
Mémoire de fin d'études : " Quels sont les enjeux du BIM pour la réalisation d'un inventaire réemploi ?".

Auteur : Parée, Charles

Promoteur(s) : de Boissieu, Aurélie; Halbach, Amélie

Faculté : Faculté d'Architecture

Diplôme : Master en architecture, à finalité spécialisée en art de bâtir et urbanisme

Année académique : 2023-2024

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/21575>

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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



Université de Liège - faculté d'Architecture

Le BIM en tant que support à la réalisation et la gestion d'un inventaire réemploi

Travail de fin d'études présenté par Charles PAREE en vue de l'obtention du grade de Master
en Architecture

Sous la direction de : Aurélie DE BOISSIEU & Amélie HALBACH
Année académique 2023-2024
Axe de recherche : Culture numérique

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier les différentes personnes ayant contribué à la réalisation de ce mémoire.

Je remercie ma promotrice, Madame Aurélie de Boissieu, pour ses conseils et son soutien. Je remercie également ma co-promotrice, Aurélie Halbach, pour ses précieux et nombreux conseils ainsi que son accompagnement constructif tout au long de ce mémoire.

Je suis également reconnaissant envers Stefan De Feyter, professeur à l'université Thomas More et Cuno De Smet, étudiant dans la même institution, pour leur aide essentielle à la réalisation de la méthode 3DR dans ce travail.

Je tiens à remercier Mathilde Parée et Barbara Vandercam pour leur généreuse mise à disposition de leur future maison pour cette recherche, sans en entraver le déroulement.

Enfin, mes remerciements vont à l'ensemble de ma famille pour leur soutien au cours de ces cinq années d'études.

RESUME

Dans le cadre de la transition du secteur de la construction vers une économie circulaire, ce mémoire a pour objectif d'étudier les enjeux du BIM pour réaliser et gérer d'un inventaire réemploi. En effet, la gestion et l'échange des informations sur les éléments de réemploi sont essentiels pour garantir leur récupération. Les logiciels BIM offrent alors un potentiel pour structurer, gérer et partager efficacement ces informations, ce qui fait actuellement défaut dans le secteur du réemploi. De plus, la manipulation des modèles BIM peut également faciliter l'évaluation du potentiel de réemploi des éléments de construction.

Cette recherche analyse la capacité d'un modèle BIM à fonctionner comme un inventaire réemploi. La méthodologie consiste à réaliser un inventaire réemploi BIM des éléments de construction présent dans une maison bruxelloise, suivi d'un démontage réel de ces éléments. Cette méthode expérimentale permet de comprendre comment le BIM peut structurer et stocker les informations nécessaires au réemploi. Nous examinerons également comment ce modèle BIM peut faciliter l'évaluation du potentiel de réemploi des éléments de construction. Les résultats obtenus lors de la modélisation BIM seront ensuite comparés avec ceux observés lors du démontage. Enfin, nous observerons la nécessité d'adapter les logiciels BIM pour répondre aux spécificités du réemploi.

MOTS CLES

BIM
Digital Deconstruction
Urban Mining
Economie circulaire
Inventaire réemploi
Réemploi

ABSTRACT

As part of the transition of the construction sector towards a circular economy, this thesis aims to explore the challenges of using BIM for the creation and management of a reuse inventory. Managing and exchanging information about reusable elements are essential to ensure their recovery. BIM software offers significant potential to structure, manage, and share this information effectively, which is currently lacking in the reuse sector. Additionally, manipulating BIM models can also facilitate the assessment of the reuse potential of construction elements.

This research examines the capability of a BIM model to function as a reuse inventory. The methodology involves creating a BIM reuse inventory of construction elements in a Brussels house, followed by the actual dismantling of these elements. This experimental approach allows us to understand to analyse how BIM can structure and store the information needed for reuse. We will also explore how the BIM model can facilitate the assessment of the reuse potential of construction elements. The results obtained from the BIM modeling will then be compared with those observed during the dismantling process. Finally, the research highlights the need to adapt BIM software to meet the specific requirements of reuse.

KEY WORDS

BIM
Digital Deconstruction
Urban Mining
Circular Economy
Reuse Inventory
Reuse

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	2
RESUME	3
MOTS CLES.....	3
ABSTRACT	4
KEY WORDS.....	4
TABLE DES MATIÈRES	5
INTRODUCTION.....	8
PARTIE I : ÉTAT DE L'ART.....	10
1. L'économie circulaire.....	11
1.1. Les trois principes de l'économie circulaire	11
1.2. L'économie circulaire dans le domaine de la construction	13
1.3. Urban mining.....	15
2. Le traitement des éléments de construction	18
2.1. L'élimination	18
2.2. La valorisation énergétique	20
2.3. Le recyclage	20
2.4. La préparation au réemploi	22
2.5. La prévention (le réemploi)	23
2.5.1. Les impacts environnementaux du réemploi dans le secteur de la construction.....	26
3. Les informations permettant de faire circuler les éléments de construction.....	28
3.1. Les informations techniques.....	29
3.2. Les informations économiques.....	32
3.3. Les informations culturelles.....	33
4. Les inventaires dans le domaine de la construction.....	33
4.1. L'inventaire démolition	34
4.2. L'inventaire réemploi	34
4.3. Fusionner l'inventaire démolition et l'inventaire réemploi.....	38
5. Le BIM.....	39
5.1. La définition du BIM	39
5.2. Le jargon du BIM : le protocole BIM, le plan d'exécution BIM et le document de vision BIM	40
5.3. Les acteurs du BIM	41
5.4. Building Information Model : la maquette numérique	42
5.4.1. Niveaux de développement (LOD), de détail (LoD) et le niveau d'information (LoI)	44
5.4.2. Les huit dimensions du BIM	46

6.	Le potentiel du BIM pour faciliter la réalisation et la gestion d'un inventaire réemploi.....	47
6.1.	Les opportunités et les limites du BIM pour l'inventaire réemploi.....	47
6.2.	Acquisition et organisation de l'information dans le modèle BIM.....	50
7.	Le potentiel du BIM pour évaluer le potentiel de réemploi.....	51
7.1.	La méthode 3DR.....	52
8.	Conclusion et questions recherche.....	54
PARTIE II : MÉTHODOLOGIE.....		55
1.	Cadre théorique de la recherche.....	56
1.1.	La recherche qualitative.....	56
1.2.	La recherche expérimentale.....	57
2.	Méthodologie de recherche.....	57
3.	Application de la recherche expérimentale.....	58
3.1.	Ordinateur et logiciels utilisés.....	58
3.1.1.	Ordinateur utilisé.....	58
3.1.2.	Revit.....	58
3.1.3.	Dynamo pour Revit.....	59
3.2.	Choix du terrain.....	59
3.3.	Étapes de la méthode expérimentale.....	59
3.3.1.	Étape 1 : Inventorisation des éléments de réemploi sur le site.....	60
3.3.2.	Étape 2 : Création du modèle numérique BIM.....	60
3.3.3.	Étape 3 : Application de la méthode 3DR.....	61
3.3.4.	Étape 4 : Démontage effectif.....	62
3.3.5.	Étape 5 : Confrontation des résultats.....	62
3.4.	Méthode de recueil des données.....	62
4.	Conclusion.....	62
PARTIE III : RÉSULTATS ET DISCUSSION.....		63
1.	Présentation des résultats.....	64
1.1.	L'inventaire numérique BIM.....	64
1.2.	Évaluation du potentiel de réemploi.....	73
1.3.	Démontage effectif.....	81
1.4.	Confrontation des résultats.....	85
1.5.	Conclusion.....	85
2.	Discussion.....	86
2.1.	Les enjeux du BIM pour la réalisation d'un inventaire réemploi.....	86
2.1.1.	Opportunités du BIM pour la réalisation et la gestion d'un inventaire réemploi.....	87
2.1.2.	Limites du BIM pour la réalisation et la gestion d'un inventaire réemploi.....	88

2.2. Le stockage des informations dans le modèle numérique BIM	88
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	89
TABLE DES FIGURES.....	90
LISTE DES TABLEAUX	92
LISTE DES ÉQUATIONS.....	93
BIBLIOGRAPHIE	94
ANNEXES.....	98
Annexe 1 : Exemple d’inventaire réemploi.....	98
Annexe 2 : Protocole BIM.....	102
1. Contexte et objectif	103
1.1. Contexte : Le projet	103
1.1.1. Situation existante : plan de démolition.....	104
1.1.2. Situation projetée : plan de rénovation.....	106
1.2. Objectifs	108
1.3. Parties prenantes.....	108
1.3.1. Interlocuteurs.....	108
1.3.2. Le chercheur	108
2. Processus BIM – Modélisation générale	109
2.1. Processus de modélisation générale	109
.....	109
2.2. Définition et répartition de la modélisation	110
2.2.1. Appropriation et adaptation des données	110
2.2.2. Organisation du travail de modélisation.....	110
2.2.3. Création sur revit.....	110
3. Processus BIM – Les informations à échanger	111
3.1. Choix des paramètres.....	111
Annexe 3 : Inventaire réemploi (Étape 1 : Inventorisation des éléments de réemploi sur le site)	113
Annexe 4 : Tableaux Excel du « Disassemble Index Tools (DIt), « Disassemble Index Move (DIIm) et « Resilience Index (Ri) ».	115

INTRODUCTION

« La nature opère selon un système de nutriments et de métabolismes au sein duquel le déchet n'existe pas. » (McDonough & Braungart, 2011,p88).

L'espèce humaine est la seule espèce sur Terre à prendre au sol de grandes quantités de nutriment sans lui en restituer. Les méthodes d'exploitation pour l'agriculture et la production industrielle salinisent et acidifient les sols contribuant à les épuiser de plus en plus. Aujourd'hui nous perdons 500 fois plus de terres que nous n'en régénérons (McDonough & Braungart, 2011).

Face à cette réalité écologique, le secteur de la construction se révèle lui aussi être extrêmement gourmand en ressources. Il représente plus de 40 % du total des matières premières extraites à l'échelle mondiale et génère plus de 35 % des déchets totaux. De plus, il est responsable d'environ 39 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre liées à l'énergie (De Wolf et al., 2024). En outre, d'ici 2050, la majorité de la population vivra dans les zones urbaines, ce qui augmentera considérablement la consommation de matériaux pour l'urbanisation (De Wolf et al., 2024; Göswein et al., 2019).

Actuellement, le véritable problème réside dans le fait que le secteur de la construction opère dans un modèle linéaire « prendre-faire-jeter »¹. Cependant, si nous continuons dans ce modèle, nous finirons par épuiser les ressources de la Terre et la catastrophe climatique sera plus grande. Il est donc urgent que le secteur de la construction passe dans un modèle circulaire au sein duquel les ressources ne deviennent pas des déchets (De Wolf et al., 2024).

Le réemploi des éléments de construction constitue un élément clé à la mise en œuvre d'une économie circulaire (EC) dans le domaine de la construction (Gobbo, 2021a). Dans ce contexte, la réalisation d'un inventaire réemploi représente la toute première étape permettant d'évaluer le potentiel de réemploi des éléments et de gérer leur récupération (Buildwise, 2023a). Pourtant, la réalisation d'inventaire réemploi est encore très peu courante. Une meilleure prise en compte de cette approche permettrait d'encourager et de soutenir le développement du réemploi (Gobbo, 2021a).

En parallèle, l'utilisation d'outils numériques dans le secteur de la construction se développe de plus en plus (Vrijders et al., 2023). En théorie, les outils numériques peuvent faciliter la transition circulaire du secteur de la construction (De Wolf et al., 2024; de Roissart, 2022). L'utilisation d'outils tels que les maquettes numériques BIM devrait ainsi faciliter la réalisation et la gestion d'un inventaire réemploi. L'idée derrière l'utilisation du BIM est de centraliser les données et de les rendre facilement accessibles, permettant une meilleure coopération entre les différents acteurs du secteur (Vrijders et al., 2023).

Ce mémoire explore les possibilités et le potentiel du BIM pour la réalisation et la gestion d'un inventaire réemploi. Notre objectif est de comprendre et d'analyser les avantages et les limites qu'offre le BIM pour réaliser et gérer efficacement un inventaire réemploi. Ainsi, la question de recherche principale est formulée comme suit : **« Quels sont les enjeux du BIM pour la réalisation et la gestion d'un inventaire de réemploi ? »**. En complément, une question de recherche secondaire a été formulée : **« Comment stocker les informations nécessaires au réemploi dans le modèle numérique BIM ? »**.

¹ Traduction de « « Take, Make, Waste »

Pour répondre aux questions de recherche, nous avons divisé ce travail en trois parties.

Premièrement, l'état de l'art établit un cadre théorique pour ce mémoire. Il est divisé en deux parties. La première explore le concept du réemploi au sein de l'EC, définissant les champs d'application d'un inventaire réemploi. La seconde examine le jargon du BIM et son intégration possible avec l'inventaire réemploi. Cette partie se clôture par la présentation de nos hypothèses et la méthodologie utilisée.

Deuxièmement, la partie empirique de notre recherche consiste en une analyse qualitative qui permettra de valider ou d'invalider nos hypothèses. La méthode de recherche utilisée est une méthode expérimentale qui comprend la réalisation d'un inventaire réemploi d'une maison bruxelloise à l'aide d'un logiciel BIM.

Troisièmement, ce mémoire se termine par une présentation et une interprétation des résultats de notre recherche. Ces résultats seront comparés à la littérature étudiée pour en dégager des conclusions.

Ainsi, ce travail a pour objectif de comprendre comment le BIM et l'inventaire réemploi peuvent fonctionner ensemble pour favoriser la transition vers une EC.

PARTIE I : ÉTAT DE L'ART

1. L'économie circulaire

L'EC est un système qui conserve le plus longtemps possible la valeur des produits, des matériaux et des autres ressources de l'économie. Elle vise à proposer des réponses aux défis mondiaux majeurs tels que le changement climatique, la perte de la biodiversité, la production de déchets et la pollution (Ellen MacArthur Fondation, 2020; Vlaanderen Circulair, 2023).

1.1. Les trois principes de l'économie circulaire

La fondation Ellen MacArthur² identifie trois principes qui sous-tendent l'EC :

- Éliminer les déchets et la pollution

Actuellement, notre économie fonctionne selon un système linéaire « prendre-faire-jeter ». Nous prélevons des matières premières de la Terre, les transformons en produits, puis nous les éliminons comme déchets. Une grande partie de ces déchets aboutit dans des décharges ou des incinérateurs, entraînant une perte considérable de matière. Le gaspillage découle en réalité de choix de conception. Il n'y a pas de déchet dans la nature, ils sont une invention humaine (Ellen MacArthur Fondation, 2020).

Au sein de l'EC, une spécification essentielle est que les matériaux sont réintégrés dans l'économie à la fin de leur cycle d'utilisation. Cette approche permet de réduire un maximum la production de déchets (figure 1) (Ellen MacArthur Fondation, 2020).

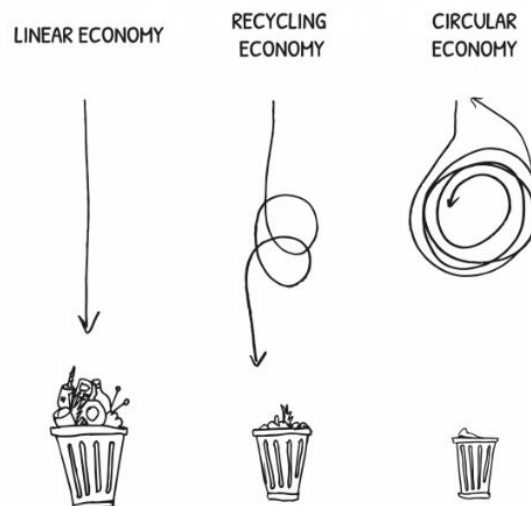


Figure 1 : L'économie linéaire, le recyclage et l'économie circulaire (Vlaanderen Circulair, 2023).

- Faire circuler les produits et les matériaux

Le deuxième principe consiste à faire circuler les produits et les matériaux de façon à éviter la production de déchets. L'EC implique de conserver les matériaux en usage, soit en tant que produit, soit, lorsqu'ils ne peuvent plus servir à leur fonction initiale, en tant que composants ou matières premières. Ainsi, aucun produit ou matériau ne devient un déchet, préservant ainsi leur valeur intrinsèque (Ellen MacArthur Fondation, 2020).

² La Fondation Ellen MacArthur est une association caritative britannique dédiée à promouvoir l'économie circulaire. Son objectif est d'inspirer une génération à repenser et reconstruire un avenir durable en mettant en pratiques les principes de l'économie circulaire.

Les produits et les matériaux circulent au sein de deux métabolismes distincts qui cohabitent sur notre planète. Le premier est le métabolisme biologique ou biosphère, qui implique les cycles naturels. Le second est le métabolisme technique ou technosphère, qui implique les cycles industriels comprenant le prélèvement de matériaux techniques dans l'environnement (figure 2) (McDonough & Braungart, 2011).

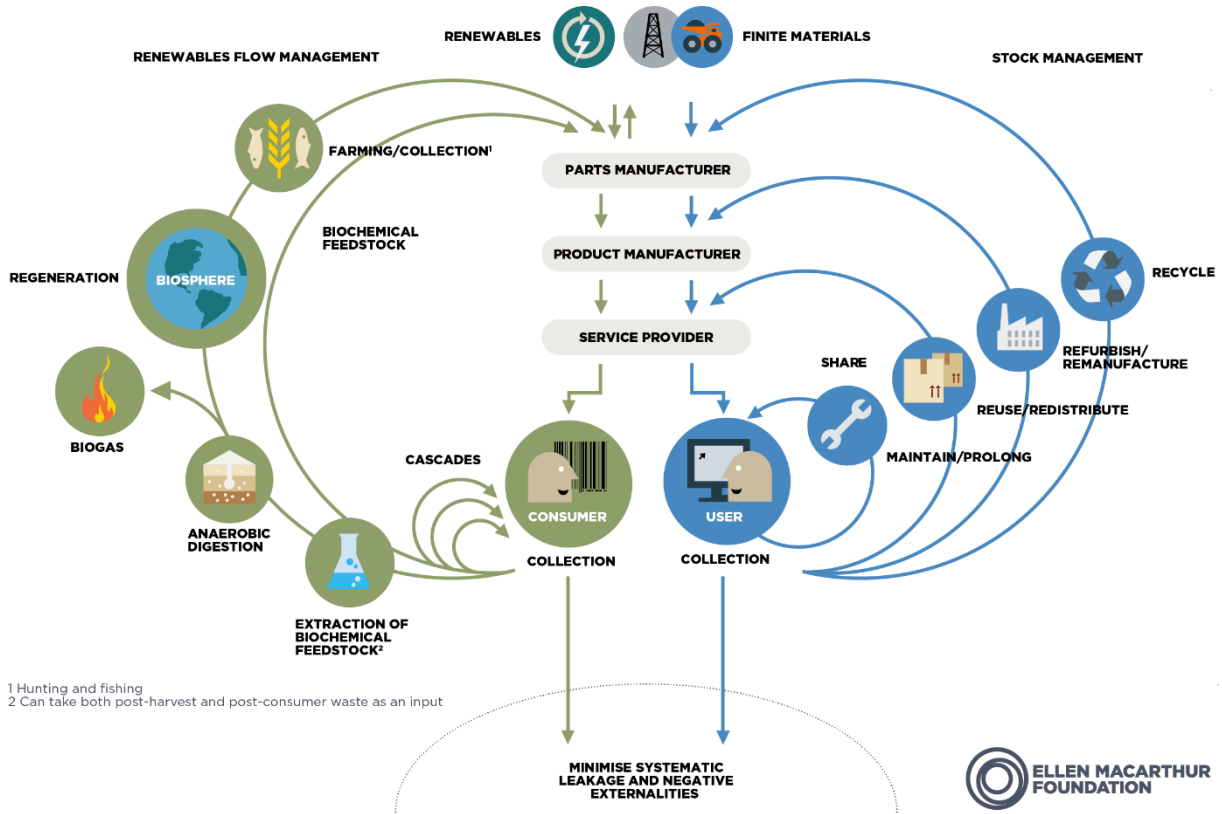


Figure 2 : Le diagramme papillon : visualisation du métabolisme biologique et technique (Ellen MacArthur Foundation, 2020).

D'un côté, un nutriment biologique est un matériau ou un produit conçu pour intégrer le cycle biologique où il est littéralement consommé par des micro-organismes du sol ou d'autres animaux. Le cycle biologique est donc composé de tout ce qui est biodégradable. Il inclut des matériaux tels que le bois, le coton, les déchets alimentaires, etc. De l'autre côté, un nutriment technique est un matériau ou un produit conçu pour retourner dans le cycle technique, c'est-à-dire au sein du métabolisme industriel duquel il provient. Ce cycle concerne donc les matériaux qui ne se biodégradent pas. Il comporte les métaux, les métaux rares, la plupart des plastiques, des polymères, etc. (Ellen MacArthur Foundation, 2020; McDonough & Braungart, 2011).

Afin que ces deux métabolismes restent sains et prospères, il est essentiel de veiller à ce qu'ils ne se contaminent pas. Cependant, l'un des problèmes de notre époque actuelle réside dans le fait que nous mélangeons fréquemment ces deux types de matériaux, créant ainsi des « hybrides monstrueux » (Braungart & McDonough, 2006). Les « hybrides monstrueux » sont des mélanges de matériaux à la fois techniques et biologiques qui, une fois en fin de vie, deviennent souvent irrécupérables. Après usage, ces matériaux de valeur, techniques ou biologiques, se retrouvent généralement dans des décharges (Ellen MacArthur Foundation, 2020; McDonough & Braungart, 2011).

- Régénérer la nature

Le troisième principe de l'EC consiste à régénérer la nature en déplaçant l'extraction des terres vers la régénération des terres. En maintenant les produits et les matériaux en circulation, moins de terres sont

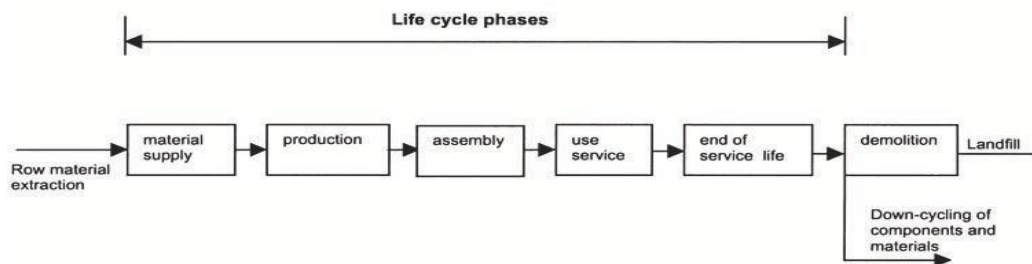
nécessaires pour l'approvisionnement en matières premières, et une part de celles-ci pourrait être restituée à la nature. Dans une EC, les terres dédiées à l'approvisionnement en matériaux seront orientées vers des ressources renouvelables, cultivées de manière régénérative, plutôt que vers l'extraction de matériaux finis³, qui demeure de plus en plus en circulation (Ellen MacArthur Fondation, 2020).

1.2. L'économie circulaire dans le domaine de la construction

Notre environnement construit, composé de bâtiments, de routes et d'infrastructures, joue un rôle central dans l'EC. Le secteur de la construction utilise près de la moitié des matériaux extraits dans le monde chaque année, contribuant significativement aux émissions de gaz à effet de serre. En orientant le secteur de la construction vers une EC (figure 3), il serait possible de réduire les émissions mondiales de CO₂ issues des matériaux de construction de 38 % d'ici 2050 (Ellen MacArthur Fondation, 2020).

Cependant, l'un des principaux problèmes est lié au fait que l'industrie de la construction suit encore le modèle linéaire (figure 3). Au sein de ce modèle, les étapes sont caractérisées par l'extraction de matières premières transformées par la suite en matériaux de construction puis assemblées sur le site de construction. La plupart du temps, les matériaux sont assemblés de telle manière qu'ils deviennent impossibles à démonter sans détruire leur intégrité. Une fois que le cycle de vie du bâtiment est terminé, ces matériaux obsolètes sont généralement jetés (Fénard, 2021; Romnée & Vrijders, 2018).

Existing: Linear model



New: Cyclic model

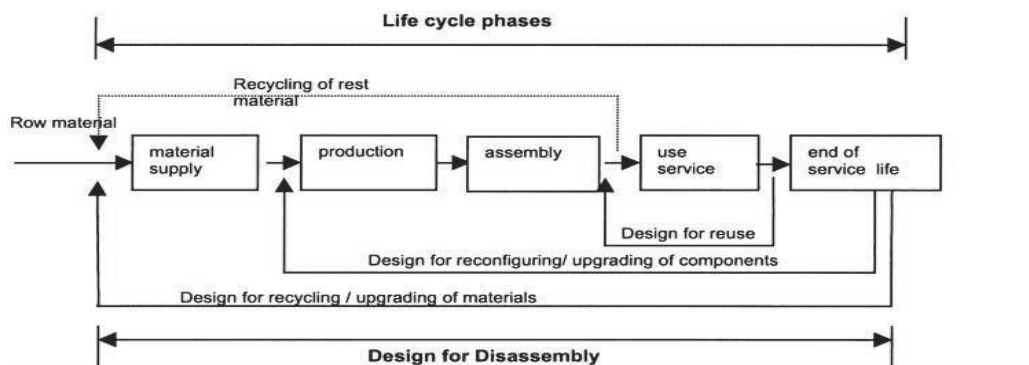


Figure 3 : Différence entre l'économie linéaire et l'économie circulaire propre au secteur de la construction (Durmisevic, 2019).

³ Matériaux qui ne sont pas renouvelables dans des délais pertinents pour une économie circulaire.

La *figure 3* précise à quel niveau d'intervention le réemploi (*upgrading of materials*) s'intègre au sein de l'EC, se situant en fin de vie des bâtiments ou de leurs composants. L'intégration d'éléments de réemploi dans ce cadre nécessite de répondre aux principales exigences de l'organisation actuelle de la construction, qui se caractérise par une forte distinction (contractuelle, juridique, professionnelle) entre les divers acteurs impliqués dans les projets de construction (Ghyoot et al., 2018).

Le processus traditionnel du secteur de la construction se traduit d'abord par l'élaboration d'un projet par un architecte. Les éléments de construction réels sont rarement impliqués dès la phase de conception. Une fois le projet terminé, il est traduit sous forme d'instructions à travers des plans détaillés associés au métré et au cahier des charges. Ces documents prescrivent, pour les entrepreneurs, les matériaux à utiliser. Les entrepreneurs se procurent auprès des fournisseurs de matériaux qui établissent des catalogues détaillant les matériaux disponibles avec leurs caractéristiques techniques. Ce processus repose sur une concordance entre les différentes étapes, depuis la conception jusqu'à la réalisation du chantier (Ghyoot et al., 2018).

L'organisation traditionnelle de la construction telle qu'elle est décrite ci-dessus repose sur des caractéristiques qui ne sont pas adaptées aux exigences de l'EC. L'une de ses exigences est que le réemploi des éléments de construction nécessite qu'ils soient directement pris en compte dès la phase de conception. Les discussions et les recherches en cours brassent des idées et proposent des pistes de réflexion visant à promouvoir l'EC dans le domaine de la construction. Ces différentes pistes peuvent être classées selon trois grandes familles (*figure 4*) (Ghyoot et al., 2018; Romnée & Vrijders, 2018) :

- concevoir et construire des bâtiments qui permettent de récupérer les matériaux en fin de vie, tout en repensant les produits de construction et leur mode d'assemblage pour maximiser le potentiel de réemploi (Concevoir et construire),
- imaginer de nouveaux modèles d'affaires encourageant la création de valeur pendant tout le cycle de vie des bâtiments et des matériaux (Modèles d'affaires),
- développer des solutions techniques pour extraire et valoriser les ressources matérielles disponibles dans les bâtiments existants (Urban mining).

