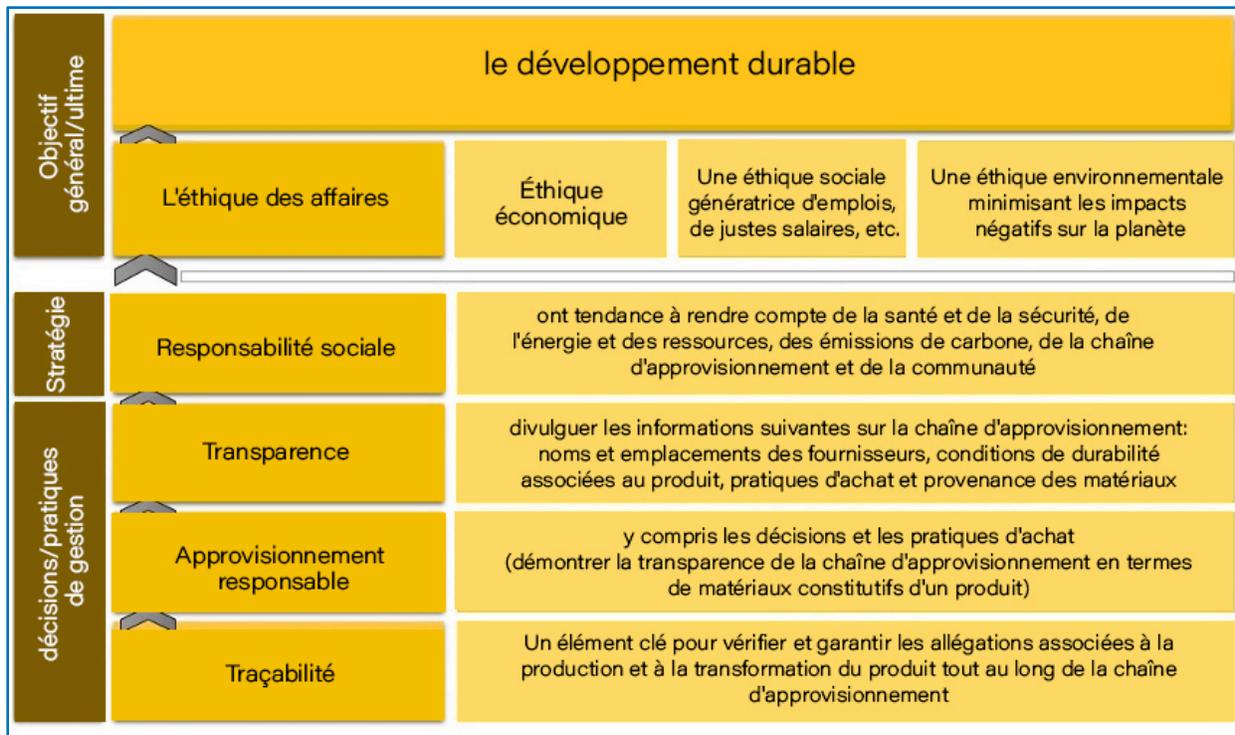


Figure 3: Concepts clés liés à la traçabilité pour le développement durable (adapté de Katenbayeva et al. (2017))

La numérisation joue un rôle important pour permettre la traçabilité des produits de construction dans le contexte de la norme BES 6001. Les entreprises peuvent établir un registre complet et précis de l'origine et du mouvement de leurs produits de construction grâce à des outils et processus numériques (Hackitt, 2018). Il s'agit notamment de capturer et de mettre à disposition des données sur la source des matières premières, de rationaliser les processus et de réduire le temps et les efforts nécessaires à la collecte et à la gestion de toute information pertinente sur le produit et la chaîne d'approvisionnement. En ce qui concerne les réglementations actuelles, dans l'Union européenne (UE), le Règlement sur les produits de construction (RPC) exige que les produits de construction soient traçables tout au long de leur chaîne d'approvisionnement, des matières premières au produit fini (AEE, 2011). Le RPC exige également que les produits soient accompagnés d'une déclaration de performance (DP) qui fournit des informations sur les caractéristiques de performance du bien, telles que la résistance au feu et la résistance mécanique. Aux États-Unis, l'Agence de protection de l'environnement (EPA) exige que les entrepreneurs réalisant des projets de rénovation, de réparation et de peinture touchant la peinture à base de plomb dans les habitations, les établissements de garde d'enfants et les écoles construites avant 1978 suivent des pratiques spécifiques pour prévenir la contamination par le plomb (Wright, 2020). Il s'agit notamment de tenir un registre des pratiques de travail utilisées sans danger pour le plomb dans le cadre de chaque projet. En outre, certains programmes de certification volontaire, tels que Leadership in Energy and Environmental Design (LEED), encouragent la traçabilité en accordant des points pour l'utilisation de matériaux à contenu recyclé, l'approvisionnement durable et la transparence dans la communication des impacts environnementaux et sociaux du produit (Sarsam, 2015). D'autres initiatives sont notables, tel que le Living Building Challenge (LBC) qui propose une certification basée sur la performance des projets, évaluant l'aspect matériaux par des principes d'approvisionnement responsable et local, l'évaluation des impacts carbone, et encourage l'effort de gestion de fin de vie des matériaux.

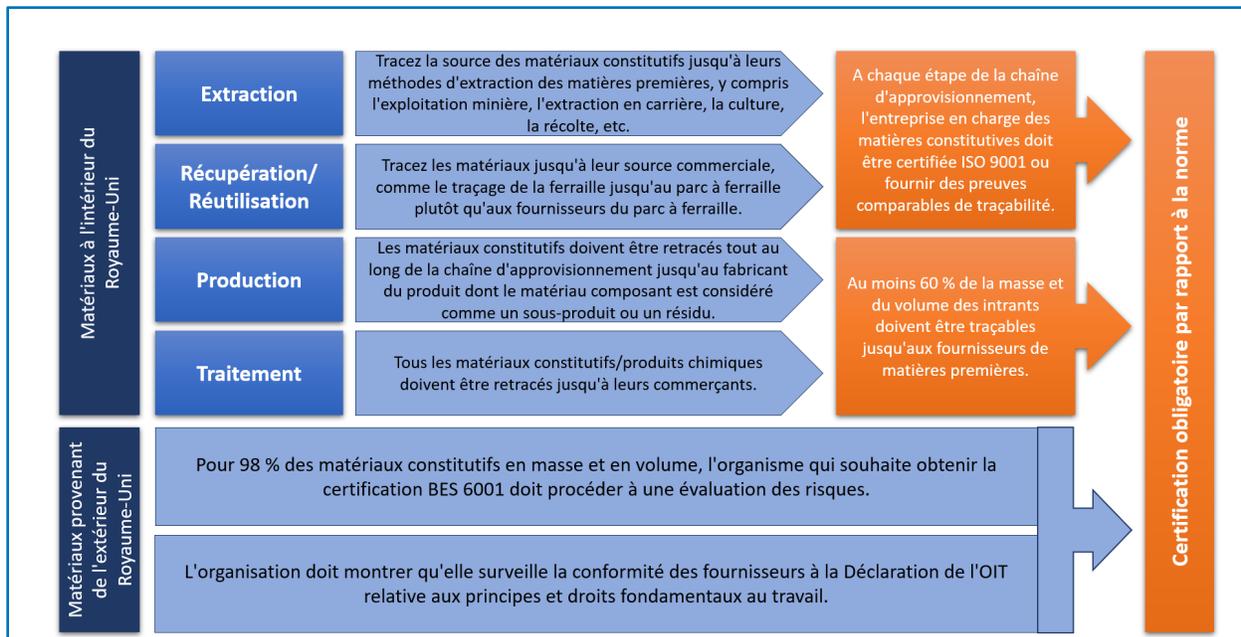


Figure 4: Traçabilité dans le secteur de la construction - Norme BES 6001, développée par BRE au Royaume-Uni (adoptée de BRE Global Ltd (2014))

En matière de traçabilité des exigences, Watson et al. (2019) ont proposé un cadre de traçabilité des exigences (figure 4) soutenant la traçabilité des exigences en lien avec les matériaux et produits de construction tout au long de leur cycle de vie. Le cadre est conçu pour permettre un enregistrement précis et fiable de chaque unité de ressource traçable (UTR), des exigences aux chaînes d'utilisation. Une UTR peut être une unité de matériau, un composant ou un produit fini auquel est attribué un identifiant unique (par exemple un code-barres ou un numéro de série) et qui est enregistré au fur et à mesure de son passage dans les différentes chaînes. Cet identifiant unique peut être utilisé pour obtenir des données sur l'origine, la transformation, le transport, le stockage et la distribution de l'UTR (Karlsen et al., 2013). Comme les UTR peuvent se trouver dans les chaînes physiques et d'information d'un bien, l'enregistrement numérique se produit à des moments clés qui sont indiqués comme "événements traçables" dans la figure 5. Il est essentiel de comprendre les relations entre ces événements traçables, car cela permet aux parties prenantes d'avoir une vision plus large de l'ensemble des processus et des activités des différentes chaînes. Plus récemment, l'application de fils numériques (Digital Thread (DTH) en anglais) a permis de relier et d'harmoniser de manière transparente plusieurs UTR à travers les différentes étapes du cycle de vie (Pang et al., 2021).

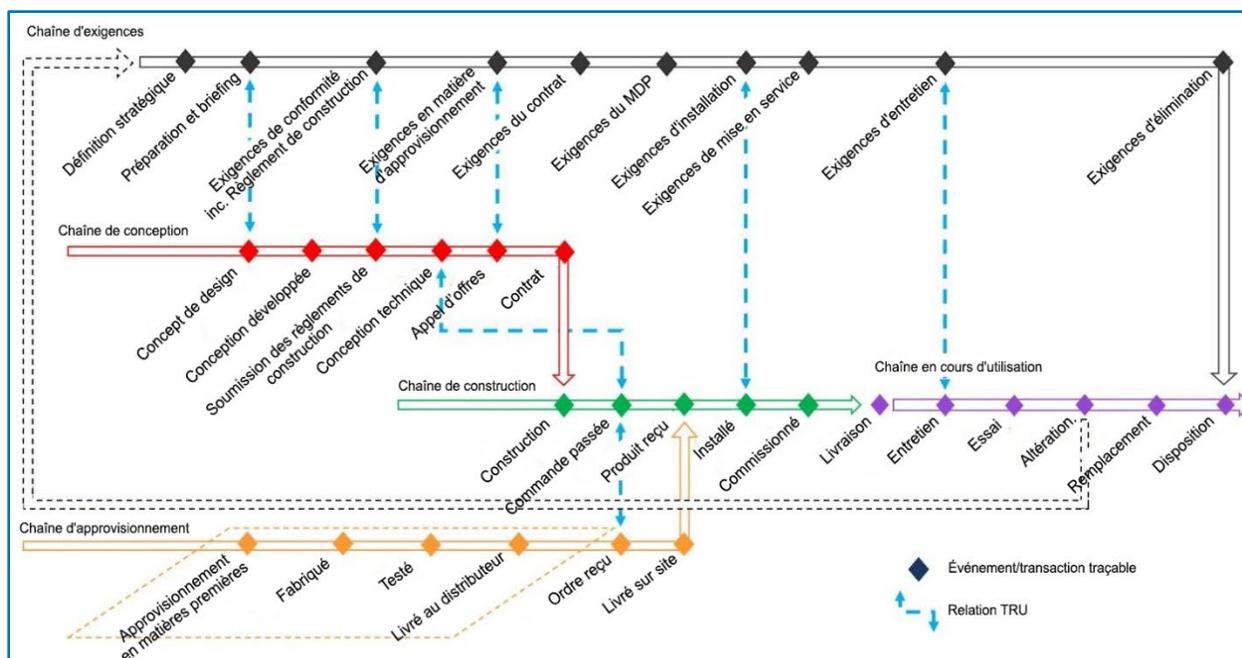


Figure 5: Cadre de traçabilité des exigences dans la construction (tiré de Watson et al. (2019) [Traduction libre])

Dans l'ensemble, l'amélioration de la traçabilité dans l'industrie des actifs bâtis nécessite une approche à multiples facettes qui implique diverses parties prenantes tout au long de la chaîne d'exigences, de la chaîne de conception, de la chaîne de construction, de la chaîne d'approvisionnement et de la chaîne d'utilisation. De nombreux chercheurs et praticiens industriels se sont accordés sur certaines actions nécessaires, telles que l'établissement de normes et de lignes directrices claires (Katenbayeva et al., 2017), l'adoption de technologies numériques innovantes (par exemple les systèmes de blockchain) (Brandín & Abrishami, 2021), l'encouragement de la collaboration et de la communication entre les parties au projet (Karlsen et al., 2013), le suivi et la vérification réguliers des performances de la chaîne d'approvisionnement (Pinheiro, n.d.), etc. Cependant, il manque encore une compréhension globale de ces actions et de la manière dont elles doivent être menées dans le développement d'une approche commune de la traçabilité pour soutenir l'application des principes de l'EC dans l'industrie des biens construits. En effet, en tant que champ d'étude naissant, il est nécessaire d'approfondir les recherches sur les principes et les composants fondamentaux qui sous-tendent le concept de traçabilité dans l'industrie des actifs bâtis afin de permettre la traçabilité des données et des informations sur les matériaux et les produits au sein de l'industrie des actifs bâtis et de faciliter sa transition vers un avenir circulaire et durable.

3. Le projet de recherche

3.1 OBJECTIF DE RECHERCHE

L'objectif principal de cette recherche était de développer un cadre de traçabilité des matériaux et des informations sur les produits en formalisant le concept de fil numérique pour soutenir la circularité dans l'industrie des actifs bâtis et de piloter sa mise en œuvre. Les sous-objectifs du projet de recherche sont les suivants :

- Caractériser la traçabilité des matériaux et de l'information et son rôle dans la mise en place d'une économie circulaire dans l'environnement bâti ;
- Identifier les obstacles et les défis à cette traçabilité ;
- Identifier des stratégies supportant la traçabilité via la définition de cas d'usages;
- Formaliser les processus et les pratiques soutenant ces stratégies de mise en œuvre auprès de l'ensemble des parties prenantes;
- Déployer un écosystème informationnel permettant la capture, la gestion, la réutilisation et assurant la pérennité des données et de l'information afin de faciliter la traçabilité des produits et des matériaux de construction.

Pour atteindre cet objectif, le concept de traçabilité et son rôle dans la mise en place d'une économie circulaire ont été définis, développés et encadrés par une série d'activités de recherche et d'ateliers avec des experts de l'industrie. Ces activités sont expliquées dans les sections suivantes/

3.2 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

Le projet de recherche s'est déroulé sur une période de 28 mois, s'étalant de septembre 2021 à décembre 2023. Le projet a été mené par étapes en collaboration avec les membres de l'équipe solution 8A. Une série de 4 ateliers ont été tenus pour faire intervenir l'équipe solution et valider les résultats des travaux effectués par l'équipe de recherche. Les solutions développées ont été opérationnalisées dans le cadre d'une étude de cas. La Figure 6 illustre le déroulement du projet de recherche. Les activités effectuées à chaque étape sont discutées ci-dessous.

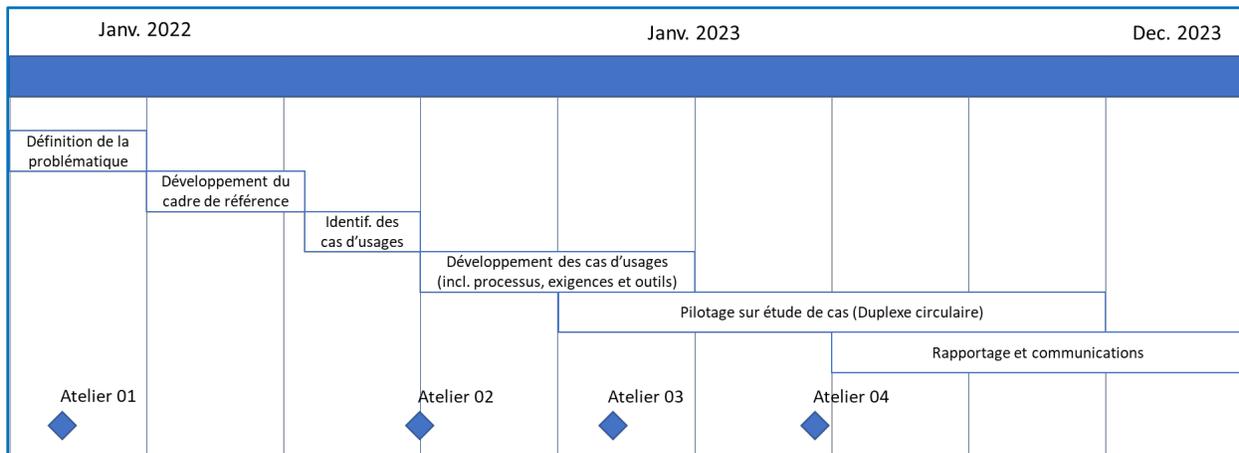


Figure 6: Déroulement du projet de recherche

3.3 Élaboration du cadre de traçabilité

La prise en compte de chaque dimension du modèle de référence de la traçabilité nécessite une articulation réfléchie des normes, des lignes directrices, des principes, des outils et des stratégies existants dans un cadre logique. À cette fin, l'équipe de recherche a procédé en quatre étapes pour définir les principaux éléments du cadre de traçabilité. Parallèlement, une série d'ateliers a été organisée et un large éventail de parties prenantes a été invité à fournir des informations sur les résultats obtenus à partir des sources de données existantes, les résultats potentiels et les applications du cadre de traçabilité, l'identification des cas d'utilisation et leur valeur dans l'industrie des actifs bâtis.

La première étape a consisté à comprendre le concept de traçabilité dans l'industrie des actifs bâtis et ses obstacles, tendances et potentiels actuels dans la littérature. Le premier atelier a été organisé pour présenter l'état de l'art aux participants et recueillir leurs commentaires sur l'importance de la traçabilité dans l'industrie des actifs bâtis et sur la manière dont un cadre de traçabilité peut potentiellement combler les lacunes de la recherche.

La deuxième étape a permis d'identifier les thèmes clés, les points communs et les potentiels dans les différentes sources. Il s'agissait notamment de procéder à un examen approfondi de la littérature pertinente, y compris (i) les normes et les lignes directrices d'organisations telles que l'ISO, la CEI et le CEN ; (ii) les lignes directrices et les meilleures pratiques d'associations industrielles et d'agences gouvernementales telles que le BAMP et le BRE ; et (iii) les études de cas et les exemples d'initiatives en matière de traçabilité dans l'industrie. Au cours du processus d'examen dans l'atelier 2, ces résultats ont été évalués de manière critique par l'équipe de recherche et les experts industriels afin de mettre en évidence les moteurs potentiels, les catalyseurs, les stratégies, etc.