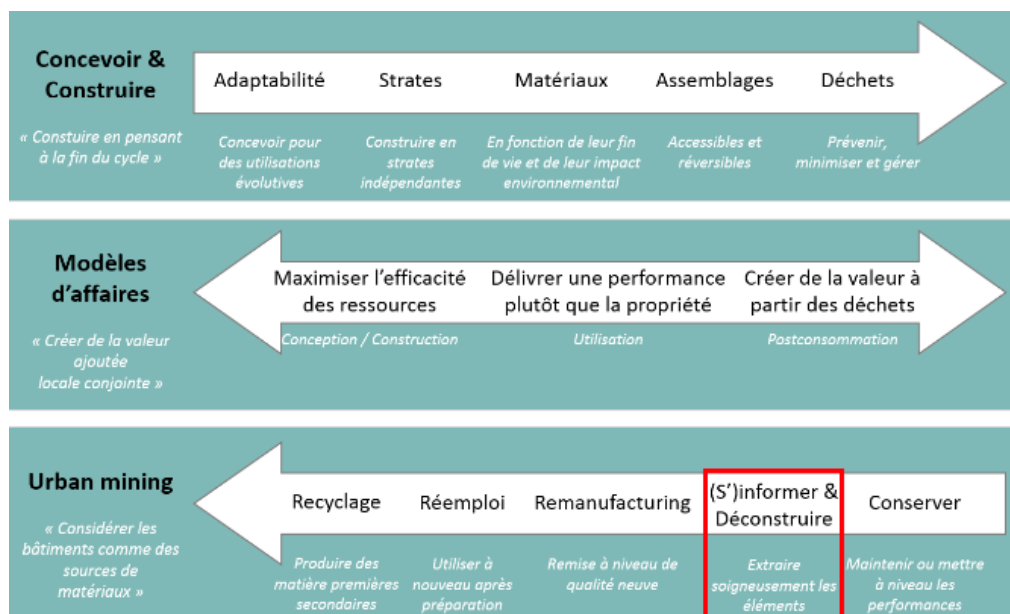


Figure 4 : Les trois principaux piliers de l'économie circulaire dans la construction (Romnée & Vrijders 2018).

Ce travail abordera le troisième volet « *urban mining* » et plus particulièrement, « (s’)informer & déconstruire ». Ce point nous semble pertinent pour atteindre les objectifs de cette recherche. En effet, l’implémentation d’un inventaire réemploi implique des exigences en matière de gestion de l’information, nécessaire pour une bonne circulation des éléments de réemploi.

1.3. Urban mining

Le métabolisme urbain

En 2018, on estimait que 55,3 % de la population mondiale résidait dans des zones urbaines. D’ici 2030, les zones urbaines devraient abriter 60 % de la population mondiale, soit une personne sur trois vivra dans des villes (United Nations, 2018).

Face à ce constat et à la prise de conscience des limites de notre planète, certains chercheurs ont étudié la ville comme un gisement de ressources, donnant ainsi naissance au terme « *urban mining* ». Ce terme est souvent utilisé pour décrire les activités liées au réemploi des éléments de construction. Cette approche considère la ville comme un vaste gisement de ressources susceptibles d’être exploitées dans le futur (lorsqu’elles arrivent au bout d’un premier cycle de vie utile) (Ghyoot et al., 2018; Gobbo, 2021b).

Actuellement, le métabolisme urbain présente un caractère linéaire (figure 5). Les ressources acheminées vers les villes sont utilisées à diverses fins et stockées pour des durées indéterminées avant de sortir des villes, principalement sous la forme de déchets (Gobbo, 2021b).

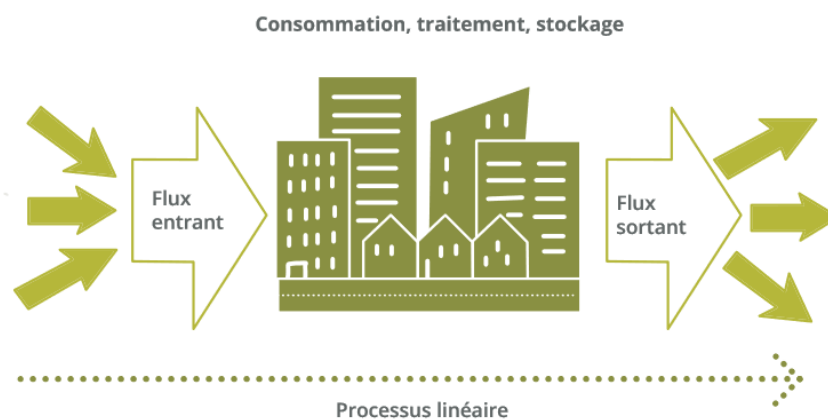


Figure 5 : Le caractère linéaire du métabolisme urbain (Gobbo, 2021).

En matière de flux entrants et sortants d'une ville, le secteur de la construction occupe une place prépondérante. En effet, les zones urbaines renferment une concentration élevée de matériaux présents dans les bâtiments et les infrastructures (Göswein et al., 2019). Selon une étude menée à Bruxelles, les bâtiments représentent 84 % de tous les matériaux présents dans la ville (Gobbo, 2015).

« *L’urban mining* » poursuit plusieurs objectifs (Delcourt et al., 2018; Gobbo, 2021b) :

- éviter que des ressources potentielles ne soient éliminées sous forme de déchets,
- réduire la consommation en ressources naturelles en prolongeant le cycle de vie des matériaux,
- stimuler le développement d’activités économiques locales liées à l’exploitation de la « mine urbaine ».

Considérer le réemploi à l’aune du concept « *urban mining* » permet de mettre en évidence son intérêt pour favoriser l’économie des ressources et la réduction des déchets. Effectivement, le réemploi contribue directement à la réalisation de ces objectifs. Les logiques de réemploi occupent alors une position significative dans les cadres réglementaires et stratégiques qui encadrent la transition des villes, des régions et des États vers les principes de circularité (Gobbo, 2021b).

Dans ce contexte (figure 6), privilégier des actions telles que la réalisation d'inventaire réemploi est cruciale pour réutiliser correctement les éléments de construction et les maintenir dans l'EC.

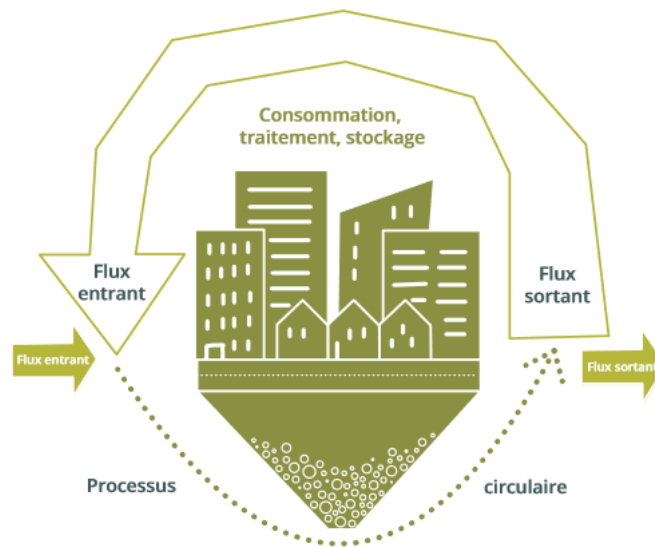


Figure 6 : L'urban mining selon une perspective circulaire (Gobbo, 2021).

Une telle approche devrait être privilégiée par rapport aux stratégies de réduction des déchets telles que le recyclage. Ce dernier, impliquant une transformation profonde des matériaux sans prolonger leur durée d'utilisation, devrait être considéré comme secondaire par rapport au réemploi (Gobbo, 2021b).

[Le réemploi face à la nature dynamique du métabolisme urbain](#)

On peut appréhender et comprendre ce caractère dynamique de deux manières différentes. La première est rétrospective, c'est-à-dire qu'elle s'intéresse aux changements survenus dans le passé. La seconde est prospective, elle s'intéresse aux changements futurs (Gobbo, 2021b).

Cette double approche temporelle trouve des similitudes avec les pratiques de réemploi. L'approche rétrospective implique de collecter des données, des informations et des connaissances sur l'évolution des techniques et des matériaux de construction. Cette approche peut contribuer à caractériser et évaluer le potentiel de réemploi de certains éléments de construction (Gobbo, 2021b).

L'approche prospective consiste à anticiper le réemploi futur dès la phase de conception (*Design for Deconstruction*). Cette approche ne doit pas se limiter à l'échelle des matériaux, mais également prendre en compte l'échelle du bâtiment (Gobbo, 2021b).

[L'échelle d'analyse](#)

L'étude du métabolisme urbain s'étend de l'échelle de la ville à l'échelle des matériaux (figure 7). En ce qui concerne les analyses à l'échelle de la ville et des bâtiments, certaines approches étudient la répartition des différents types de construction dans les zones urbaines afin de caractériser leur composition matérielle (Gobbo et al., 2019). Ces études démontrent que la fonction des bâtiments influence la dynamique des flux des matériaux de réemploi et leur évolution dans le temps (Gobbo, 2021b).

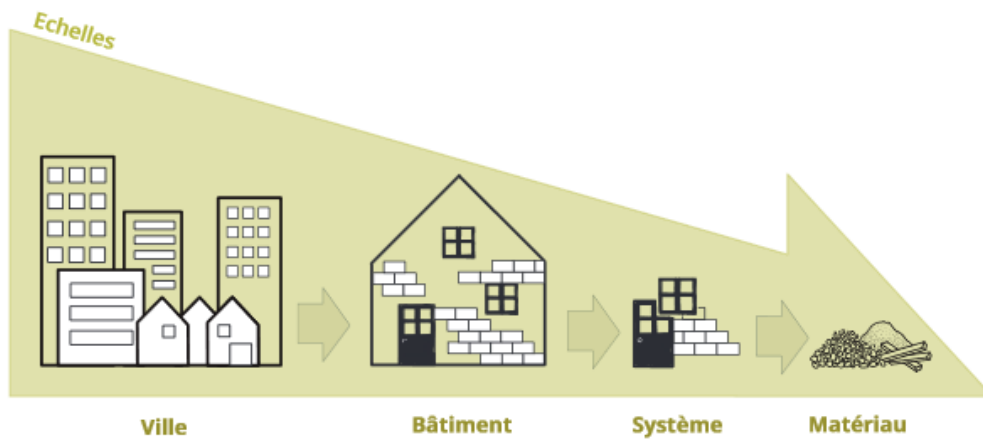


Figure 7 : L'échelle d'analyse de « l'urban mining » (Gobbo, 2021)

À l'échelle des éléments de construction, une quantification est plus souvent effectuée pour des matériaux d'une nature spécifique ou regroupés par type (Gobbo, 2021b). C'est précisément à cette échelle que le réemploi opère. Cependant, les éléments de construction peuvent être composés de différents types de matériaux, ce qui peut complexifier la façon de les quantifier (Gobbo, 2021b).

2. Le traitement des éléments de construction

La littérature fait fréquemment référence à l'échelle de Lansink⁴ (1979) lorsqu'il s'agit du traitement des déchets.

L'objectif de la hiérarchie des déchets (figure 8) est de minimiser les impacts négatifs de la production et de la gestion des déchets et d'améliorer efficacement l'utilisation des ressources (European Commission, 2012).

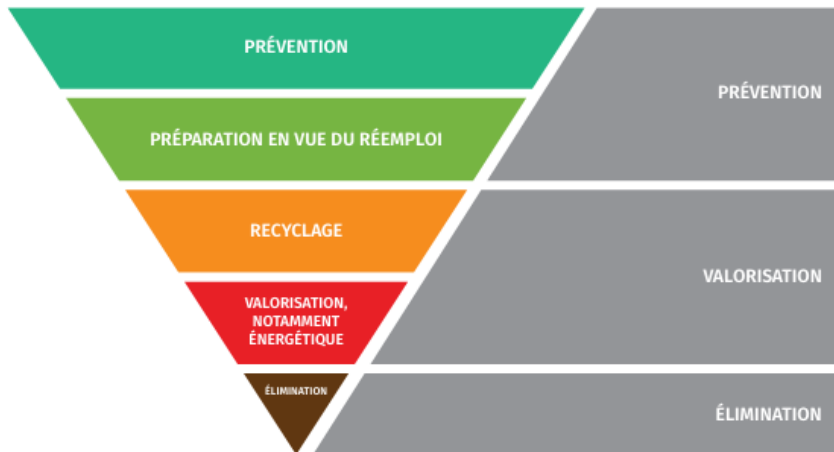


Figure 8 : Représentation de la hiérarchie des déchets sur base de l'échelle de Lansink (1979) (Luxembourg Institute of Science and Technology, 2022).

Elle indique aussi les modes de gestion qu'il faut prioritairement utiliser pour traiter les ressources/déchets. Les méthodes les plus préférables se trouvent en haut, tandis que celles en bas représentent les méthodes de traitement des déchets à envisager en dernier recours (European Commission, 2012).

2.1. L'élimination

L'élimination est la méthode qui traite les déchets en tant que tels. Ce mode inclut toute opération ne relevant pas de la valorisation, comme la mise en décharge ou l'incinération sans valorisation d'énergie. (European Commission, 2012).

Le déchet, quant à lui, est défini comme « toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'obligation ou l'intention de se défaire » (Waste Framework Directive 2008/98/EC [1]- Art 3.1).

La Commission européenne a détaillé par la suite les différentes significations du terme « se défaire » couvert par la définition (figure 9) (Naval, 2021) :

⁴ L'échelle de Lansink est une norme reconnue dans le domaine de la gestion des déchets. Établi par le néerlandais Ad Lansink en 1979, le principe fondamental de l'échelle de Lansink est souvent appelé « hiérarchie des déchets ».

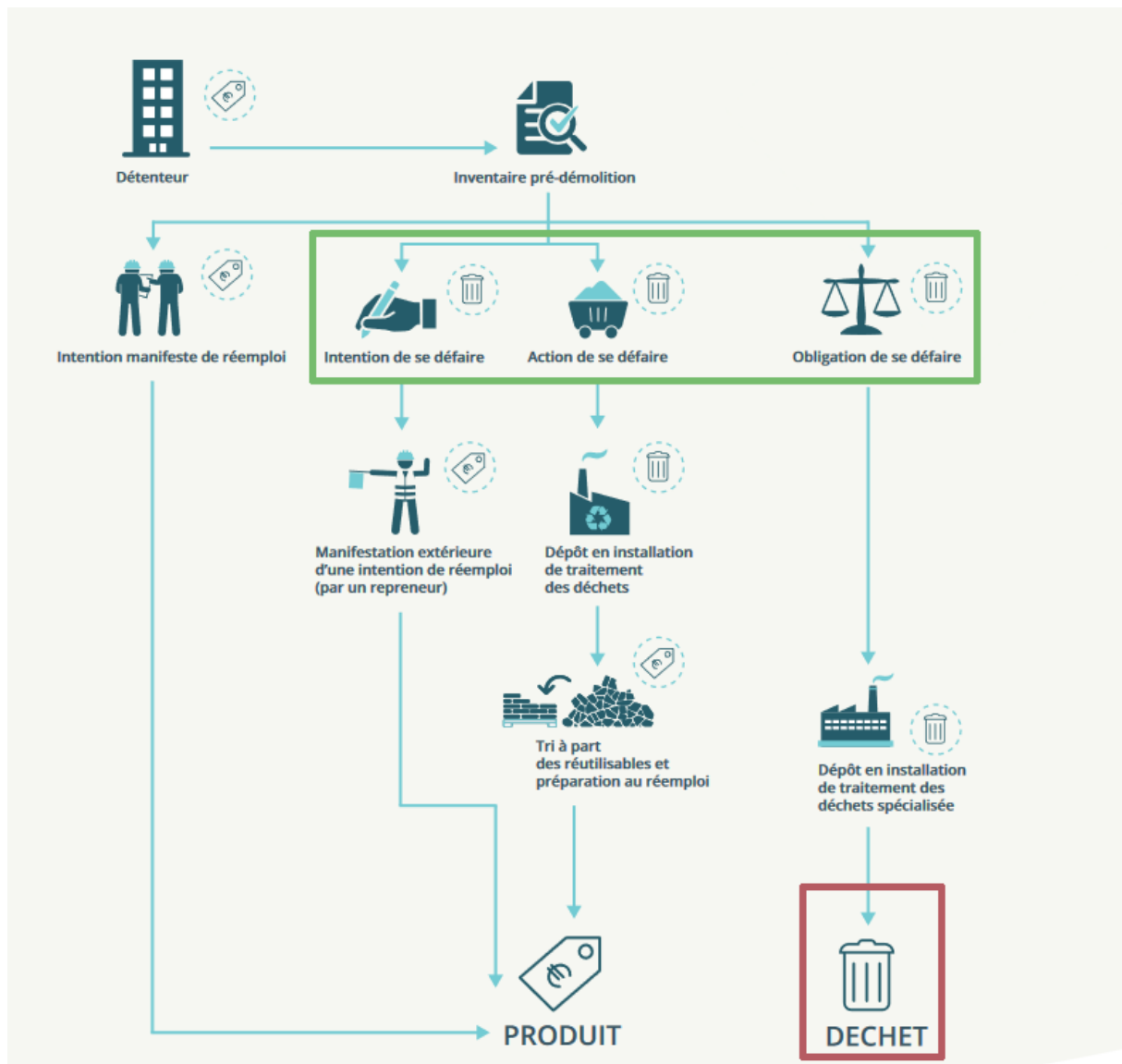


Figure 9 : Les voies alternatives partant de l'action du détenteur jusqu'à la qualification de produit ou de déchet (Naval, 2021).

- « Action de se défaire » : action directe

Le détenteur réalise une action qui conduit directement à la classification des matériaux comme déchets. Il est important de noter que cette action peut être involontaire ou accidentelle. Lors des travaux d'un bâtiment, plusieurs intervenants peuvent effectuer cette action à un moment donné pour le compte du détenteur, sans que celui-ci en soit informé (Naval, 2021).

- « Intention de se défaire » : action indirecte ou absence d'action

Certaines actions du détenteur laissent supposer une intention de se débarrasser des matériaux, conduisant ainsi indirectement à leur qualification en tant que déchets. Cette qualification est une conséquence indirecte de ces actions. Elle découle d'une absence de volonté de ne pas jeter le matériau. La jurisprudence démontre que l'intention initiale du détenteur n'est pas le seul critère déterminant pour caractériser le statut de déchet. L'analyse repose sur l'accumulation d'indices témoignant du manque d'intérêt de différentes parties à conserver ou à réutiliser un produit. Cette nuance est importante dans le secteur de la construction où de nombreux acteurs sont impliqués et assument des responsabilités à l'égard des matériaux (Naval, 2021).

- « Obligation de se défaire » action obligatoire

Le détenteur est contraint de se débarrasser du matériau en raison d'une réglementation européenne ou nationale. Dans ce cas, la qualification du matériau en tant que déchet est une conséquence directe et indépendante de la volonté du détenteur (Naval, 2021).

Nous pouvons alors observer que les facteurs humains et les attitudes culturelles jouent également un rôle dans la production de déchets. En effet, la tendance à rejeter la responsabilité sur autrui et l'attitude d'évitement des responsabilités sont aussi responsables de la production de déchets (Ajayi et al., 2016). Pour améliorer la gestion des déchets, il est donc nécessaire de clarifier les responsabilités (Lockrey et al., 2018).

Enfin, les typologies de déchets varient d'un pays à l'autre. En Belgique, les déchets sont classés en 4 types suivant leur provenance : les déchets dangereux, les déchets inertes, les déchets ménagers et les déchets organiques biodégradables ou non biodégradables. Les différents types de déchets issus de divers types de matériaux ont des impacts environnementaux différents (Wallonie Service Public SPW, 2023).

2.2. La valorisation énergétique

La valorisation énergétique implique les procédés de traitement des déchets qui génèrent de l'énergie, par exemple sous forme d'électricité ou de chaleur. Elle inclut également ceux qui produisent des combustibles dérivés des déchets (European Commission, 2017).

La valorisation est supérieure à l'élimination (par exemple, la mise en décharge) mais inférieure au recyclage.

2.3. Le recyclage

Le recyclage se définit comme « toute opération de valorisation par laquelle des déchets sont retraités en produits, matières ou substances, que ce soit pour leurs fonctions initiales ou d'autres fins. Cela inclut le retraitement de matières organiques, mais n'inclut pas la récupération d'énergie ni le retraitement en matériaux destinés à être utilisés comme combustibles ou pour des opérations de remblayage » (Directive-cadre "Déchets" 2008/98/CE [1]- Art 3.17).

Le recyclage implique donc une transformation profonde des éléments de construction. Les opérations de recyclage reposent généralement sur une opération de broyage qui ramène les composants à l'état de matières premières (Ghyoot et al., 2018). Si l'élément pouvait être réutilisé, cela entraînerait potentiellement une perte de matière et un bilan carbone aggravé. De plus, les matériaux recyclés passent généralement par le statut de déchets, nécessitant alors la gestion par un opérateur agréé. Pour être réutilisés, ils peuvent être soumis à des normes obligatoires, des tests, des exonérations fiscales, etc. Il est attendu qu'un produit recyclé présente des qualités comparables à celles d'un produit neuf pour être commercialisé. Tout cela souligne la nécessité d'une vigilance particulière. Par ailleurs, le recyclage opère dans un secteur économique distinct du réemploi qui ne permet pas de préserver le patrimoine historique et culturel d'un élément (Naval, 2021).

D'après Buildwise (anciennement CSTC), plusieurs conditions doivent être remplies pour qu'une matière puisse être recyclée :

- les matériaux doivent être techniquement recyclables conformément aux procédés appropriés,
- les composants doivent être aisément accessibles et non contaminants,
- le processus de recyclage (comme tout processus de retraitement de matière) doit être rentable économiquement.

De plus, le recyclage comporte deux notions importantes popularisées par William McDonough et Michael Braungart avec leur ouvrage « *Cradle to Cradle* » (2002) : *l'upcycling* et *le downcycling*.

Upcycling :

L'upcycling consiste à remettre en cycle, tout en donnant de la valeur. Il implique les processus de recyclage qui génèrent une forme de valeur ajoutée (McDonough & Braungart, 2013; Rollet & Rebois, 2014).

Un exemple d'*upcycling* architectural concerne l'utilisation des conteneurs maritimes dans des projets de construction. Aux Pays-Bas, le projet « Keetwonen » a utilisé des containers upcyclés pour créer de nombreux appartements étudiants bon marché pour répondre à la pénurie de logements (Rollet & Rebois, 2014). Au lieu d'être abandonnés, ces conteneurs ont été réintégrés dans un nouveau projet, en détournant leur fonction initiale.

Le terme « détournement » est parfois utilisé pour désigner *l'upcycling*. Cette pratique consiste à récupérer un élément en le détournant de sa fonction initiale pour lui trouver un nouvel usage (Ghyoot et al., 2018).

Downcycling :

Fréquemment, le recyclage est assimilé à ce qu'on pourrait qualifier de *downcycling*. Cependant, cette pratique réduit la qualité des matériaux au fil du temps (McDonough & Braungart, 2011; Rollet & Rebois, 2014).

Dans le domaine de la construction, un exemple de *downcycling* concerne le concassage des débris. Il s'agit de broyer les matières minérales pour créer des granulats qui sont ensuite employés dans des travaux de remblai, de fondation, ou intégrés à un nouveau béton (si la qualité des granulats le permet) (Ghyoot et al., 2018).

La figure 10 illustrant le diagramme papillon montre que la longueur de la boucle du recyclage est plus importante que celle du réemploi. Cette distinction est liée au fait que l'impact environnemental du recyclage est perçu comme plus important. La différence est liée au fait que le matériau recyclé est plus proche du stade final de déchet que le matériau réemployé (Naval, 2021).

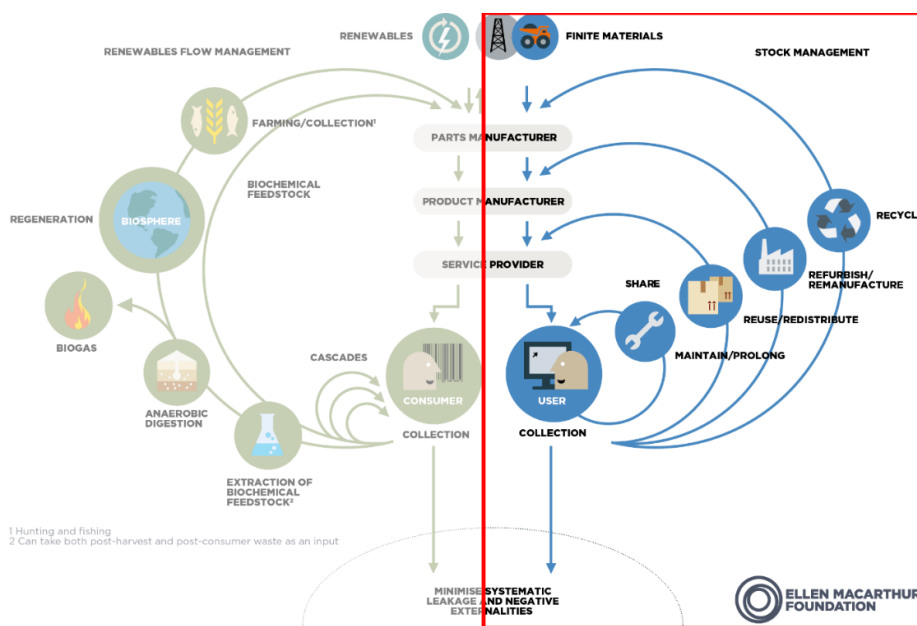


Figure 10 : Le diagramme papillon : visualisation du métabolisme technique (Ellen MacArthur Foundation, 2020).

Malheureusement, le recyclage est souvent privilégié par rapport au réemploi, principalement en raison de sa meilleure conformité aux normes industrielles de notre société (Gobbo, 2021b; Naval, 2021).

2.4. La préparation au réemploi

La préparation au réemploi (figure 11) se définit par « toute opération de contrôle, de nettoyage ou de réparation en vue de la valorisation, par laquelle des produits ou des composants de produits qui sont devenus des déchets sont préparés de manière à être réutilisés sans autre opération de prétraitement » (Directive-cadre “Déchets” 2008/98/CE [1]- Art 3.16).

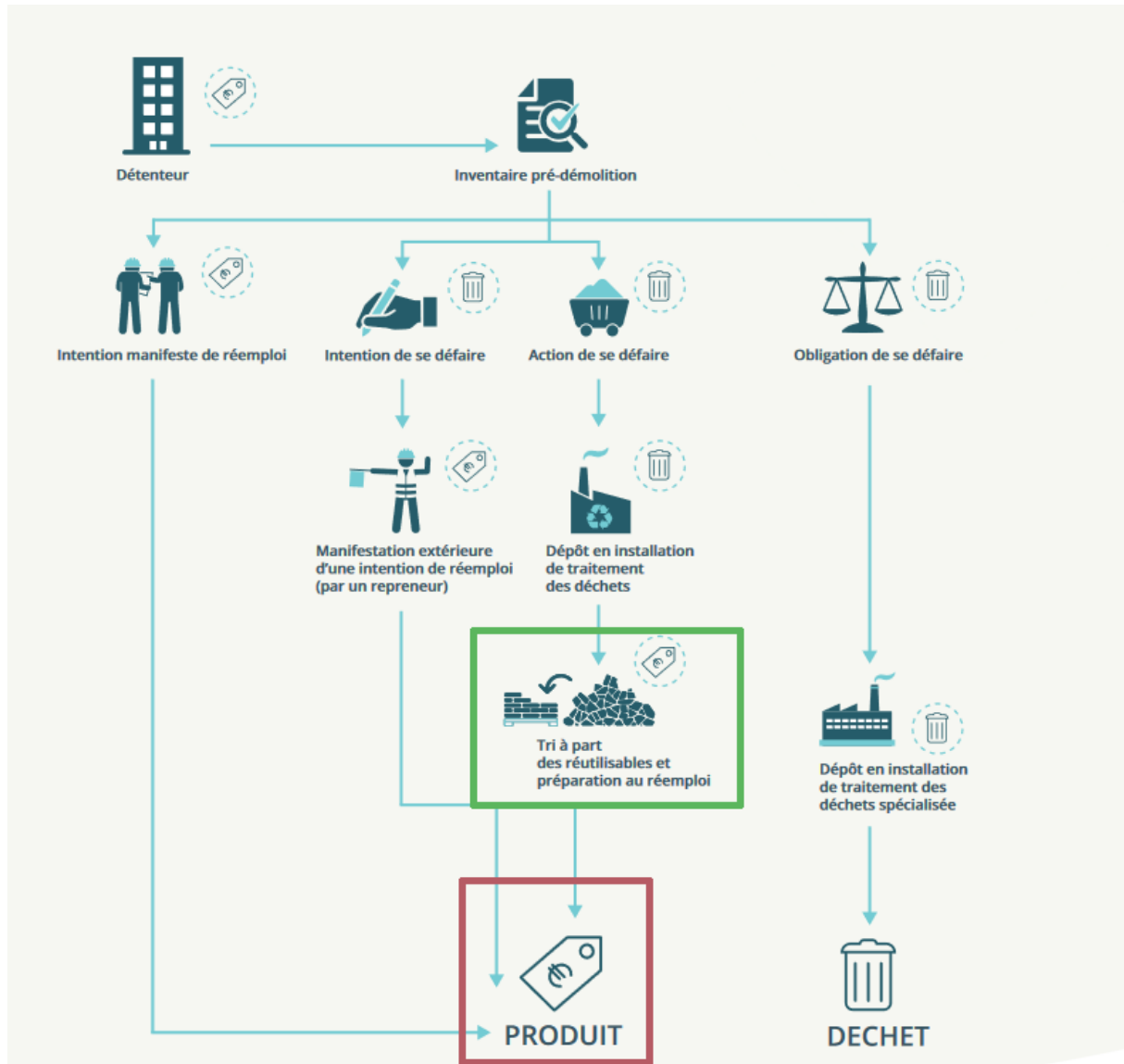


Figure 11 : Les voies alternatives partant de l'action du détenteur jusqu'à la qualification de produit ou déchet (Naval, 2021).

Il existe une différence entre la préparation en vue du réemploi et le réemploi. En effet, dans ce dernier, le matériau n'est pas considéré comme un déchet. En revanche, la préparation au réemploi concerne les matériaux ayant acquis le statut de déchet au sens de la définition des déchets (European Commission, 2012; Naval, 2021).

Nous constatons ici que, selon la définition de déchet, la notion de « se défaire » joue un rôle important dans la qualification du réemploi et de la préparation en vue du réemploi.

De plus, la définition établie par la directive suscite des doutes : quels sont les indicateurs permettant de déterminer que le détenteur n'a pas l'intention de se débarrasser des matériaux ? Les matériaux sont-ils qualifiés directement en tant que déchets dès qu'ils sont transférés à un autre propriétaire ? Une erreur courante consiste à considérer que les matériaux provenant d'une démolition sont automatiquement classés comme déchets dès leur sortie du chantier, du fait que leur propriétaire n'a manifestement pas l'intention de les réintégrer dans un nouveau projet (intention de « se défaire ») (Naval, 2021).

Il convient de noter que, même si la préparation en vue du réemploi concerne les matériaux qui sont devenus des déchets, elle se situe au-dessus du recyclage dans la hiérarchie des déchets.

Malgré cette hiérarchie, on estime que moins de 1 % des matériaux de construction sont réemployés⁵ (Gobbo, 2021b). L'utilité de la notion de préparation au réemploi paraît ici évidente : elle permet d'éviter des processus très réglementés et coûteux. De plus, elle permet de bénéficier de conditions de sortie du statut de déchet assouplies lorsque les opérations appliquées sur le matériau restent mineures et permettent de prolonger le cycle de vie initial du matériau (Naval, 2021).

2.5. La prévention (le réemploi)

La prévention englobe les actions mises en place avant qu'une substance/matière ou un élément ne devienne un déchet. En favorisant **le réemploi**, la prévention permet de réduire la quantité de déchets, la concentration de substances nocives et les impacts néfastes des déchets sur l'environnement et la santé humaine (European Commission, 2012).

Le réemploi se caractérise par « toute opération par laquelle des produits ou des composants qui ne sont pas des déchets sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus » (Directive-cadre "Déchets" 2008/98/CE [1]- Art 3.13).

Contrairement au recyclage, le réemploi tend à conserver l'apparence formelle et la fonction initiale d'un élément. Pour certains éléments, plusieurs opérations telles que le nettoyage, le décapage, etc. sont nécessaires pour assurer une réutilisation (Ghyoot et al., 2018).

Le réemploi implique que les matériaux ne soient pas qualifiés en tant que déchets et par conséquent, que leur propriétaire n'ait pas l'intention de s'en débarrasser (Naval, 2021). Dans le cas où le propriétaire se débarrasse du matériau, une manifestation extérieure pour également exprimer une intention de récupérer le matériau (figure 12).

⁵ Ce nombre est une estimation élaborée dans le cadre du projet FCRBE. Elle repose notamment sur les données des récentes enquêtes BigRec menées par Salvo, ainsi que sur diverses variables telles que le nombre d'entreprises engagées dans le réemploi des matériaux, la quantité de déchets de construction et de démolition (C&D) générés, et la population. Des évaluations de plusieurs chantiers ont confirmé cette estimation. L'étude statistique également réalisée dans le cadre du projet FCRBE devrait consolider ce résultat (<https://www.nweurope.eu/projects/project-search/fcrbe-facilitating-the-circulation-of-reclaimed-building-elements-in-northwestern-europe/#tab-1>).

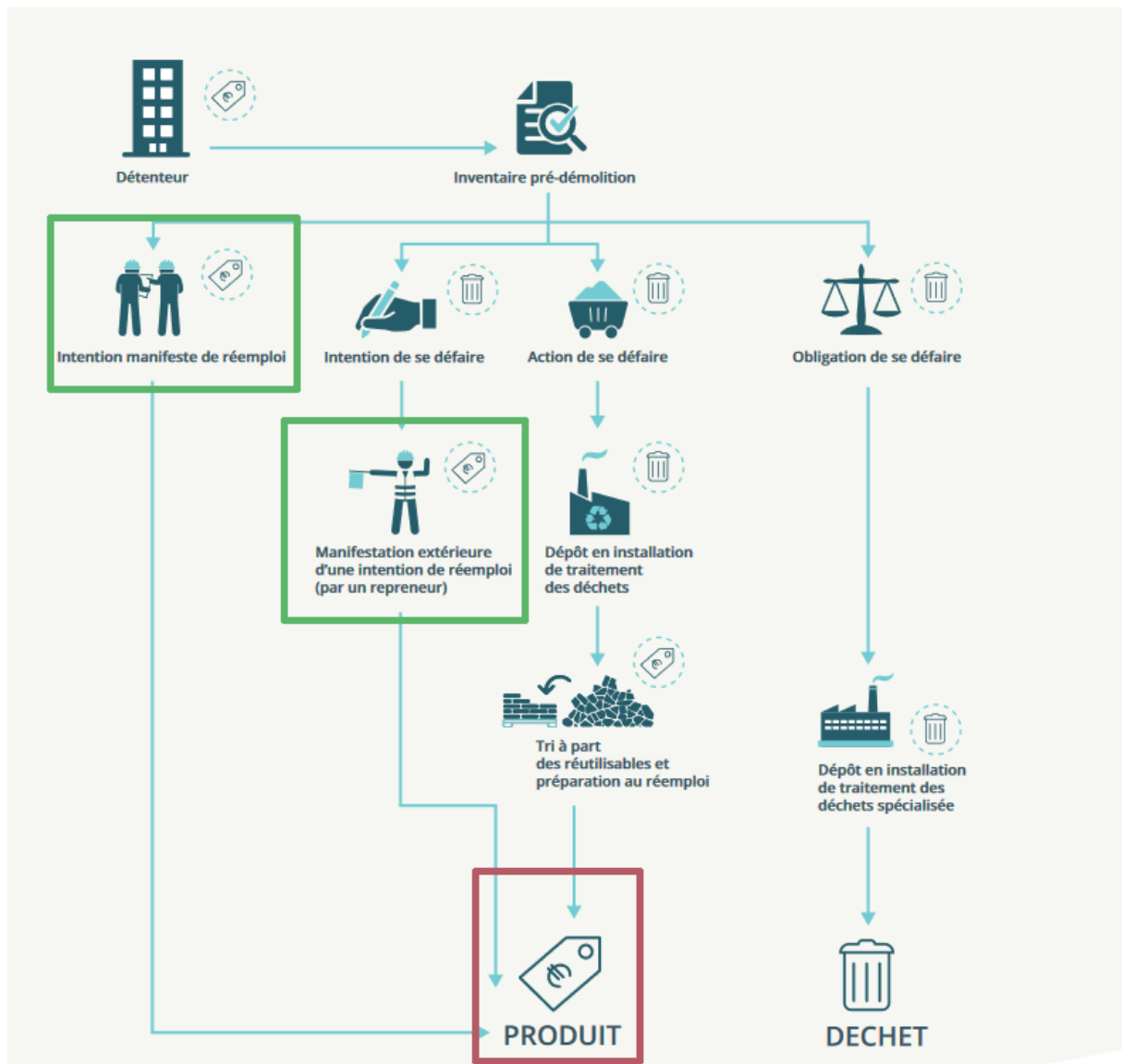


Figure 12 : Les voies alternatives partant de l'action du détenteur jusqu'à la qualification de produit ou déchet (Naval, 2021).

Susie Naval (2021), identifie quelques cas pour lesquels on peut bien parler de réemploi :

- si le matériau est remis en œuvre sur le même site,
- si le matériau est remis en œuvre sur un autre site appartenant au même propriétaire,
- si le matériau est cédé à un autre acteur dans le but d'une réutilisation future. Si ce procédé se fait en passant par plusieurs phases de tri, le matériau passera alors par une étape de préparation au réemploi,
- si le matériau est abandonné ou déposé dans une installation de traitement des déchets, mais qu'un nouveau détenteur se manifeste avec la volonté de le remettre en œuvre. Le matériau sera alors passé par une étape de préparation au réemploi.

Le terme « réemploi » désigne donc la pratique de récupérer des éléments de construction pendant un chantier de transformation ou de démolition, et de les réintégrer dans le même projet en cours (*in situ*) ou dans d'autres projets (*ex-situ*) (figure 13) (Ghyoot et al., 2018).

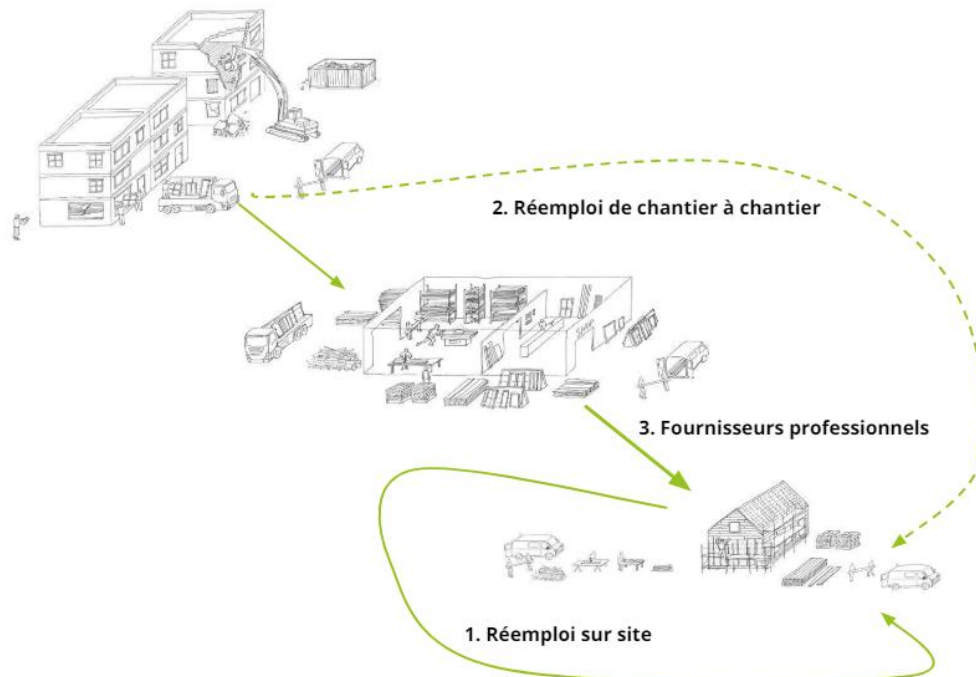


Figure 13 : Les différentes approches du réemploi (image issue du webinaire « Réemploi et construction » par Susie Naval, le 24 juin 2020).

In Situ (réemploi sur site) :

Le réemploi *in situ* consiste à réutiliser directement les éléments sur le site où ils ont été démontés. Cette méthode est une manière directe de réutiliser les éléments de construction et contribue, d'une certaine manière, à réduire les coûts énergétiques liés au transport. Cette approche peut complexifier la phase de conception, car elle nécessite une collaboration étroite entre les différents corps de métier et le maître d'ouvrage. De plus, les éléments démontés doivent être stockés sur place jusqu'à leur réinstallation, ce qui peut poser problème dans des projets confrontés à des contraintes d'espace (Fénard, 2021).

Ex-situ (réemploi de chantier à chantier/fournisseurs professionnels) :

Le réemploi *ex-situ* implique l'insertion des éléments de construction récupérés à partir d'un autre chantier de démolition ou de réhabilitation. Il s'agit d'une approche indirecte de réutiliser des matériaux et nécessite une logistique spécifique (transport, stockage, etc.). Les matériaux peuvent provenir directement d'un autre chantier ou transiter par une plateforme de réemploi. La facilité du réemploi *ex-situ* dépend largement de la présence d'une filière de réemploi dans les environs du projet (Fénard, 2021).

2.5.1. Les impacts environnementaux du réemploi dans le secteur de la construction

Les atouts en matière d'impact environnemental du réemploi dans le secteur de la construction sont multiples.

Tout d'abord, le réemploi des éléments de construction permet de réduire les impacts environnementaux dans le secteur de la construction en diminuant la production de déchets et la surconsommation des ressources (Gobbo, 2021b).

La figure 14 illustre les différentes étapes du cycle de vie d'un produit de construction, allant de A1 (production) à C4 (fin de vie). Comme nous pouvons le constater, le réemploi permet non seulement d'éviter l'impact lié à l'extraction des matières premières, mais également d'éviter l'impact associé à la production de nouveaux produits (Dougnet & Wagner, 2021). Pour les mêmes besoins, l'utilisation de matériaux de réemploi peut réduire l'impact environnemental de 2 à 12 fois par rapport à l'utilisation de produits neufs équivalents (Smeyers et al., 2022). Dans cette optique, moins de terres seront nécessaires pour s'approvisionner en matières premières et elles pourraient ainsi être restituées à la nature (Ellen MacArthur Fondation, 2020).

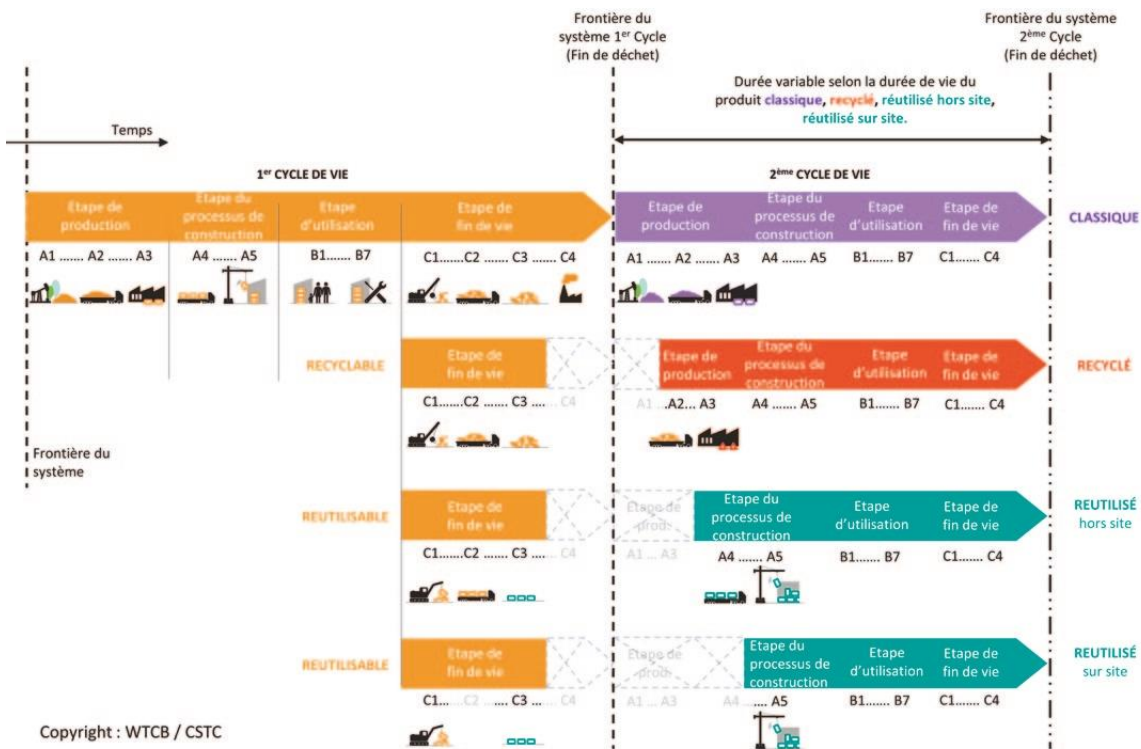


Figure 14 : L'impact du recyclage et du réemploi sur les modules du cycle de vie (Dougnet & Wagner, 2021).

Ensuite, l'un des avantages d'un matériau réemployé par rapport à un matériau neuf réutilisable est qu'il permet de réaliser une économie d'impact immédiate, plutôt qu'une économie hypothétique dans le futur (Dougnet & Wagner, 2021).

De plus, maintenir les éléments de construction en circulation grâce au réemploi réduit également la quantité de déchets de construction et de démolition, puisqu'ils ne finissent pas en décharges (Akbarieh et al., 2020; Smeyers et al., 2022). Le réemploi entraîne également une diminution de l'extraction des ressources et une diminution de l'empreinte de l'utilisation des sols (Simion et al., 2013). Cela contribue donc à la restauration du capital naturel et des ressources écologiques de la planète (Akbarieh et al., 2020).

Actuellement, le réemploi engendre un intérêt croissant en tant que solution pour réduire la pollution du secteur de la construction. De plus, il permet d'appréhender des problèmes mondiaux tels que l'épuisement des ressources, les dommages environnementaux liés à l'extraction des ressources et les enjeux éthiques associés à l'approvisionnement des ressources (Rose & Stegemann, 2019).

Enfin, le choix entre l'élimination, le recyclage ou la valorisation varie aussi en fonction du scénario de fin de vie prévu pour un bâtiment : **la démolition, la démolition sélective et la déconstruction**. Contrairement aux deux premiers scénarios, la déconstruction favorise le démontage et le réemploi des éléments de construction (figure 15) (Akbarieh et al., 2020).

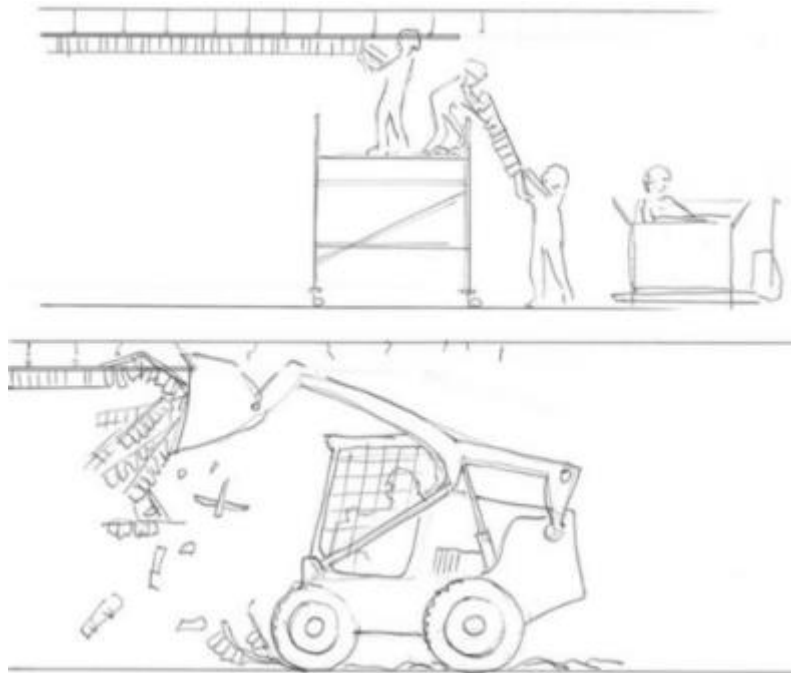


Figure 15 : Déconstruction vs démolition (Ghyoot et al., 2018)

La démolition

La démolition consiste en un processus de suppression ou de déblaiement d'un bâtiment ou d'une partie d'un bâtiment. L'opération est généralement réalisée à l'aide de machineries lourdes pour une exécution rapide. La démolition comprend régulièrement un tri léger des matériaux (Smeyers et al., 2022). Le mode de traitement des déchets souvent associé à ce type de scénario est l'élimination où les éléments de construction sont traités sous forme de déchets (voir chapitre 2.1 L'élimination).

La démolition sélective

La démolition sélective est effectuée pendant ou avant une opération de démolition. C'est un processus qui consiste à démonter méticuleusement un bâtiment, en totalité ou en partie, en utilisant une méthode inverse à celle de sa construction, dans le but de préserver ses composants (Smeyers et al., 2022). Cette approche encourage la séparation et le tri des matériaux afin de récupérer ceux pouvant être réutilisés dans d'autres projets ou être recyclés (Akbarieh et al., 2020). La démolition sélective est donc plus respectueuse de l'environnement que la démolition traditionnelle.

La déconstruction

La déconstruction désigne le processus de désassemblage complet ou partiel d'un bâtiment (Akbarieh et al., 2020; Aziminezhad & Taherkhani, 2023). Les éléments de construction sont démontés et réemployés dans d'autres projets ou remis sur le marché. Étant donné que la durée de vie des matériaux est souvent plus longue que celle des bâtiments, ces éléments demeureront dans le secteur de la construction pour une période prolongée afin d'atteindre leur fin de vie prévue. De plus, la déconstruction permet de réduire les déchets de démolition en évitant que les matériaux ne finissent dans les décharges. (Akbarieh et al., 2020). Néanmoins, la déconstruction n'est possible que si les éléments présents dans un bâtiment peuvent être démontés et réutilisés sans mettre en danger la santé et la sécurité d'autrui (Akbarieh et al., 2020; Crowther, 2005).

À travers ces différents chapitres, nous avons constaté l'importance du réemploi au sein de l'EC pour réduire la quantité de déchets générés par le secteur de la construction. Cependant, le réemploi des éléments de construction n'est possible que si l'on dispose d'informations suffisantes et indispensables pour permettre leur réinstallation (Ghyoot et al., 2018; Honic et al., 2024).

C'est dans cette optique que nous étudions l'optimisation de l'acquisition de l'information à travers les inventaires réemploi. En disposant de toutes les informations nécessaires pour le réemploi des éléments de construction, nous pourrions les réintégrer dans d'autres projets en toute sécurité.

3. Les informations permettant de faire circuler les éléments de construction

Ce chapitre se concentre sur le rôle essentiel de l'information et explicite celles nécessaires à la mise en place d'un inventaire réemploi.

Lorsque l'on parle de réemploi, le manque de données et la difficulté de suivre les matériaux de construction sont souvent évoqués dans les études actuelles. Le manque d'informations sur les éléments des bâtiments existants représente ainsi un obstacle majeur pour la mise en place d'une EC dans le secteur de la construction (Honic et al., 2024).

Actuellement, les pays et les villes européens ne collectent pas de données relatives sur le réemploi des éléments de construction, rendant ainsi leur réutilisation difficile. Cette situation pourrait expliquer le manque d'attention porté au réemploi (Gobbo, 2021b).

En réalité, le décalage entre la conception et la construction contraint les concepteurs à fournir une description détaillée des produits qu'ils prescrivent et des performances qu'ils doivent atteindre. Pour répondre à cette exigence, les fabricants de matériaux neufs fournissent non seulement des produits de construction, mais aussi une documentation technique détaillant leurs performances respectives. Cependant, les matériaux de réemploi ne disposent souvent pas (ou plus) de toutes ces informations, ce qui complique leur réutilisation (Ghyoot et al., 2018).

L'analyse des travaux de publication de Guhyoot et al. 2018, Gielen et al. (2009), Halbach & de Boissieu (2022), Smeyers et al. (2022), et Cottafava, D et al. (2020) ainsi que Halbach & Trachte (2024) nous a permis de synthétiser les informations nécessaires pour permettre le réemploi des éléments de construction. Nous avons observé que la possibilité de réutiliser les éléments dépend de plusieurs types d'informations disponibles à leur propos : les informations techniques, économiques et culturelles.

3.1. Les informations techniques

L'identification de l'élément

Les informations d'identification telles que le nom, le type de l'élément, la localisation *in situ* sont indispensables pour une localisation précise des éléments à l'intérieur du bâtiment. Il est essentiel d'éviter toute confusion, comme par exemple, le démontage d'un élément au mauvais étage et de manière plus générale, d'organiser le processus de récupération (il peut y avoir différentes phases de travaux correspondant à différentes unités du bâtiment). La localisation au sein du bâtiment doit être indiquée avec autant de précision que possible, en particulier s'il s'agit d'un immeuble de grande envergure. Ces informations précisent notamment l'unité du bâtiment, l'étage, la pièce, etc.

Les propriétés géométriques de l'élément

Les informations sur les dimensions de l'élément, le volume, la masse et la quantité, accompagnées de leur unité de mesure, sont indispensables afin d'adapter l'élément à son futur usage. Ces informations sont aussi utiles à des fins logistiques telles que le transport, le stockage et la manipulation des éléments sur chantier.

L'information sur la masse peut également permettre d'évaluer les bénéfices environnementaux d'une opération de démontage (masse ou m^2 x quantités d'énergie non renouvelable par unité de matériau de construction, élément ou système).

Les données relatives aux quantités influenceront notamment la décision de récupérer certains éléments. En effet, la décision de récupérer un élément est souvent liée à l'intérêt économique de l'opération. Suite aux quantités identifiées, plusieurs questions peuvent se poser telles que : la quantité de matériaux est-elle suffisante pour justifier sa déconstruction ?

La capacité d'un élément à conserver ses propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques font référence à la capacité physique d'un matériau à remplir la fonction pour laquelle il a été conçu. Ce critère mesure le degré de résistance de l'élément aux différents cycles de démontage, de transport, de stockage, etc., dans des conditions normales.

La capacité d'un élément à conserver ses propriétés esthétiques

Les propriétés esthétiques se réfèrent aux qualités liées à l'aspect extérieur et à la valeur que peuvent prendre ou perdre les différents éléments sous l'effet de l'usure. Ce critère est surtout déterminant pour les matériaux de finition, utilisés dans la décoration d'intérieur.

Dans certains cas, l'usure joue un rôle positif sur l'appréciation des éléments tels que les antiquités architecturales. Dans d'autres cas, une altération même légère peut être perçue comme problématique.

La facilité d'un élément à être démonté/manipulé

L'information sur la manière dont les éléments sont attachés entre eux et au bâtiment a un impact significatif sur la capacité à réutiliser un élément. En effet, si le matériau ne peut pas être démonté, sa récupération devient impossible.

Gielen M et al., (2009) font référence pour ce critère à quatre cas de figure possibles :

- l'élément nécessite une équipe hautement spécialisée pour être démonté,
- l'élément implique une équipe de travailleurs lourdement outillés,
- l'élément implique un travailleur bien outillé,
- l'élément peut être démonté « à la main ».