Dans la troisième étape, tous les principes, stratégies, moteurs et facilitateurs significatifs ont été regroupés et liés au modèle de référence de la traçabilité afin de développer un cadre logique de traçabilité. La première version du cadre a été proposée lors du 3^e atelier avec des participants du lab construction et d'autres experts industriels de diverses disciplines. Sur la base des résultats de l'atelier 3, plusieurs pistes ont été discutées pour identifier le lien entre la traçabilité et l'EC, l'évaluation des données nécessaires pour permettre la traçabilité à travers les étapes du cycle de vie, et la manière dont le cadre de traçabilité peut permettre l'EC à travers ses composants définis.

Dans la dernière étape, la version finale et révisée du cadre de traçabilité a été présentée à des experts du lab construction et à des experts industriels impliqués dans le projet de recherche. Cette étape a permis d'identifier les applications potentielles et les cas d'usages du cadre pour les recherches futures. Le processus itératif de développement du cadre et les ateliers sont résumés dans la figure 7.

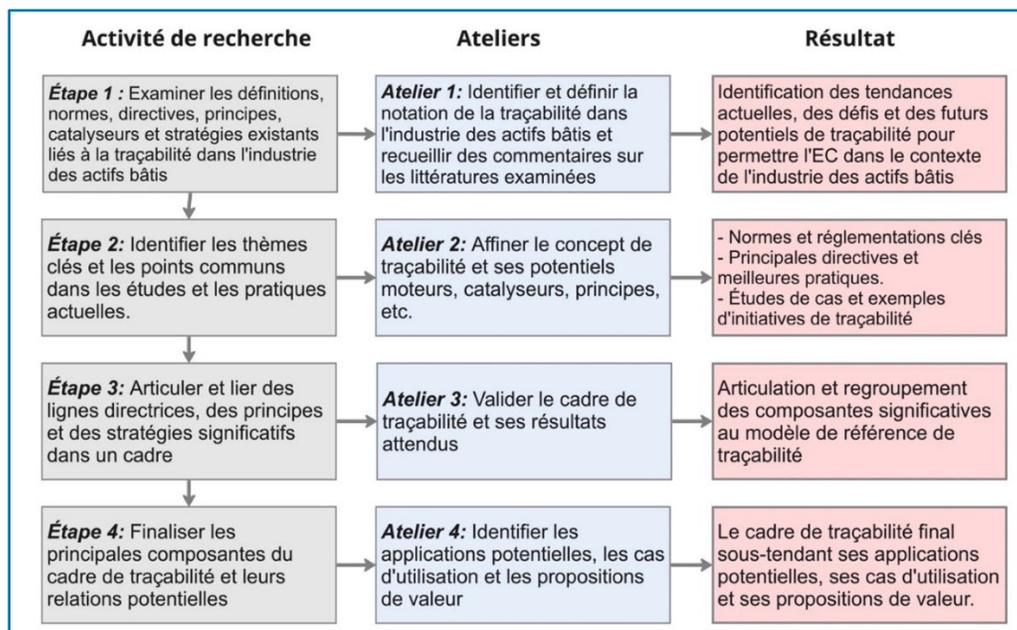


Figure 7: Résumé des principales activités de recherche et des ateliers organisés pour formuler le cadre de traçabilité.

3.4 CAS D'USAGES

Les cas d'usage ont été identifiés et développés en atelier avec l'équipe solution 8A lors d'un exercice de réflexion. À partir de différents scénarios, nécessitant une traçabilité, présentés dans le rapport BAMB (2018), l'objectif était de définir deux cas d'usages sur lesquels concentrer notre champ d'étude. Les différents scénarios, illustrés en Figure 8, ont été présentés et d'après l'expérience des professionnels de l'équipe, deux cas d'usages ont été déterminés comme pertinents pour une mise en pratique de la traçabilité.



Figure 8: Sélection de cas d'usages d'après différents scénarios

3.5 ÉTUDE DE CAS : LE DUPLEX CIRCULAIRE

L'étude de cas choisie est celui du 8278-8280 rue Foucher qui fait déjà l'objet d'un projet d'expérimentation au sein du lab construction du CERIEC, nommé « Duplex circulaire » (Figure 8). Il s'agit d'un projet de rénovation d'un duplex construit dans les années 1910 dans le quartier Rosemont, en appliquant les principes de l'EC. Le projet implique la rénovation du premier étage et du sous-sol.

Dans le contexte du projet, la firme d'architecture travaillant sur le projet désire développer et évaluer différents scénarios en fonction de leur indice de circularité, entre autres indicateurs. L'équipe de recherche a travaillé avec les membres de l'équipe de projet dans l'établissement du processus de modélisation et d'échange d'information pour supporter l'opérationnalisation du cadre et la mise en œuvre des cas d'usages. Dans le cadre de l'étude de cas, l'équipe de recherche a eu accès aux modèles BIM/Rhino, aux documents de projet ainsi qu'aux photos de l'existant.

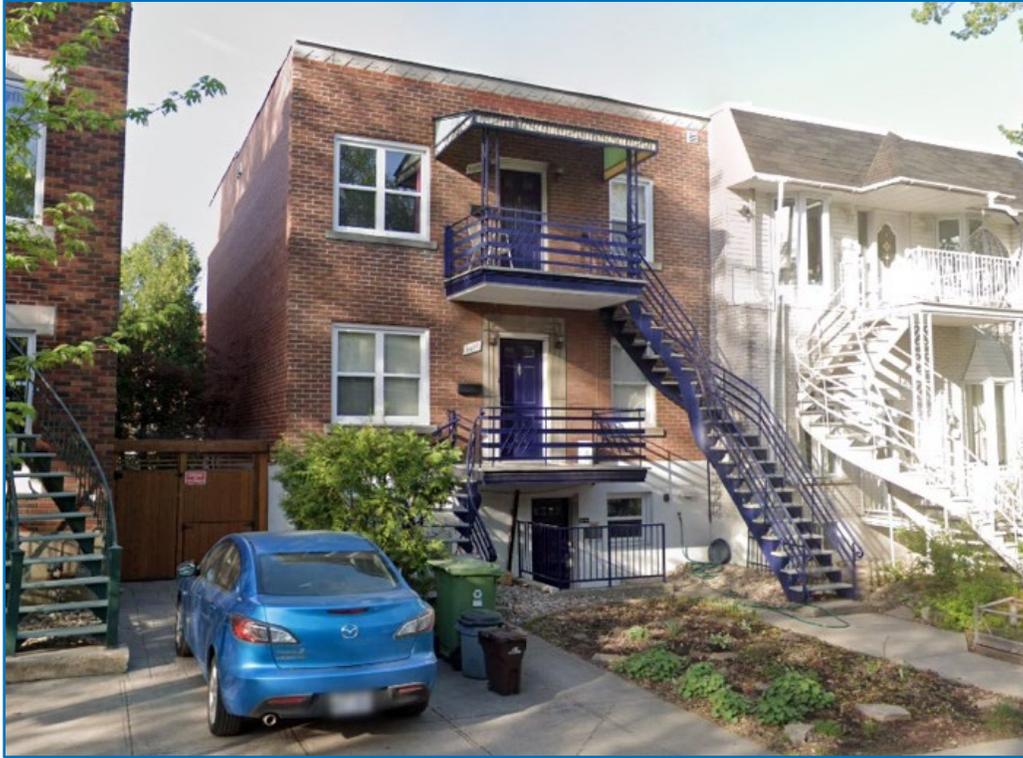


Figure 9: 8278-8280 rue Foucher (Source: Google maps, 2023)

4. Résultats

Les résultats de la recherche se déclinent en trois parties:

- Un cadre de référence permettant de bien cerner la notion de traçabilité des matériaux et des produits de construction et comment celle-ci supporte l'application des principes de l'économie circulaire en construction.
- L'identification et la définition des cas d'usages supportés par les technologies de l'information et des processus numériques pour faciliter la prise de décisions en lien avec l'application des principes de l'économie circulaire via la traçabilité des matériaux et des produits de construction.
- L'opérationnalisation de ces cas d'usage afin d'en tirer des leçons apprises et d'évaluer des pistes d'amélioration.

4.1 LE CADRE DE RÉFÉRENCE

Un cadre de référence permettant de bien cerner la notion de traçabilité des matériaux, des produits et des systèmes de construction et comment celle-ci supporte l'application des principes de l'économie circulaire en construction. Le cadre de traçabilité proposé articule les différentes composantes définissant la traçabilité et ses facteurs facilitant l'amélioration de la circularité de l'industrie des actifs bâtis. Basé sur le modèle de référence de la traçabilité proposé par Ramesh & Jarke (2001), le cadre explique toutes les dimensions pertinentes de la traçabilité. Bien que le modèle de référence de la traçabilité puisse être appliqué à différents domaines, il est important de comprendre comment il s'inscrit dans le contexte de l'industrie des actifs bâtis et quels sont les principes, les moteurs, les catalyseurs et les stratégies à prendre en compte pour faciliter la

circularité tout au long des étapes du cycle de vie d'un bien. Le résultat de cette contextualisation est défini par le cadre de traçabilité présenté à la Figure 10. Chaque composante du cadre est décrite ci-dessous et dans les sous-sections suivantes.

- **Pourquoi tracer?** Il s'agit des objectifs et des motivations de la traçabilité pour toutes les parties prenantes. Le cadre doit couvrir les besoins et les objectifs spécifiques des parties prenantes et expliquer pourquoi la traçabilité est nécessaire dans chaque cas. Parmi les motivations possibles de la traçabilité figurent l'amélioration du contrôle de la qualité, le respect des exigences réglementaires, l'accroissement de la transparence et de la responsabilité, le soutien des objectifs en matière de développement durable et d'environnement, et la réduction des risques et des responsabilités lors de la spécification, de l'achat, de l'installation et de la réutilisation ou du recyclage des produits et des matériaux.
- **Ce qui doit être tracé?** Il s'agit des matériaux, des produits ou des systèmes qui nécessitent une traçabilité, ainsi que des éléments de données qui doivent être tracés pour chaque élément. La détermination de ce qui doit être tracé peut-être influencée par divers facteurs, tels que les exigences réglementaires, les exigences spécifiques au projet et les besoins des parties prenantes.
- **Comment tracer?** Il s'agit des stratégies et des outils utilisés pour tracer et gérer les données, et de la manière dont les parties prenantes sont impliquées dans le processus. Le cadre doit fournir des orientations sur la manière dont les données sont saisies, gérées et partagées, et sur la manière dont les parties prenantes peuvent accéder aux données et les utiliser.
- **Qui s'occupe de la traçabilité?** Se réfère aux parties prenantes responsables de la mise en œuvre et du maintien de la traçabilité, et à la manière dont elles peuvent contribuer aux efforts de traçabilité et en bénéficier. Il s'agit des différents acteurs impliqués dans l'industrie des biens construits, tels que les concepteurs, les fabricants, les fournisseurs, les entrepreneurs et les propriétaires. Le cadre doit également fournir des conseils sur les rôles et les responsabilités de chaque partie prenante dans le processus de traçabilité.

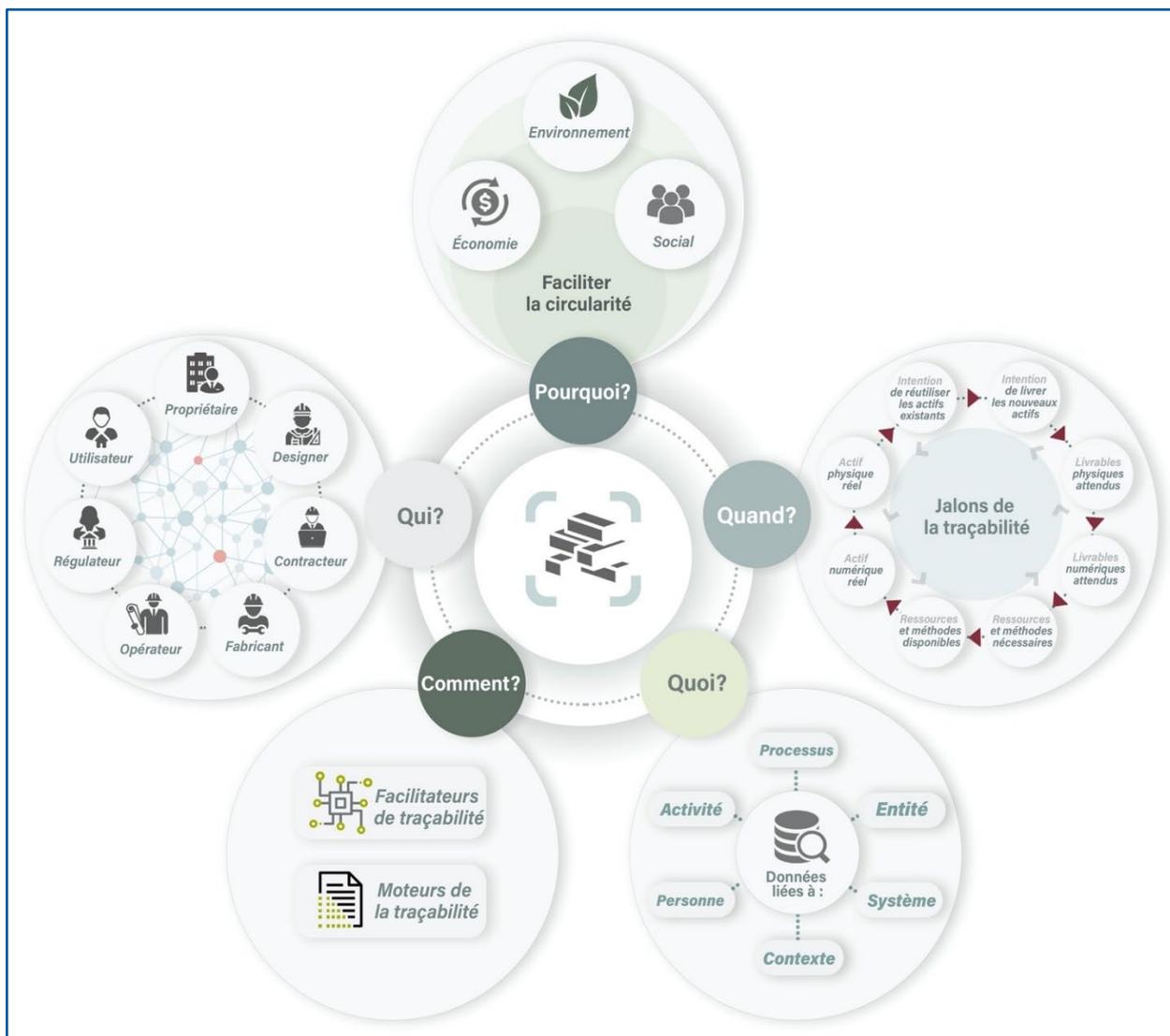


Figure 10: Le cadre de traçabilité pour l'industrie des actifs bâtis

- Quand tracer?** il s'agit des étapes ou des chaînes spécifiques du cycle de vie du bien où la traçabilité est nécessaire, ainsi que des contraintes de temps ou des délais qui peuvent s'appliquer. La traçabilité est un aspect essentiel à la fois dans la phase de conception et de planification ainsi que dans la phase de construction des biens construits. Pendant la phase de conception et de planification, la traçabilité garantit que les matériaux et les composants spécifiés sont conformes aux spécifications et aux normes requises. Elle facilite la sélection des matériaux, permettant de vérifier l'utilisation de matériaux respectueux de l'environnement dans les projets de construction durable ou la conformité à des réglementations strictes dans des domaines tels que la santé. De plus, la traçabilité contribue à identifier et à atténuer les risques potentiels dès le début, comme garantir l'utilisation de matériaux résistants aux séismes dans les zones à risque sismique, améliorant ainsi la résilience du projet. Dans la phase de construction, la traçabilité est un outil d'assurance qualité, vérifiant que les matériaux spécifiés sont effectivement utilisés, évitant les substitutions par des alternatives de moindre qualité. Elle garantit l'intégrité du projet, en particulier dans des structures telles que les immeubles de grande hauteur où la conformité des matériaux structuraux à la conception est primordiale. De plus, la

traçabilité soutient la surveillance de la chaîne d'approvisionnement, permettant de résoudre de manière proactive les retards ou les problèmes de livraison de matériaux, optimisant ainsi l'efficacité de la construction. La documentation fournie par la traçabilité est inestimable pour les approbations réglementaires, la maintenance future et la transparence globale du projet, améliorant la conformité en matière de sécurité et d'assurance. En somme, le déploiement stratégique de la traçabilité dans les deux phases garantit un bien construit réussi, conforme aux normes de qualité, aux exigences réglementaires et à l'intention de conception, tout en minimisant les risques et en maximisant l'efficacité.

4.1.1. Pourquoi : la proposition de valeur de la traçabilité dans le contexte du développement durable

Le potentiel de la traçabilité pour soutenir la circularité des produits et des matériaux et minimiser les impacts négatifs de l'environnement bâti sur l'environnement, l'économie et les aspects sociaux a fait l'objet de plusieurs études dans le passé. L'objectif principal de la traçabilité provient du fait qu'en permettant la transparence et l'approvisionnement responsable tout au long du cycle de vie d'un bien, la traçabilité peut contribuer à réduire les déchets, à améliorer l'efficacité des ressources et à garantir que les produits et les matériaux sont produits, fournis, construits et entretenus d'une manière éthique et responsable. En outre, l'une des valeurs potentielles de la traçabilité provient de la responsabilité et de la fiabilité des informations générées par les chaînes de valeur dans un contexte de traçabilité. Le plus souvent, les grandes entreprises peuvent éprouver des difficultés à obtenir des données adéquates et normalisées en ce qui concerne les principes de durabilité. Dans de telles circonstances, un système de traçabilité efficace permet de recueillir des informations précises et vérifiables sur l'origine, la composition et l'impact des produits et des matériaux tout au long du cycle de vie de l'actif. Une fois les données collectées et structurées, il devient plus facile de répondre aux exigences de durabilité en retraçant la seconde vie des produits et matériaux, en particulier dans le contexte de l'EC. Selon Durmiševic et al (2018), la réutilisation et la récupération inadéquates des matériaux et des produits sont souvent dues à un manque d'informations sur la composition actuelle des actifs bâtis, ainsi que sur leur emplacement, leur état et leur historique réels. La traçabilité offre ainsi aux parties prenantes un aperçu complet de l'état passé, actuel et futur des actifs bâtis, ce qui favorise une utilisation plus intelligente des produits et des matériaux et prolonge leur durée de vie.