De plus, des tests de démontage constituent une méthode efficace pour évaluer la démontabilité d'un élément. Ils permettent aussi d'identifier les moyens nécessaires à la déconstruction tels que les outils les plus adaptés et les techniques de démontage les plus adéquates. Cela permet d'organiser la planification du chantier afin de ne pas perdre de temps. Ces tests permettent également d'anticiper les aspects liés au moyen de transport, à l'emballage et d'estimer le taux de perte après l'opération de démontage.

Il est évident que ce critère dépendra du type d'entreprise qui entreprend l'opération et des moyens logistiques et d'outillage qui y sont disponibles. La déconstruction sera confiée à un entrepreneur/une entreprise ou elle sera directement prise en charge par le revendeur de matériaux de réemploi. Celui-ci possède l'expertise nécessaire dans le domaine de la déconstruction.

Enfin, le démontage d'un élément est également lié à l'impact économique de l'opération. Effectivement, en déployant les moyens appropriés, il y a très peu d'éléments qui sont véritablement impossibles à démonter. Au-delà de la technique, ce sont surtout les contraintes financières qui jouent un rôle limitatif. L'enjeu est donc de maintenir les moyens techniques dans des proportions qui n'affectent pas la rentabilité économique de l'opération.

La facilité de transport

Ce critère concerne tous les aspects liés au transport, incluant le type de véhicule nécessaire (camion, camionnette, etc.), la taille, le poids, l'encombrement et le nombre de personnes nécessaires aux transports de l'élément. Tout comme pour le critère de démontage, il dépendra du type d'entreprise qui entreprendra la déconstruction du bâtiment.

La facilité de stockage

La facilité d'un élément à être stocké influence également la possibilité de le réemployer. Certains éléments peuvent être entreposés en plein air sans craindre les intempéries, tandis que d'autres matériaux nécessitent des conditions de stockage plus strictes.

Pour ce critère, Gielen M et al., (2009) font à nouveau référence à quatre cas de figure possibles :

- élément qui est impossible à stocker, ou seulement dans des formes très spécifiques, comme par exemple, des matériaux avec un très haut degré d'inflammabilité,
- élément qui doit être conservé dans un espace couvert et chauffé,
- élément qui doit être conservé à l'abri de la pluie,
- élément qui peut sans problème reposer dehors, sous les intempéries.

La question du stockage rejoint à nouveau celle liée aux aspects économiques. En effet, si un élément doit être conservé dans un espace couvert et chauffé, dans quelle mesure cette obligation impactera-t-elle la rentabilité économique de l'opération ?

La facilité de réinstallation

Certains éléments sont relativement faciles à démonter, mais leur réinstallation peut devenir plus complexe. Ce problème peut être compensé par un travail méticuleux de documentation lors du démontage (exemple : mode d'emploi pour le montage). Dans certains cas, les éléments démontés doivent être accompagnés de toutes les pièces nécessaires à leur remise en œuvre. Par exemple, certains systèmes sanitaires se vendent mieux s'ils sont fournis avec toutes les pièces nécessaires à leur fonctionnement.

Gielen M et al., (2009) évoquent quatre cas de figure particuliers en ce qui concerne la facilité de réinstallation :

- élément dont la réinstallation semble irréaliste,
- élément réinstallable uniquement par un professionnel équipé,
- élément réinstallable par un semi-professionnel,
- élément facile à installer soi-même, de l'ordre du *do-it-yourself*.

Critère normatif

Les modifications des normes peuvent à elles seules rendre un matériau invalide ou compliquer son réemploi.

Par exemple, depuis 2007, en Belgique, la norme NBN S 23-002 exige l'utilisation de verre de sécurité pour les cloisons de bureaux où l'allège descend plus bas que 90 cm. Ce changement implique alors que toutes les cloisons vitrées et posées avant cette date ne peuvent pas être réemployées dans les immeubles de bureaux.

Les indicateurs sur l'impact environnemental

Il peut être utile de réutiliser des éléments de construction dont la production a des conséquences néfastes sur l'environnement. En effet, cette approche permet d'éviter une nouvelle production et de préserver l'empreinte carbone d'un élément. Ainsi, détruire les bâtiments et jeter leurs composants équivaut à gaspiller un investissement antérieur en énergie. Chaque matériau contient une certaine quantité d'énergie grise que l'on peut estimer à l'aide des méthodes telles que l'analyse de cycle de vie.

Les indicateurs sur les impacts environnementaux sont une première évaluation des performances de durabilité d'un élément. Ils servent à fournir aux différents intervenants un outil de décision efficace pour réutiliser ou non un matériau. Cependant, malgré que de nombreux indicateurs existent à l'échelle du matériau ou du composant, il n'existe pas de consensus sur ceux à inclure.

Critère de toxicité

Le potentiel de réemploi d'un élément de construction peut être significativement compromis en présence de substances chimiques, telles que le plomb ou l'amiante, ainsi que de substances biologiques telles les champignons.

Au sein de l'étude réalisée par Gielen M, Devliger L et Ghyoot M, la nocivité est décrite comme un critère décisif, au sens où elle ne comporte que deux possibilités : nocive ou non nocive. Un élément nocif, comme par exemple, un élément contenant de l'amiante, est catégorisé automatiquement comme déchet.

De plus, certains tests additionnels peuvent être effectués pour obtenir des informations spécifiques sur la toxicité des éléments. En effet, certaines substances nécessitent d'être identifiées dans des laboratoires spécialisés. L'extraction d'échantillons destinés à des analyses en laboratoire doit être confiée à un expert.

Enfin, le critère de toxicité influence également le déroulement du chantier afin que les opérations de démontage ne génèrent pas de contamination.

Post-critère : les performances techniques d'un élément

Comme indiqué précédemment, les matériaux de réemploi ne disposent pas (ou plus) de toutes les informations relatives à leurs performances techniques. Le réemploi de certains éléments de construction peut être alors influencé par ce manque d'information. Les informations qui sont nécessaires sont établies en fonction de la réutilisation prévue pour un élément. Par exemple, les éléments qui participent à la structure du bâtiment ne sont pas soumis aux mêmes exigences de performance que ceux qui n'y participent pas. Les performances peuvent alors être qualifiées de fondamentales (exigées par la loi ou nécessaires pour que l'élément convienne à son nouvel usage) ou de complémentaires (besoins non fondamentaux et spécifiques à un projet).

3.2. Les informations économiques

Comme énoncé précédemment, la décision de récupérer certains éléments ne se limite pas uniquement à des questions de performances techniques ou de nouvel usage. L'intérêt économique joue également un rôle dans la décision de récupérer un élément. Cet équilibre économique dépend de la quantité d'éléments disponibles avant le démontage, de l'accès aux éléments, de la quantité d'éléments qui sera réellement démontée (taux de perte), des coûts liés à la charge de travail, des coûts logistiques, des coûts de réinstallation, etc.

Lorsqu'un élément de réemploi est régulièrement mis sur le marché, avec des filières établies garantissant sa réutilisation, il devient possible de définir un prix moyen de revente. Cette valeur économique constitue une référence pour évaluer la rentabilité de récupérer un élément de construction. Ainsi, le coût global des opérations de récupération (études, démontage, nettoyage, tests de performance, transport, etc.) sera estimé et comparé au coût d'un produit de réemploi similaire disponible sur le marché (et/ou au coût d'un produit neuf similaire sur le marché).

Toutefois, l'aspect économique varie considérablement en fonction du type de matériau. En effet, certains matériaux se situent dans des gammes de prix très différentes. Il serait donc plus approprié de prendre en compte le ratio en valeur absolue entre l'élément neuf et l'élément de réemploi.

Enfin, les résultats de l'analyse économique ne doivent pas nécessairement dicter la décision de récupérer un élément. En effet, lorsque celui-ci est réutilisé directement *in situ*, il est alors inutile de considérer sa valeur économique.

Post-critère : l'existence d'une demande.

« Tous les éléments sont réutilisables dès le moment où il existe une demande pour les réutiliser » (Guhyoot et al., 2018).

Ce critère se rapproche de la valeur économique d'un produit. Il permet d'éviter des investissements à perte, c'est-à-dire de consacrer des efforts au démontage sans jamais trouver de repreneur.

D'abord, le marché des matériaux de réemploi est un domaine particulièrement complexe. En effet, divers acteurs, tels que les marchands professionnels, les propriétaires, les ferrailleurs et les brocanteurs opèrent des transactions qui se situent souvent dans la zone grise de l'économie. Les matériaux sont sujets à la vente, à l'échange, au vol, à la collection, et leur valeur est constamment en évolution.

Ensuite, pour évaluer le potentiel de réemploi d'un élément, il est parfois utile de vérifier l'existence préalable d'un marché ou d'un usage spécifique pour l'élément concerné. L'auditeur peut donc se baser sur des produits particulièrement prisés du marché du réemploi, pour lesquels il sera facile de trouver des acquéreurs. Cela concerne des produits tels que les briques pleines, les tuiles et ardoises, le bois, les planchers et parquets en bois, les poutres et bois d'ossature, les bardages en bois, les carrelages de

sol et muraux, les structures en acier, les portes, les châssis de fenêtres à double vitrage, les radiateurs en fonte, les luminaires, les équipements sanitaires, les seuils, les moellons et dallages en pierre, les éléments de voirie, les antiquités et ouvrages architecturaux telles que les colonnes, les boiseries, les manteaux de cheminées, les consoles ouvragées, les sculptures, les fontaines, etc.

Malgré tout, la demande pour un élément est un critère particulièrement fluctuant. De plus, un projet socio-économique dans le domaine du réemploi aura inévitablement des impacts sur cet écosystème. Il est essentiel de se rappeler que l'objectif principal du réemploi consiste avant tout à réduire l'impact environnemental du secteur du bâtiment.

3.3. Les informations culturelles

Authenticité et la valeur culturelle d'un élément

Les éléments de construction peuvent être chargés d'une valeur culturelle. Dans certaines situations, cette valeur est liée à la conception même des éléments de construction. Les matériaux présentent des indices (usure, finition, matérialité) qui, grâce à un processus d'observation et d'interprétation, fournissent des informations sur le type de matériau, ses méthodes de production et ses usages.

Dans d'autres situations, ce qui suscite l'appréciation d'un élément de construction est sa provenance, l'artisan ou l'entreprise qui l'a réalisé ou encore le concepteur qui l'a dessiné. Pour le dernier cas évoqué, à moins qu'une signature explicite ne soit clairement visible sur l'élément, celui-ci ne fournit généralement pas toutes les informations souhaitées. Le fait de posséder certaines informations telles que des documents qui fournissent la preuve de l'implication d'un concepteur dans la création d'un élément récupéré participent donc à la création de sa valeur économique.

De plus, la valeur culturelle d'un élément peut résider aussi dans le fait qu'il soit simplement une « antiquité architecturale ». Ce terme désigne une vaste catégorie d'éléments ayant en commun d'être issus d'une forme d'artisanat. Il s'agit de pièces souvent anciennes, façonnées par un travail manuel. Ces éléments possèdent également une valeur patrimoniale.

Au sein du secteur du réemploi, on encourage le développement et l'adoption de nouveaux outils tels que les inventaires prédémolition, les inventaires réemploi, les passeports matériaux, etc. La difficulté de l'exercice réside dans l'optimisation du processus de documentation, la systématisation et la centralisation de l'information (Gobbo, 2021b).

4. Les inventaires dans le domaine de la construction

Les inventaires sont définis comme une liste ou une caractérisation des déchets et des ressources qui seront libérées lors d'un chantier. Leurs utilités varient en fonction des acteurs d'un chantier (Buildwise, 2022) :

- pour l'entrepreneur, les inventaires permettent de mieux organiser un chantier, de prévoir les coûts et les équipements nécessaires,
- pour le propriétaire et l'architecte, les inventaires permettant de mieux connaître le bâtiment, valoriser les déchets, promouvoir le réemploi, communiquer l'information aux autres acteurs,
- pour les autres acteurs du réemploi et du recyclage, établir un inventaire est utile afin de se tenir informé des gisements, de récupérer les éléments et les déchets de plus haute qualité.

Il existe deux types d'inventaires dans le domaine de la construction (figure 16). Les **inventaires réemploi** et les inventaires démolition.



Figure 16 : Les deux types d'inventaires dans le domaine de la construction (Buildwise, 2022).

4.1. L'inventaire démolition

L'inventaire démolition répond à la question suivante : quels sont les déchets libérés au cours de la démolition ?

Qu'est-ce qu'un inventaire démolition ?

L'inventaire démolition est une liste qui identifie tous les déchets et les ressources qui seront générés lors de la démolition, en précisant leur nature, leur quantité et leur emplacement dans le bâtiment. Ce document sert à informer les acteurs de la démolition des éléments présents dans le bâtiment, notamment la présence de substances dangereuses. L'inventaire est généralement accompagné des recommandations de modalités de gestion des déchets et des ressources (Buildwise, 2023a).

De plus, l'objectif principal de l'inventaire démolition est de prévoir la nature et la quantité de déchets qui sera libérée pendant le chantier de démolition et de définir leur destination (Buildwise, 2023a).

Qui réalise l'inventaire démolition ?

La réalisation de l'inventaire démolition est à la charge du maître d'ouvrage. Il est rédigé par un expert compétent, avant le début du chantier (Buildwise, 2023a). En fonction de la localisation du chantier et du type de matériau, certaines contraintes existent. Pour ne citer qu'un exemple, à Bruxelles, la personne ou l'entreprise chargée d'établir l'inventaire amiante doit être indépendante de l'entreprise chargée des travaux de retrait ou d'encapsulation (de Roissart & Poncelet, 2021).

4.2. L'inventaire réemploi

L'inventaire réemploi, quant à lui, répond à la question suivante : quels éléments ont un potentiel pour être réemployés sur site ou dans d'autres chantiers ?

Qu'est-ce qu'un inventaire réemploi ?

Un inventaire réemploi est une opération effectuée sur des bâtiments qui seront en partie ou en totalité démolis. L'inventaire énumère les éléments réemployables en rassemblant suffisamment d'informations sur ces derniers pour permettre leur réemploi (Cottafava et al., 2020; Smeyers et al., 2022).

L'objectif principal de l'inventaire réemploi est de mettre en évidence les éléments qui présentent un haut potentiel de réemploi (Buildwise, 2023a; Cottafava et al., 2020; Smeyers et al., 2022).

Les inventaires réemploi peuvent servir à différentes fins (Smeyers et al., 2022) :

- fournir les informations sur le potentiel de réemploi des éléments existant sur un site aux différents acteurs tels que les maîtres d’ouvrage et les concepteurs de nouveau projet,
- informer les revendeurs ou tous autres acteurs intéressés de la disponibilité de matériaux de réemploi,
- préciser à l’entreprise de démolition les éléments qui doivent être soigneusement démontés,
- décider de la récupération et de la destination des éléments de réemploi.

Que doit contenir un inventaire réemploi ?

Comme énoncé précédemment, le potentiel de récupération des éléments de construction dépend des informations disponibles à leur sujet. De plus, l’inventaire de réemploi doit contenir suffisamment d’informations sur les caractéristiques des éléments : les caractéristiques techniques, les futures destinations possibles, les conseils pour le démontage, le stockage, etc. Actuellement, il n’existe pas de protocole reconnu et normalisé pour dresser un inventaire (Cottafava et al., 2020; Smeyers et al., 2022).

Suite à l’analyse de différents modèles d’inventaire réemploi présents dans la littérature (voir Annexe 1 : Exemple d’inventaire réemploi), nous avons identifié une série d’informations à introduire dans un inventaire réemploi. Les informations sont généralement classées en données primaires (aussi appelées données de base), qui sont presque toujours nécessaires pour le réemploi des éléments, et en données complémentaires. Ces informations sont reprises dans *le tableau 1* ci-dessous :

Tableau 1 : Les informations que doit contenir un inventaire réemploi (réalisé par le chercheur sur base de la littérature)

Les données primaires/données de base de l'élément	Les données complémentaires de l'élément
Identification (numéro, nom, catégorie de matériaux)	Valeur économique
Visualisation 2D (photo) et/ou 3D (modélisation)	Valeur culturelle/architecturale (rareté, signature...)
Quantité	Description plus détaillée de l'élément (couleur, etc.)
Dimension	Conformité ou le respect au cadre normatif et réglementaire
Masse (poids)	Impact environnemental
Localisation in situ	Facilité de transport (si transport nécessaire)
État	Facilité de stockage (si stockage nécessaire)
Réversibilité (facilité de l'élément à être démonté)	Toutes informations supplémentaires permettant une meilleure vue d'ensemble pour le réemploi de l'élément
Performances techniques	
Identification du fabricant si possible	
Destination potentielle (in situ ; ex-situ ; revendeur)	
Toxicité	
Date de production et/ou de mise en œuvre	
Facilité de réinstallation (la remise en œuvre)	

Qui réalise l’inventaire réemploi ?

Le tableau 2 illustre les différents acteurs qui peuvent réaliser un inventaire réemploi : le maître d’ouvrage, l’architecte, l’ingénieur, l’entrepreneur en construction/démolition, le contrôleur des travaux, l’expert en réemploi, le revendeur de matériaux. Le choix d’un ou de plusieurs d’entre eux dépend des objectifs du projet, du contexte général (type de bâtiment, moyens mis à disposition, etc.) et du *timing* (Cottafava et al., 2020; Smeyers et al., 2022).

Tableau 2 : Tableau des différents acteurs qui peuvent mener un inventaire réemploi avec les divers avantages et inconvénients ainsi que des recommandations (Bruxelles Environnement, 2023).

	Avantages	Inconvénients	Recommandations
Architecte	<p>évalue la valeur d'un élément en fonction d'une approche globale ;</p> <p>repère des opportunités directes de réemploi.</p>	<p>peut ne pas être impliqué dans la décision de démolir ou non le bâtiment ;</p> <p>le cahier des charges de l'auteur du projet doit inclure cette mission et les honoraires ;</p> <p>certains architectes préfèrent encore travailler à partir d'une page blanche ;</p> <p>méconnaît le marché du réemploi.</p>	<p>plus adéquat dans des projets de rénovation avec réemploi in-situ (en tant que « sourceur »).</p>
Maître d'ouvrage	<p>peut intervenir en amont du processus et adapter ses ambitions ;</p> <p>peut effectuer le premier inventaire en interne ;</p> <p>peut repérer les possibilités de réemploi</p> <p>(si MO public) connaît les stratégies des marchés publics et peut les adapter en fonction des opportunités.</p>	<p>a des connaissances techniques limitées ;</p> <p>n'a pas souvent les moyens d'effectuer des inventaires exhaustifs dans les grands bâtiments.</p>	<p>peut effectuer la première étape d'une évaluation simplifiée, assisté ou non par d'autres professionnels.</p>
Entrepreneur (construction ou démolition)	<p>démolition : donner une estimation précise des défis techniques posés par la déconstruction ;</p> <p>construction : repérer des possibilités de réemploi sur site ou en flux tendu sur d'autres sites.</p>	<p>conflits d'intérêts par rapport aux objectifs et ambitions en matière de quantité ;</p> <p>inexpérience dans l'identification des possibilités de réemploi.</p>	<p>peut réutiliser les matériaux sur site et être consulté sur la faisabilité technique et logistique ;</p> <p>à impliquer dans les discussions lors de processus de déconstruction/logistique.</p>
Contrôleur de travaux	<p>dispose de vastes connaissances techniques et législatives.</p>	<p>peut avoir une expérience limitée du réemploi.</p>	<p>si impliqué dans un autre type d'audit, il peut effectuer une première évaluation et ensuite être assisté par d'autres professionnels.</p>
Expert en réemploi	<p>repère les réemployables et évalue leur potentiel ;</p> <p>peut agir en tant qu'externe et servir de liaison entre les différentes parties ;</p> <p>suggère différentes possibilités et évalue leur faisabilité en combinant le</p>	<p>fonction encore en développement et peu commune et non certifiée ;</p> <p>sa mission doit faire l'objet d'un contrat.</p>	<p>si : ambition élevée, taille importante, stratégie large (réemploi ou déchet) ;</p> <p>si : moyens dédiés au réemploi ;</p> <p>pour avoir vue d'ensemble des possibilités et une première estimation de leurs répercussions.</p>

	<p>marché existant et le projet d'architecture ;</p> <p>donne un avis sur performances à atteindre.</p>		
Revendeur de matériaux de réemploi	<p>a une bonne connaissance du marché ;</p> <p>précieuses indications sur les conditions déterminant le caractère réemployable ;</p> <p>garanti la circulation effective des matériaux vers de nouvelles utilisations.</p>	<p>vision étroite ou biaisée sur un segment ;</p> <p>peu sensible au réemploi innovant ;</p> <p>peut ignorer certains produits, car n'en perçoit pas la valeur à la revente ;</p> <p>peut avoir des connaissances techniques et législatives limitées.</p>	<p>s'il existe déjà un (segment de) marché ;</p> <p>pour simplement obtenir des « gains rapides » (pas exhaustif) ;</p>

Il est important de préciser que les acteurs du secteur de la construction listés ci-dessus peuvent avoir un point de vue différent en ce qui concerne le potentiel de réemploi des éléments de construction (Cottafava et al., 2020; Ghyyoot et al., 2018). La figure 17 met en évidence le lien entre l'identification d'un élément de réemploi et le profil de la personne qui dresse l'inventaire.

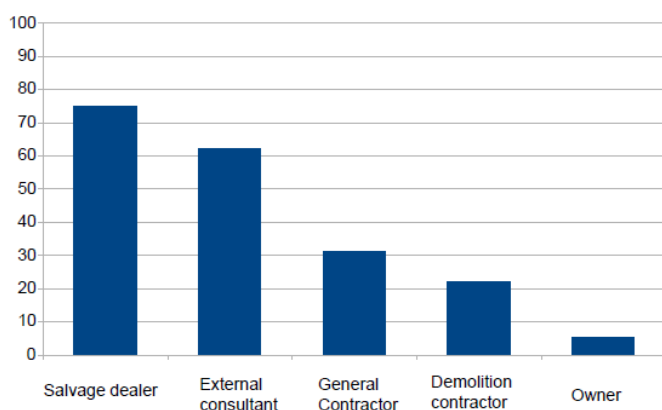


Figure 17 : Pourcentage de composants et de produits identifiés dans un bâtiment ayant un potentiel de réemploi par différents acteurs de la construction (Wassink, 2016).

En effet, ces chiffres montrent bien qu'en fonction du type de personne qui dresse l'inventaire, l'évaluation du potentiel de réemploi d'un élément varie énormément. Cette différence est due aux intérêts propres de chaque acteur. Par exemple, un revendeur (*salvage dealer*) a tout intérêt à identifier précisément le potentiel de réemploi, au risque d'être trop optimiste, car il est susceptible d'en bénéficier lors d'une éventuelle revente (Ghyyoot et al., 2018). À l'opposé, les autres intervenants tels que les entrepreneurs (*general contractor*) ou les démolisseurs (*demolition contractor*) ne possèdent pas les compétences nécessaires ou n'ont pas d'intérêt à identifier les éléments en vue de leur réemploi (Cottafava et al., 2020; Ghyyoot et al., 2018).

Dans cette logique, il devient évident qu'un inventaire réemploi, pour être fiable, doit être mené par des experts capables de rester neutres lors de l'évaluation du potentiel de réemploi des éléments. Un tel rôle peut être alors confié à un prospecteur (Ghyyoot et al., 2018).

Le rôle du prospecteur

Historiquement, le prospecteur est une personne chargée d'identifier les minerais et les sources naturelles exploitables. Dans les traités miniers de la Renaissance, on dresse une image du prospecteur comme étant une personne dotée d'un très grand talent d'observation (Ghyoot et al., 2018).

Aujourd'hui, les méthodes de prospection s'appuient sur des techniques de pointe et des méthodes scientifiques. Elles nécessitent toujours de bonnes capacités d'observation et de déduction à partir d'indices relativement subtils. Dans le cas du réemploi des matériaux, ces capacités sont nécessaires pour identifier le potentiel de réemploi d'un matériau. Ainsi, le travail du prospecteur est nécessaire avant chaque opération et c'est à lui de décider si une opération de déconstruction en vue du réemploi est justifiée. De plus, le but du prospecteur est d'aider un propriétaire ou un gestionnaire d'un bâtiment à identifier les éléments réutilisables et à activer les bons acteurs pour concrétiser leurs intentions (Ghyoot et al., 2018).

4.3. Fusionner l'inventaire démolition et l'inventaire réemploi

Le fait de combiner les deux inventaires est une option viable à condition que les principales différences entre les deux inventaires soient prises en compte (Buildwise, 2023a) :

- les inventaires doivent être effectués avant le début des travaux pour assurer une bonne gestion des déchets et des éléments de réemploi,
- les experts chargés de la réalisation des inventaires démolition ne sont pas des spécialistes pour repérer les éléments réemployables. Cependant, l'association avec d'autres experts en réemploi permettra de diminuer le risque de ne pas identifier les éléments à récupérer. Les experts en démolition peuvent également devenir eux-mêmes des spécialistes en réemploi,
- il est important de faire preuve de prudence lors de la distinction entre les éléments destinés au réemploi et ceux qui seront traités en tant que déchets.

Enfin, s'il n'est pas possible de combiner les deux inventaires, ils seront alors effectués en parallèle (figure 18). L'inventaire réemploi peut être effectué après l'inventaire démolition afin de bénéficier de l'identification des déchets toxiques (Buildwise, 2023a).

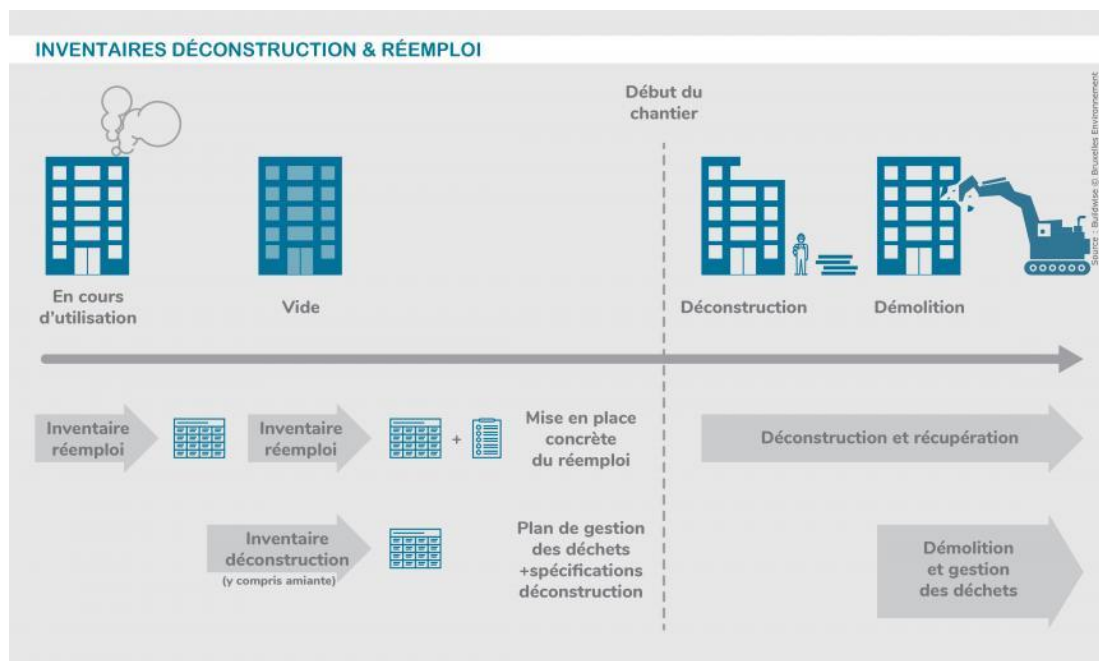


Figure 18 : Schéma illustrant quand réaliser l'inventaire démolition et l'inventaire réemploi (Bruxelles Environnement, 2023).