Dans le cadre des ateliers de l'équipe solution 8A, un des exercices entrepris était de bien comprendre et cadrer la traçabilité d'un point de vue de la proposition de valeur qu'elle peut générer. Les membres de l'équipe étaient chargés de revoir et de prioriser des énoncés de proposition de valeur développés dans le rapport BAMB (2018). La Figure 11 illustre les énoncés de proposition de valeur ainsi que leur priorisation par l'équipe solution 8A.

À l'issue de cet exercice, la proposition de valeur pour la traçabilité des matériaux, produits et systèmes retenue par l'équipe solution était la suivante : « Générer des gains d'efficacité dans la gestion des données en décrivant l'emplacement, la quantité, le type, le contenu et le potentiel de réutilisation des produits, des composants et des matériaux ».



Figure 11: Énoncés de proposition de valeur priorisés par l'équipe solution 8A

En parallèle, l'équipe solution a discuté et analysé des propositions de valeur ciblées pour les passeports matériaux. La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** illustre les énoncés de proposition de valeur ciblés pour les passeports matériaux priorisés par l'équipe solution 8A. À l'issue de cet exercice, cette proposition de valeur portée sur la mise en œuvre des passeports matériaux était la suivante : « Améliorer le potentiel de réutilisation et de recyclage des produits et des matériaux à chaque étape du cycle de construction en fournissant des données permettant de définir et d'optimiser les produits »



Figure 12: Énoncés de proposition de valeur ciblés pour les passeports matériaux priorisés par l'équipe solution 8A

Comme démontré, la traçabilité supporte plusieurs finalités. En plus des propositions de valeur identifiées ci-dessus, les différentes parties prenantes impliqués dans le cycle de vie d'un actif bâti peuvent implanter des stratégies de traçabilité afin d'opérationnaliser des stratégies des «10 R » d'ÉC, telles qu'elles sont énumérées dans la Figure 13. Dans l'ensemble, le développement durable peut être considéré comme l'objectif ultime de la traçabilité dans l'industrie des actifs bâtis. Par conséquent, l'objectif de tout système de traçabilité devrait directement ou indirectement répondre aux préoccupations environnementales, financières et humaines en vertu des principes de durabilité (Morseletto, 2020).

Utilisation et fabrication plus intelligentes des produits	R0	Refuser	Rendre le produit redondant en abandonnant sa fonction ou en proposant la même fonction avec un produit radicalement différent
	R1	Repenser	Rendre l'utilisation des produits plus intensive (par exemple en partageant des produits ou en mettant sur le marché des produits multifonctionnels).
	R2	Réduire	Accroître l'efficacité de la fabrication ou de l'utilisation des produits en consommant moins de ressources naturelles
Prolonger la durée de vie du produit et de ses pièces	R3	Réutiliser	Réutilisation par un autre consommateur d'un produit mis au rebut encore en bon état et remplissant sa fonction d'origine
	R4	Réparer	Réparation et entretien du produit défectueux afin qu'il puisse être utilisé avec sa fonction d'origine
	R5	Rénover	Restaurer un ancien produit et le mettre à jour
	R6	Refabriquer	Utiliser des pièces d'un produit mis au rebut dans un nouveau produit ayant la même fonction
	R7	Reconvertir	Utiliser des produits mis au rebut ou sa partie dans un nouveau produit avec une fonction différente
Application utile des matériaux	R8	Recycler	Traiter les matériaux pour obtenir la même qualité (qualité supérieure) ou une qualité inférieure (qualité inférieure)
	R9	Récupérer	Incineration de matériel avec récupération d'énergie

Figure 13: Stratégies R en ÉC (adapté de Morseletto [60])

4.1.2. **Quoi : Les principaux types de données permettant la traçabilité**

La traçabilité des produits et des matériaux est associée au suivi du flux d'informations à travers un système ou un processus complexe, et à la visibilité des relations entre les différents éléments des actifs. Cela permet de s'assurer que les produits sont fabriqués conformément aux spécifications requises, que les exigences réglementaires sont respectées et que les problèmes ou les défauts peuvent être retracés jusqu'à leur source. Les données qui permettent la traçabilité peuvent être classées en six catégories : (i) entités ; (ii) processus ; (iii) activités ; (iv) systèmes ; (v) contexte ; et (vi) acteurs.

Les entités, telles que les produits, les composants ou les matériaux, sont généralement incluses dans le système afin de suivre leur mouvement et leur emplacement et de s'assurer qu'elles répondent aux exigences définies. Les processus et les activités sont suivis afin d'identifier les étapes de la production ou de la livraison

d'un produit et de s'assurer que chaque étape est correctement réalisée. Les systèmes peuvent également être retracés afin d'identifier les dépendances entre leurs éléments constitutifs et de s'assurer que les modifications apportées à une partie du système n'ont pas de conséquences imprévues sur les autres parties. Les données relatives aux acteurs sont des informations sur les personnes, les organisations ou leurs relations qui participent à la fourniture ou à la réalisation de projets, au traitement ou à l'utilisation du produit ou de l'entité faisant l'objet de la traçabilité. Il peut s'agir d'informations relatives à l'identité des acteurs, à leurs rôles et responsabilités, et à leurs interactions avec d'autres acteurs ou avec le système, l'entité et les processus. Enfin, les données contextuelles peuvent permettre à un système de traçabilité de fournir des informations précieuses sur les facteurs externes qui ont une incidence sur les performances et la qualité du système. Par exemple, la traçabilité des données contextuelles relatives à la demande des utilisateurs peut aider à identifier les domaines dans lesquels les matériaux et les produits doivent être optimisés, ou la traçabilité des données relatives à la conformité réglementaire peut aider à bien répondre à toutes les normes et exigences pertinentes. Outre ces principaux éléments de données, d'autres données peuvent être tracées dans un système de traçabilité, notamment les exigences, les spécifications, les résultats des tests et les dossiers d'audit.

4.1.3. Quand : Le rôle de la traçabilité à travers les étapes du cycle de vie

La traçabilité joue un rôle crucial à chaque étape du cycle de vie du bien, de l'intention de fournir un nouveau bien à l'intention de réutiliser un bien existant. Selon Succar et Poirier (Succar & Poirier, 2020), les informations se transforment en huit étapes tout au long du cycle de vie d'un bien, dans l'ordre suivant : [1] intention de fournir un nouveau bien ; [2] livrables physiques attendus ; [3] livrables numériques ciblés ; [4] ressources et méthodes nécessaires ; [5] ressources et méthodes disponibles ; [6] biens numériques réels ; [7] biens physiques réels ; et [8] intention de réutiliser un bien existant. Dans le contexte du présent document, les informations peuvent être tracées depuis l'exploration initiale des actifs nécessaires, la spécification de leurs livrables physiques et numériques, l'identification des ressources et des méthodes à déployer, jusqu'à la livraison de l'actif réel et des stratégies R potentielles (par exemple, réutilisation, recyclage, remise à neuf, etc). BRE (BRE Global Ltd, 2014) et ISO 9001 ont souligné le rôle de la traçabilité au stade de la fin de vie d'un actif en fournissant l'historique de l'actif, de ses composants et de son état fonctionnel et technique. Ces informations sont essentielles pour prendre des décisions éclairées sur les stratégies de réutilisation et de recyclage les plus appropriées pour les produits et les matériaux (Kedir et al., 2021), et pour garantir que le processus est mené de manière circulaire et responsable.

Il existe plusieurs façons de garantir la traçabilité à tous les stades du cycle de vie. Selon Pinheiro (Pinheiro, n.d.), les produits et les matériaux peuvent être tracés soit vers l'avant, soit vers l'arrière. La traçabilité en amont est la capacité à suivre le flux de matériaux et de produits dans le temps, depuis la phase d'exigence jusqu'à l'utilisation finale du bien construit. Cela permet d'étudier l'impact des changements et de s'assurer que les matériaux et les produits utilisés dans la construction du bien répondent aux normes de qualité, de sécurité et d'environnement souhaitées. La traçabilité ascendante, quant à elle, consiste à suivre le flux de matériaux et de produits en remontant dans le temps, depuis l'utilisation finale du bien construit jusqu'à leur origine et leurs exigences initiales. La traçabilité en amont permet aux utilisateurs de révéler toutes les informations historiques associées à un produit ou à un matériau. Cela s'avère particulièrement utile dans le cas de projets de rénovation et de réhabilitation, lorsque tous les enregistrements numériques peuvent être utilisés pour étayer les décisions relatives à la réutilisation ou au recyclage des matériaux et produits existants.

4.1.4. Qui : Une collaboration et une coordination efficaces

L'industrie des actifs bâtis est complexe et implique de multiples acteurs aux compétences variées. Le manque de coordination, qui résulte d'une incapacité à partager les données et les connaissances entre les acteurs, la propriété peu claire des activités spécifiques soutenant la traçabilité, l'absence de processus de collaboration normalisés et la résistance au changement des équipes de développement ont été signalés comme l'un des principaux obstacles à la mise en œuvre efficace des solutions de traçabilité dans l'industrie des actifs bâtis (Brandín & Abrishami, 2021), (Ramesh, 2002), (Wohlrab et al., 2020). Il est essentiel de comprendre le réseau de relations entre les acteurs, car cela accroît la transparence, la confiance et la responsabilité dans les phases du cycle de vie, et permet d'identifier et de résoudre les problèmes d'EC (Garcia-Torres et al., 2019). Dans la pratique, les informations permettant la circularité peuvent être tracées et utilisées par les utilisateurs stratégiques de la traçabilité et les utilisateurs opérationnels de la traçabilité (Ramesh & Jarke, 2001), (Pinheiro, n.d.). En général, les utilisateurs stratégiques de la traçabilité s'intéressent aux questions de gestion, par exemple un directeur d'installation qui détermine quelles informations doivent être tracées et par qui, ou un régulateur qui cherche à se conformer à toutes les réglementations applicables liées à la circularité, y compris les réglementations sur la gestion des déchets, les exigences de la REP (responsabilité élargie du producteur), et les normes de recyclage. Les utilisateurs de la traçabilité opérationnelle sont plus intéressés par les questions techniques au sein d'un système, d'un processus ou d'une activité de traçabilité. Par exemple, un coordinateur qui documente la transformation des exigences en conception et simulation, ou un fabricant qui décompose les propriétés de conception d'un composant à des fins de fabrication.

Il existe plusieurs moyens d'encourager les acteurs de la traçabilité à collaborer et à se coordonner activement:

- Vision et objectifs communs : Développer une vision commune et un ensemble d'objectifs pour le projet de traçabilité qui s'alignent sur les objectifs d'EC de toutes les parties prenantes impliquées (O. Gotel et al., 2012).
- Communication et partage de l'information : Favoriser des canaux de communication ouverts et efficaces et la gestion des connaissances du processus entre les parties prenantes et partager les informations pertinentes sur le projet de traçabilité et ses progrès (Ramesh, 2002).
- Incitations et avantages : Identifier et communiquer les incitations et les avantages pour tous les membres du projet qui découlent de la mise en œuvre réussie de la traçabilité, tels que l'amélioration de l'efficacité, les économies de coûts et l'amélioration de la réputation (Liu, 2022).
- Renforcement des capacités et formation : Offrir des possibilités de renforcement des capacités et de formation aux acteurs du cycle afin d'améliorer leurs connaissances et leurs compétences en matière de traçabilité et d'EC (Liu, 2022), (Mejías et al., 2019).
- Normalisation et certification : Promouvoir l'adoption de systèmes de normalisation et de certification pour les systèmes de traçabilité afin d'accroître la confiance et l'acceptation de la technologie parmi les parties prenantes (Katenbayeva et al., 2017), (Rival et al., 2016).
- Amélioration et évaluation continues : Évaluer en permanence le système de traçabilité et son impact sur les objectifs de l'EC et utiliser le retour d'information pour améliorer le système et accroître l'adhésion des parties prenantes (Dömges & Pohl, 1998).

Bien que ces exemples puissent contribuer à combler les lacunes en matière de collaboration entre les acteurs de la traçabilité, l'importance de la traçabilité doit également être activement promue et enseignée. Cela permet de sensibiliser les acteurs du projet à la traçabilité et de les aider à prendre des décisions efficaces dans diverses circonstances.

4.1.5. Comment : Facilitateurs et moteurs de la traçabilité

Si les entreprises et les organisations décident de mettre en œuvre des pratiques de traçabilité, elles doivent trouver des moteurs et des facilitateurs efficaces pour soutenir tout processus ou activité de traçabilité (Karlsen et al., 2013). Il est essentiel, avant toute mise en œuvre, de comprendre comment les informations doivent être tracées et liées aux multiples composantes d'un système de traçabilité. Comme indiqué, un grand nombre de publications ont souligné le rôle des passeports de matériaux pour permettre la circularité par le biais de systèmes de traçabilité (Kedir et al., 2021), (Holla, 2017), (Walden et al., 2021). Les passeports matériaux catégorisent en particulier les informations traçables (comme le montre la figure 1) liées aux propriétés des matériaux de construction, et guident les acteurs de la traçabilité vers les données qui doivent être tracées à l'aide d'étiquettes RFID, de codes-barres, d'identifiants uniques, etc. (Heinrich & Lang, 2019). En outre, l'utilisation de modèles de données de produits (PDT) décrit les propriétés détaillées des produits d'une manière qui peut être tracée jusqu'à une source crédible. Les PDT peuvent également contribuer à garantir la qualité et la sécurité des produits en fournissant des informations sur leurs processus de conception et de fabrication. Ces informations peuvent être utilisées pour identifier les dangers et les risques potentiels associés à un produit, ainsi que pour contrôler le respect des réglementations et des normes applicables (Alani et al., 2021). Les PDT deviennent des fiches de modèle de produit (PDS) lorsqu'elles servent de base à la création d'un modèle de produit spécifique pour un produit particulier (Lucky et al., 2019). En utilisant une PDS, les concepteurs et les ingénieurs peuvent s'assurer que toutes les informations nécessaires sur un produit sont incluses, telles que ses dimensions, son poids, ses matériaux, ses processus de fabrication et d'autres données pertinentes. Les PDT et les PDS servent tous deux la traçabilité en tant que cadre commun pour gérer les données les plus récentes et fournir des sources de données transparentes et crédibles.

Dans le contexte de l'EC, la BIM joue un rôle crucial pour accumuler des informations sur le cycle de vie des bâtiments de manière partagée et collaborative (Eadie et al., 2013). Dans les projets de construction traditionnels, il était très difficile de remonter à la source des problèmes de qualité ou des défauts. En cas de problème, il n'est pas toujours évident de déterminer la partie responsable, ce qui entraîne des litiges entre les parties prenantes du projet. Ce manque de responsabilité entraînait des retards et des coûts supplémentaires. L'intégration des PPM dans l'environnement BIM permet de documenter la composition des matériaux, de représenter les matériaux et les produits intégrés dans les actifs bâtis et de montrer diverses combinaisons de conception pour les potentiels de réutilisation ou de recyclage (Honic, Kovacic, & Rechberger, 2019). L'utilisation d'un PPM basé sur le BIM fournit aux acteurs de la traçabilité une base de données centralisée composée de toutes les données pertinentes décrites dans la section 4.2. Pour surmonter les éventuels problèmes d'interopérabilité, l'openBIM est une approche collaborative qui favorise l'échange transparent d'informations entre les parties prenantes, quels que soient les logiciels et les systèmes qu'elles utilisent (Jiang et al., 2019). À la base, l'openBIM peut contribuer à la traçabilité des produits et des matériaux en permettant une meilleure communication, un partage des données et une transparence accrue, ainsi qu'une collaboration entre les parties prenantes impliquées dans une pratique de traçabilité.

Une utilisation appropriée des technologies de l'information est un autre aspect important qui devrait être bien planifié dès les premières phases de tout projet de traçabilité. De nombreuses études ont mis l'accent sur les avantages de l'utilisation de technologies intelligentes telles que la chaîne de blocs (BC), l'Internet des objets (IoT), l'intelligence artificielle (IA) et les jumeaux numériques (DT) (Brandín & Abrishami, 2021), (Ademujimi et al., 2017). Bien que ces technologies puissent être déployées à différentes phases d'un projet de traçabilité, l'effort nécessaire pour traiter, relier et gérer un grand volume de données au sein d'un système de traçabilité est resté un défi (Brandín & Abrishami, 2021).

L'une des solutions prometteuses pour relier les informations traçables provenant de systèmes et de sources disparates tout au long des phases du cycle de vie, comblant ainsi le déficit d'information et de collaboration, est le concept des fils numériques (DTH) (Kwon et al., 2020a). (Kwon et al., 2020b). Le concept de DTH a récemment reçu l'attention de l'industrie et du monde universitaire en tant qu'approche axée sur les données soutenues par des technologies intégrées, en particulier pour la gestion du cycle de vie des produits (PLM) et la fabrication additive (Singh & Willcox, 2018). La caractérisation du DTH selon les principes de l'EC peut aider à surmonter divers obstacles et défis en matière de traçabilité associés à la transparence dans la chaîne d'approvisionnement, à la capture de données en temps réel, à la visibilité des processus (par exemple, logistique, transport), à la prise de décision dans l'incertitude et à l'optimisation des processus et des produits tout au long des phases du cycle de vie (David et al., 2021). De plus, la DTH peut être déployée pour faciliter les principes de circularité, tels que caractérisés par les PPM, qui comprennent les exigences en matière de données sur les matériaux, l'équilibre entre les intrants et les extrants industriels, l'analyse de la chaîne de processus, la gestion des ressources, etc. (Kedir et al., 2021). L'application de la DTH pour relier les informations traçables à toutes les étapes du cycle de vie permet de garantir l'exactitude, l'exhaustivité et l'intégrité des données relatives au développement, à la fabrication et à l'utilisation des produits. En permettant la saisie, l'intégration et l'analyse des données tout au long du cycle de vie des actifs, les DTH offrent aux entreprises une vue d'ensemble de leurs produits et les aident à identifier les domaines à améliorer et à prendre de meilleures décisions. En outre, le DTH est capable de relier et d'harmoniser de multiples entrées de données stockées dans des bases de données décentralisées ou des plateformes blockchain dans des systèmes de traçabilité des matériaux et des produits. En conduisant les données et les informations le long du DTH, les acteurs de la traçabilité n'auraient pas besoin de se souvenir de tous les liens qui ont été faits à l'information et pourraient suivre une chaîne de liens qui va au-delà du point initial d'un processus de traçabilité (Pinheiro, n.d.). Bien que les avantages de la DTH deviennent évidents, il est encore difficile d'agréger correctement un grand volume de données dispersées générées par de multiples utilisateurs et de les transformer en un format unifié ou normalisé (Pang et al., 2021). Ces questions de traitement des données et d'interopérabilité doivent être approfondies pour exploiter pleinement le potentiel de la DTH à des fins de traçabilité. Bien que différentes solutions aient été développées pour mettre en œuvre certaines parties du principe de DTH, à savoir les principes openBIM et les PDT, des travaux supplémentaires sont nécessaires pour promouvoir leur développement et leur adoption.

4.2 LES CAS D'USAGES

La deuxième partie du projet implique l'identification et la définition des cas d'usages supportés par les technologies de l'information et des processus numériques pour faciliter la prise de décisions en lien avec l'application des principes de l'économie circulaire via la traçabilité des matériaux et des produits de construction. L'opérationnalisation de ces cas d'usage permettent de rencontrer les propositions de valeur ciblées par l'équipe solution. De façon similaire à la proposition de valeur, les cas d'usage ont été tirés du rapport BAMB (2018) et puis priorisés par l'équipe solution (Figure 14).



Figure 14: Cas d'usages priorités par l'équipe solution 8A

À la suite de cet exercice, les deux cas d'usage suivants ont été ciblés par l'équipe solution :

- Le produit est retiré du bâtiment, remis à neuf, puis utilisé dans un autre bâtiment.
- L'agrégation des passeports matériaux est effectuée à différentes fins, par exemple en fonction des produits, des bâtiments et des propriétés.

Chaque cas d'usage a par la suite été développé afin d'identifier les objectifs spécifiques, les tâches, les intrants et livrables attendus des activités soutenant le cas d'usage. Les deux cas d'usage sont décrits ci-dessous.

4.2.1 Cas d'usage 01

Ce cas d'usage vise à supporter la prise de décision quant à l'utilisation de matériaux et de produits de construction en permettant de calculer les indicateurs de circularité et en identifiant les options de réutilisation potentielles pour les projets de construction. Après avoir identifié le produit ciblé, le calcul des circularités des matériaux et des produits s'effectue à travers trois cycles principaux (Figure 15): (1) Cycle de désassemblage; (2) Cycle de rénovation; et (3) cycle de réutilisation.

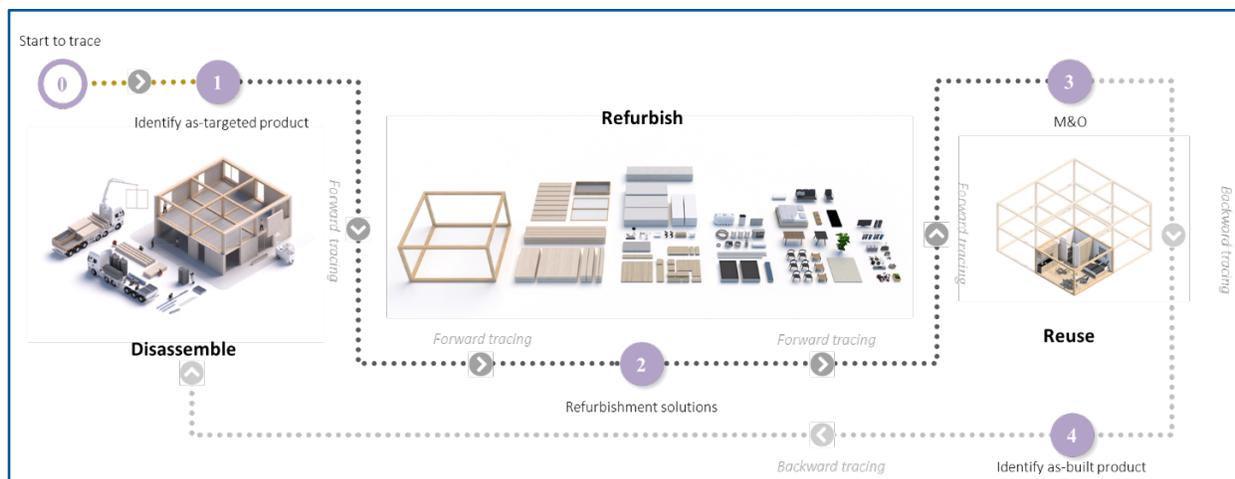


Figure 15: Trois cycles principaux du cas d'usage 01

En bref, le processus de désassemblage des matériaux de construction et des produits consiste à démonter et séparer méthodiquement les composants afin de récupérer les ressources et de permettre leur réutilisation ou leur recyclage, favorisant ainsi la circularité. Le cycle commence par l'identification des composants et des matériaux dans une structure ou un produit, puis par leur démontage à l'aide d'outils et de techniques appropriés. Les éléments désassemblés sont ensuite triés en fonction de leurs propriétés, telles que le type de matériau, la qualité et l'état. Selon l'état du matériau ou du produit, cela peut impliquer le nettoyage, la réparation ou la remise en état des composants pour une réutilisation, ou la séparation des matériaux en vue de leur recyclage ou de leur transformation en nouveaux produits. En mettant en place un processus de désassemblage efficace, les ressources sont préservées, la génération de déchets est réduite et le cycle de vie des matériaux et des produits est prolongé.

Une fois les matériaux et produits de construction démontés, le processus de rénovation commence. Il comprend une inspection approfondie et une évaluation de chaque composant pour évaluer son état et déterminer l'étendue des travaux de rénovation nécessaires. Les dommages, l'usure et les problèmes fonctionnels sont identifiés au cours de cette étape. Après l'évaluation, les composants sont soumis à un processus de nettoyage pour éliminer toute saleté, adhésifs ou revêtements accumulés lors de leur utilisation précédente. Les méthodes de nettoyage utilisées peuvent varier en fonction du matériau et peuvent inclure le lavage, le ponçage ou l'utilisation de solvants ou de détergents appropriés. Une préparation de surface est également effectuée, pouvant impliquer le ponçage ou l'application d'une couche d'apprêt sur les composants pour obtenir une surface lisse et uniforme pour les traitements ultérieurs. Une fois nettoyés et préparés, des réparations sont effectuées pour résoudre les dommages ou les problèmes fonctionnels détectés précédemment. Cela peut impliquer le remplacement de pièces cassées, la réparation de composants électriques ou mécaniques ou le renforcement de structures affaiblies. Après les réparations, les composants sont restaurés à leur apparence d'origine grâce à diverses techniques telles que la peinture, le polissage ou le raffinage. L'objectif est d'obtenir un résultat esthétiquement plaisant qui correspond à l'usage prévu et aux normes de qualité. Enfin, les composants rénovés sont réassemblés ou préparés pour être utilisés dans de nouvelles applications, prolongeant ainsi leur durée de vie et contribuant à la circularité des matériaux et des produits.

Pour réussir à mettre en œuvre ce cas d'usage, il est nécessaire de bien informer la prise de décision tout au long du cycle de vie de l'actif, produit ou matériau. Comme mentionné, certains indicateurs existent pour appuyer cette prise de décision. Dans le cadre de ce projet de recherche, le *Building Circularity Index* (BCI) du

Ellen MacArthur Foundation a été choisi et est expliqué ci-dessous. Afin d’opérationnaliser cet indicateur et d’ainsi mettre en œuvre le cas d’usage, il est nécessaire d’identifier et d’intégrer tous les livrables, les exigences, les ressources et les méthodes nécessaires dans une utilisation modèle. À cette fin, un guide d’usage de modèle a été développé sur la base du gabarit développé par BIMExcellence pour identifier les éléments critiques tels que les propriétés de base, les propriétés avancées et les diagrammes de flux d’activité de l’utilisation modèle. Le tableau 3 illustre la combinaison des propriétés de base et avancées de l’utilisation modèle, ainsi que leurs propriétés pertinentes respectives.

Tableau 3. Modèles d’utilisation du modèle (MUT) : propriétés de base et avancées cas d’usage 01

Propriétés	Description
Objectifs	<ul style="list-style-type: none"> •Fournir un modèle pour l'analyse de la circularité •Pour calculer des indicateurs de circularité •Fournir des facteurs pertinents sur la réutilisabilité •Tracer trois cycles (avant et arrière)
Description détaillée	L'utilisation du modèle comprend trois cycles majeurs : (i) désassemblage des produits d'un bâtiment; (ii) Rénovation des produits; et (iii) Réutilisation des produits dans un autre bâtiment. Les calculs de circularité se produisent dans chaque cycle au niveau du matériau, du produit et du système, pour obtenir la circularité globale du bâtiment de l'étude de cas sélectionnée.
Utilisations des documents	<ul style="list-style-type: none"> •Documentation fabricant et fournisseur •Propriétés de la banque de matériaux •Rapports d'évaluation BCI •Indicateurs CE •Documents de métré
Outils logiciels	<ul style="list-style-type: none"> • Autodesk Revit •Dynamo •Rhino • BIM360 •Speckle •PowerBI •AutoCAD
Équipement	<ul style="list-style-type: none"> •Des machines-outils • BIM hardware • Network Hardware •Outils de surveillance et de mesure
Liste des données	<ul style="list-style-type: none"> •Durée de vie de l'élément •BAMB - compositions de matériaux •SHMD - SundaHus matériaux •BIMobiect •RESET base de données •Cradle to Cradle •EPEA Base de données

Pour mieux exécuter et comprendre l'utilisation du modèle ainsi que la séquence des activités à travers les trois cycles, des diagrammes de flux d'activités de niveaux 3 et 4 ont été développés. Le diagramme de flux d'activités de niveau 3 (Figure 16) indique les activités préparatoires nécessaires après avoir sélectionné l'usage de modèle ou groupement d'usage de modèle. Dans un premier temps, tous les objectifs de l'utilisation du

modèle ont été identifiés, ce qui inclut la définition de chaque cycle, le calcul des indicateurs de circularité et la comparaison de la situation existante (avant le désassemblage) avec la situation rénovée. Aux étapes deux et trois, les livrables du projet tels que les documents de gabarits de données de produits, les normes et les modèles ont été identifiés. Il était également important de déterminer les exigences d'échange d'informations et les spécifications techniques afin de combler les lacunes en matière d'information et de collaboration entre les personnes impliquées dans le projet. À la dernière étape, toutes les dépendances internes et externes ont été répertoriées pour soutenir les calculs de BCI à travers les trois cycles du bâtiment.

Le niveau 4 (Figure 17) comprend des activités détaillées nécessaires à la modélisation et au calcul de la circularité des matériaux de construction et des produits. La première étape consiste à définir toutes les exigences et les protocoles liés aux cycles de démontage et de rénovation, tels que les exigences du projet, les calendriers, les tâches et les outils, ainsi que la stratégie de réutilisation. Dans la deuxième étape, les modèles existants du bâtiment sont examinés afin de vérifier les caractéristiques géométriques, physiques et comportementales des composants du bâtiment dans différentes conditions. La troisième étape consiste à préparer un nouveau modèle de rénovation en fédérant les modèles provenant des différentes disciplines. Au cours de cette activité, des paramètres de circularité et des formules sont attribués à chaque partie ou composant. En utilisant la capacité de planification des logiciels de modélisation des informations du bâtiment (BIM) tels que Revit, des relevés de quantité de matériaux et de produits sont effectués, ainsi que les paramètres permettant d'évaluer leur circularité. Les formules spécifiques pour le MCI, le PCI, le SCI et le BCI global (discutés ci-dessous) sont développés dans les outils de calcul pour automatiser le processus. Après avoir obtenu les valeurs de circularité pour chaque indicateur, une analyse de combinaison de conception peut être réalisée pour optimiser différents scénarios de réutilisation. Les trois dernières étapes du diagramme de flux des activités consistent à sélectionner la meilleure combinaison de conception et à analyser sa mise en œuvre dans de nouveaux projets de construction. Les matériaux ou produits réutilisés peuvent être stockés dans une nouvelle base de données pour une utilisation future. Dans le cadre du cycle de réutilisation, plusieurs vérifications et validations peuvent être nécessaires pour s'assurer que les produits ou matériaux réutilisés répondent aux exigences des nouveaux projets de construction.

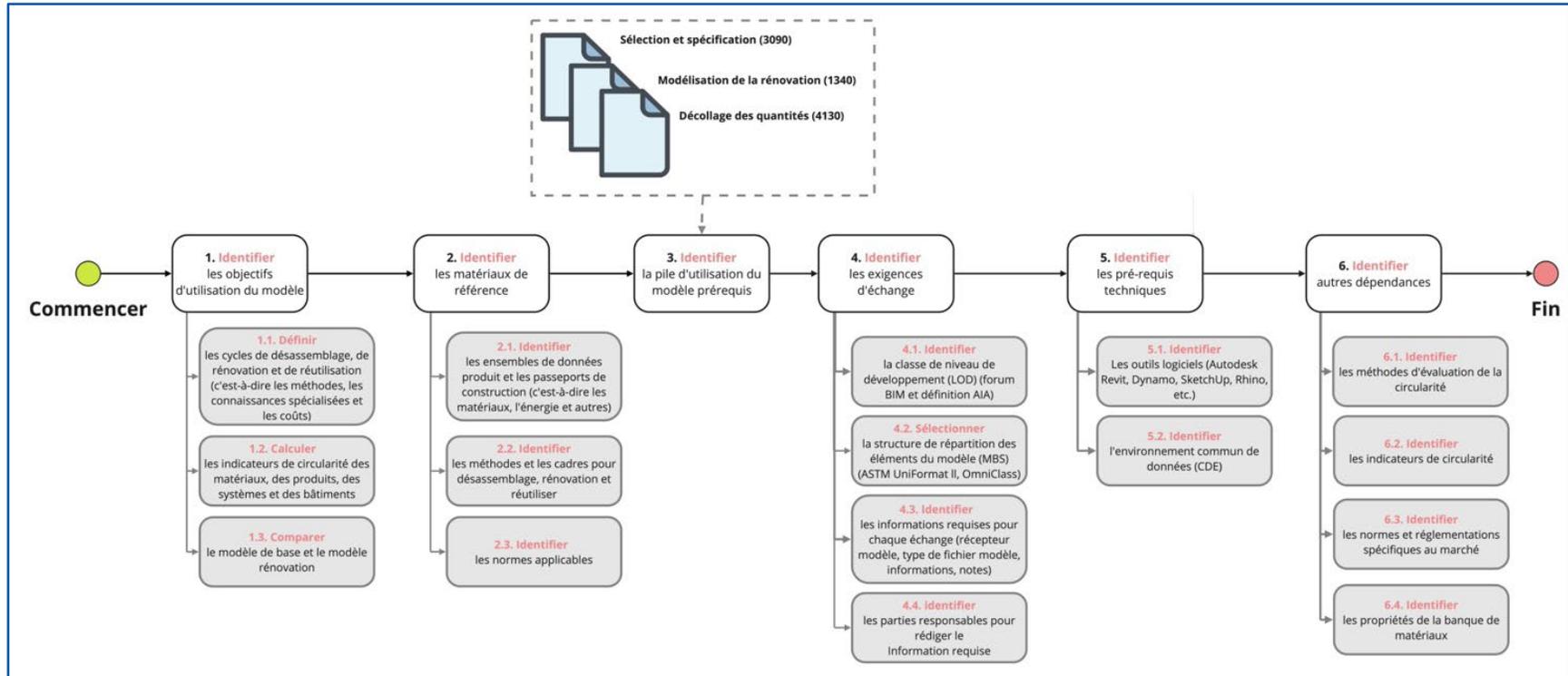


Figure 16: Diagramme de flux d'activité - Niveau 03

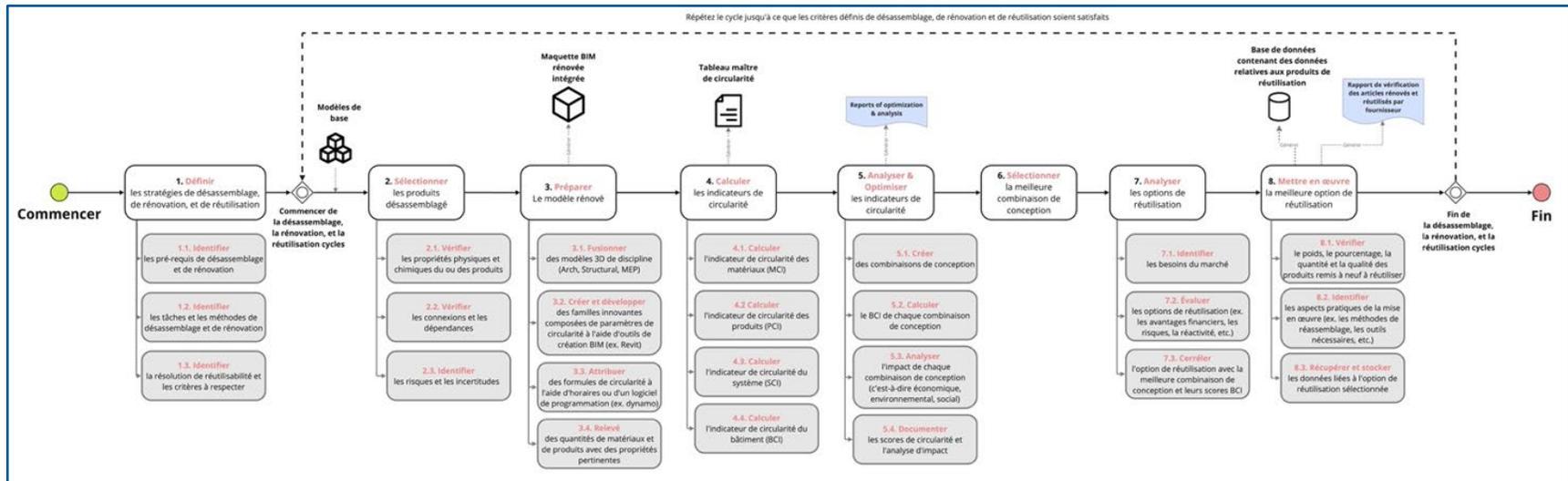


Figure 17: Diagramme de flux d'activité - Niveau 04

4.2.2 Cas d'usage 02

Ce cas d'usage traite de l'utilisation du BIM dans le but d'agréger un ensemble de passeports matériaux (PPM) pour différentes fins. Comme il a été énoncé dans ce document, un PPM est l'outil qui va nous permettre de rassembler des données quantitatives et qualitatives d'un élément selon plusieurs caractéristiques (Figure 18). Dans le contexte d'un bâtiment, le PPM peut être applicable au niveau d'un matériau, d'un élément ou produit, d'un système ou pour tout le bâtiment lui-même. Les données peuvent regrouper des propriétés physiques décrivant le type, la composition ou encore la localisation, des informations sur la fonctionnalité tels que la séparabilité d'un élément ou des instructions de désassemblage, ou encore des informations sur l'état et le potentiel de recyclage de l'élément. Le PPM peut donc être un outil dynamique qui offre des informations pertinentes pour la prise de décision.