5. Le BIM

Comme mentionné dans le chapitre 3, l'absence d'information sur les éléments de réemploi constitue un obstacle majeur à leur réutilisation. Cependant, le BIM apporte une solution à ce problème, car il permet de générer, structurer, stocker et échanger une grande quantité d'informations détaillées sur un bâtiment ou un élément. Cette capacité à gérer l'information est l'une des raisons de la mise en avant du BIM pour la déconstruction (Akbarieh et al., 2020; Ghyyoot et al., 2018; Koutamanis, 2024; Vrijders et al., 2023).

Dans ce chapitre, il s'agira d'abord de définir le BIM et ce qui le constitue. Ensuite, le chapitre 6 explorera les enjeux du BIM dans le domaine du réemploi, en se concentrant particulièrement sur sa complémentarité avec l'inventaire réemploi.

5.1. La définition du BIM

En 1975, Charles M. Chuck Eastman a publié le premier document détaillant le concept BIM tel que nous le connaissons aujourd'hui. Sous la forme d'un prototype fonctionnel intitulé « *The use of computers instead of drawings in building design* », il énonçait déjà des notions du BIM désormais courantes (Eastman et al., 2008).

Aujourd'hui, l'acronyme BIM est souvent défini comme « *Building Information Modeling* ». Cependant, la lettre « M » correspond en réalité à trois concepts différents (Buildwise, 2023b; Celnik et al., 2016) :

Building Information Model : le modèle numérique est la représentation graphique d'un bâtiment. Le modèle est créé avec un logiciel spécifique appelé « logiciel BIM ». Le modèle BIM n'est pas qu'un simple modèle 3D, il contient aussi des informations qui sont liées aux objets qui composent le modèle.

Building Information Modeling : modéliser un modèle BIM n'est pas simplement dessiné en 3D, mais c'est aussi y entrer des informations et les structurer. La deuxième signification de l'acronyme désigne alors un processus de travail des personnes qui utilisent le BIM, dans un esprit de constitution de base de données et d'échanges entre acteurs.

Building Information Management : cette signification évoque le processus de gestion et d'échange de l'information. On aborde ici la gestion et l'échange du modèle numérique et des données qu'il contient entre les différents acteurs.

Le BIM n'est pas un outil ou un logiciel de modélisation. Il correspond en réalité à un processus de travail et de collaboration entre les différents acteurs d'un projet. Ce processus repose sur des outils particuliers qui permettent la conception et l'exploitation d'une maquette numérique d'un bâtiment tel que construit et exploité (Celnik et al., 2016). Le BIM utilise la technologie numérique pour définir, gérer et échanger des informations de manière structurée tout le long du cycle de vie d'un bâtiment (de la conception à l'exploitation et même à la déconstruction) (Vrijders et al., 2023).

Le BIM peut être aussi défini comme la « gestion des informations sur le bâtiment ». En effet, outre le modèle lui-même, l'importance est portée sur l'information et la capacité à la partager. Nous pouvons considérer le modèle BIM comme une combinaison entre un modèle 3D et une base de données qui relie chaque élément du modèle, appelé « objet », à un ensemble de paramètres spécifiques et définis (figure 19) (Vrijders et al., 2023).

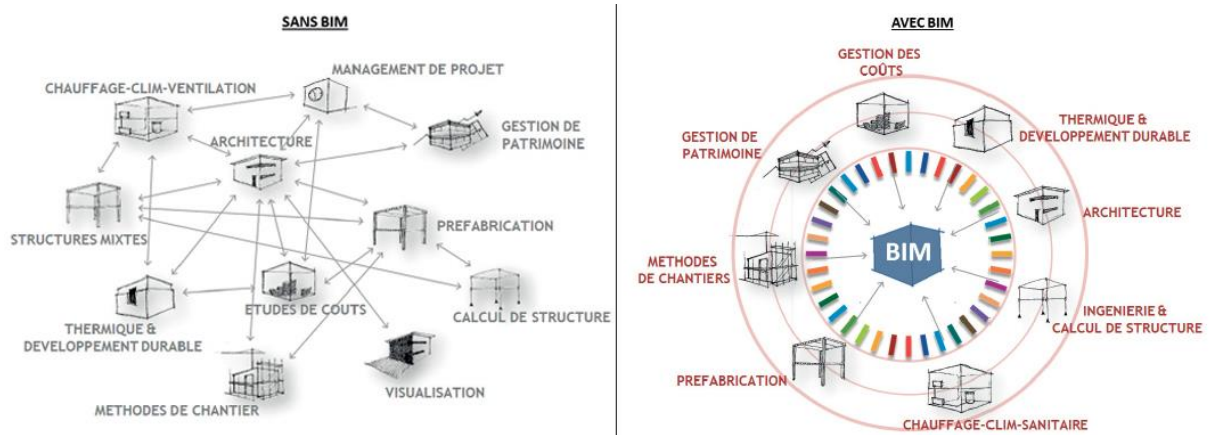


Figure 19 : Schéma illustrant la différence entre un processus de construction classique et un processus de construction BIM (Celnik et al., 2016).

Le BIM est souvent mal défini et donc mal compris. Il est parfois réduit à la production de dessins et d'autres documents conventionnels qui améliore l'efficacité et permet de réduire les erreurs. Malheureusement, cette réduction empêche de voir comment sont structurés les logiciels BIM et comment cette structure permet d'atteindre différents objectifs (Koutamanis, 2024).

Pour remédier à la confusion entre les logiciels BIM et tout autre logiciel de modélisation, il est utile de décrire ceux qui n'utilisent pas la technologie BIM (Eastman et al., 2008) :

- **Les modèles numériques contenant uniquement des données 3D et sans aucun attribut d'objet** : ces modèles sont limités à la visualisation graphique et ne disposent d'aucune intelligence au niveau des objets. De plus, il ne permet pas l'intégration de données et d'analyse de la conception.
- **Les modèles sans support de comportement** : ce type de modèle définit des objets, mais leur positionnement et leurs proportions ne peuvent pas être ajustés, car il n'utilise pas l'intelligence paramétrique. Il rend alors les modifications très difficiles et n'offre donc aucune protection contre la création de vues incohérentes ou inexactes du modèle.
- **Les modèles composés de plusieurs fichiers de référence CAO 2D qui doivent être combinés pour définir le bâtiment** : ce type de modèle ne garantit ni la réalisation cohérente du modèle 3D et ni que ce dernier présentera l'intelligence nécessaire en ce qui concerne les objets qu'il contient.
- **Les modèles permettant de modifier les dimensions d'une vue sans que cette modification ne se répercute automatiquement sur les autres vues** : les erreurs dans ce genre de modèle sont très difficiles à détecter.

5.2. Le jargon du BIM : le protocole BIM, le plan d'exécution BIM et le document de vision BIM

Le protocole BIM, le plan d'exécution BIM et le document de vision BIM constituent les trois principaux documents d'un projet BIM (Euben & Boeykens, 2019).

En effet, la réalisation d'un projet BIM nécessite une coordination et une communication claires entre les différents acteurs du BIM, chacun jouant un rôle spécifique. Pour obtenir un modèle BIM de qualité, il est important d'avoir une bonne communication et des conventions claires. Celles-ci sont donc définies et groupées dans un protocole BIM et un plan d'exécution BIM (Euben & Boeykens, 2019; Ghyoot et al., 2018).

Par définition, le **protocole BIM** est « un document contractuel qui reprend les conventions et les attentes en matière de BIM. Ce protocole doit être signé par tous les partenaires d'un projet » (Euben & Boeykens, 2019). De plus, il permet de définir les ambitions et les objectifs BIM, qu'il s'agisse de la production, de la gestion, de la communication ou du stockage de l'information (Vandenberg, 2018).

Le plan d'exécution BIM, quant à lui, constitue un complément au protocole. Il décrit l'application pratique des conventions du protocole BIM et régit la collaboration entre les partenaires d'un projet. Le plan d'exécution est un document évolutif et s'adapte à chaque étape importante d'un projet (Euben & Boeykens, 2019).

Le document de vision BIM regroupe les attentes, les objectifs et les exigences du maître d'ouvrage en matière de BIM. En plus de l'ensemble des informations fournies par tous les acteurs du projet, il sert de base pour la rédaction du protocole et du plan d'exécution (Euben & Boeykens, 2019).

5.3. Les acteurs du BIM

Au sein d'un projet BIM, il existe plusieurs acteurs qui communiquent entre eux, notamment grâce aux documents présentés dans le chapitre précédent.

Le maître d'ouvrage (MO) : Personne physique ou morale qui confie la conception et l'exécution d'un projet de construction à autrui (Euben & Boeykens, 2019).

L'assistant du maître d'ouvrage (AMO) BIM : L'AMO BIM accompagne le maître d'ouvrage (MO) en se chargeant de certaines ou de l'ensemble des tâches liées au BIM (au nom et pour le compte du MO) (Euben & Boeykens, 2019).

Le BIM process manager : Il est chargé du bon déroulement du processus BIM et assiste l'équipe du projet. En fonction d'un projet, il peut y avoir plusieurs BIM process managers. Ce rôle peut être exercé par une partie externe ou par l'un des acteurs du projet. Il rédige aussi le protocole BIM et le plan d'exécution (Euben & Boeykens, 2019).

Le coordinateur BIM : Son rôle consiste à organiser et à contrôler la coordination globale entre les acteurs. Il exerce un rôle opérationnel et travaille en étroite collaboration avec le BIM process manager (Euben & Boeykens, 2019).

Le modelleur BIM : Le modelleur BIM est la personne qui est chargée de la réalisation de la maquette numérique. Il travaille en équipe pour développer les différentes parties du modèle 3D. Il a aussi comme fonction de créer, développer et extraire la documentation 2D à partir du modèle BIM. Pour finir, il se charge de mettre à jour la maquette numérique au fur et à mesure du développement du projet (Barison & Santos, 2010; De Maestri, 2017).

Le Model Element Author (MEA) (auteur de l'élément du modèle) : Le MEA est une personne ou un groupe de personnes chargées de la livraison des informations nécessaires (géométriques et alphanumériques) concernant un type d'élément spécifique au sein d'un modèle BIM (Euben & Boeykens, 2019).

L'analyste BIM : Il effectue les analyses et les simulations basées sur le modèle BIM telles que les analyses des performances du bâtiment, les analyses de la circularité, etc. (Barison & Santos, 2010).

Le facilitateur BIM : Il aide les autres professionnels qui ne sont pas compétents dans l'utilisation d'un logiciel BIM pour visualiser les informations du modèle numérique. Il travaille généralement avec les différents corps de métiers qui vont construire physiquement le bâtiment (Barison & Santos, 2010).

Le consultant BIM : Le consultant BIM guide les concepteurs, les développeurs et les constructeurs de projets dans l'implémentation du BIM. Il intervient dans les entreprises qui ne disposent pas d'un expert en BIM. Il existe trois types de consultants BIM : le consultant stratégique, le consultant fonctionnel et le consultant opérationnel. Le premier génère les stratégies à moyen et à long terme dans une vision de réussite. Le deuxième génère les plans d'action en accord avec les stratégies établies. Le troisième réalise le processus de mise en œuvre et est formé par un fournisseur de logiciel pour élaborer les plans de mise en œuvre (Barison & Santos, 2010).

Le chercheur BIM : Agissant en tant qu'éducateur BIM, le chercheur BIM est le spécialiste qui travaille dans les universités, les instituts de recherche ou les organisations gouvernementales. Il enseigne, coordonne et développe la recherche sur le BIM (Barison & Santos, 2010).

La figure 20 illustre schématiquement comment s'appliquent les trois documents précédemment mentionnés aux différents acteurs BIM :

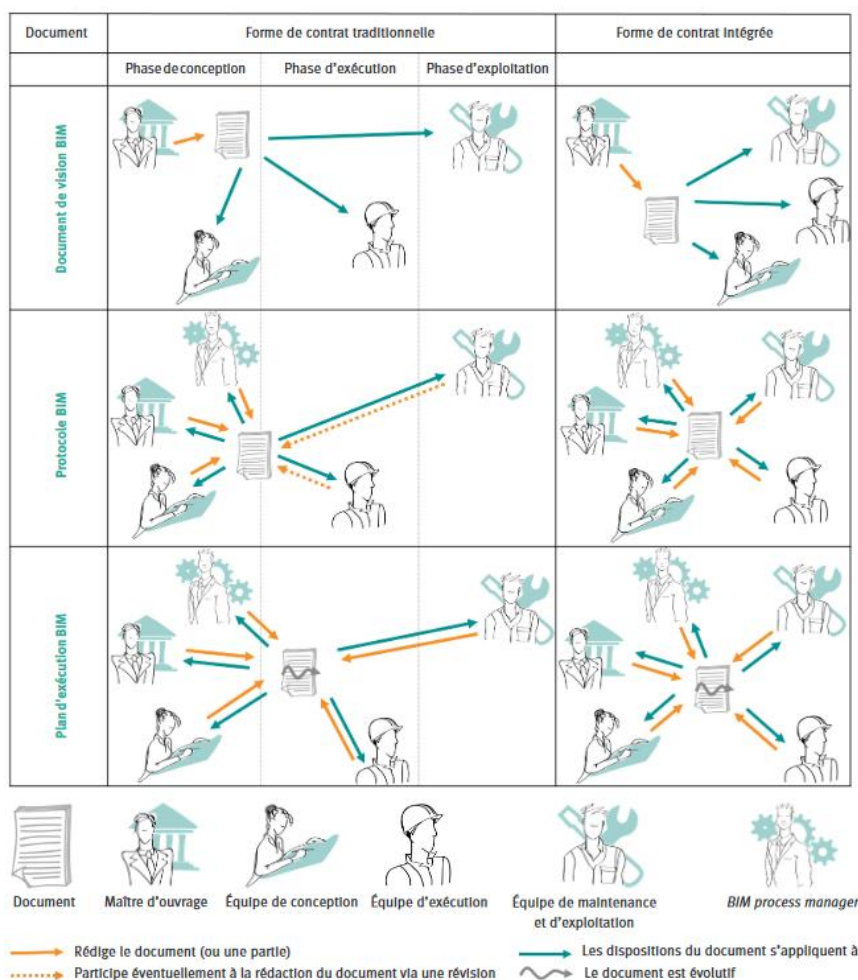


Figure 20 : Schéma des documents BIM selon la forme de contrat (Euben & Boeykens, 2019).

5.4. Building Information Model : la maquette numérique

Une maquette numérique est une représentation géométrique d'un produit, en 3D, réalisée sur un ordinateur de façon à l'analyser, le contrôler et en simuler certains comportements (figure 21) (Celnik et al., 2016).

Le « Building Information Model » correspond à une maquette numérique sémantisée d'un bâtiment. Une maquette numérique est dite « sémantisée » lorsqu'elle est produite avec un logiciel BIM tel que

Revit et ArchiCAD. Elle n'est pas sémantisée lorsqu'elle est produite avec des logiciels de dessins DAO-CAO 3D tels que SketchUp ou AutoCAD 3D. Le mot « sémantisée » fait référence à l'ajout d'informations liées aux objets qui va au-delà d'une simple représentation graphique comme expliquée précédemment (Celnik et al., 2016).

De plus, le terme « Model » désigne à la fois le modèle numérique lui-même, mais aussi un élément du modèle ou plusieurs modèles qui cohabitent au sein d'un projet (Institut américain des architectes, 2013).

La maquette numérique évolue tout au long du projet. Elle est alimentée d'informations structurées et vérifiées par les différents corps de métiers impliqués dans le projet. L'objectif principal d'une maquette numérique BIM est donc de contenir toutes les informations essentielles au projet, en fonction de l'état d'avancement, de sa conception à sa réalisation et son exploitation (De Maestri, 2017).

Enfin, les éléments contenant les informations sont structurés sous forme « d'objet renseigné ». Par exemple, pour les éléments techniques tels que les portes, les gaines, les faux plafonds, etc., les informations détaillent les références, les types, les dimensions, les caractéristiques techniques et thermiques, les durées de vie, etc. des éléments (De Maestri, 2017).

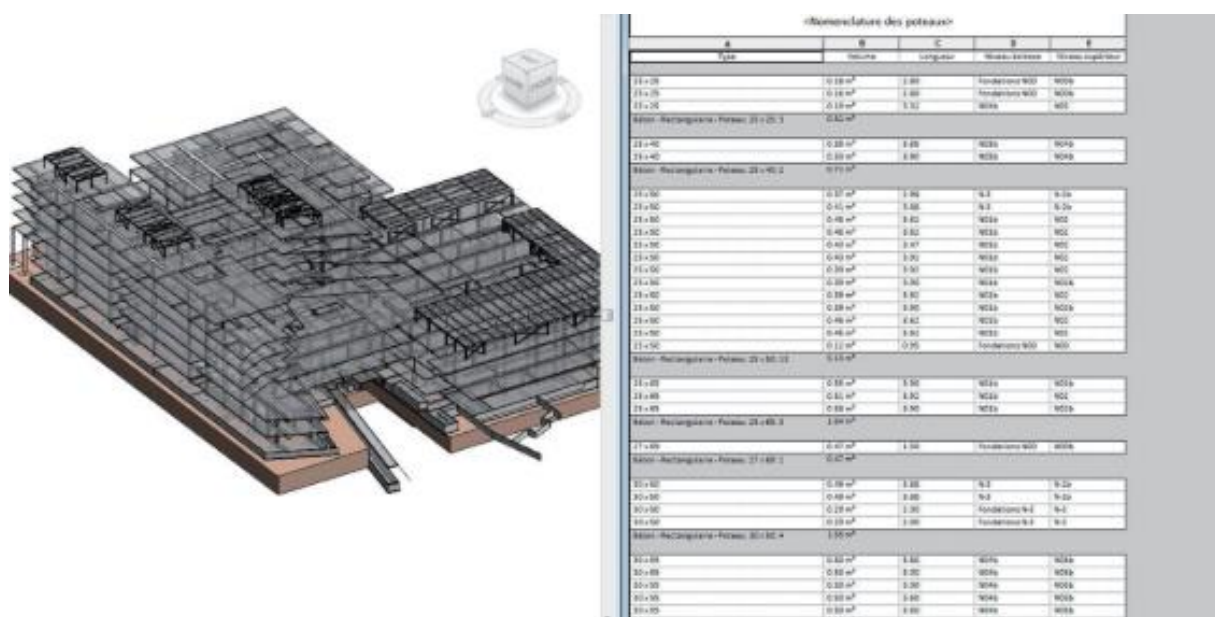


Figure 21 : Exemple de maquette numérique renseignée (De Maestri, 2017).

Au sein d'un projet BIM, plusieurs types de maquettes numériques peuvent cohabiter : la maquette intégrée, la maquette métier et la maquette fédérée (De Maestri, 2017).

La maquette intégrée est une maquette numérique qui regroupe en un seul fichier tous les éléments d'un projet. Elle est stockée sous forme de format natif ou export (IFC) (De Maestri, 2017).

La maquette métier, quant à elle, est dédiée à un métier spécifique, une discipline ou un lot de construction. Elle est une composante de l'ensemble du projet. Elle peut prendre la forme d'une maquette architecturale, d'une maquette de structure, d'une maquette CET, etc. (De Maestri, 2017).

La maquette fédérée, quant à elle, est une maquette globale du projet. Cette maquette regroupe les informations des maquettes métiers. Elle agit comme une maquette d'assemblage d'un projet.

La réalisation de la maquette se fait à l'aide d'un logiciel compatible avec les différents corps de métiers, soit à l'aide d'un serveur partagé organisé (De Maestri, 2017).

5.4.1. Niveaux de développement (LOD), de détail (LoD) et le niveau d'information (LoI)

Ces différentes notions constituent l'un des concepts fondamentaux de la maquette numérique BIM (Celnik et al., 2016).

Il existe des différences importantes entre le niveau de développement et le niveau de détail. En effet, ces deux notions sont souvent confondues (Bedrick & Reinhardt, 2023).

D'abord, **le niveau de développement (LOD)** est le degré auquel la géométrie de l'élément a été réfléchi (Bedrick & Reinhardt, 2023). Chaque élément du modèle BIM se développe à un rythme différent. Le niveau de développement d'un élément informe alors les participants du projet, du degré de développement attendu des informations et de la mesure dans laquelle ils peuvent se fier pour l'élaboration du modèle. De plus, le LOD de chaque élément du modèle permet d'éviter que d'autres participants n'utilisent l'élément de manière involontaire ou n'en déduisent une plus grande précision que celle prévue par le LOD (Institut américain des architectes, 2013). Le niveau de développement comprend le niveau de détail et le niveau d'information (De Maestri, 2017).

Ensuite, **Le niveau de détail (LoD)**, définit la quantité de détail à inclure dans un élément du modèle (Bedrick & Reinhardt, 2023). Le niveau de détail varie au fur et à mesure de l'élaboration d'un projet et varie également en fonction des corps de métiers qui exploitent la maquette numérique (Celnik et al., 2016).

Enfin, **Le niveau d'information (LoI)** concerne les données qui sont liées aux éléments du modèle. Ce sont des données qui ne sont pas représentées graphiquement (De Maestri, 2017).

Le niveau de développement est défini dans un modèle BIM, d'une échelle allant de 100 à 500 telle qu'illustrée dans *la figure 22*. Les exigences de chaque LOD (sauf le LOD 500) comprennent les exigences de tous les LOD inférieurs (Akbarieh et al., 2020; Bedrick & Reinhardt, 2023).

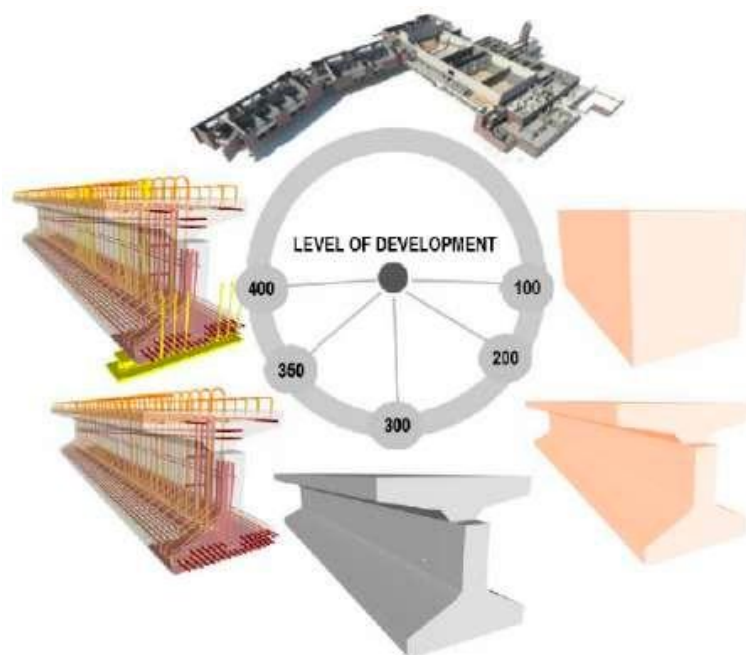


Figure 22 : Les différents niveaux de développement (LOD) (Akbarieh et al., 2020).

LOD 100 :

Les éléments de LOD 100 ne sont pas nécessairement des représentations géométriques. Ils peuvent être représentés par des symboles montrant l'existence de l'élément sans en informer sa forme, sa taille ou son emplacement précis. Ils peuvent être représentés aussi par de simples volumes de réservation d'espace. Toutes informations sur les éléments du LOD 100 doivent être considérées comme approximatives (Bedrick & Reinhardt, 2023).

LOD 200 :

Les éléments de LOD 200 sont représentés de manière générique et graphique avec une quantité, une taille, une forme, un emplacement et une orientation supposée. Toutes les informations présentant un LOD 200 doivent être considérées comme approximatives (Bedrick & Reinhardt, 2023).

LOD 300 :

Les éléments représentés sous le LOD 300 sont représentés graphiquement avec une quantité, une taille, une forme, un emplacement et une orientation, de telle sorte qu'ils puissent être mesurés. Le LOD 300 développe suffisamment d'informations pour transmettre l'intention de conception d'un élément (Bedrick & Reinhardt, 2023).

LOD 350 :

Les éléments représentés sous le LOD 350 sont représentés graphiquement avec une quantité, une taille, une forme, un emplacement, une orientation et des interfaces avec des éléments de modèles adjacents ou dépendants, de telle sorte qu'ils puissent être mesurés. Le LOD 350 définit les exigences relatives aux éléments afin de prendre en charge la coordination au niveau de la construction (Bedrick & Reinhardt, 2023).

LOD 400 :

Les éléments avec un LOD 400 sont représentés graphiquement dans le modèle avec suffisamment de détails pour permettre leur fabrication, leur assemblage et leur installation (Bedrick & Reinhardt, 2023).

LOD 500 :

Le LOD 500 n'indique pas un niveau de détail supérieur à un LOD 400, mais précise que la géométrie de l'élément est déterminée par l'observation d'un élément existant plutôt que par la conception d'un élément futur. Le niveau de précision doit être noté ou joint à l'élément (Bedrick & Reinhardt, 2023).

Après avoir énoncé les différentes descriptions des niveaux de développement, une question peut se poser : quel niveau de développement est nécessaire pour une déconstruction circulaire ?

D'après l'étude réalisée par Akbarieh et al. (2020), un LOD d'au moins 350 est nécessaire pour la déconstruction basée sur le BIM. En effet, si un bâtiment doit être déconstruit sur base d'un BIM conforme à une réalité existante, des informations précises sont nécessaires. La fabrication et l'assemblage des éléments requièrent un LOD de 400. Puisque le modèle BIM repose sur un bâtiment déjà existant, les éléments du modèle sont donc représentés sur base d'éléments existants. C'est pourquoi un LOD 500 serait nécessaire. Il est également important de définir un niveau d'informations (Loi) approprié. Effectivement, les informations et les propriétés des objets sont plus importantes, que leur visualisation ou leurs attributs géométriques (Akbarieh et al., 2020).

5.4.2. Les huit dimensions du BIM

Au-delà de la géométrisation en 3D, le BIM présente plusieurs dimensions réparties de la 2D à la 7D (figure 23) (Akbarieh et al., 2020; Chatterton, 2018; De Maestri, 2017). Certains experts tels que Scott Chatterton identifient la déconstruction basée sur le BIM comme étant la huitième dimension du BIM. Cependant, il y a encore des discussions pour savoir si la déconstruction est bien une nouvelle dimension du BIM (Charef et al., 2018).

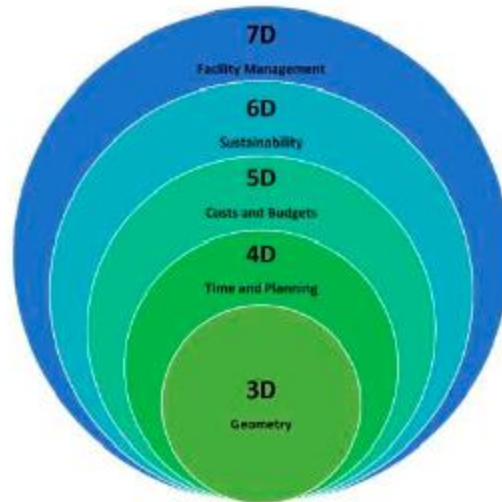


Figure 23 : Les dimensions de la modélisation des données du bâtiment (BIM) (Akbarieh et al., 2020).

La 2D :

La 2D représente les dimensions géométriques sur un plan en X-Y, comprenant les plans, les coupes, les élévations et les détails. Cette dimension constitue la base contractuelle pour la validation des projets BIM. Les informations qu'elle contient doivent provenir de la maquette numérique afin de garantir la cohérence des documents.

La 3D : La modélisation

La modélisation en axe X-Y-Z représente la troisième dimension. Les éléments du modèle numérique et les données qui y sont associées sont directement liés au modèle 3D. Ce dernier est exploité pour la visualisation, l'analyse précoce des performances du bâtiment, l'évaluation de la durabilité, l'analyse préliminaire des coûts et pour la génération de documents (dessins), etc.

La 4D : Le temps (planification)

La quatrième dimension est le temps et la gestion du temps (planification). Cette dimension sert à visualiser la durée prévue pour la construction d'un projet, en reliant les éléments du modèle, les assemblages et les données à un calendrier spécifique. Elle sert aussi à la livraison programmée des matériaux de construction.