L'utilisation du PPM va dépendre de plusieurs facteurs (Tableau 4). Tout d'abord, la phase du projet ainsi que les objectifs de circularité vont directement influencer la fonction du PPM. En phases de pré-construction et construction, où l'objectif est surtout de réduire le nombre de ressources utilisées pour le projet et d'en réutiliser un maximum, le passeport se présente comme un outil d'optimisation. En phase de post-construction, le passeport aura la fonction de documenter les éléments du bâti dans le but d'informer sur les potentiels de recyclages de ses éléments. La première étape de mise en place du PPM est d'en déterminer les orientations et sa méthodologie d'intégration dans le projet par la définition des objectifs de circularité et exigences. Le processus d'agrégation consistera ensuite en la création d'un PPM pour chaque composante du bâtiment avec les caractéristiques nécessaires pour répondre aux objectifs.

Parmi les utilisations finales, les activités possibles suivantes ont été recensées :

- "Urban mining" (minage urbain) : Une « mine urbaine » est définie par l'office québécois de la langue française comme une « Réserve de ressources, notamment minérales ou métalliques, qui peuvent être récupérées en milieu urbain en vue d'être réutilisées ou recyclées. » Les infrastructures sont considérées comme des gisements particulièrement riches.
- Gestion des données : La centralisation des données dans un passeport représente, au même titre que pour le BIM, un atout majeur pour l'accès et l'échange des données et à la collaboration.
- Inspections réglementaires : Utilisation du passeport pour tracer les performances du bâtiment et s'assurer de sa conformité réglementaire (Sesana, 2018)
- Contrôle de la circularité du produit : « Mesure de la quantité de ressources provenant de matières circulant en boucle dans un système économique défini, pour une période donnée, par rapport à la quantité totale de ressources utilisées dans ce système, pendant cette même période. » (OQLF)
- Évaluation de la durabilité et de la circularité des bâtiments : « Analyse visant à déterminer et à mesurer les impacts environnementaux, les conséquences sociales, à quantifier les flux et les stocks de matières et d'énergie, ou les coûts d'un bâtiment. » (Adapté de OQLF)
- Développement et optimisation de la chaîne de valeur : « Ensemble d'activités créatrices de valeur, mises en évidence par l'analyse de l'ensemble des activités d'une organisation, depuis la conception d'un produit jusqu'à son lancement. » (OQLF)

Tableau 4 : L'utilisation des passeports matériaux tout au long du cycle de vie du projet

Phase	Pre-construction / conception	Construction	Post-construction
Objectifs de circularité	Réduire & Réutiliser		Recycler
Fonction du Passeport Matériau	Outil d'optimisation		Documentation et inventaire des ressources de l'actif
Utilisation du passeport Matériau	"Urban mining" (minage urbain) Gestion des données Inspections réglementaires Contrôle de la circularité du produit Évaluation de la durabilité et de la circularité des bâtiments Développement et optimisation de la chaîne de valeur		

Comme pour le cas précédent, un guide d'usage de modèle sur la base du gabarit développé par BIMExcellence a été réalisé pour orienter son application. Ce guide est présenté dans le Tableau 5.

Tableau 5. Modèles d'utilisation du modèle (MUT) : propriétés de base et avancées cas d'usage 02

Propriété	Description
Objectifs	<ol style="list-style-type: none"> 1. Suivi des matériaux au cours de leur cycle de vie 2. Évaluer le potentiel d'utilisation, de récupération et de réutilisation des éléments de construction 3. Soutenir le gestionnaire d'immeuble pour l'entretien, la rénovation et la démolition des actifs
Description détaillée	Un passeport matériau est un document rassemblant des données quantitatives et qualitatives sur les éléments d'un actif. Son utilisation est principalement associée au concept d'économie circulaire car elle permet de tracer les matériaux et d'évaluer leur potentiel de circularité. Le passeport matériel contient généralement des caractéristiques telles que le type / description du produit, la composition des ressources du produit, l'emplacement, le potentiel de recyclage, la séparabilité, la qualité, les instructions de démontage et d'élimination ou l'état actuel.
Utilisation des documents	<ul style="list-style-type: none"> • Documentation fabricant et fournisseur • Fiches de Déclarations Environnementale et Sanitaire (FDES) • Propriétés de la banque de matériaux • Rapports d'évaluation BCI • Indicateurs
Outils et logiciels	<ul style="list-style-type: none"> • Revit • Excel • Power BI • BIM360 • Speckle • OpenLCA • Madaster

	<ul style="list-style-type: none"> • BAMB •
Équipements	<ul style="list-style-type: none"> • Outils de surveillance et de mesure • RFID
Liste de données	<ul style="list-style-type: none"> • Durée de vie de l'élément • BAMB - compositions de matériaux • BIMobject • RESET base de données • Cradle to Cradle • EPEA Base de données • Ecoinvent, • OpenLCA, • LCA commons • Hydro-Québec

4.3 LA MISE EN ŒUVRE

Les deux cas d'usages détaillés ci-dessus ont été appliqués dans l'étude de cas du Duplex Circulaire présenté dans la partie 3.5. La firme d'architecture travaillant sur le projet désire développer et évaluer différents scénarios de rénovation en fonction de leur indice de circularité. L'équipe de recherche s'est donné comme objectif de développer un processus à partir des cas d'usages pour répondre aux besoins du projet. La mise en œuvre des cas d'usage couvre à la fois l'implémentation technique au niveau de la modélisation des informations et de l'opérationnalisation des indicateurs.

4.3.1 Mise en œuvre technique

Dans la mise en œuvre de ce projet, le flux de travail comprend une collaboration entre l'équipe d'architecture (conception) et l'équipe de recherche. Voici un aperçu de ces étapes :

1. Processus de conception initial :

L'équipe d'architectes commence le processus en concevant un modèle géométrique de base du projet de rénovation à l'aide de Rhino, un outil de modélisation géométrique utilisé dans le domaine de l'architecture. Les architectes ont également utilisé l'outil de modélisation SketchUp. À ce stade, le modèle est principalement géométrique, et manque d'informations détaillées sur le type de matériaux et de composants dans le modèle.

2. Conversion de données pour la collaboration :

Le modèle architectural créé dans Rhino et/ou SketchUp est ensuite transféré à l'équipe de recherche par le biais de Speckle. Speckle est une plateforme de transfert de données open-source utilisée dans l'industrie AEC (architecture, ingénierie, construction). Il permet à l'équipe de convertir le modèle Rhino au format Revit (Figure 18). Revit permet ensuite à l'équipe de recherche d'attribuer et d'extraire les propriétés des matériaux nécessaires pour calculer l'indicateur de circularité des matériaux (MCI) de chaque matériau sélectionné par l'équipe d'architectes.

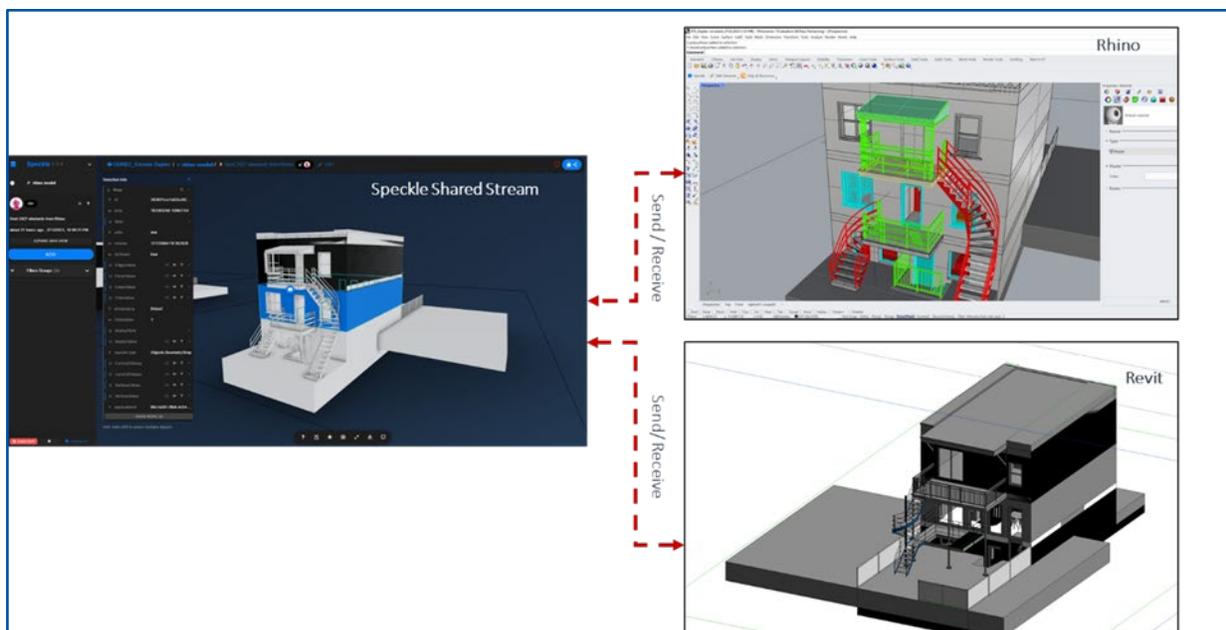


Figure 18: Processus d'échange de données souhaité entre l'équipe de conception et de recherche

3. Définition des composants dans Revit :

Dans cette étape, l'équipe de recherche prend le modèle géométrique de base et l'enrichit avec des détails spécifiques à l'aide de Revit. Chaque élément de la rénovation, comme les murs, les planchers et les plafonds, est paramétré en détail. Ces définitions comprennent les types de matériaux à utiliser, les couches de chaque composant et leurs données connexes. Cette transformation transforme le modèle géométrique abstrait en un modèle concret et détaillé du projet de rénovation.

4. Quantification des matériaux :

Un relevé de quantité de matériaux est effectué pour chaque composant défini dans Revit (Figure 19). Cette étape consiste à calculer la quantité de chaque matériau nécessaire à la construction en fonction du modèle architectural. Cela inclut tous les matériaux du bâtiment, du béton dans les murs au verre dans les fenêtres. La classification des matériaux est basée sur Unifomat II et Master Format.

5. Calcul de l'Indicateur de Circularité du Bâtiment (BCI) :

La nomenclature de matériaux est transférée dans une table de calcul Excel. L'équipe de recherche utilise ces données pour calculer différents indicateurs de circularité : l'indicateur de circularité des matériaux (MCI), l'indicateur de circularité des produits (PCI), l'indicateur de circularité du système (SCI) et l'indicateur de circularité du bâtiment (BCI). Ces mesures vont nous servir à évaluer la circularité de chaque option de conception pour le bâtiment et ainsi aider l'équipe de conception dans la prise de décision.

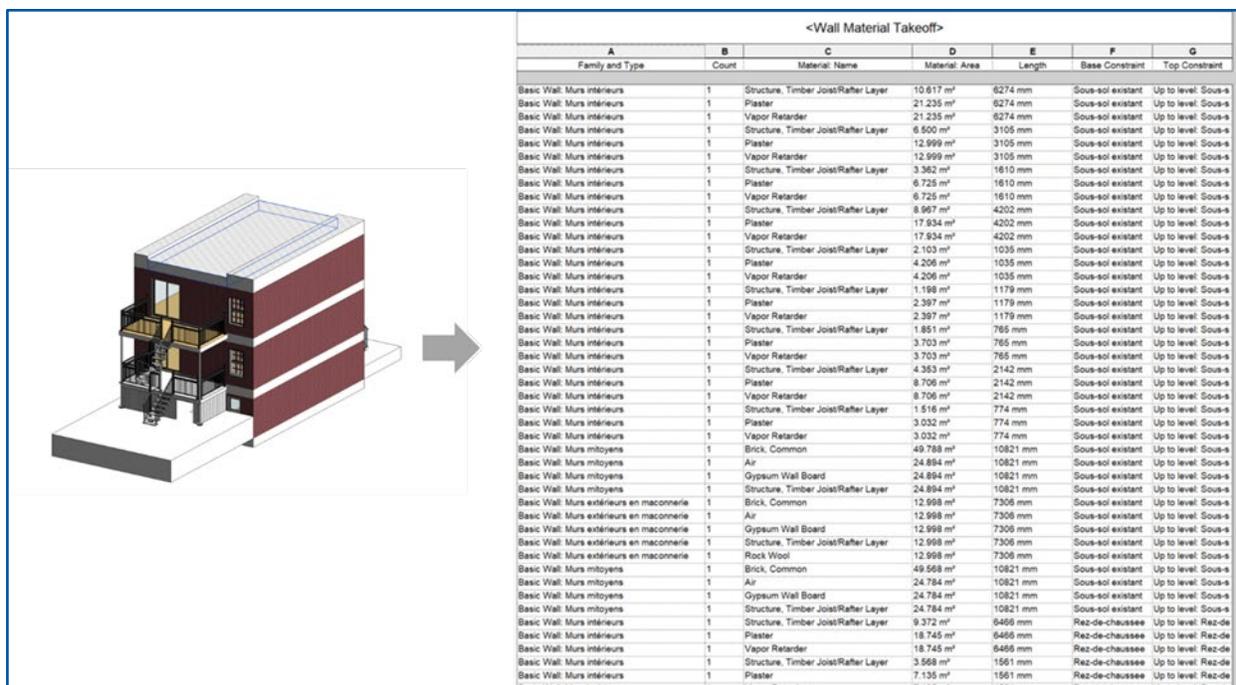


Figure 19. Relevé quantitatif des matériaux du modèle à partir de Revit

4.3.2 Opérationnalisation des indicateurs de circularité

L'équipe de recherche a procédé avec l'indice de circularité développé par le Ellen MacArthur Foundation et par Verberne (2016), comme mentionné précédemment. Ces indicateurs servent d'outil d'évaluation de la circularité d'un projet. Selon cette approche, le calcul de l'indicateur de circularité des matériaux (MCI), de l'indicateur de circularité des produits (PCI), de l'indicateur de circularité des systèmes (SCI) et de l'indicateur de circularité du bâtiment (BCI) permet d'effectuer une évaluation complète de la circularité. Le MCI aide à évaluer la capacité de récupération et de recyclage des matériaux après le désassemblage, ce qui permet de prendre des décisions éclairées sur les stratégies de récupération des ressources et de recyclage. En quantifiant le potentiel de circularité des matériaux, les efforts visant à maximiser leur réutilisation et à réduire au minimum les déchets sont guidés. Le PCI évalue la circularité de l'ensemble du produit, en tenant compte des aspects de conception, des choix de matériaux et de la facilité de rénovation. Il fournit des informations précieuses sur les performances du produit tout au long de son cycle de vie, permettant aux concepteurs et aux fabricants d'optimiser la circularité en améliorant la durabilité, la modularité et la recyclabilité. Le SCI élargit la portée à l'échelle du système, en évaluant la circularité d'entités plus grandes telles que les bâtiments ou les lignes de production. Il tient compte des interactions et des flux de ressources, en mettant l'accent sur les stratégies de réutilisation en cascade et de gestion efficace des ressources. Le SCI favorise une approche holistique de la circularité, en promouvant les synergies et en optimisant l'utilisation des ressources dans l'ensemble du système. Ensemble, ces indicateurs offrent des mesures quantitatives précieuses qui éclairent la prise de décision, identifient les opportunités d'amélioration et favorisent la transition vers des pratiques circulaires et durables lors des processus de désassemblage, de rénovation et de réutilisation.

Cette approche ascendante commence par le MCI, initialement développé par la fondation Ellen MacArthur, puis progresse vers le PCI, le SCI et enfin, le BCI. Chaque niveau supérieur implique un regroupement pondéré

des matériaux, produits et systèmes du niveau précédent. La figure 20 ci-dessous montre les différents niveaux de cette approche.

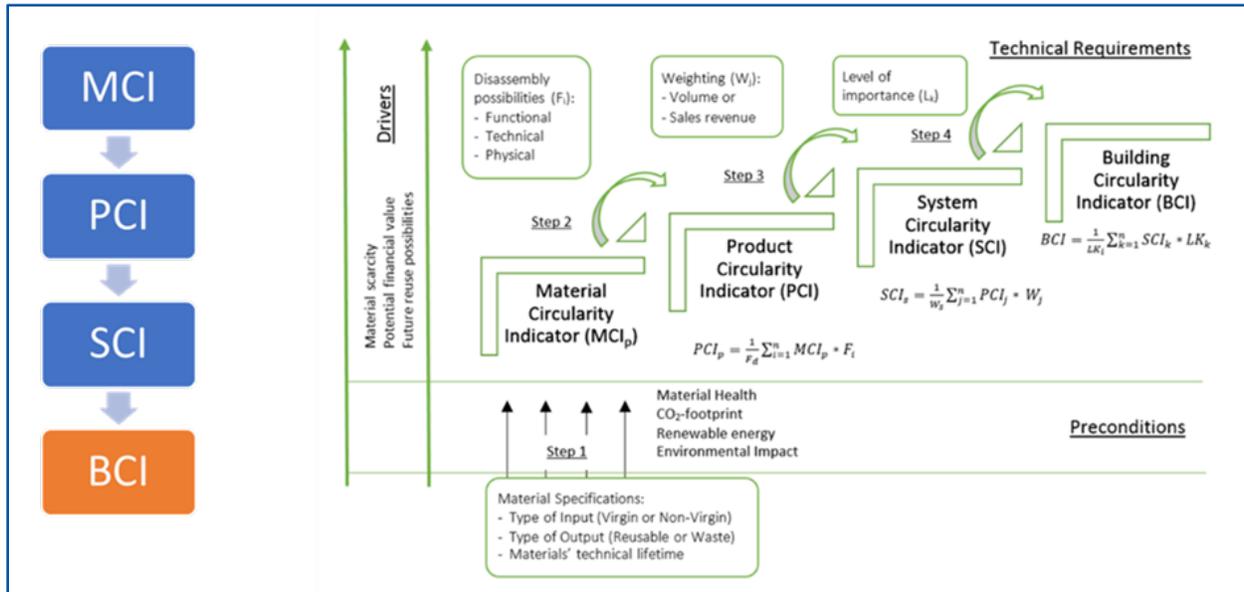


Figure 20. Processus de calcul de l'indicateur de circularité du bâtiment. Tiré de Verbene (2016)

1er niveau : Indicateur de Circularité Matériau

Le MCI est une mesure élaborée par la fondation Ellen MacArthur basée sur l'évaluation des flux de matières constituant un produit durant son cycle de vie (Figure 21). L'approche est orientée sur la minimisation de la linéarité du flux (utiliser-jeter) et l'optimisation de la réutilisation, favorisant un flux circulaire. L'évaluation comprend des considérations sur la durée et l'intensité de l'utilisation du produit par rapport à des produits similaires standard de l'industrie.

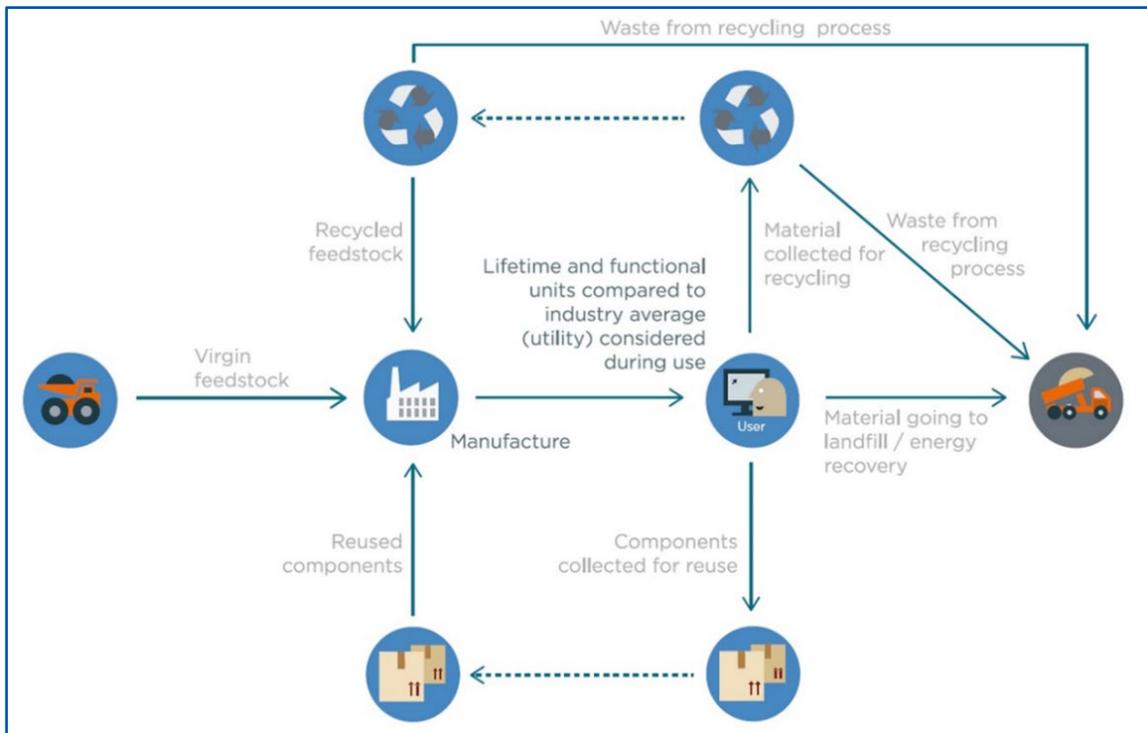


Figure 21. Évaluation de l'indicateur de circularité des matériaux d'après la fondation Ellen MacArthur

Un produit qui est entièrement fabriqué à partir de nouvelles ressources et qui est éliminé dans une décharge après utilisation peut être classé comme un produit entièrement « linéaire ». En revanche, un produit qui n'utilise pas de nouvelles ressources, qui est entièrement collecté pour le recyclage ou la réutilisation de ses composants et qui atteint une efficacité de recyclage de 100 % peut être considéré comme un produit entièrement « circulaire ».

Identification des quantités de matériaux :

Tout d'abord, une liste de tous les matériaux composants les produits du bâtiment et leurs quantités est compilée (Figure 22). Cela a été rendu possible grâce à Revit qui propose des compositions d'éléments personnalisables par l'utilisateur. Ces matériaux ont ensuite été classés en fonction de la classification Unifomat II. Cette liste comprendra la masse volumétrique, le volume et la masse totale de chaque matériau utilisé.

Elements			Quantity		
Classification UniFormat.II Number	Matériau: Description	Matériau: Nom	Masse volumique (kN/m3)	Volume	Masse (kn)
B1011	Particleboard sheathing	Wood Sheathing, Chipboard	7.80	1.73	13.51
B1011	Generic wood	Wood	5.60	41.03	229.75
B1011	Timber framing, thermal airspace	Structure, Timber Joist/Rafter Layer	0.10	0.91	0.09
B1011	Plaster	Plaster	11.00	0.91	10.03
B1011	Polyethylene film membrane	Vapor Retarder	0.10	3.19	0.32

Figure 22. Extrait de la Classification des matériaux composants les éléments du bâtiment

Matières premières vierges (V):

L'OQLF définit une matière première vierge comme une « Matière première brute directement issue des ressources naturelles. » Ainsi, la quantité de matière première vierge (V) est la quantité de matière nouvelle ou inutilisée utilisée dans la fabrication du produit. Elle est calculée en fonction de trois facteurs :

1. Matières premières dérivées de matériaux recyclés (Fr)
2. Matières premières dérivées de matériaux réutilisés (Fu)
3. Efficacité de recyclage des matières premières (Ef)

Le calcul de la part de matières premières vierges est présenté dans la formule (eq.1).

$$V = M(1 - Fr - Fu) \quad (eq. 1)$$

Ici, M représente la masse du produit fini, et Fr, Fu et Ef sont donnés en pourcentages. Il convient de noter que la « fraction de matériel biologique » utilisée qui provient de la production soutenue peut également être incorporée dans cette formule. Les valeurs de ces données étant indisponibles, nous avons fait l'hypothèse que le bâtiment tel qu'il est actuellement est composé de 100 % de matières vierges.

Classification UniFormat II. Number	Matériau: Description	Matériau: Nom	Masse volumique (kN/m ³)	Volume	Masse (kg)	Fr (%) feedstock derived from recycled	Fu (%) feedstock derived from reused	Ef (%) Recycling efficiency of Feedstock	V (kg) Virgin Feedstock
B1011	Particleboard sheathing	Wood Sheathing, Chipboard	7,80	1,73	13,51	0,00%	0,00%	0,00%	13,51

Figure 23. Calcul de la part de matières vierges des produits

Déchets non valorisables (W) :

Les déchets non valorisables, notés W, concernent la partie de la matière qui ne sera pas récupérée une fois que le produit aura atteint la fin de sa phase d'utilisation. Il est divisé en trois catégories :

1. Déchets mis en décharge ou valorisés en énergie (Wo)
2. Déchets générés dans le processus de recyclage (Wc)
3. Déchets destinés à la production de contenu recyclé utilisés comme matières premières (Wf)

Chaque catégorie est déterminée en fonction de plusieurs facteurs :

1. Matières d'utilisation finale destinées au recyclage (Cr)
2. Matières d'utilisation finale destinées à la réutilisation (Cu)
3. Efficacité de recyclage des préparations commerciales (Ec)

Ces facteurs sont représentés en pourcentage. Les calculs des différentes catégories sont présentés dans les équations (eq.2) à (eq.4). La quantité globale de déchets non valorisables est donnée en équation (eq.5).

$$W_o = M(1 - Cr - Cu) \quad (eq. 2)$$

$$W_c = M(1 - Ec)Cr \quad (eq. 3)$$

$$W_f = M * \frac{[(1 - Ef) * Fr]}{Ef} \quad (eq. 4)$$

$$W = W_o + \frac{[W_f + W_c]}{2} \quad (eq. 5)$$

Dû à un manque de données précises et cohérentes avec notre contexte, les données sur les efficacités de recyclage de matériaux ont été prises d'après les données de traitement des matériaux de constructions de RECYC-QUÉBEC (Figure 24). La méthode de calcul pour déterminer le % de l'élément qui sera recyclé, valorisé et l'efficacité de recyclage est la suivante. Par exemple, RECYC-QUÉBEC nous donne pour le bois (en Tonnes) :

Recyclage : 70 000

Valorisation : 184 000

Exportation : 18 000

Total traité : 272 000

Envoyé en élimination : 267 000

Total reçu : 539 000

Calcul de l'efficacité de recyclage : Total traité 272 000 / Total reçu 539 000 x 100 = 50,4%

Part allant au recyclage : Recyclage 70 000 / Total traité 272 000 x 100 = 25%

Part allant à la valorisation : 68%

Ainsi, pour chaque matériau fait à base de bois, ces valeurs ont été utilisées pour compléter l'analyse. Le même exercice a été réalisé pour l'ensemble du tableau fourni par RECYC-QUÉBEC. Le tableau RECYC-QUÉBEC communique des informations pour des matériaux génériques, pour certains éléments comme les isolants, l'hypothèse était que rien n'était récupéré. Un exemple tiré de notre feuille de calcul est présenté dans la Figure 24.

	Recyclage	Valorisation énergétique	Autre destination / entreposage	Exportation	Total	Élimination ⁵
Agrégats	129 000		22 000		151 000	174 000
Bardeaux	1 000	27 000		5 000	33 000	43 000
Bois	70 000	184 000		18 000	272 000	267 000
Bois traité		800			800	55 000
Mélange combustible		21 000			21 000	
Gypse	2 000				2 000	100 000
Carton	11 000				11 000	27 000
Métaux	41 000				41 000	58 000
Plastiques	600				600	28 000
Verre	5 000				5 000	3 000
Résidus fins	1 000		2 000	16 000	19 000	
CRD non triés			13 000		13 000	
Autres CRD						187 000
Autres matières résiduelles acheminées avec les déchets du secteur CRD Ex. : matières organiques, textiles, etc.						78 000
Total	260 600	232 800	37 000	39 000	569 400	1 018 000

Figure 24. Quantités de matières sortantes selon les destinations (recyclage, valorisation énergétique et autres filières) et de matières provenant du secteur CRD acheminées à l'élimination (en tonnes). Tiré de RECYC-QUÉBEC (2021).

End use Indicators						
Cr (%) End use material going for Recycling	Cu (%) End use material going for Reusing	Ec (%) Recycling efficiency of End use material	Wo (kg) waste going to landfill or energy recovery	Wc (kg) waste generated in the recycling process	Wf (kg) waste for producing recycled content used as feedstock	W (kg) overall amount of unrecoverable waste
25%	68%	100	13.38396072	0	0	13.38396072
25%	68%	50.00%	227.6089659	0.57149218	0	227.894712
25%	68%	50.00%	0.09035184	0.00022686	0	0.09046527
100%	0%	2%	9.93168	0.100299936	0	9.981829968
0%	0%	1.00%	0.3191	0.000	0	0.3191

Figure 25. Calcul de la part de déchets non valorisables

Facteur d'utilité (X) :

Le facteur d'utilité (X) représente l'intensité et la durée d'utilisation du produit. Il est déterminé par deux composantes :

1. La durée de vie (L) : Indique la durée de vie d'utilisation moyenne du produit par rapport à la moyenne de l'industrie.
2. La composante intensité d'utilisation (U) : Définit la fréquence d'utilisation du produit.

Le facteur d'utilité (X) est calculé à l'aide de la formule présentée dans l'équation (eq.6).

$$X = \left(\frac{L}{L_{av}}\right) * \left(\frac{U}{U_{av}}\right) \quad (eq.6)$$

Ici, U_{av} est le nombre moyen d'unités fonctionnelles obtenues lors de l'utilisation d'un produit moyen de l'industrie d'un type similaire, tandis que U est le nombre moyen d'unités fonctionnelles obtenues lors de l'utilisation du produit en question. L'augmentation de la durée de vie lorsque la moyenne de l'industrie reste constante entraîne une augmentation de X et, par conséquent, une augmentation du TCM du produit.

Pour ce projet, le facteur d'utilité X a été simplifié en utilisant seulement les durées de vies sans intégrer l'utilisation fonctionnelle des éléments. La durée de vie de chaque élément choisi est 77 ans (création du bâtiment 1946 – année de réhabilitation 2023). Il a donc été assumé qu'aucun remplacement n'a été fait jusqu'ici. Un extrait du calcul du facteur d'utilité de notre outil est illustré dans la Figure 26.

Utility Indicators					
L Lifetime of the product	L _{av} Lifetime of industry average	U Functional unit of the product	U _{av} Functional unit industry average	X The utility	F(x)
77	30	1	1	2.566667	0.350649
77	30	1	1	2.566667	0.350649
77	30	1	1	2.566667	0.350649
77	60	1	1	1.283333	0.701299
77	15	1	1	5.133333	0.175325

Figure 26. Calcul du facteur d'utilité du produit

Indice de débit ou flux linéaire (LFI) :

L'indice de flux linéaire (LFI) mesure la proportion de matériaux qui s'écoulent de manière linéaire, ce qui signifie qu'ils proviennent de matériaux vierges et finissent comme déchets non récupérables. La quantité de LFI dépend de V, W, M, Wf et Wc. Son calcul est représenté dans l'équation (eq.7).

$$LFI = \frac{V + W}{2M + \frac{Wf - Wc}{2}} \quad (eq.7)$$

Calcul de l'indicateur MCI :

Le MCI évalue la circularité d'un matériau, avec moins d'écoulement linéaire et plus de flux réparateur, ce qui se traduit par un score plus élevé. La formule de calcul est présentée dans l'équation (eq.8) :

$$MCI = 1 - LFI * F(X) \quad (eq.8)$$

LFI est l'indice de débit linéaire et F(X) est un facteur d'utilité tenant compte de l'intensité et de la durée d'utilisation du produit. La fonction F(X) pénalise une durée de vie plus courte et une mauvaise utilisation, favorisant une utilisation efficace et la longévité des produits.

2^{ème} niveau : Indicateur de Circularité Produit

Le PCI prend en compte les interfaces et les connexions entre les produits, un aspect qui impacte significativement la circularité d'un système. Ces connexions et interfaces sont représentées par l'étude de Conception pour le désassemblage (Design for Disassembly (DfD)), un processus de conception qui facilite les changements futurs et le démantèlement éventuel pour la récupération des systèmes, des composants et des matériaux.

MCI Calculator		
LFI	MCI	Design factor
0.9907	0.65261169	2
0.99132188	0.65239363	1.2
0.99132188	0.65239363	1.2
0.9924995	0.30396139	2.6
1	0.82467532	2.6

Figure 27. Calcul de l'indicateur de circularité des matériaux

Lors de l'évaluation du PCI, la méthodologie de Verberne (2016), définissant un facteur de désassemblage (FD) pour classer différents matériaux constitutifs d'un produit selon une analyse de plusieurs caractéristiques a été utilisée (Figure 28). Cette analyse donne un score de 0 à 1, 0 ayant le pire impact et 1 représentant le meilleur impact sur le désassemblage. Pour chaque matériau, la somme des scores de ces caractéristiques est alors réalisée pour définir son FD. Dans cette étude, par soucis de simplicité et l'impossibilité de réaliser l'analyse de

certaines caractéristiques, quatre caractéristiques ont été sélectionnées : le potentiel de séparation du matériau, sa dépendance au produit, son type de connexion et son accessibilité. L'exemple du calcul pour le PCI du plancher du sous-sol est présenté Figure 29.

Functional separation	separation of functions	1.0
	integration of function with same lifecycle into one element	0.6
	integration of function with different lifecycle into one element	0.1
Functional dependence	modular zoning	1.0
	planned interpenetrating for different solutions (overcapacity)	0.8
	planned for one solution	0.4
	unplanned interpenetrating	0.2
	total dependence	0.1
Technical life cycle / coordination	long (1) / long (2) or short (1) / short (2) or long (1) / short (2)	1.0
	medium (1) / long (2)	0.5
	short (1) / medium (2)	0.3
Geometry of product edge	short (1) / long (2)	0.1
	open linear	1.0
	symmetrical overlapping	0.8
	overlapping on one side	0.7
	unsymmetrical overlapping	0.4
Standardisation of product edge	insert on one side	0.2
	insert on two sides	0.1
	pre-made geometry	1.0
	half standardised geometry	0.5
	geometry made on the construction site	0.1
Type of connections	accessory external connection or connection system	1.0
	direct connection with additional fixing devices	0.8
	direct integral connection with inserts (pin)	0.6
	direct integral connection	0.5
	accessory internal connection	0.4
	filled soft chemical connection	0.2
	filled hard chemical connection	0.1
	direct chemical connection	0.1
Accessibility to fixings and intermediary	accessible	1.0
	accessible with additional operation with causes no damage	0.8
	accessible with additional operation which is repairable damage	0.6
	accessible with additional operation which causes damage	0.4
	not accessible – total damage of bought elements	0.1

Figure 28. Facteurs de désassemblages. Tiré de Verberne (2016)

Modifier l'assemblage

Famille: Sol
 Type: Plancher
 Epaisseur totale: 527.0 mm (Par défaut)
 Résistance (R): 18.5545 (m²·K)/W
 Masse thermique: 77.71 kJ/(m²·K)

Couches

	Fonction	Matériau	Epaisseur
1	Finition 2 [5]	Wood	19.0 mm
2	Finition 2 [5]	Wood Sheathing, Chipboard	38.0 mm
3	Limite de la couche principale	Couches au-dessus	0.0 mm
4	Porteur/Ossature [1]	Structure, Timber Joist/Rafter	450.0 mm
5	Limite de la couche principale	Couches en dessous	0.0 mm
6	Isolant/Vide [3]	Vapor Retarder	10.0 mm
7	Finition 2 [5]	Plaster	10.0 mm

Classification UniForm mat.II. Number	Matériau: Description	Matériau: Nom	MCI	Design factor	Product	Product circularity Indicator
B1011	Particleboard sheathing	Wood Sheathing, Chipboard	0,65239	2	Floor basement	0,60
B1011	Generic wood	Wood	0,65239	1,2		
B1011	Timber framing, thermal airspace	Structure, Timber Joist/Rafter Layer	0,65239	1,2		
B1011	Plaster	Plaster	0,30396	2,6		
B1011	Polyethylene film membrane	Vapor Retarder	0,82468	2,6		

Figure 29: Calcul du PCI du plancher du sous-sol

3^{ème} niveau : Indicateur de circularité du système

Le SCI est calculé en définissant un système au sein du projet (tel qu'une pièce, un étage, une zone ou un groupe d'espaces), puis en calculant le PCI moyen pondéré des produits qui composent ce système. La définition du système peut être adaptée en fonction des besoins et des objectifs du projet.