La 5D : Coût (quantification)

En reliant les éléments et les assemblages du modèle au calendrier (4D) avec les coûts associés, cette dimension permet de quantifier les matériaux et le coût de construction. Ce modèle sert à visualiser l'avancement des activités de construction et les coûts qui y sont associés au cours du temps.

La 6D : Performances

À partir d'ici, la littérature diverge à propos de la définition de la sixième, septième et huitième dimension.

D'une part, la sixième dimension correspond à la modélisation énergétique et l'évaluation des performances du bâtiment. Elle permet aussi de mesurer et valider la modélisation énergétique estimée par rapport aux performances réelles. D'autre part, elle correspond à l'intégration de données pour la maintenance et l'aperçu du « Life Cycle Costs⁶ ».

La 7D : Maintenance et gestion des installations

Le BIM 7D caractérise l'un des objectifs principaux du BIM car il permet de délivrer au gestionnaire de l'ouvrage toutes les informations nécessaires à l'exploitation et la maintenance du bâtiment. Le modèle 7D contient les données nécessaires pour le *facility management*, le *property management* et l'*asset management*. En d'autres termes, la septième dimension facilite la gestion des actifs tout au long de la durée de vie du bâtiment et fournit une base de données pour le suivi, la maintenance et la gestion continue du bâtiment.

La 8D : La déconstruction

Cette dimension potentielle est en lien direct avec notre sujet d'étude, à savoir, l'utilisation du BIM pour la déconstruction des bâtiments dans une logique d'EC. L'utilisation du BIM peut nous servir à mieux comprendre la façon dont nous déconstruisons et servir de support aux réemplois des matériaux (Chatterton, 2018).

Dans cette logique, la maquette BIM sert d'inventaire tel que l'inventaire réemploi, permettant aux maîtres d'ouvrage de réemployer les matériaux de leurs bâtiments ou de les revendre. Certains chercheurs trouvent que cette approche constitue la septième dimension et non la huitième (Guldager Jensen & Sommer, 2016).

6. Le potentiel du BIM pour faciliter la réalisation et la gestion d'un inventaire réemploi

L'exécution d'un scénario durable et circulaire dans le domaine de la construction nécessite des informations fiables et précises. L'utilisation des modèles numériques BIM permet donc de répondre aux exigences du réemploi en matière d'informations (Akbarieh et al., 2020).

En effet, la réalisation d'un inventaire réemploi peut être améliorée par le BIM grâce à sa capacité à fonctionner comme un stockage d'informations structurées (Akbarieh et al., 2020; de Roissart, 2022) ainsi qu'à son intelligence à refléter directement tout changement (Akbarieh et al., 2020).

Dans cette logique, le BIM sert de modèle numérique 3D présentant toutes les informations géométriques et les informations non géométriques nécessaires aux réemplois des éléments (Akbarieh et al., 2020).

6.1. Les opportunités et les limites du BIM pour l'inventaire réemploi

Les opportunités du BIM

L'utilisation du BIM pour réaliser un inventaire réemploi apporte de multiples opportunités pour la gestion circulaire des éléments de construction (Vrijders et al., 2023).

⁶ Traduction : Coût du cycle de vie

D'abord, la maquette BIM permet d'obtenir les dimensions des éléments de construction, leurs propriétés, leur emplacement ainsi que le volume global et la masse des matériaux. Il est également possible d'ajouter des informations supplémentaires aux objets BIM, soit directement dans le BIM ou à partir de sources extérieures (Excel, base de données, etc.). Ces informations sont stockées dans le modèle BIM qui peut être analysé par tous les acteurs. Cette capacité à centraliser les informations constitue l'une des principales opportunités du BIM pour la réalisation d'inventaire réemploi (de Roissart, 2022; Vrijders et al., 2023).

Aujourd'hui, un approvisionnement en grande quantité des matériaux de réemploi pour des grands projets pose particulièrement problème. En effet, les plateformes de réemploi ne sont pas adaptées pour les projets de grande envergure. La mise en réseau des matériaux réemployables est d'ailleurs l'un des freins actuels au réemploi dans le secteur de la déconstruction (Halbach, 2019). La numérisation de l'inventaire par le biais du BIM permet de transférer les informations sur les matériaux vers une base de données numériques, ou sur une plateforme de vente (figure 24) (Vrijders et al., 2023). Cette base de données contenant les informations sur les matériaux de réemploi est couramment appelée dans la littérature « banque de matériaux/composants » (banque M/C). Ce concept de banque M/C est indissociable de l'EC car elle offre un lieu de stockage numérique nécessaire pour les éléments avant qu'ils entament leur prochain cycle de vie dans un nouveau bâtiment (Akbarieh et al., 2020). En effet, la banque M/C est définie comme un « gestionnaire » qui régule et facilite le transfert des matériaux d'un bâtiment en fin de vie vers une nouvelle structure (Cai & Waldmann, 2019). De plus, une représentation numérique de la banque M/C est nécessaire pour faire connaître la disponibilité des éléments réutilisables sur le marché (Densley Tingley & Davison, 2012; Vrijders et al., 2023). Néanmoins, le manque de cadres théoriques solides semble freiner le développement d'une banque M/C, ce qui constitue un obstacle à l'utilisation des matériaux de réemploi. En effet, il n'existe pas de directives claires pour la mise en place d'une banque M/C (Akbarieh et al., 2020; Cai & Waldmann, 2019).

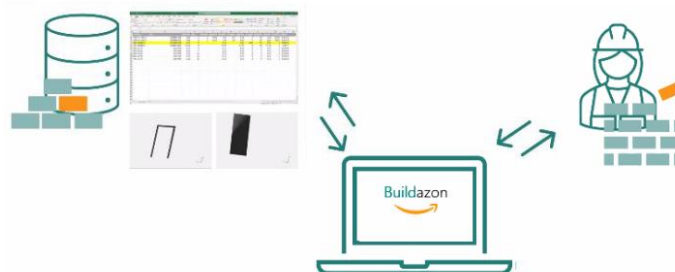


Figure 24 : schéma du flux d'information entre la base de données BIM, la plateforme de vente et le nouveau projet incorporant l'élément de réemploi (de Roissart, 2022).

Comme illustré ci-dessus, les informations sur les éléments de construction peuvent être préalablement mises à disposition dans le processus de lien direct avec une plateforme de vente. Cette approche permet aux clients d'identifier à l'avance les éléments dont ils ont besoin, aidant ainsi les acteurs de la déconstruction à se concentrer uniquement sur la récupération des éléments préalablement identifiés. De plus, ce processus modifie également la logistique de réutilisation, en permettant des flux tendus et en réduisant le besoin de stockage physique, car celui-ci représente un coût important dans le domaine du réemploi (Vrijders et al., 2023).

Ensuite, l'un des freins supplémentaires au réemploi est le transport et le stockage des matériaux réemployables (Halbach, 2019). Cependant, le modèle BIM peut faciliter la gestion des déchets et des éléments sur chantier et en entrepôt. Effectivement, il est possible d'automatiser l'évaluation du nombre de conteneurs nécessaires pour chaque type de déchet. En filtrant les objets et en déterminant, par

exemple, leur surface au sol et leur volume total, il est possible d'estimer l'espace nécessaire pour stocker les éléments. Le choix du local de stockage pourra dès lors être optimisé (de Roissart, 2022).

De plus, le BIM apporte également une plus-value dans le cas où l'inventaire réemploi est combiné à l'inventaire démolition. Il est possible de filtrer les objets présents dans le modèle BIM et de les mettre en évidence en fonction de divers paramètres. Dans ce cas, filtrer les objets en fonction du paramètre de toxicité facilite alors l'élimination des matériaux qui ne peuvent pas être réemployés. Cela permet également d'évaluer les mesures de sécurité nécessaires pendant la démolition et d'identifier plus rapidement les éléments dangereux lors du démantèlement (de Roissart, 2022).

L'un des avantages supplémentaires du BIM est qu'il permet d'obtenir une meilleure connaissance de l'existant. La création d'une maquette numérique BIM permet de réaliser un inventaire précis de l'état actuel du bâtiment avant sa démolition (Halbach, 2019). De plus, il est faisable de réaliser l'inventaire en se déplaçant physiquement dans le bâtiment. Les données recueillies peuvent être facilement attribuées à leur emplacement exact dans le modèle BIM. Cela permet d'associer des informations à des objets positionnés correctement dans un modèle 3D. Cette méthode permet de bien visualiser les différents matériaux ainsi que leur positionnement les uns par rapport aux autres et leurs interconnexions. Cela permet d'évaluer le potentiel de réversibilité d'un matériau, c'est-à-dire le potentiel de désassemblage du matériau (de Roissart, 2022).

Les inventaires basés sur le BIM facilitent également l'intégration des éléments réutilisables dans de nouveaux projets, car ceux-ci sont déjà identifiés en tant qu'objets BIM et peuvent être automatiquement partagés. Les architectes qui conçoivent avec des outils BIM peuvent directement inclure des « objets BIM de réemploi » dans leur projet (de Roissart, 2022; Vrijders et al., 2023).

Enfin, la numérisation BIM de l'inventaire apporte une valeur ajoutée, principalement dans les situations où un modèle BIM existe déjà (de Roissart, 2022). Cependant, les bâtiments existants disposent très rarement d'une maquette BIM en fin de vie. Pour les projets de déconstruction où le BIM doit être créé à partir de zéro, la pertinence de créer un modèle BIM peut être remise en question, impliquant des efforts et des coûts de modélisation importants. Il est également utile de considérer le type de bâtiment. En effet, la modélisation d'un grand bâtiment avec des éléments redondants déjà sauvegardés en tant qu'objets BIM prendra beaucoup moins de temps (par m²) que celle d'un petit bâtiment avec des éléments différents qui n'ont pas encore été modélisés en tant qu'objets BIM (Vrijders et al., 2023). Effectivement, d'après la plupart des architectes interrogés par Amélie Halbach (2019), la numérisation BIM de l'inventaire est principalement utile pour les projets de grande envergure. Cependant, Lionel Bousquet souhaite prouver le contraire avec le projet « Dethy » qui entrevoit la réhabilitation d'une maison bruxelloise typique située à Saint-Gilles. L'objectif du projet est de simplifier la gestion des matériaux démontés en créant un inventaire ou un catalogue de tous les éléments récupérables à partir du BIM. En utilisant cet inventaire, il souhaite montrer la quantité de matériaux qui peut être récupérée à partir d'une maison ordinaire (Halbach, 2019).

Les limites du BIM

Le potentiel des inventaires BIM pour la dynamique de réutilisation des matériaux a bien été établi. Cependant, on peut estimer les quantités de matériaux réutilisables sans recourir aux inventaires BIM en énumérant les informations des matériaux via un autre inventaire numérique tel qu'Excel et en les reliant à une base de données numérique. Il convient alors d'étudier pour chaque projet la pertinence de créer une maquette numérique BIM pour générer des inventaires (Vrijders et al., 2023). Le BIM doit être adapté aux besoins et ne doit pas être nécessairement une méthode prédéfinie pour chaque projet (de Roissart, 2022).

D'abord, les logiciels BIM ont été initialement conçus pour optimiser le processus de conception et de construction. Ils n'ont pas été conçus pour une déconstruction ce qui implique plusieurs limites. (de Roissart, 2022; Vrijders et al., 2023)

L'absence de standardisation des objets BIM, particulièrement dans le domaine de la déconstruction, est l'une de ses limites. Il est donc nécessaire d'avoir une classification standardisée pour faciliter l'échange de données et permettre une collaboration efficace entre les systèmes numériques et les différents acteurs de la déconstruction (de Roissart, 2022).

De plus, il y a un manque d'interopérabilité⁷ entre les outils numériques, ce qui limite les échanges ouverts entre le BIM et les outils externes de gestion de l'environnement, ainsi qu'avec les bases de données numériques (Akbarieh et al., 2020; de Roissart, 2022; Vrijders et al., 2023). Il est donc essentiel de faciliter la mise en relation des différents systèmes numériques entre eux (Vrijders et al., 2023).

Enfin, les logiciels qui utilisent le BIM ne sont pas conçus pour gérer une bibliothèque d'éléments inventoriés et récupérés dans le cadre d'un autre projet. Même s'il est possible d'établir des connexions directes entre une maquette numérique BIM et les marchés numériques de matériaux de réemploi, il reste encore des points à résoudre, notamment en ce qui concerne la disponibilité des matériaux de construction à long terme. En effet, télécharger un élément d'une base de données équivaut-il à l'acheter ? L'élément sera-t-il réservé pour une période spécifique ou quelqu'un d'autre peut-il encore l'acquérir ? Ces types de questions doivent être résolues pour éviter que la déconstruction numérique ne génère pas de problème au lieu d'en résoudre (Vrijders et al., 2023).

En résumé, le BIM apporte des solutions intéressantes pour faciliter la prise de décision et l'organisation de la déconstruction dans une logique d'EC. Cependant, dans la littérature, on soulève encore plusieurs limites qui entravent la bonne réalisation d'inventaire réemploi BIM. La mise en place du processus BIM pour la déconstruction n'en est encore qu'à ses débuts (de Roissart, 2022; Vrijders et al., 2023).

6.2. Acquisition et organisation de l'information dans le modèle BIM

Premièrement, comme énoncé précédemment, le BIM permet d'obtenir toute une série d'informations concernant la géométrie des éléments : les dimensions, la masse, le volume, l'emplacement, etc. (Vrijders et al., 2023).

Deuxièmement, un autre type d'information qui peut être généré à partir d'un modèle BIM concerne **les paramètres de « type »** et **les paramètres « d'occurrence »**.

Les paramètres de type sont les paramètres communs à tous les éléments d'un même type et les paramètres d'occurrence sont les paramètres spécifiques à un élément. Ces différents paramètres structurent les données dans le modèle BIM. Une utilisation efficace de ces paramètres permet de structurer l'inventaire réemploi et de permettre l'automatisation (Vrijders et al., 2023).

De plus, les informations que doit contenir un inventaire réemploi peuvent être ajoutées dans le modèle BIM en tant que paramètres de type ou en tant que paramètres d'occurrence. Par exemple, pour une série de portes du même type, les paramètres tels que la couleur, la marque, la composition peuvent être ajoutés dans les paramètres de type. Cela permet d'ajouter les données à tous les éléments du même type en une seule action. Des données peuvent être ajoutées à un élément spécifique au sein d'un type, en tant que paramètres d'occurrence. Par exemple, lorsqu'une porte d'un type présente un mauvais état par rapport aux autres portes du même type, son état sera intégré en tant que paramètre d'occurrence (Vrijders et al., 2023).

⁷ L'interopérabilité est la capacité de différents systèmes, logiciels, équipements ou composants à fonctionner ensemble.

Enfin, pour les paramètres plus complexes nécessitant des calculs ou des évaluations, il est possible d'intégrer des formules mathématiques directement dans les paramètres de type ou d'occurrence. Par exemple, la masse est calculée automatiquement à l'aide d'une formule à partir du volume et de la densité d'un élément (Vrijders et al., 2023).

En résumé, s'interroger sur les paramètres de type et sur les paramètres d'occurrence permet d'organiser la structure du modèle et facilite la réalisation de l'inventaire. Le tableau 3 propose une manière dont certaines informations relatives aux éléments de réemploi peuvent être intégrées dans un modèle BIM (Vrijders et al., 2023).

Tableau 3 : Liste des paramètres liés aux éléments de construction (Vrijders et al., 2023).

Parameter	Type / Instance	Comment
Item identification	Instance	The software unique id can be used to identify objects / another parameter can be added at the instance level if needed. If an item identification is need for all objects of the same type this should be added as a type parameter
Visualisation 2D/3D	Not a parameter	Can be exported either per type/instance
Quantity	(Type)	Calculated by counting the number of elements of a given type
Dimensions/Mass/description	Instance/Type	If all elements of the same "type" have the same value -> type (e.g. height and thickness of a wall) If all elements of the same type can vary (e.g. length of a wall) -> instance
Location	Instance	Can be extracted from the model
Condition	Instance	As every item of the same type may have a different condition
Value	Type/Instance	Market value might be a type parameter; estimated value adapted from the condition might be an instance parameter
Context	Instance	Can use the premade "comment parameter"
Assembly	Instance	Except for structures, not handled by default; Some hosting properties exist (walls are hosting windows); Making a list of connections types and elements separated by commas might be a work around);

7. Le potentiel du BIM pour évaluer le potentiel de réemploi

Le BIM peut également simplifier l'évaluation du potentiel de réemploi des éléments en complément de l'inventaire réemploi. Il existe plusieurs outils BIM qui permettent d'évaluer le potentiel de réemploi.

Par exemple, Madaster est une plateforme en ligne qui permet, en outre, de calculer un indicateur de circularité basé sur un document BIM ou Excel. Cet indicateur attribue un indice allant de 0 à 100 %. L'indicateur est calculé sur base des données du matériau qui sont enregistrées directement sur la plateforme (Madaster, 2021). Un autre exemple concerne l'outil « *Reversible BIM* ». Cet outil, quant à lui, permet de calculer le potentiel de réversibilité⁸ d'un élément. Ce potentiel est calculé et visualisé en

⁸ Le potentiel de réversibilité définit la facilité d'un élément à être démonté.

3D, affichant une échelle de couleur allant du rouge (irréversible) au vert (presque complètement réversible) (de Roissart, 2022).

Malheureusement, certains outils BIM comme ceux énoncés ci-dessus ne sont pas facilement accessibles et peuvent être coûteux. Ce facteur peut donc influencer les acteurs à utiliser certains logiciels. C'est pourquoi, dans le cadre de notre recherche, nous adopterons la méthode 3DR. Cette méthode de calcul est simple à utiliser et facilement compatible avec un modèle BIM. De plus, elle est facilement accessible et moins coûteuse que d'autres outils BIM, car elle repose principalement sur l'utilisation d'un fichier Excel.

7.1. La méthode 3DR

La méthode 3DR est donc une méthode qui permet d'évaluer la démontabilité et la déconstruction des bâtiments ainsi que la résilience des éléments de construction. Cette méthode génère un nouvel indice de circularité pour un bâtiment. L'indice de circularité 3DR est basé sur la désassemblabilité⁹ (DI), la déconstructibilité¹⁰ (DE) et la résilience¹¹ (R) des éléments qui composent un bâtiment (O'Grady et al., 2021).

Les valeurs de DI, DE et R sont données par les équations suivantes :

Équation 1 : Équation déterminant la valeur de DI (O'Grady et al., 2021).

$$DI = \sum_{i=1}^n (DI_{t_i} \times DI_{m_i} \times W_i) / W_T$$

Équation 2 : Équation déterminant la valeur de DE (O'Grady et al., 2021).

$$DE = \sum_{j=1}^m (DE_{t_j} \times DE_{m_j} \times W_j) / W_T$$

Équation 3 : Équation déterminant la valeur de R (O'Grady et al., 2021).

$$R = \sum_{k=1}^t (Re_k \times W_k) / W_T$$

Dans les équations précédentes, (DI_{t_i}) fait référence aux outils requis pour démonter l'élément et (DE_{t_j}) fait référence aux outils requis pour déconstruire l'élément. Les valeurs (DI_{m_i}) et (DE_{m_j}) font référence aux équipements requis pour déplacer l'élément. La valeur (Re_k) fait référence à la résilience de l'élément. Les valeurs (W_i), (W_j) et (W_k) font référence au poids de l'élément et (W_T) est le poids total de l'ensemble des éléments présents dans le bâtiment qui doivent subir un démontage ou une déconstruction (O'Grady et al., 2021).

L'indice de circularité 3DR est calculé par l'équation suivante :

Équation 4 : Équation déterminant l'indice de circularité 3DR (O'Grady et al., 2021).

$$3DR = (DI \times a) + (DE \times b) + (R \times c)$$

La valeur de l'indice 3DR est située entre 0 et 1. Une valeur plus proche de 0 indique que le bâtiment n'a pas été conçu selon les principes de l'EC et une valeur plus proche de 1 indique que le bâtiment présente un potentiel de démontabilité et/ou de déconstruction, construit avec des composants qui peuvent être

⁹ Traduction littérale de « disassemblability »

¹⁰ Traduction littérale de « deconstructability »

¹¹ Traduction littérale de « resilience »

réutilisés plusieurs fois. Les variables (*a*), (*b*) et (*c*) valent 0 ou 0,5 en fonction du scénario choisi pour un bâtiment. Par exemple, pour un scénario de démontage où l'équation de déconstruction (DE) n'est pas utile, il suffit de fixer la valeur de (*b*) à 0. La somme des variables restantes, à savoir, (*a*) et (*c*) doit être égale à 1. Dans ce cas, il suffit de fixer la valeur de (*a*) et (*c*) à 0,5 (O'Grady et al., 2021).

Nous pouvons observer qu'au sein de la méthode 3DR, une distinction est faite entre le démontage et la déconstruction. Le **démontage** fait référence à la déconnexion des éléments qui composent la structure, le revêtement mural/sol, les panneaux muraux, les finitions internes et le mobilier. Ce scénario peut avoir lieu à n'importe quelle étape du cycle de vie d'un bâtiment. La **déconstruction** est définie comme la suppression des éléments structurels d'un bâtiment et le déplacement d'une partie ou de la totalité d'un bâtiment. La déconstruction se distingue du démontage, car elle fait référence à l'enlèvement des éléments d'un bâtiment pour être reconstruit. La déconstruction agit principalement dans un processus de *design for deconstruction*, là où le démontage agit sur des bâtiments qui n'ont pas forcément été construits pour être déconstruits. La **résilience**, quant à elle, définit le nombre de fois que l'élément peut être utilisé (O'Grady et al., 2021).

Le chercheur utilisera alors dans son travail, l'Équation 1 et l'Équation 3 sans prendre en compte l'Équation 2, car celle-ci ne correspond pas à la recherche.

Le tableau 4 présente les valeurs des variables (DIt), (DIm) et (Ri) basées sur les outils, les machines, les personnes ou les équipements nécessaires pour déplacer les éléments démontés. Il faut noter que ce tableau n'est pas exhaustif. En effet, les praticiens qui appliquent la méthode 3DR peuvent personnaliser les variables répertoriées dans le tableau ainsi que leurs valeurs. Ce présent tableau présente les variables qui sont généralement utilisées lors d'un chantier (O'Grady et al., 2021).

Tableau 4 : Tableau détaillant les variables utilisées pour la méthode 3DR (réalisé par le chercheur sur base de O'Grady et al., (2021)).

VARIABLES	DESCRIPTIONS	FONCTIONNEMENT ET OUTILS REQUIS	VALEURS
Diassemble Index Tools (DIt)	Type d'outils nécessaire pour démonter les composants	Aucun outil	1
		Outil à main	0,9
		Outil électrique	0,8
		Outil à gaz/pneumatique	0,5
		Équipement hydraulique	0,2
Disassemble Index Move (DIm)	Personnes ou équipements nécessaires au déplacement des composants après déconstruction	Une personne : < 20 kg	1
		Deux personnes : < 42 kg	0,9
		Chariot à main : < 50 kg	0,7
		Chariot élévateur : < 2000kg	0,4
		Grue : > 2000 kg	0,1
Resilience Index (Ri)	Degré de résilience d'un composant	Réutilisable un nombre infini de fois	1
		Réutilisable jusqu'à trois fois	0,9
		Réutilisable une seule fois	0,7
		Recyclable	0,6
		Downcyclable	0,2
		Jetable	0

8. Conclusion et questions recherche

À travers ce mémoire, nous nous penchons sur l'utilisation du BIM pour réaliser et gérer un inventaire réemploi. L'état de l'art, principalement nourri par une lecture de divers articles scientifiques et de livres, nous a permis de clarifier les différentes notions abordées dans cette recherche. Tout d'abord, ces lectures nous ont permis d'établir les principes d'une économie circulaire (EC) et de son application dans le domaine de la construction. Nous avons déterminé que le réemploi constitue le traitement le plus approprié pour diminuer l'extraction des ressources primaires et la production des déchets.

Au fil de la revue de la littérature, nous avons identifié le manque d'informations relatives aux éléments de réemploi comme étant l'un des obstacles principaux à leur réutilisation. En effet, disposer de peu ou de pas d'informations à propos des éléments joue un rôle majeur dans le fait de pouvoir les réemployer. L'inventaire réemploi est alors un moyen de répertorier les éléments, de les stocker et de centraliser leurs informations nécessaires pour être réutilisés.

Nous avons également observé que les modèles numériques BIM apparaissent alors comme une solution pour gérer l'information de manière plus structurée. Nous avons alors orienté notre recherche sur le fait que la réalisation d'un inventaire réemploi peut être améliorée par le BIM grâce à sa capacité à fonctionner comme un stockage d'information structuré et centralisé.

Cela nous conduit alors à formuler notre hypothèse principale de la manière suivante : **« l'utilisation d'une maquette numérique BIM permet de réaliser de manière plus efficace et plus structurée un inventaire réemploi dans le secteur de la construction »**. Notre hypothèse secondaire affirme que **la manipulation de la maquette numérique permet de déterminer de manière efficace le potentiel de réemploi des matériaux de construction**.

La question de recherche qui guidera notre travail est la suivante : **« Quels sont les enjeux du BIM pour la réalisation d'un inventaire réemploi ? »**.

Au fur et à mesure de notre recherche, une question secondaire a été formulée : **« Comment stocker les informations nécessaires au réemploi dans le modèle numérique ? »**.

PARTIE II : MÉTHODOLOGIE

1. Cadre théorique de la recherche

Pour mieux comprendre notre choix méthodologique, nous établissons d'abord un cadre théorique des pratiques utilisées.

1.1. La recherche qualitative

La recherche qualitative est une méthode de recherche qui permet d'analyser et de comprendre des phénomènes, des comportements de groupe, des faits ou des sujets. L'objectif d'une telle recherche est d'obtenir des données approfondies en se concentrant sur des interprétations, des expériences, des observations et leurs significations (Scribbr, s. d.).

Cette recherche repose sur diverses méthodes impliquant une approche interprétative et contextuelle du sujet étudié. Les chercheurs qualitatifs étudient donc les phénomènes dans leur contexte naturel, en essayant de leur donner un sens ou de les interpréter (Groat & Wang, 2013).

La recherche qualitative en architecture est caractérisée par cinq éléments principaux (Groat & Wang, 2013) :

- **Les phénomènes sont étudiés dans leurs milieux naturels** : par « milieux naturels », on entend que les objets d'études ne sont pas éloignés de leur milieu dans lequel ils existent réellement ;
- **L'interprétation et le sens du point de vue des chercheurs** : dans une recherche qualitative, les chercheurs fondent leur travail sur les réalités empiriques de leurs observations, mais en tant que chercheurs, ils jouent également un rôle important dans l'interprétation et la compréhension des données récoltées ;
- **L'interprétation et le sens du point de vue des répondants** : dans une situation où la méthode comprend une implication de participants, l'accent est porté sur la manière dont les participants qui sont interrogés interprètent leur propre situation ;
- **L'utilisation de plusieurs méthodes** : cela implique que les chercheurs qualitatifs emploient une multitude de méthodes particulières au contexte étudié et adaptées à la ou les questions de recherche. Les études qualitatives ne s'appuient pas nécessairement sur plusieurs méthodes de recherche. Cependant, même si une méthode principale est utilisée, d'autres méthodes secondaires sont généralement employées ;
- **L'importance de la logique inductive** : les questions de recherche étudiées dans le cadre d'une étude qualitative évoluent généralement selon un processus itératif. La formulation de la question de recherche est généralement affinée à la lumière des entretiens ou des observations en cours. Toutefois, des chercheurs soulignent le fait que la recherche qualitative n'est pas exclusivement inductive ;

Malgré tout, la recherche qualitative comporte des limites. Ce type de recherche suppose une réalité subjective et considère le chercheur en interaction avec le sujet qu'il étudie. Cela signifie que le chercheur joue un rôle actif dans la collecte et l'analyse des données, ce qui peut affecter l'objectivité des résultats (Groat & Wang, 2013).