Pour ce projet, les systèmes sont définis en termes de « zones d'interventions de rénovation », c'est-à-dire les zones où l'équipe de conception compte réaliser des rénovations. Pour ce qui est du facteur de pondération, la durée de vie du système est utilisée comme facteur. À des fins de planification, cela aiderait le décideur à préparer son plan d'intervention en donnant la priorité aux systèmes ayant une durée de vie plus courte. L'exemple de calcul du SCI de la zone d'intervention « Accès avant RDC », représenté dans la Figure 30, composé de la dalle extérieure d'accès avant, l'escalier avant RDC, le balcon avant RDC et la porte d'entrée avant du RDC est présenté dans les figures 31 et 32.

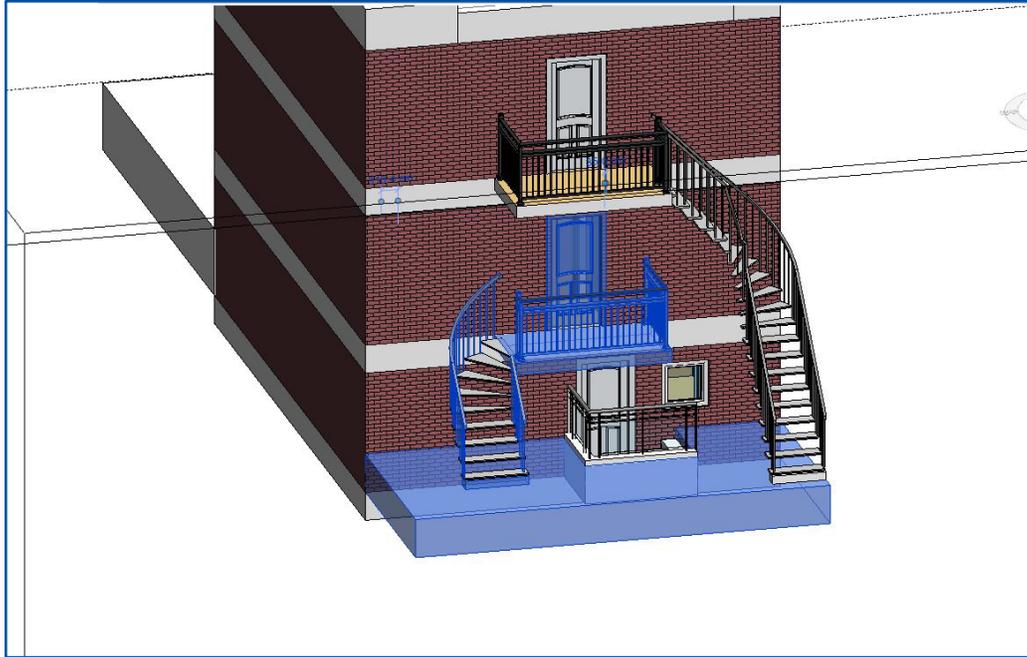


Figure 30: Système d'intervention "Accès avant RDC"

Product	Classification UniForm at.II. Number	Matériau: Des	Matériau: Nor	L Lifetime of the product	Product Average Lifetime
Floor_Balcony (Front rdc)	B1013	Particleboard	Wood Sheath	77	77
	B1013	Generic wood	Wood	77	
	B1013	Timber fram	Structure, Tin	77	
	B1013	Plaster	Plaster	77	
	B1013	Polyethylene	Vapor Retard	77	
ial-Ext_Steel-Fire_Escape F	B1015	Escalier	lfcSurfaceSty	77	77
	B1015	Steel, paint fi	Steel, Paint F	77	
	B1015	Cast-in-place	Concrete, Ca	77	
e_Door_915x2090mm RDC	B2039	Tempered Gl	Glass - TruSt	77	77
	B2039	Premium-Gra	Wood - TruSt	77	
Exterior Slab Front rdc	B1011	Exterior Slab	Concrete	77	77

Figure 31: Définition des durées de vies des produits composants le système pour le calcul du facteur système

Product	System	System Factor	System Circularity Indicator
Exterior Slab Front rdc	RDC Front access	231,00	0,52
Commercial-Ext_Steel-Fire_Escape Front RDC			
Floor_Balcony (Front rdc)			
Entrance Door 915x2090mm RDC FRONT			

Figure 32: Calcul du SCI de l'accès avant du bâtiment

4^{ème} niveau : Indicateur de circularité des bâtiments

Le BCI est la dernière étape de ce processus et il représente la somme des SCI du projet. Le calcul n'a pas été réalisé car l'équipe d'architecture n'a pas prévu d'intervenir sur l'ensemble du bâtiment et ne nécessite donc pas d'évaluation jusqu'à ce niveau. Dans des travaux subséquents, il serait intéressant d'évaluer l'entière du bâtiment afin de créer un point de référence global pour le projet.

5. Discussions

Pour rappel, les résultats escomptés du projet de recherche étaient de faciliter l'application des principes d'économie circulaire bénéficiant de la traçabilité des matériaux et des produits de construction dans le secteur de l'environnement bâti québécois via le développement d'une approche intégrée et accessible à un grand nombre d'acteurs du secteur. La mise en œuvre des cas d'usages dans le but de rencontrer les propositions de valeurs, notamment au moyen de la mise en œuvre d'un processus supporté par le BIM visant à permettre de calculer les différents indicateurs de circularité de solutions proposées au niveau du matériau, produit, système et bâtiment, est prometteuse mais reste relativement embryonnaire. Ceux-ci devaient permettre d'avoir une vue d'ensemble du cycle de vie des composantes de l'environnement bâti afin de faciliter la prise de décision en matière de planification, conception, réalisation, exploitation et réutilisation des actifs bâtis pour assurer la circularité de celles-ci dans une perspective de développement durable. Cependant, de nombreux défis ont été soulevés dans le développement et la mise en œuvre de la solution. Ces défis sont discutés ci-dessous.

L'interopérabilité :

Encore à ce jour, aucune solution d'échange de données automatique et bidirectionnelle n'a pu être trouvée pour le projet. La solution Speckle que nous avons sélectionné n'est pas encore arrivée à maturité et est toujours en cours de développement par l'éditeur. Les plug-ins proposés par Speckle ont donc présenté des limites technologiques au travers de retards et des bogues lorsque les données sont mises à jour sur la plateforme, et ce particulièrement lorsque ces données sont échangées de Sketchup à Revit. Aussi, la plupart des données IFC ont été perdues pendant le processus, telles que les propriétés physiques des composants, rendant leur exploitation impossible pour notre cas.

La piste de solution pour résoudre ce problème serait que l'équipe de conception travaille avec le logiciel de conception Rhino, avec lequel la plateforme Speckle présente une meilleure stabilité. Cependant, il serait demandé à l'équipe de conception d'établir une classification claire et simple pour permettre l'extraction aisée et structurée des données de classification dans l'outil de quantification, ce qui facilitera la modélisation paramétrique du projet. En attendant la résolution du problème, l'équipe de conception a fourni à l'équipe de recherche ses modèles Sketchup et Rhino et le processus a dû être fait de façon manuelle.

Une évaluation qui manque encore de robustesse :

L'équipe de recherche a été confrontée à de nombreux obstacles dans l'application de la méthodologie du BCI. La création de l'outil d'évaluation a représenté un temps d'élaboration majeur dû à une difficulté de modélisation adaptée pour l'exercice. En effet, les défis d'interopérabilité présentés précédemment, ont entraîné une conséquence sur le bon déroulement de l'évaluation de la circularité du projet. L'exportation du premier modèle Sketchup vers Revit a résulté en un modèle purement géométrique, que l'équipe de recherche a dû entièrement reparamétriser. Une première erreur a été faite en n'intégrant pas les classifications Unifomat II et MasterFormat dans ces paramètres, donnant pour résultat un relevé de quantité manquant d'organisation adéquat pour la mesure de la circularité. Un travail d'organisation a dû être réalisé dans le fichier Excel. Des

points d'attention sont à porter sur la précision des découpages pour les quantités et la vérification pertes de données lors du transfert des modèles Sketchup/Rhino vers Revit pour qu'elles soient intégrées au projet.

Difficultés rencontrées pour les sources de données

Le calcul des différents indicateurs nécessite un certain nombre de données. Pour rappel, le MCI est calculé en fonction des données suivantes :

Calcul de la part de matière vierge :

- Matières premières dérivées de matériaux recyclés
- Matières premières dérivées de matériaux réutilisés
- Efficacité de recyclage des matières premières

Calcul de la part de déchets non récupérables :

- Matières d'utilisation finale destinées au recyclage
- Matières d'utilisation finale destinées à la réutilisation
- Efficacité de recyclage des préparations commerciales

Calcul du facteur d'utilité:

- La durée de vie (L) : Indique la durée de vie d'utilisation moyenne du produit par rapport à la moyenne de l'industrie.
- La composante intensité d'utilisation (U) : Définit la fréquence d'utilisation du produit.

À ce jour, aucune base de données adaptée et cohérente pour le contexte de la construction québécoise n'a été trouvée. L'équipe de recherche a tenté de trouver des données dans les bases de données d'analyse en cycle de vie (ACV) suivantes :

- Ecoinvent,
- OpenLCA,
- LCA commons

Cependant, les différentes bases pour les ACV ne contiennent pas les informations spécifiques pour l'indicateur de circularité pour le bâtiment. L'équipe a tenté de se tourner vers la base de données Origin, qui contient des informations qui peuvent satisfaire à nos besoins mais celle-ci n'est pas toujours complète pour certains produits.

Comme indiqué précédemment, les données fournies par RECYC-QUÉBEC sont celles qui correspondent le mieux au besoin de l'analyse. Cependant il nous a été indiqué par l'organisme que ces données manquent de fiabilité. La traçabilité se montre donc primordiale pour fournir des données sur lesquelles se fier. L'équipe de recherche tient à signaler qu'il est primordial de développer une base de données locale avec des données cohérentes et fiables sur la circularité des matériaux afin de mener des analyses robustes.

La notion de traçabilité des matériaux, et donc de leurs données, s'intègre pleinement dans la discipline de la gestion de l'information des projets, et des enjeux que nous avons discuté dans notre cadre. Cependant, pour renforcer cette coordination de l'information pour une traçabilité optimale, il sera important d'étudier la question de responsabilité de conserver et maintenir les données à jour dans les projets. Il se pourrait que chaque acteur se devra de respecter le principe de pollueur-payeur, où chacun devra être responsable des déchets qu'il produit, l'obligeant ainsi à maîtriser le flux de données de matières de ses biens et services. Nous pouvons retrouver cet exemple pour d'autres industries québécoises, à travers la Responsabilité Élargie du

Producteur (REP) qui régleme et responsabilise les entreprises sur les déchets qu'ils produisent. Pour le secteur de la construction, nous pouvons citer l'exemple français de la REP des produits et matériaux de construction du bâtiment, qui applique le concept dans ce domaine. Ajouter un aspect réglementaire tel que la REP, peut inciter à réduire les enjeux de traçabilité, cependant, nous avons vu que le secteur de la construction est composé de projets complexes, et fragmentés par nature. Si chacun dispose de sa propre base de données, nous en revenons alors à notre discussion sur la coordination des données, en plus d'un aspect juridique qui pourrait entrer en considération pour la confidentialité et sécurité des données d'entreprises. Il est donc capital de faciliter cette collaboration notamment grâce à des modes de projets collaboratifs et intégrés, avec un coordinateur et une répartition équitable des responsabilités des données, et à des outils facilitant ces échanges de tels que le BIM et les environnements de données communs.

Un point d'attention particulier doit être porté sur le découpage du projet, afin de définir adéquatement les différents produits et systèmes, ainsi que les facteurs de pondération qui leurs sont attribués, afin que l'analyse de la circularité soit la plus cohérente possible. Il est conseillé de réaliser ce découpage en amont du projet pour que toutes les équipes travaillent de manière uniforme, facilitant la collaboration et le bon déroulement du projet.

Finalement, il était attendu que l'approche proposée permette de lever plusieurs freins identifiés en lien avec l'économie circulaire, dont le manque d'expertise au Québec sur le recensement et la traçabilité des matériaux tout au long du cycle de vie d'un actif bâti, favorise l'utilisation de matériaux recyclés / réutilisés dans les projets de construction au Québec, permette d'intégrer les acteurs de la chaîne de valeur pour optimiser et pleinement bénéficier de la mise en œuvre des pratiques de l'économie circulaire et facilite la capture et la gestion d'informations sur les matériaux, leur entretien, et leur réemploi.

6. Conclusion

Alors que l'industrie des actifs bâtis continue d'adopter de nouvelles technologies en réponse, entre autres, aux préoccupations croissantes en matière de durabilité, la traçabilité est susceptible de devenir un aspect de plus en plus important de l'EC à la lumière des besoins émergents pour une meilleure gestion de l'information tout au long du cycle de vie des biens. Pour soutenir cette tendance et à la lumière des nombreux défis évoqués, le cadre de traçabilité présenté dans ce document est un moyen d'étudier et de soutenir la traçabilité pour soutenir les principes de l'EC.

Basée sur le modèle de référence de la traçabilité de Ramesh & Jarke (Ramesh & Jarke, 2001), cette recherche a encadré les normes, les lignes directrices, les principes et les stratégies existants en cinq dimensions. Faciliter la circularité des matériaux et des produits dans la poursuite des objectifs de durabilité a été identifié comme la principale raison de mettre en œuvre la traçabilité dans l'industrie des biens construits. La circularité implique un changement d'état d'esprit, passant d'un modèle linéaire "prendre-faire-jeter" à un modèle circulaire "fabriquer-utiliser-réutiliser". Cela signifie que les entreprises et les individus doivent penser à l'ensemble du cycle de vie des produits et des matériaux, de l'exigence à la fin de vie, et assumer la responsabilité de leur impact sur les capitaux environnementaux, financiers et sociaux de la planète. Afin de soutenir la circularité par le biais de la traçabilité, il est important de disposer d'un système solide et fiable pour suivre et vérifier les informations tout au long du cycle de vie des biens. Ce système peut inclure toutes les données traçables relatives aux entités, aux activités, aux acteurs, aux processus, aux systèmes et aux contextes, ce qui permet de combler le manque d'informations.

Comblé le fossé de la collaboration entre les acteurs est un autre facteur critique qui devrait être encouragé par une collaboration et une coordination transparente. Si plusieurs personnes et équipes peuvent être impliquées dans un projet et au cours du cycle de vie d'un bien, la mise en place d'une plateforme de collaboration peut faciliter la communication et le partage des connaissances à des fins de traçabilité. Cependant, encourager toutes les parties au projet à utiliser une approche intégrée de la traçabilité peut s'avérer difficile en raison d'une mauvaise gestion du changement ou d'une réticence à surmonter les obstacles techniques et financiers. Par conséquent, il convient d'adopter des stratégies efficaces pour communiquer les avantages et les incitations potentiels, sensibiliser à l'importance de la traçabilité ou s'engager dans de petits projets pilotes pour démontrer la valeur de la collaboration à l'appui de la traçabilité à tous les stades du cycle de vie.

Enfin, il est nécessaire de disposer de catalyseurs et de moteurs efficaces pour comprendre "comment" la traçabilité peut être mise en œuvre avec succès. D'un point de vue organisationnel, l'utilisation des données PPM peut fournir un terrain commun aux acteurs pour s'assurer qu'ils ont tous accès aux mêmes informations sur les matériaux et leurs propriétés détaillées. Pour mieux intégrer les sources de données multiples, une plateforme de passeport matériel (MPP) a été récemment introduite par BAMB (Holla, 2017), permettant aux parties au projet de partager et de personnaliser les données de leurs produits sur la base des lignes directrices du PPM. Une telle plateforme et sa base de données peuvent être utilisées par les acteurs pour obtenir un enregistrement numérique transparent des matériaux, ainsi qu'un ensemble diversifié d'informations provenant de différentes disciplines. Malgré ces contributions, la qualité des entrées de données, la crédibilité des données, l'exactitude des données et les coûts de collecte des données sont restés des défis majeurs qui doivent être relevés pour surmonter le problème du "garbage in, garbage out" dans les PPM (Kedir et al., 2021). D'un point de vue technologique, l'industrie des actifs bâtis subit une transformation numérique et la mise en œuvre de technologies intelligentes à des fins de traçabilité nécessite des infrastructures adéquates, des

normes complètes et une expertise technique. Pour surmonter ces obstacles, il faudra une étroite collaboration entre les parties prenantes et une volonté d'adopter les nouvelles technologies, malgré le fait que l'industrie des actifs bâtis se caractérise par un degré élevé de fragmentation.

Le cadre proposé sert de base à une étude plus approfondie du rôle de la traçabilité dans le soutien de la circularité des matériaux et des produits à tous les stades du cycle de vie. Le cadre soutient la circularité des produits en promouvant des modèles de données automatisés et intégrés, articulés dans le cadre proposé, qui soutiennent la réutilisation, le recyclage et la refabrication des produits construits aux niveaux micro et macro. L'utilisation du cadre de traçabilité proposé devrait permettre d'établir une condition de remplacement des matières premières par des matériaux recyclés à différentes échelles.

Une fois le cadre de traçabilité établi, des cas d'usages spécifiques à l'appui de la traçabilité rencontrant des propositions de valeur ont été développés et opérationnalisés sur une étude de cas. L'opérationnalisation des cas d'usage a permis de détailler les aspects techniques et opérationnels de la mise en œuvre de stratégies permettant d'atteindre des objectifs de circularité. Il a notamment été question de tracer le cycle de vie d'un projet dans le contexte où un produit est retiré du bâtiment, remis à neuf, puis utilisé dans un autre bâtiment. L'autre étude de cas vise l'agrégation des passeports matériaux à différentes fins, par exemple en fonction des produits, des bâtiments et des propriétés. Une étude de cas a été ciblée afin d'opérationnaliser les cas d'usages. Divers indicateurs de circularité ont été pilotés sur cette étude de cas. Le projet présenté dans ce rapport présente cependant quelques limites. Tout d'abord, les cas d'usages n'ont été appliqués qu'à une seule étude de cas unique. D'autres cas d'études permettraient de valider leur application, et notamment une application sur un projet de plus grande envergure serait souhaitable. Aussi, les indicateurs calculés pour ce projet se sont limités au niveau système et ne représentent donc pas l'évaluation complète du projet.