En théorie, la recherche quantitative implique une approche d'enquête déductive qui explique les relations de cause à effet, tandis que la recherche qualitative implique une approche inductive qui vise à éclaircir les nombreux facteurs critiques qui influencent le phénomène (Groat & Wang, 2013).

1.2. La recherche expérimentale

La recherche expérimentale constitue une méthode importante au sein de la recherche architecturale (Groat & Wang, 2013).

Cette méthode de recherche a pour objectif de tester diverses théories à l'aide de plusieurs hypothèses. À travers les recherches et les expériences réalisées, le chercheur peut valider ou invalider ses hypothèses en manipulant certaines variables dans son expérience (Scribbr, s. d.).

Groat & Wang (2013) identifient cinq caractéristiques de la recherche expérimentale :

- **L'utilisation d'un traitement ou d'une variable indépendante** : le chercheur étudie les impacts d'une ou plusieurs variables sur le phénomène étudié. Ces variables sont manipulées et contrôlées d'une manière spécifique par le chercheur et elles sont considérées comme des traitements dans la stratégie expérimentale ;
- **La mesure d'une ou plusieurs variables de résultat** : le chercheur détermine l'impact du traitement expérimental en mesurant soigneusement certaines variables de résultats.
- **La désignation d'une unité d'affectation** : le chercheur applique le traitement expérimental à une unité d'affectation spécifique. L'unité d'affectation reçoit un traitement manipulé par le chercheur ;
- **L'utilisation d'un groupe de comparaison ou de contrôle** : l'objectif de l'utilisation d'un groupe de comparaison ou de contrôle est de permettre de mesurer l'effet relatif du traitement, ou d'une variable indépendante, par rapport aux unités qui n'ont reçu aucun traitement ou un traitement différent ;
- **L'accent est mis sur la causalité** : les caractéristiques énoncées ci-dessus permettent au chercheur d'établir de manière cohérente une relation de cause à effet. En général, le chercheur expérimental cherche à déterminer et à mesurer dans quelle mesure un ou plusieurs traitements provoquent un résultat clairement mesurable dans le cadre de la recherche ;

Enfin, l'expérimentation peut donner lieu à des recherches soit remarquables, soit imparfaites, selon la manière dont elle est appliquée à une question de recherche (Groat & Wang, 2013).

2. Méthodologie de recherche

La méthodologie de recherche choisie est une recherche qualitative basée sur une méthode expérimentale.

D'abord, l'expérimentation est établie en plusieurs étapes. La première consiste à répertorier une première fois les éléments de réemploi d'une maison existante qui va subir une transformation intérieure. La seconde comprend la réalisation d'un inventaire réemploi à l'aide d'une maquette numérique BIM. La troisième étape consiste à évaluer le potentiel de réemploi des éléments répertoriés en manipulant la maquette BIM. La quatrième étape comprend un démontage sur le terrain des éléments répertoriés suivant les résultats obtenus à partir du modèle BIM. La cinquième et dernière étape compare les résultats du démontage avec les résultats annoncés par le modèle BIM lors de la troisième étape. Ces différentes étapes sont détaillées dans le chapitre 3 de la partie « méthodologie ».

Ensuite, ce processus méthodologique a été défini comme pertinent pour tester les hypothèses de recherche. Il permet d'atteindre les objectifs de la recherche et de répondre à la question principale, à savoir : « **Quels sont les enjeux du BIM pour la réalisation d'un inventaire réemploi ?** ». La réalisation de la maquette numérique BIM permettra d'observer comment le BIM influence le processus d'inventaire. De plus, les expériences sur le terrain permettront de mesurer l'efficacité et la précision de la maquette numérique par rapport aux méthodes traditionnelles d'inventaires.

La méthodologie de recherche permettra également de répondre à la question secondaire : « **Comment stocker les informations nécessaires au réemploi dans le modèle numérique ?** ». En paramétrant la maquette numérique avec les informations nécessaires au réemploi, il sera possible de comprendre la gestion et le stockage de ces informations au sein du modèle BIM.

En résumé, la méthodologie expérimentale est pertinente, car elle permet de valider ou d'invalider les hypothèses de notre recherche. En effet, il nous sera possible d'obtenir une compréhension sur les enjeux du BIM pour la réalisation de l'inventaire réemploi et de comprendre comment stocker les informations dans le modèle numérique. L'expérimentation sur le terrain permet de comparer les résultats théoriques obtenus lors de l'évaluation du potentiel de réemploi avec ceux réellement obtenus en pratique.

3. Application de la recherche expérimentale

L'expérience est menée par le chercheur, en s'appuyant sur ses connaissances et son expérience avec les logiciels utilisés. Son expérience provient principalement des cours de numériques suivis à l'Université de Liège durant son cursus (2023-2024). De plus, le chercheur a également suivi des formations en ligne pour maîtriser au mieux les logiciels. Ces apprentissages lui ont permis de mener à bien cette recherche. Il convient donc de rappeler que le chercheur n'est pas un expert aguerri dans l'utilisation de ces logiciels.

3.1. Ordinateur et logiciels utilisés

3.1.1. Ordinateur utilisé

Le chercheur utilise un ordinateur avec la configuration suivante :

- Processeur : Intel CORE i7-9750HF
- Nombre de cœurs du processeur : 6
- RAM : 16 Go
- Carte graphique : Nvidia Geforce GTX 1650
- Système d'exploitation : Système d'exploitation 64 bits, processeur x64

3.1.2. Revit

La version 2023 de Revit a été utilisée dans le cadre de la recherche.

Revit est un logiciel de conception et de documentation qui centralise les données de conception, les dessins et les nomenclatures nécessaires à la modélisation BIM. La modélisation des informations de construction fournit des données utiles pour les différentes phases, la définition et la conception de projet de construction (Autodesk, 2024a).

[Les nomenclatures dans Revit](#)

Il est important pour la suite du travail, d'expliquer en quoi consistent les nomenclatures dans Revit.

Les nomenclatures se présentent sous la forme de tableaux comprenant les propriétés des éléments d'un projet BIM. Elles permettent de quantifier, d'analyser et de gérer les composants, les matériaux, les vues et les feuilles utilisés dans la maquette numérique (F3DF, 2019).

Les nomenclatures sont entièrement personnalisables selon les critères de regroupement sélectionnés. Elles permettent, entre autres, d'appliquer des filtres, de faire des regroupements d'occurrences, des totaux, des valeurs calculées, des champs personnalisés, des nomenclatures par phases de projet, etc. (F3DF, 2019). Les nomenclatures sont indispensables pour structurer et gérer les données dans la maquette numérique.

3.1.3. Dynamo pour Revit

La version 2.13.1.3891 de Dynamo a été utilisée dans le cadre de la recherche.

Dynamo est un logiciel de programmation visuelle Open Source. Il est directement intégré dans Revit en tant que composant et comprend des nœuds de programmation propres à Revit. Dynamo utilise une interface de programmation graphique qui permet de personnaliser les flux de travail des informations du bâtiment (BIM) (Autodesk, 2024b).

Dans notre recherche, Dynamo est utilisé pour appliquer la méthode 3DR à l'inventaire numérique BIM pour déterminer le potentiel de réemploi des éléments.

3.2. Choix du terrain

D'abord, le terrain sélectionné pour réaliser l'inventaire de réemploi est une maison située à Etterbeek, à Bruxelles. Au début de la recherche, cette maison allait subir une série de transformations intérieures dans le cadre d'une rénovation. Ce bâtiment a été jugé comme pertinent pour cette recherche, car il s'agit d'une maison typique bruxelloise, représentant bien la typologie urbaine de la ville. Ainsi, notre schéma expérimental pourrait être réutilisé pour d'autres maisons de ce type. De plus, la pertinence de cette étude est renforcée par le fait que les zones urbaines, telles que Bruxelles, sont les lieux où l'enjeu du réemploi est le plus important. Comme énoncé dans l'état de l'art, les estimations des scientifiques prévoient que la majorité de la population vivra dans des villes. Par conséquent, il est essentiel d'étudier la mine urbaine présente dans ces zones afin d'améliorer les pratiques de réemploi.

Ensuite, toutes les informations concernant le bâtiment sont disponibles dans le protocole BIM réalisé par le chercheur (voir Annexe 2 : Protocole BIM).

3.3. Étapes de la méthode expérimentale

Nous établissons dans ce chapitre les différentes étapes de notre méthode de recherche :

- Étape 1 : Inventorisation des éléments de réemploi sur le site
- Étape 2 : Création du modèle numérique BIM avec le logiciel Revit
- Étape 3 : Application de la méthode 3DR pour définir le potentiel de réemploi des éléments
- Étape 4 : Démontage effectif
- Étape 5 : Confrontation des résultats

La figure 25 illustre la temporalité des différentes étapes au sein de la recherche :

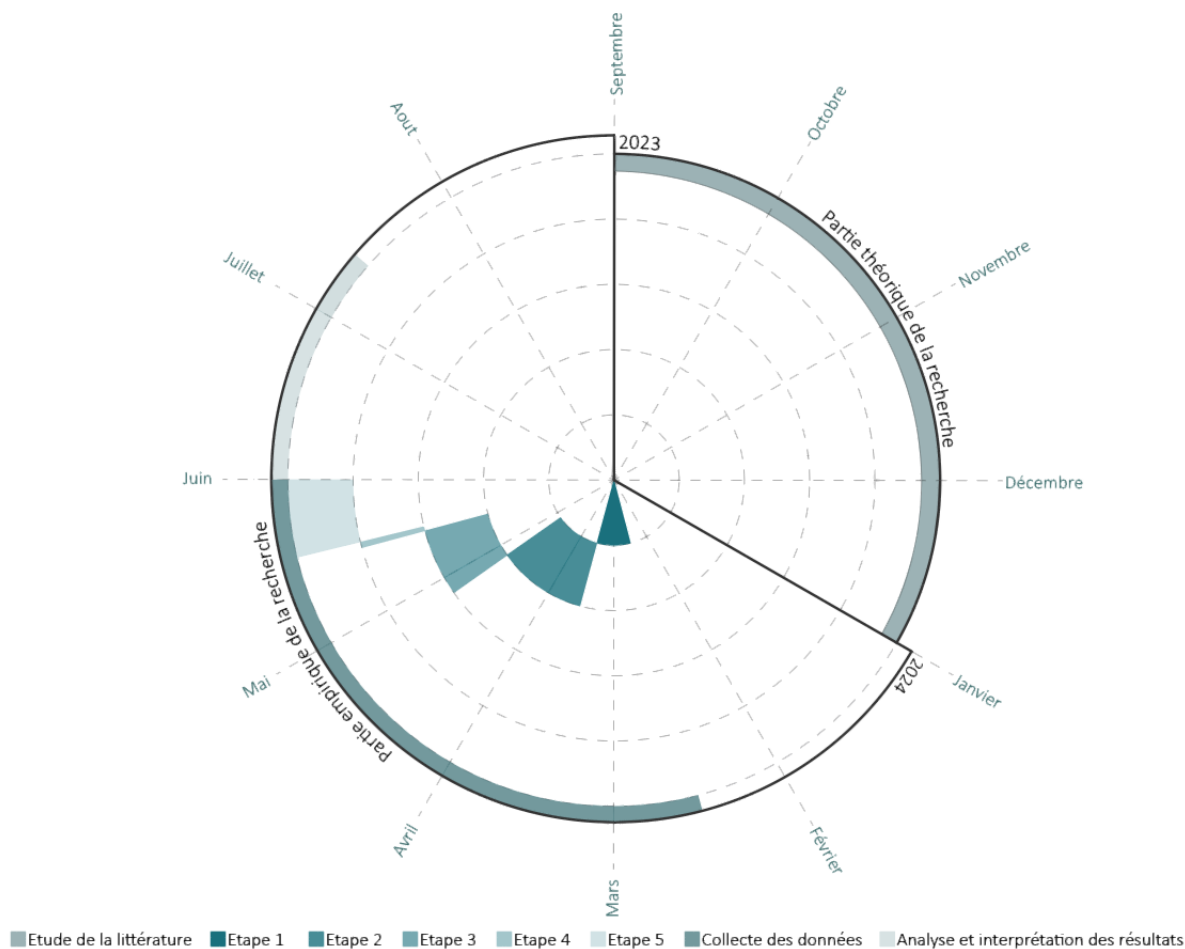


Figure 25 : Temporalité de la recherche

3.3.1. Étape 1 : Inventorisation des éléments de réemploi sur le site

La première étape de la méthode consiste à réaliser un inventaire « papier » des éléments de réemploi présents sur le terrain. Tous les éléments potentiellement réemployables sont identifiés et répertoriés dans un tableau Excel (voir Annexe 3 : Inventaire réemploi (Étape 1 : Inventorisation des éléments de réemploi sur le site)) avec leurs caractéristiques primaires (dimensions, quantité, etc.). De plus, cette étape permet d'identifier les éléments qui devront être modélisés dans la maquette numérique.

Il est important de noter que, dans notre travail, nous avons répertorié les éléments que les maîtres d'ouvrage souhaitaient réutiliser. Ce facteur fait directement référence au critère « l'existence d'une demande » mentionné dans l'état de l'art. En effet, nous concentrons nos efforts sur les éléments pour lesquels il existe une forte probabilité de réemploi dans le futur.

3.3.2. Étape 2 : Création du modèle numérique BIM

Modélisation du modèle numérique avec le logiciel Revit

Un protocole BIM (voir Annexe 2 : Protocole BIM) a été réalisé par le chercheur en amont de la modélisation. Ce protocole définit les procédures à suivre pour la modélisation numérique. Il comprend le processus de modélisation avec les objets à modéliser ainsi que les informations à intégrer.

Le modèle BIM réalisé par le chercheur inclut les éléments de réemploi répertoriés sous forme d'objets. De plus, les objets BIM ont été paramétrés pour intégrer les informations spécifiques au réemploi.

Intégrations des paramètres spécifiques au réemploi dans le modèle numérique

D'abord, l'état de l'art nous a permis de définir les informations nécessaires pour un inventaire réemploi. Ensuite, afin d'associer ces informations aux différents types de paramètres dans Revit, *le Tableau 22* : Tableau des informations à intégrer en fonction des paramètres de types ou des paramètres d'occurrences (réalisé par le chercheur sur base de Vrijders et al., (2023)). a été réalisé dans le protocole BIM sur base de Vrijders et al., (2023). Ce tableau détermine les informations à intégrer dans le modèle en fonction des paramètres de type ou des paramètres d'occurrence. Ce tableau permet de faciliter la structuration et l'accès aux informations dans le modèle numérique.

3.3.3. Étape 3 : Application de la méthode 3DR

Comme énoncé précédemment, la méthode 3DR est appliquée par l'intermédiaire de Dynamo pour évaluer le potentiel de réemploi des éléments qui composent le modèle numérique.

D'abord, trois tableaux Excel (voir Annexe 4 : Tableaux Excel du « Disassemble Index Tools (DIT), « Disassemble Index Move (DIm) et « Resilience Index (Ri) ».) comprenant les différentes variables énoncées dans le chapitre 7.1 doivent être complétés. Les tableaux permettent de calculer la valeur du « *Disassemble Index Tools* » (DIT), « *Disassemble Index move* » (DIm) et la « *Resilience Index* » (Ri) des éléments répertoriés.

Ensuite, un script Dynamo (figure 26) est utilisé. Ce script permet de définir le potentiel de réemploi des éléments en se basant sur les valeurs DIT, DIm et Ri répertoriées dans *le tableau 5*. Le script lit les valeurs depuis le tableau Excel (tableau 5) et applique un code couleur aux objets présents dans le modèle Revit.

- Rouge : non réemployables
- Orange : difficilement réemployables
- Vert : facilement réemployables

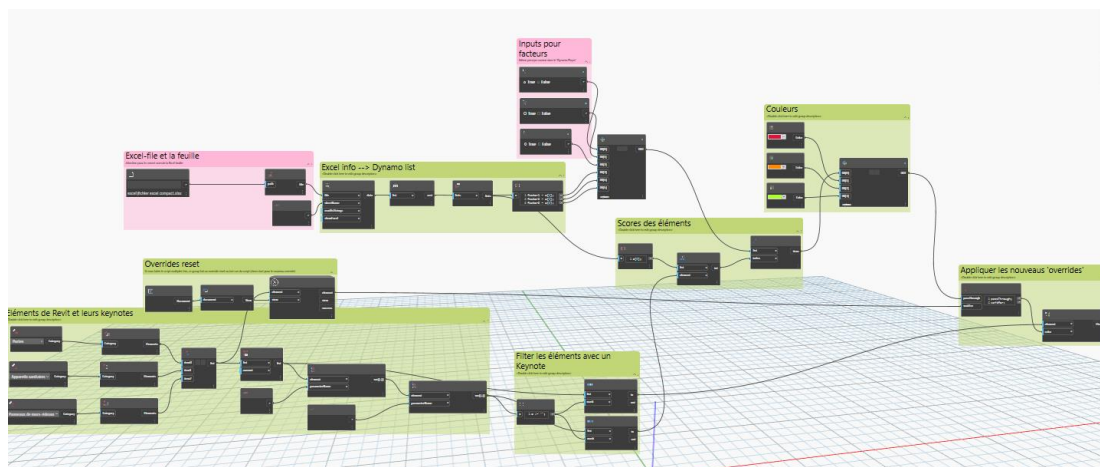


Figure 26 : Script Dynamo pour appliquer le code couleur avec la méthode 3DR (image provenant du fichier Revit du chercheur)

Tableau 5 : Tableau comprenant les différentes valeurs Dlt, Dlm, Ri des éléments (réalisé par le chercheur)

Keynote	Disassemble Index Tools (Dlt)	Disassemble Index Move (Dlm)	Resilience Index (Ri)
A1	0,9	0,9	1
A1	0,9	0,9	1
A1	0,9	0,9	1
A1	0,9	0,9	1
A1	0,9	0,9	1
A2	0,9	0,9	1
A3	0,9	0,9	1
A4	0,9	0,9	1
A5	0,9	0,9	1
A6	0,9	0,9	1
A7	0,9	0,9	1
C2	0,9	0,7	0,7
C1	0,9	0,9	0,7
B4	0,8	0,4	0,7
B3	0,9	0,4	0,7
B2	0,9	0,4	0,7
B1	0,9	0,4	0,7
D1	0,9	0,9	1
E3	0,9	0,9	1
F1	0,8	1	1

3.3.4. Étape 4 : Démontage effectif

Cette étape consiste à valider sur le site les résultats obtenus à partir du modèle numérique. Les éléments identifiés comme réemployables seront démontés et récupérés. De plus, elle permet aussi d'étudier l'efficacité du traitement de l'information dans le modèle pour organiser et planifier le chantier.

3.3.5. Étape 5 : Confrontation des résultats

La dernière étape permet de vérifier la correspondance entre les résultats obtenus lors de l'étape 3 et la réalité pratique du chantier. Cela permet d'ajuster les paramètres du modèle si nécessaire.

3.4. Méthode de recueil des données

Tout au long du processus de recherche, le chercheur prend des notes. Le journal de bord, indispensable à la recherche qualitative, permet d'enregistrer toute une série d'observations (Lejeune, 2019).

Un journal de bord est tenu par le chercheur à titre personnel. Entrepris sur support papier, le chercheur y inscrit toutes ses observations tout au long de l'étude. Cela permet de documenter les réflexions, les décisions méthodologiques et les découvertes faites au cours de la recherche. Ce journal de bord sert de base pour la rédaction et l'analyse des résultats.

4. Conclusion

Au sein de ces différents chapitres, nous avons présenté notre méthodologie de recherche. Nous avons d'abord établi le cadre théorique des méthodes utilisées. Ensuite, nous avons expliqué les raisons pour lesquelles nous avons opté pour une méthode de recherche qualitative. La pertinence d'une telle méthode de recherche pour notre sujet d'étude a également été exprimée. Nous avons ensuite détaillé l'organisation de la méthode de recherche, le terrain d'étude ainsi que la méthode de collecte de données. Au sein de la partie III, nous tenterons d'apporter des éléments de réponse à nos questions de recherche grâce à notre méthode expérimentale.

PARTIE III : RÉSULTATS ET DISCUSSION

1. Présentation des résultats

Comme nous l'avons énoncé au chapitre précédent, notre objectif est de réaliser un inventaire réemploi à l'aide d'une maquette numérique BIM. Cette expérimentation vise à comprendre les enjeux du BIM lors de la réalisation d'un inventaire réemploi.

Les résultats sont obtenus après une modélisation et une série de manipulations effectuées dans Revit, explicités dans la méthodologie (Chapitre 3 : Application de la recherche expérimentale).

Nous scindons en quatre parties les résultats obtenus :

- Une présentation de **l'inventaire numérique BIM** détaille le modèle avec les objets modélisés et leur information relative (point 1.1)
- Une description sur **l'évaluation du potentiel de réemploi** présente les résultats obtenus par l'application de la méthode 3DR sur le modèle numérique (point 1.2).
- Une présentation du **démontage effectif** présente les éléments qui ont été démontés et potentiellement réutilisés (point 1.3).
- **La confrontation des résultats** compare les résultats obtenus par le modèle BIM avec ceux observés lors du démontage (point 1.4).

1.1. L'inventaire numérique BIM

Cette partie présente l'inventaire numérique BIM obtenu. Le modèle comprend les éléments de réemploi répertoriés dans Étape 1 : Inventorisation des éléments de réemploi sur le site ainsi que les informations intégrées. Le protocole BIM réalisé par le chercheur (voir Annexe 2 : Protocole BIM) détaille le processus de modélisation.

Visualisation générale de la maquette numérique

Le rez-de-chaussée (figure 27) et le premier étage (figure 28) ont été modélisés en suivant le processus de modélisation décrit dans le protocole BIM.

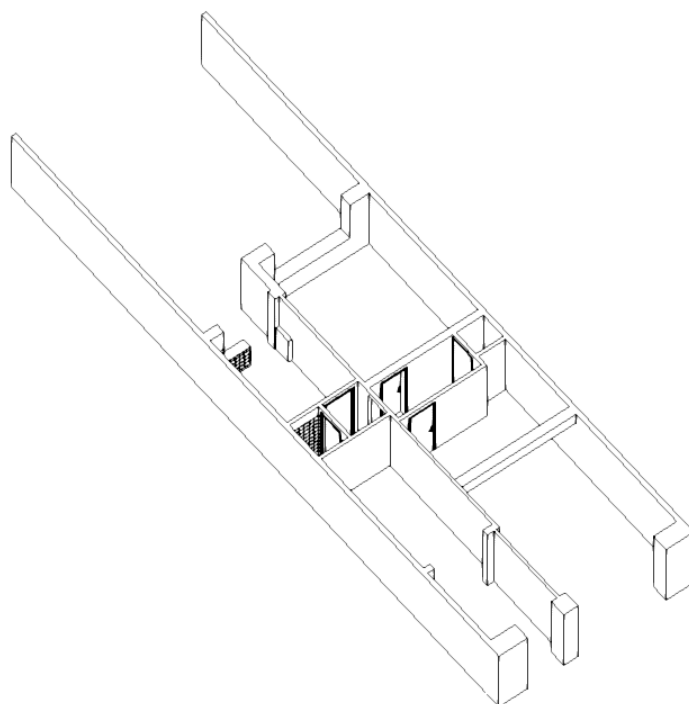


Figure 27 : Modélisation du rez-de-chaussée

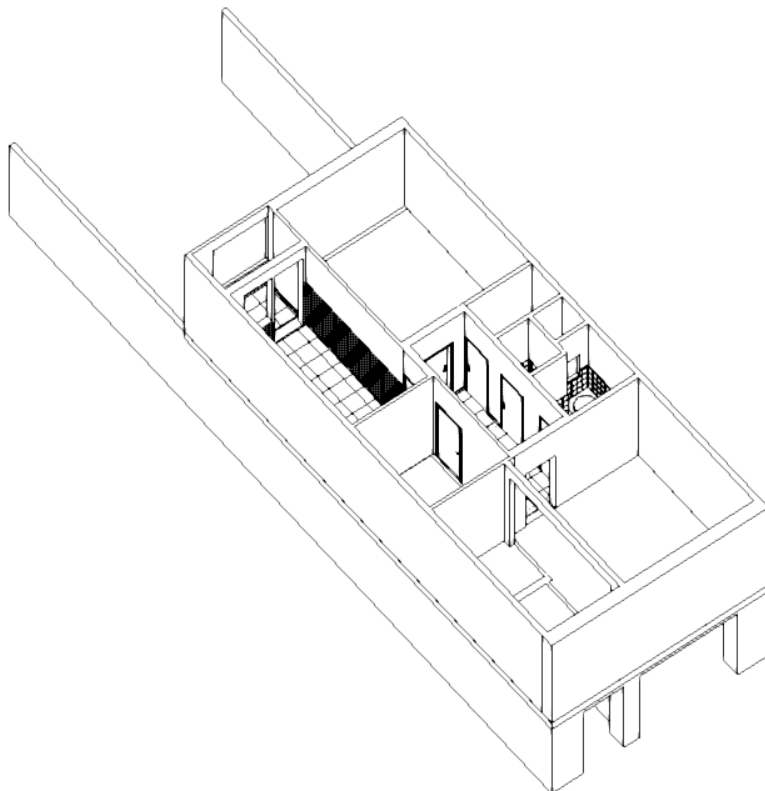


Figure 28 : Modélisation du premier étage

Pour chaque type d'élément, à savoir, les portes, les carrelages, les plinthes, le radiateur, la baignoire et le seuil de fenêtre, nous détaillerons leurs caractéristiques et leurs informations associées.

D'abord, les informations nécessaires au réemploi ont été intégrées dans le modèle en suivant le *tableau 5* (en fonction des paramètres de type ou d'occurrence).

Ensuite, les caractéristiques sur les dimensions sont directement liées aux objets BIM. En effet, les informations telles que la quantité, la masse et le volume sont aussi générées par le modèle BIM. Les quantités sont obtenues directement depuis le modèle. La masse et le volume sont générés de manière automatique en paramétrant les formules nécessaires à la génération de ces informations.

- Le volume = longueur (m) x largeur (m) x hauteur (m)
- La masse = la densité (kg/m³) x le volume (m³)

Nous présenterons les différentes informations associées aux différents types d'éléments à travers les nomenclatures. Les nomenclatures prennent la forme de tableau détaillant chaque élément avec leurs caractéristiques et leurs informations associées.

Les portes

La figure 29 illustre la modélisation des portes dans la maquette numérique.

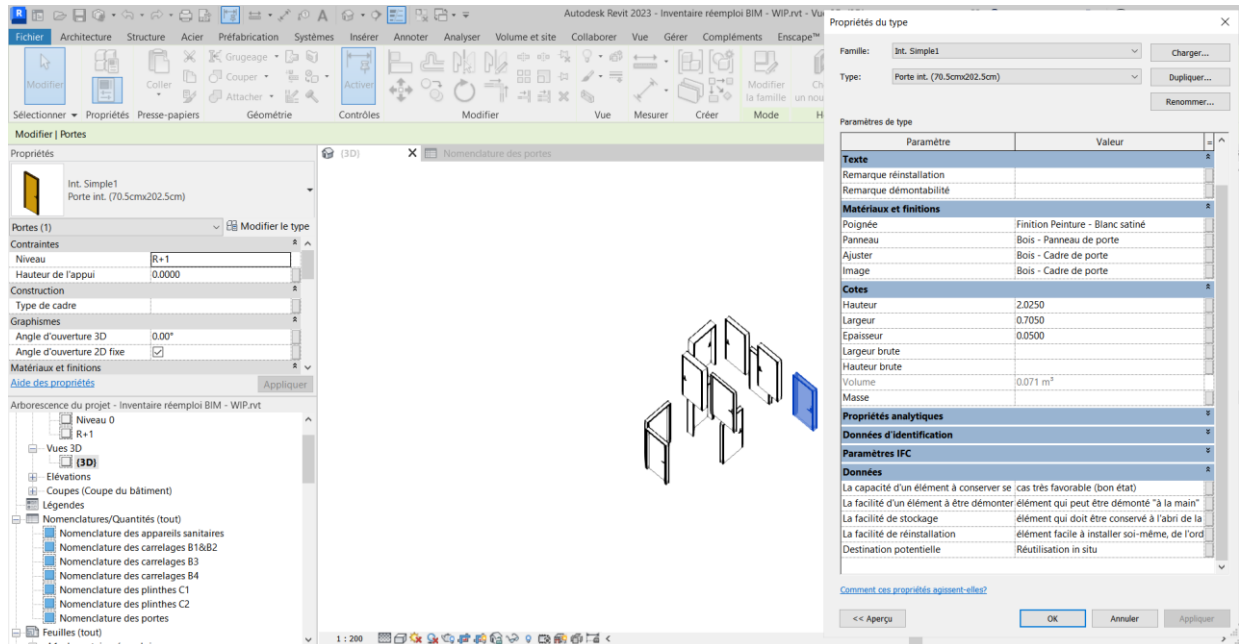


Figure 29 : Modélisation des portes dans le modèle Revit

Informations intégrées :

- Informations d'identification
 - Note d'identification
 - Quantité
 - Image (photo de l'élément avant le démontage)
 - Localisation
- Informations géométriques
 - Largeur
 - Hauteur
 - Épaisseur
 - Volume
- État
 - La capacité d'un élément à conserver ses propriétés esthétiques
- Informations de démontage
 - La facilité d'un élément à être démonté
 - La facilité de réinstallation
 - La facilité de stockage
 - Destination potentielle
- Description supplémentaire
 - Présence d'une bouche d'aération

Nomenclature des portes

La nomenclature des portes (figure 30) présente les différents types de portes avec leurs informations associées.