À l'issue de ce projet, nous identifions comme pertinent de mener un futur travail sur les indicateurs afin d'élargir leur application à l'ensemble du bâtiment et de définir d'autres indicateurs de circularité qui pourraient supporter la prise de décision dans les projets. Il serait intéressant de mener une étude avec plus de parties prenantes afin d'élargir l'horizon de l'étude et faciliter certains aspects comme l'accès aux données. Finalement, dans un but de standardisation de ces cas d'usages, il serait important d'opérationnaliser les solutions proposées sur plusieurs types de projets différents pour définir une méthodologie systématique afin de supporter la circularité des projets.

Références

3XN Architects. (2018). *Buidling a Circular Future—3rd Edition*.

Ademujimi, T. T., Brundage, M. P., & Prabhu, V. V. (2017). A Review of Current Machine Learning Techniques Used in Manufacturing Diagnosis. In H. Lödding, R. Riedel, K.-D. Thoben, G. von Cieminski, & D. Kiritsis (Eds.), *Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing* (Vol. 513, pp. 407–415). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66923-6_48

Aiello, G., Enea, M., & Muriana, C. (2015). The expected value of the traceability information. *European Journal of Operational Research*, 244(1), 176–186. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.01.028>

Alani, Y., Dawood, N., Patacas, J., Rodriguez, S., & Dawood, H. (2021). A semantic common model for product data in the water industry. *Journal of Information Technology in Construction*, 26, 566–590. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.030>

Bonizzi, I., Feligini, M., Aleandri, R., & Enne, G. (2007). Genetic traceability of the geographical origin of typical Italian water buffalo Mozzarella cheese: A preliminary approach. *Journal of Applied Microbiology*, 102(3), 667–673. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2006.03131.x>

Bougdira, A., Akharraz, I., & Ahaitouf, A. (2020). A traceability proposal for industry 4.0. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 11(8), 3355–3369. <https://doi.org/10.1007/s12652-019-01532-7>

Brandín, R., & Abrishami, S. (2021). Information traceability platforms for asset data lifecycle: Blockchain-based technologies. *Smart and Sustainable Built Environment*, 10(3), 364–386. <https://doi.org/10.1108/SASBE-03-2021-0042>

BRE Global Ltd. (2014). *BES 6001: ISSUE 3.0 Framework Standard for Responsible Sourcing*, Watford. BREGroup. <https://bregroup.com/insights/bes-6001-framework-for-responsible-sourcing/>

Cleland-Huang, J., Chang, C. K., & Christensen, M. (2003). Event-based traceability for managing evolutionary change. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 29(9), 796–810. <https://doi.org/10.1109/TSE.2003.1232285>

Cleland-Huang, J., Chang, C. K., Sethi, G., Javvaji, K., Haijian Hu, & Jinchun Xia. (2002). Automating speculative queries through event-based requirements traceability. *Proceedings IEEE Joint International Conference on Requirements Engineering*, 289–296. <https://doi.org/10.1109/ICRE.2002.1048540>

Cleland-Huang, J., Chang, C. K., & Yujia Ge. (2002). Supporting event based traceability through high-level recognition of change events. *Proceedings 26th Annual International Computer Software and Applications*, 595–600. <https://doi.org/10.1109/CMPSAC.2002.1045069>

Cleland-Huang, J., Gotel, O. C. Z., Huffman Hayes, J., Mäder, P., & Zisman, A. (2014). Software traceability: Trends and future directions. *Future of Software Engineering Proceedings*, 55–69. <https://doi.org/10.1145/2593882.2593891>

Cleland-Huang, J., Marrero, W., & Berenbach, B. (2008). Goal-Centric Traceability: Using Virtual Plumblines to Maintain Critical Systemic Qualities. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 34(5), 685–699. <https://doi.org/10.1109/TSE.2008.45>

- Dalvit, C., De Marchi, M., & Cassandro, M. (2007). Genetic traceability of livestock products: A review. *Meat Science*, 77(4), 437–449. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.05.027>
- Dalvit, C., De Marchi, M., Targhetta, C., Gervaso, M., & Cassandro, M. (2008). Genetic traceability of meat using microsatellite markers. *Food Research International*, 41(3), 301–307. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2007.12.010>
- David, J., Jarvenpaa, E., & Lobov, A. (2021). Digital Threads via Knowledge-Based Engineering Systems. 2021 30th Conference of Open Innovations Association FRUCT, 42–51. <https://doi.org/10.23919/FRUCT53335.2021.9599986>
- de Lange, P., Bähre, B., Finetti-Imhof, C., Klamma, R., & Oppermann, L. (n.d.). Socio-technical Challenges in the Digital Gap between Building Information Modeling and Industry 4.0.
- de Lusignan, S., Liaw, S.-T., Krause, P., Curcin, V., Vicente, M., Michalakidis, G., Agreus, L., Leysen, P., Shaw, N., & Mendis, K. (2011). Key Concepts to Assess the Readiness of Data for International Research: Data Quality, Lineage and Provenance, Extraction and Processing Errors, Traceability, and Curation: Contribution of the IMIA Primary Health Care Informatics Working Group. *Yearbook of Medical Informatics*, 20(01), 112–120. <https://doi.org/10.1055/s-0038-1638748>
- Debacker, W., & Manshoven, S. (2016). D1 synthesis of the state-of-the-art: Key barriers and opportunities for materials passports and reversible building design in the current system. https://www.bamb2020.eu/wp-content/uploads/2016/03/D1_Synthesis-report-on-State-of-the-art_20161129_FINAL.pdf
- Dömges, R., & Pohl, K. (1998). Adapting traceability environments to project-specific needs. *Communications of the ACM*, 41(12), 54–62. <https://doi.org/10.1145/290133.290149>
- Durmišević, E. (2018). Reversible building design. In M. Charter (Ed.), *Designing for the Circular Economy* (1st ed., pp. 344–359). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315113067-32>
- Eadie, R., Browne, M., Odeyinka, H., McKeown, C., & McNiff, S. (2013). BIM implementation throughout the UK construction project lifecycle: An analysis. *Automation in Construction*, 36, 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.09.001>
- EEA. (2011). Regulation (EU) No 305/2011 of the European Parliament and of the Council. EUR-Lex.
- Ellen MacArthur Foundation, “Circularity indicators an approach to measuring circularity (methodology),” (2015) <https://emf.thirdlight.com/link/3jtevhlkbukz-9of4s4/@/preview/1?o>
- European Environment Agency. (2016). Circular economy in Europe: Developing the knowledge base. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2800/51444>
- Falleri, J.-R., Huchard, M., & Nebut, C. (2006). Towards a traceability framework for model transformations in Kermet.
- Folinas, D., Manikas, I., & Manos, B. (2006). Traceability data management for food chains. *British Food Journal*, 108(8), 622–633. <https://doi.org/10.1108/00070700610682319>
- Garcia-Torres, S., Albareda, L., Rey-Garcia, M., & Seuring, S. (2019). Traceability for sustainability – literature review and conceptual framework. *Supply Chain Management: An International Journal*, 24(1), 85–106. <https://doi.org/10.1108/SCM-04-2018-0152>

- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Glass, J., Achour, N., Parry, T., & Nicholson, I. (2012). Engaging small firms in sustainable supply chains: Responsible sourcing practices in the UK construction industry. *International Journal of Agile Systems and Management*, 5(1), 29. <https://doi.org/10.1504/IJASM.2012.045900>
- Gotel, O. C. Z., & Finkelstein, C. W. (1994). An analysis of the requirements traceability problem. *Proceedings of IEEE International Conference on Requirements Engineering*, 94–101. <https://doi.org/10.1109/ICRE.1994.292398>
- Gotel, O., Cleland-Huang, J., Hayes, J. H., Zisman, A., Egyed, A., Grunbacher, P., & Antoniol, G. (2012). The Quest for Ubiquity: A roadmap for software and systems traceability research. *2012 20th IEEE International Requirements Engineering Conference (RE)*, 71–80. <https://doi.org/10.1109/RE.2012.6345841>
- Hackitt, D. J. (2018). *Building a safer future*. Longworth.
- Heinrich, M., & Lang, W. (2019). *MATERIALS PASSPORTS - BEST PRACTICE*. 74.
- Holla, A. (2017). *External Supervisor: Monique Fledderman, VMRG*. 180.
- Honic, M., Kovacic, I., & Rechberger, H. (2019). Concept for a BIM-based Material Passport for buildings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 225, 012073. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012073>
- Honic, M., Kovacic, I., Sibenik, G., & Rechberger, H. (2019). Data- and stakeholder management framework for the implementation of BIM-based Material Passports. *Journal of Building Engineering*, 23, 341–350. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.01.017>
- Islam, S., Manning, L., & Cullen, J. M. (2021). A Hybrid Traceability Technology Selection Approach for Sustainable Food Supply Chains. *Sustainability*, 13(16), 9385. <https://doi.org/10.3390/su13169385>
- Jansen-Vullers, M. H., van Dorp, C. A., & Beulens, A. J. M. (2003). Managing traceability information in manufacture. *International Journal of Information Management*, 23(5), 395–413. [https://doi.org/10.1016/S0268-4012\(03\)00066-5](https://doi.org/10.1016/S0268-4012(03)00066-5)
- Jiang, S., Jiang, L., Han, Y., Wu, Z., & Wang, N. (2019). OpenBIM: An Enabling Solution for Information Interoperability. *Applied Sciences*, 9(24), 5358. <https://doi.org/10.3390/app9245358>
- Kamara, J. M., Anumba, C. J., & Egbuomwan, N. F. O. (2000). Establishing and processing client requirements—A key aspect of concurrent engineering in construction. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 7(1), 15–28. <https://doi.org/10.1108/eb021129>
- Karlsen, K. M., Dreyer, B., Olsen, P., & Elvevoll, E. O. (2013). Literature review: Does a common theoretical framework to implement food traceability exist? *Food Control*, 32(2), 409–417. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.12.011>
- Katenbayeva, A., Jacqui, G., Anvuur, A., & Ghumra, S. (2017). *Developing a theoretical framework of traceability for sustainability in the construction sector*. Loughborough University. https://repository.lboro.ac.uk/articles/conference_contribution/Developing_a_theoretical_framework_of_traceability_for_sustainability_in_the_construction_sector/9436811

- Kedir, F., Bucher, D. F., & Hall, D. M. (2021). A Proposed Material Passport Ontology to Enable Circularity for Industrialized Construction. 91–98. <https://doi.org/10.35490/EC3.2021.159>
- Kintscher, L., Lawrenz, S., & Poschmann, H. (2021). A Life Cycle Oriented Data-Driven Architecture for an Advanced Circular Economy. *Procedia CIRP*, 98, 318–323. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.110>
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Kwon, S., Monnier, L. V., Barbau, R., & Bernstein, W. Z. (2020a). Enriching standards-based digital thread by fusing as-designed and as-inspected data using knowledge graphs. *Advanced Engineering Informatics*, 46, 101102. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101102>
- Kwon, S., Monnier, L. V., Barbau, R., & Bernstein, W. Z. (2020b). Enriching standards-based digital thread by fusing as-designed and as-inspected data using knowledge graphs. *Advanced Engineering Informatics*, 46, 101102. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101102>
- Lago, P., Muccini, H., & van Vliet, H. (2009). A scoped approach to traceability management. *Journal of Systems and Software*, 82(1), 168–182. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2008.08.026>
- Laski, J., & Burrows, V. (2017). From thousands to billions: Coordinated action towards 100% net zero carbon buildings by 2050. World Green Building Council.
- Lawrenz, S., Nippraschk, M., Wallat, P., Rausch, A., Goldmann, D., & Lohrengel, A. (2021). Is it all about Information? The Role of the Information Gap between Stakeholders in the Context of the Circular Economy. *Procedia CIRP*, 98, 364–369. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.118>
- Li, X., Lv, F., Xiang, F., Sun, Z., & Sun, Z. (2020). Research on Key Technologies of Logistics Information Traceability Model Based on Consortium Chain. *IEEE Access*, 8, 69754–69762. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2986220>
- Liu, H. (2022). Combating unethical producer behavior: The value of traceability in produce supply chains. *International Journal of Production Economics*, 244, 108374. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108374>
- Lucky, M. N., Pasini, D., & Spagnolo, S. L. (2019). Product Data Management for Sustainability: An Interoperable Approach for Sharing Product Data in a BIM Environment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 296(1), 012053. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/296/1/012053>
- Mader, P., Gotel, O., & Philippow, I. (2009). Getting back to basics: Promoting the use of a traceability information model in practice. 2009 ICSE Workshop on Traceability in Emerging Forms of Software Engineering, 21–25. <https://doi.org/10.1109/TEFSE.2009.5069578>
- Marta Maria Sesana, Graziano Salvalai, A review on Building Renovation Passport: Potentialities and barriers on current initiatives, *Energy and Buildings*, Volume 173, 2018, Pages 195-205, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.027>.
- Mejías, A. M., Bellas, R., Pardo, J. E., & Paz, E. (2019). Traceability management systems and capacity building as new approaches for improving sustainability in the fashion multi-tier supply chain. *International Journal of Production Economics*, 217, 143–158. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.03.022>
- Moe, T. (1998). Traceability in food manufacture.

- Morseletto, P. (2020). Targets for a circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 153, 104553. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104553>
- Norton, T., Beier, J., & Shields, L. (2014). *A Guide to Traceability*. United Nations Global Compact; Business for Social Responsibility United Nations Global Compac.
- Pang, T. Y., Pelaez Restrepo, J. D., Cheng, C.-T., Yasin, A., Lim, H., & Miletic, M. (2021). Developing a Digital Twin and Digital Thread Framework for an 'Industry 4.0' Shipyard. *Applied Sciences*, 11(3), 1097. <https://doi.org/10.3390/app11031097>
- Pauzi, Z., & Capiluppi, A. (2023). Applications of natural language processing in software traceability: A systematic mapping study. *Journal of Systems and Software*, 198, 111616. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2023.111616>
- Pearson, S., May, D., Leontidis, G., Swainson, M., Brewer, S., Bidaut, L., Frey, J. G., Parr, G., Maull, R., & Zisman, A. (2019). Are Distributed Ledger Technologies the panacea for food traceability? *Global Food Security*, 20, 145–149. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.02.002>
- Pinheiro, C. (n.d.). REQUIREMENTS TRACEABILITY. *Perspectives on Software Requirements*.
- Poirier, E., Forgues, D., & Staub-French, S. (2016). Collaboration through innovation: Implications for expertise in the AEC sector. *Construction Management and Economics*, 34(11), 769–789. <https://doi.org/10.1080/01446193.2016.1206660>
- Ramesh, B. (2002). Process knowledge management with traceability. *IEEE Software*, 19(3), 50–52. <https://doi.org/10.1109/MS.2002.1003454>
- Ramesh, B., & Jarke, M. (2001). Toward reference models for requirements traceability. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 27(1), 58–93. <https://doi.org/10.1109/32.895989>
- Rival, A., Montet, D., & Pioch, D. (2016). Certification, labelling and traceability of palm oil: Can we build confidence from trustworthy standards? *OCL*, 23(6), D609. <https://doi.org/10.1051/ocl/2016042>
- Saaksvuori, A., & Immonen, A. (2008). *Product Lifecycle Management*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-78172-1>
- Sarsam, S. I. (2015). Sustainable and Green Roadway Rating System. *International Journal of Scientific Research in Environmental Sciences*, 3(3), 99–106. <https://doi.org/10.12983/ijres-2015-p0099-0106>
- Singh, V., & Willcox, K. E. (2018). Engineering Design with Digital Thread. *AIAA Journal*, 56(11), 4515–4528. <https://doi.org/10.2514/1.J057255>
- Succar, B. (2009). Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. *Automation in Construction*, 18(3), 357–375. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.10.003>
- Succar, B., & Poirier, E. (2020). Lifecycle information transformation and exchange for delivering and managing digital and physical assets. *Automation in Construction*, 112, 103090. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103090>
- Verberne, J. J. H. (2016). *Building circularity indicators: an approach for measuring circularity of a building*. Student thesis: Master. Eindhoven University of Technology. <https://research.tue.nl/en/studentTheses/8fb5165b-563e-44f3-b27d-edade8ff334d>
- Walden, J., Steinbrecher, A., & Marinkovic, M. (2021). Digital Product Passports as Enabler of the Circular Economy. *Chemie Ingenieur Technik*, 93(11), 1717–1727. <https://doi.org/10.1002/cite.202100121>

- Wang, J., Wang, J.-M., & Zhang, Y.-J. (2018). Agricultural Product Quality Traceability System Based on the Hybrid Mode. 2018 4th Annual International Conference on Network and Information Systems for Computers (ICNISC), 392–395. <https://doi.org/10.1109/ICNISC.2018.00086>
- Wang, K.-S. (2014). Intelligent and integrated RFID (II-RFID) system for improving traceability in manufacturing. *Advances in Manufacturing*, 2(2), 106–120. <https://doi.org/10.1007/s40436-014-0053-6>
- Wang, S., Li, T., & Yang, Z. (2019). Exploring Semantics of Software Artifacts to Improve Requirements Traceability Recovery: A Hybrid Approach. 2019 26th Asia-Pacific Software Engineering Conference (APSEC), 39–46. <https://doi.org/10.1109/APSEC48747.2019.00015>
- Watson, R., Kassem, M., & Li, J. (2019). Traceability for Built Assets: Proposed Framework for a Digital Record. *Proceedings of the Creative Construction Conference 2019*, 496–501. <https://doi.org/10.3311/CCC2019-068>
- Wohlrab, R., Knauss, E., Steghöfer, J.-P., Maro, S., Anjorin, A., & Pelliccione, P. (2020). Collaborative traceability management: A multiple case study from the perspectives of organization, process, and culture. *Requirements Engineering*, 25(1), 21–45. <https://doi.org/10.1007/s00766-018-0306-1>
- Wohlrab, R., Steghofer, J.-P., Knauss, E., Maro, S., & Anjorin, A. (2016). Collaborative Traceability Management: Challenges and Opportunities. 2016 IEEE 24th International Requirements Engineering Conference (RE), 216–225. <https://doi.org/10.1109/RE.2016.17>
- Wright, B. (2020). Compilation of Various Questions and Answers about EPA Traceability Protocol for Gaseous Calibration Standards.
- Zhou, W., & Piramuthu, S. (2015). IoT and Supply Chain Traceability. In R. Doss, S. Piramuthu, & W. Zhou (Eds.), *Future Network Systems and Security* (Vol. 523, pp. 156–165). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19210-9_11