Nomenclature des portes														
Informations d'identification				Informations géométriques				Etat	Informations démontage				Description supplémentaire	
Note d'identification	Quantité	Famille et type	Image	Niveau	Largeur	Hauteur	Epaisseur	Volume	La capacité d'un élément à conserver ses propriétés esthétiques	La facilité d'un élément à être démonté	La facilité de réinstallation	La facilité de stockage	Destination potentielle	Description supplémentaire
Int. Simple1: Porte int. (70.5cmx202.5cm)														
A1	1	Int. Simple1: Porte int. (70.5cmx202.5cm)		R+1	0.71	2.03	0.05	0.07 m³	cas très favorable (bon état)	élément qui peut être démonté "à la main"	élément facile à installer soi-même, de l'ordre du "do-it-yourself".	élément qui doit être conservé à l'abri de la pluie	Réutilisation in situ	Présence d'une bouche d'aération
A1	1	Int. Simple1: Porte int. (70.5cmx202.5cm)		R+1	0.71	2.03	0.05	0.07 m³	cas très favorable (bon état)	élément qui peut être démonté "à la main"	élément facile à installer soi-même, de l'ordre du "do-it-yourself".	élément qui doit être conservé à l'abri de la pluie	Réutilisation in situ	
A1	1	Int. Simple1: Porte int. (70.5cmx202.5cm)		R+1	0.71	2.03	0.05	0.07 m³	cas très favorable (bon état)	élément qui peut être démonté "à la main"	élément facile à installer soi-même, de l'ordre du "do-it-yourself".	élément qui doit être conservé à l'abri de la pluie	Réutilisation in situ	
A1	1	Int. Simple1: Porte int. (70.5cmx202.5cm)		R+1	0.71	2.03	0.05	0.07 m³	cas très favorable (bon état)	élément qui peut être démonté "à la main"	élément facile à installer soi-même, de l'ordre du "do-it-yourself".	élément qui doit être conservé à l'abri de la pluie	Réutilisation in situ	
A1	1	Int. Simple1: Porte int. (70.5cmx202.5cm)		Niveau 0	0.71	2.03	0.05	0.07 m³	cas très favorable (bon état)	élément qui peut être démonté "à la main"	élément facile à installer soi-même, de l'ordre du "do-it-yourself".	élément qui doit être conservé à l'abri de la pluie	Réutilisation in situ	
5														
Int. Simple1: Porte int. (70.5cmx198.3cm)														
A2	1	Int. Simple1: Porte int. (70.5cmx198.3cm)		Niveau 0	0.71	1.98	0.05	0.07 m³	cas très favorable (bon état)	élément qui peut être démonté "à la main"	élément facile à installer soi-même, de l'ordre du "do-it-yourself".	élément qui doit être conservé à l'abri de la pluie	Réutilisation in situ	
1														
Int. Simple1: Porte int. (71cmx200cmx3.7cm)														
A3	1	Int. Simple1: Porte int. (71cmx200cmx3.7cm)		Niveau 0	0.71	2.00	0.04	0.05 m³	cas très favorable (bon état)	élément qui peut être démonté "à la main"	élément facile à installer soi-même, de l'ordre du "do-it-yourself".	élément qui doit être conservé à l'abri de la pluie	Réutilisation in situ	
1														
Int. Simple1: Porte int. (73cmx200cmx3.7cm)														
A4	1	Int. Simple1: Porte int. (73cmx200cmx3.7cm)		Niveau 0	0.73	2.00	0.04	0.05 m³	cas très favorable (bon état)	élément qui peut être démonté "à la main"	élément facile à installer soi-même, de l'ordre du "do-it-yourself".	élément qui doit être conservé à l'abri de la pluie	Réutilisation in situ	
1														
Int. Simple1: Porte int. (80.5cmx202.5cm)														
A5	1	Int. Simple1: Porte int. (80.5cmx202.5cm)		R+1	0.81	2.03	0.05	0.08 m³	cas très favorable (bon état)	élément qui peut être démonté "à la main"	élément facile à installer soi-même, de l'ordre du "do-it-yourself".	élément qui doit être conservé à l'abri de la pluie	Réutilisation in situ	
1														
Int. Simple1: Porte int. (82.5cmx205.5cm)														
A6	1	Int. Simple1: Porte int. (82.5cmx205.5cm)		R+1	0.83	2.03	0.05	0.08 m³	cas très favorable (bon état)	élément qui peut être démonté "à la main"	élément facile à installer soi-même, de l'ordre du "do-it-yourself".	élément qui doit être conservé à l'abri de la pluie	Réutilisation in situ	
1														
Int. Simple1: Porte int. (83cmx200cmx3.7cm)														
A7	1	Int. Simple1: Porte int. (83cmx200cmx3.7cm)		Niveau 0	0.83	2.00	0.04	0.06 m³	cas très favorable (bon état)	élément qui peut être démonté "à la main"	élément facile à installer soi-même, de l'ordre du "do-it-yourself".	élément qui doit être conservé à l'abri de la pluie	Réutilisation in situ	
1														
Total général: 11														

Figure 30 : Nomenclature des portes dans le modèle Revit

Les carrelages

La figure 31 illustre la modélisation des carrelages dans la maquette numérique.

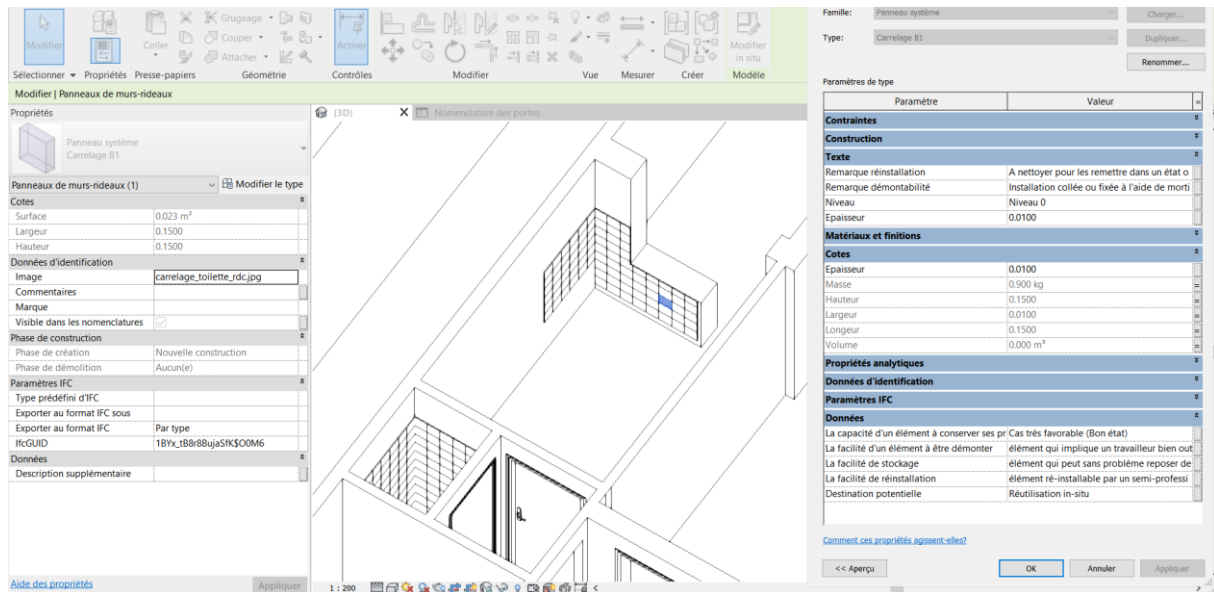


Figure 31 : Modélisation des carrelages dans le modèle Revit

Informations intégrées :

- Informations d'identification
 - Note d'identification
 - Quantité
 - Image (photo de l'élément avant le démontage)
 - Localisation
- Informations géométriques
 - Largeur
 - Hauteur
 - Épaisseur
 - Volume
 - Poids
- État
 - La capacité d'un élément à conserver ses propriétés esthétiques
- Informations de démontage
 - La facilité d'un élément à être démonté
 - La facilité de réinstallation
 - La facilité de stockage
 - Destination potentielle

Nomenclature des carrelages

La nomenclature des carrelages (figure 32) présente les différents types de carrelages avec leurs informations associées.





Nomenclature des carrelages B1 & B2														
Informations d'identification				Informations géométriques					Etat		Informations démontage			
Note d'identification	Famille et type	Image	Niveau	Nombre	Hauteur	Largeur	Epaisseur	Volume	Masse	La capacité d'un élément à conserver ses propriétés esthétiques	La facilité d'un élément à être démonté /Remarque démontable /	La facilité de réinstallation / Remarque réinstallation /	La facilité de stockage	Destination potentielle
Panneau système: Carrelage B1														
B1	Panneau système: Carrelage B1		Niveau 0	297	0.15	0.15	0.01	0.07 m³	267.300 kg	Cas très favorable (Bon état)	élément qui implique un travailleur bien outillé /Installation collée ou fixée à l'aide de mortiers /	élément ré-installable par un semi-professionnel (ou un très bon bricoleur) / A nettoyer pour les remettre dans un état où il peuvent être facilement réinstallés. /	élément qui peut sans problème poser dehors, sous les intempéries.	Réutilisation in-situ
Panneau système: Carrelage B2														
B2	Panneau système: Carrelage B2		Niveau 1	342	0.20	0.15	0.01	0.10 m³	410.400 kg	Cas très favorable (Bon état)	élément qui implique un travailleur bien outillé /Installation collée ou fixée à l'aide de mortiers /	élément ré-installable par un semi-professionnel (ou un très bon bricoleur) / A nettoyer pour les remettre dans un état où il peuvent être facilement réinstallés. /	élément qui peut sans problème poser dehors, sous les intempéries.	Réutilisation in-situ
Total général: 639								0.17 m³	677.700 kg					
Nomenclature des carrelages B3														
Note d'identification	Famille et type	Image	Niveau	Nombre	Hauteur	Largeur	Epaisseur	Volume	Masse	La capacité d'un élément à conserver ses propriétés esthétiques	La facilité d'un élément à être démonté /Remarque démontable /	La facilité de réinstallation /Remarque réinstallation /	La facilité de stockage	Destination potentielle
Panneau système: Carrelage B3														
B3	Panneau système: Carrelage B3		Niveau 1	945	0.10	0.10	0.01	0.09 m³	378.00 kg	Cas très favorable (Bon état)	élément qui implique un travailleur bien outillé /Installation collée ou fixée à l'aide de mortiers /	élément ré-installable par un semi-professionnel (ou un très bon bricoleur) / A nettoyer pour les remettre dans un état où il peuvent être facilement réinstallés. /	élément qui peut sans problème poser dehors, sous les intempéries.	Réutilisation in-situ
Total général: 945								0.09 m³	378.00 kg					
Nomenclature des carrelages B4														
Note d'identification	Famille et type	Image	Niveau	Nombre	Hauteur	Largeur	Epaisseur	Volume	Masse	La capacité d'un élément à conserver ses propriétés esthétiques	La facilité d'un élément à être démonté /Remarque démontable /	La facilité de réinstallation /Remarque réinstallation /	La facilité de stockage	Destination potentielle
Panneau système: carrelage sci B4														
B4	Panneau système: carrelage sci B4		Niveau 1	62	0.42	0.42	0.02	0.21 m³	854.24 kg	Cas très favorable (Bon état)	élément qui implique un travailleur lourdement outillé /Installation collée ou fixée à l'aide de mortiers /	élément ré-installable par un semi-professionnel (ou un très bon bricoleur) / A nettoyer pour les remettre dans un état où il peuvent être facilement réinstallés. /	élément qui peut sans problème poser dehors, sous les intempéries.	Réutilisation in-situ
Total général: 62								0.21 m³	854.24 kg					

Figure 32 : Nomenclature des carrelages dans le modèle Revit

Les plinthes

La figure 33 illustre la modélisation des plinthes dans la maquette numérique.

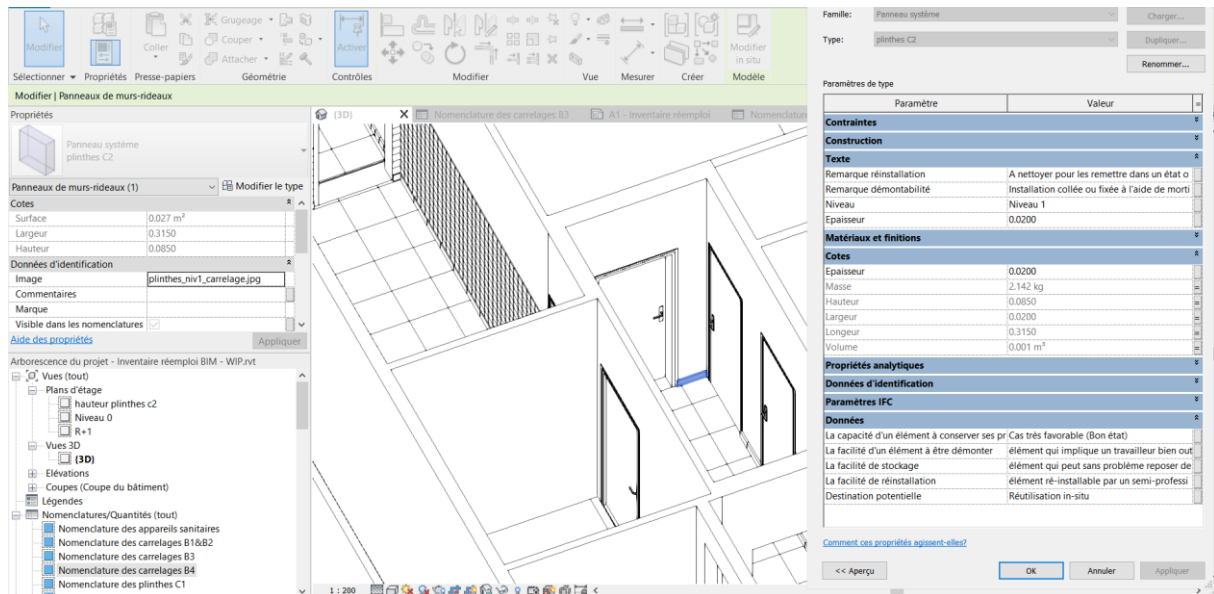


Figure 33 : Modélisation des plinthes dans le modèle Revit

Informations intégrées :

- Informations d'identification
 - Note d'identification
 - Quantité
 - Image (photo de l'élément avant le démontage)
 - Localisation
- Informations géométriques
 - Largeur
 - Hauteur
 - Épaisseur
 - Volume
 - Poids
- État
 - La capacité d'un élément à conserver ses propriétés esthétiques
- Informations de démontage
 - La facilité d'un élément à être démonté
 - La facilité de réinstallation
 - La facilité de stockage
 - Destination potentielle

Nomenclature des plinthes

La nomenclature des plinthes (figure 34) présente les différents types de plinthes avec leurs informations associées.

Nomenclature des plinthes C1														
Informations d'identification			Informations géométriques				Etat		Informations démontage					
Note d'identification	Famille et type	Image	Niveau	Nombre	Hauteur	Largeur	Épaisseur	Volume	Masse	La capacité d'un élément à conserver ses propriétés esthétiques	La facilité d'un élément à être démonté (Remarque démontabilité /)	La facilité de réinstallation (Remarque réinstallation /)	La facilité de stockage	Destination potentielle
Panneau système: plinthes C1														
C1	Panneau système: plinthes C1		Niveau 1	46	0.09	0.10	0.02	0.01 m³	21.53 kg	Cas très favorable (Bon état)	élément qui implique un travailleur bien outillé (Installation soignée ou liée à l'acte de mortier /)	élément ré-installable par un semi-professionnel (ou un très bon bricoleur) (À nettoyer pour les remettre dans un état où il peuvent être facilement réinstallés. /)	élément qui peut sans problème reposer dehors, sous les intempéries.	Réutilisation possible
Total général: 46							0.01 m³		21.53 kg					
Nomenclature des plinthes C2														
Note d'identification	Famille et type	Image	Niveau	Nombre	Hauteur	Largeur	Épaisseur	Volume	Masse	La capacité d'un élément à conserver ses propriétés esthétiques	La facilité d'un élément à être démonté (Remarque démontabilité /)	La facilité de réinstallation (Remarque réinstallation /)	La facilité de stockage	Destination potentielle
Panneau système: plinthes C2														
C2	Panneau système: plinthes C2		Niveau 1	25	0.09	0.32	0.02	0.01 m³	53.55 kg	Cas très favorable (Bon état)	élément qui implique un travailleur bien outillé (Installation soignée ou liée à l'acte de mortier /)	élément ré-installable par un semi-professionnel (ou un très bon bricoleur) (À nettoyer pour les remettre dans un état où il peuvent être facilement réinstallés. /)	élément qui peut sans problème reposer dehors, sous les intempéries.	Réutilisation in-situ
Total général: 25							0.01 m³		53.55 kg					

Figure 34 : Nomenclature des plinthes dans le modèle Revit

Les appareils sanitaires

La Baignoire

La figure 35 illustre la modélisation de la baignoire dans la maquette numérique.

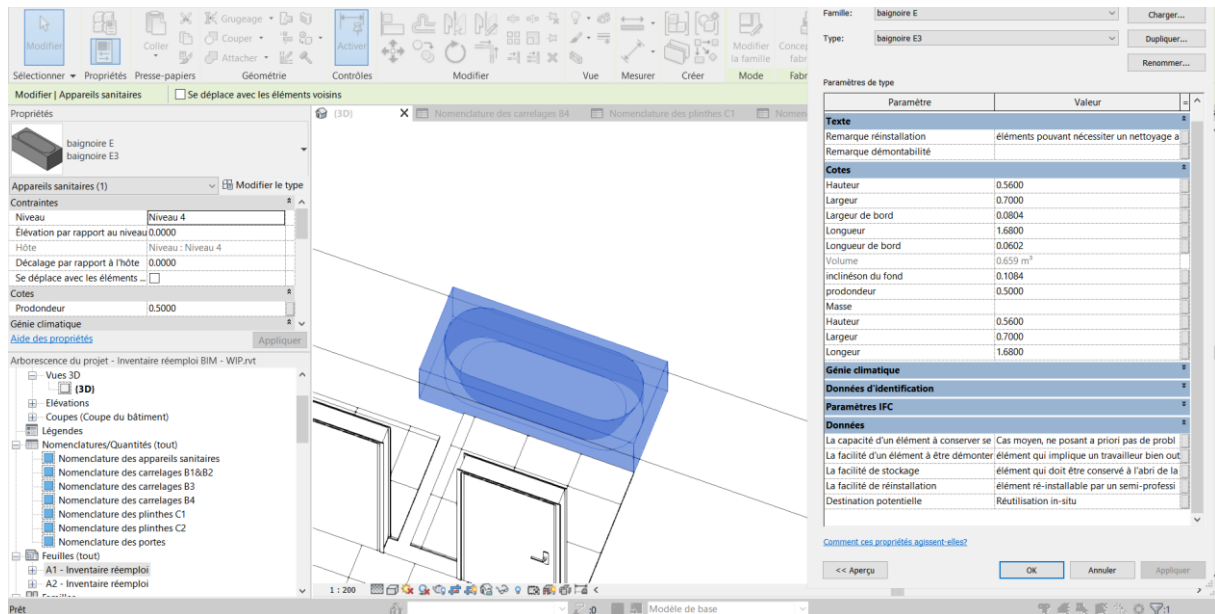


Figure 35 : Modélisation de la baignoire dans le modèle Revit

Informations intégrées :

- Informations d'identification
 - Note d'identification
 - Quantité
 - Image (photo de l'élément avant le démontage)
 - Localisation
- Informations géométriques
 - Largeur
 - Hauteur
 - Épaisseur
 - Volume

- État
 - La capacité d'un élément à conserver ses propriétés esthétiques
- Informations de démontage
 - La facilité d'un élément à être démonté
 - La facilité de réinstallation
 - La facilité de stockage
 - Destination potentielle

Nomenclature des appareils sanitaires

La nomenclature des appareils sanitaires (figure 36) présente les différents types d'appareils sanitaires avec leurs informations associées.



Informations d'identification		Quantité		Informations géométriques					Etat		Informations démontage				
Note d'identification	Famille et type	Image	Niveau	Nombre	Longueur	Largueur	Hauteur	Profondeur	Volume	La capacité d'un élément à conserver ses propriétés esthétiques	La facilité d'un élément à être démonté	La facilité de réinstallation (Remarque réinstallation /)		La facilité de stockage	Destination potentielle
D1	Radiateur Radiateur D1		Niveau 0	1	0.51	0.11	0.90		0.05 m³	Cas moyen, ne posant a priori pas de problèmes particuliers (bon état)	élément qui implique un travailleur bien outillé	élément ré-installable par un semi-professionnel (ou un très bon bricoleur) éléments pouvant nécessiter un rebouillage approfondi avant d'être réemployés /		élément qui doit être conservé à l'abri de la pluie	Réutilisation in-situ
E3	bañoire C bañoire C		R+1	1	1.68	0.70	0.56	0.50	0.66 m³	Cas moyen, ne posant a priori pas de problèmes particuliers (bon état)	élément qui implique un travailleur bien outillé	élément ré-installable par un semi-professionnel (ou un très bon bricoleur) éléments pouvant nécessiter un rebouillage approfondi avant d'être réemployés /		élément qui doit être conservé à l'abri de la pluie	Réutilisation in-situ

Figure 36 : Nomenclature des appareils sanitaires dans le modèle Revit

Seuil de fenêtre

La figure 37 illustre la modélisation du seuil de fenêtre dans la maquette numérique

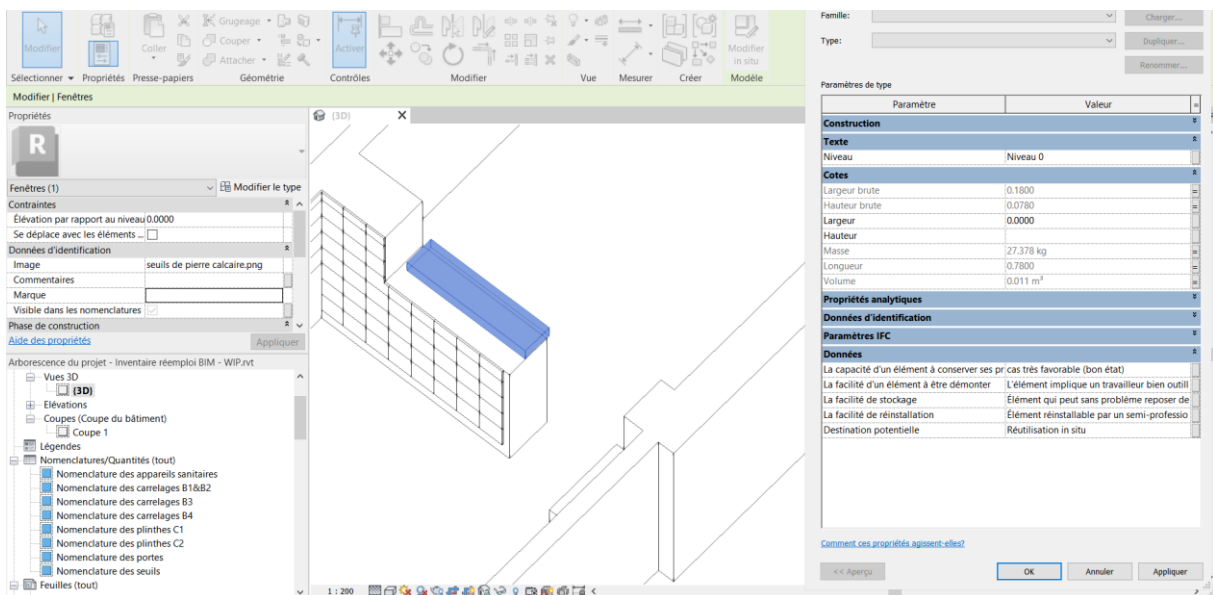


Figure 37 : Modélisation du seuil de fenêtre dans le modèle Revit

Informations intégrées :

- Informations d'identification
 - Note d'identification
 - Quantité
 - Image (photo de l'élément avant le démontage)
 - Localisation
- Informations géométriques
 - Largeur
 - Hauteur

- Longueur
- Volume
- Masse
- État
 - La capacité d'un élément à conserver ses propriétés esthétiques
- Informations de démontage
 - La facilité d'un élément à être démonté
 - La facilité de réinstallation
 - La facilité de stockage
 - Destination potentielle

Nomenclature seuil de fenêtre

La nomenclature des seuils (figure 38) présente les seuils de fenêtre avec leurs informations intégrées.


Nomenclature des seuils														
Informations d'identification			Quartier		Informations géométriques				Etat		Information démontage			
Note d'identification	Famille et type	Image	Niveau	Nombre	Largeur	Hauteur	Longueur	Volume	Masse	La capacité d'un élément à conserver ses propriétés esthétiques	La facilité d'un élément à être démonté	La facilité de réinstallation	La facilité de stockage	Destination potentielle
FF1	Seuil-Seuil		Niveau 0	1	0.18	0.08	0.78	0.01 m³	27.38 kg	cas très favorable (bon état)	L'élément implique un travailleur bien outillé.	Élément réinstallable par un semi-professionnel.	Élément qui peut sans problème reposer dehors, sous les intempéries.	Réutilisation in situ

Figure 38 : Nomenclature des seuils de fenêtres dans Revit

1.2. Évaluation du potentiel de réemploi

Nous présenterons dans cette partie les résultats obtenus après l'application de la méthode 3DR dans le modèle numérique BIM.

L'application de la méthode 3DR pour évaluer le potentiel de réemploi est expliquée dans le chapitre 3.3.3¹². Le résultat attendu est l'application d'un code couleur en fonction du potentiel de réemploi d'un élément :

- Rouge : éléments non réemployables,
- Orange : éléments difficilement réemployables,
- Vert : éléments facilement réemployables.

Dans la suite de ce chapitre, nous présenterons d'abord chaque type d'élément avec leur code couleur respectif. Ensuite, nous présenterons les tableaux comprenant les valeurs des différentes variables (DIt), (DIm), (Ri) permettant d'attribuer le potentiel de réemploi. Les tableaux serviront à comprendre le code couleur attribué à chaque élément.

Pour rappel, les codes couleurs sont attribués en fonction des valeurs du « *Disassemble Index Tools* » (DIT), « *Disassemble Index move* » (DIm) et de la « *Resilience Index* » (Ri). Le tableau général est disponible à l'Annexe 4 : Tableaux Excel du « *Disassemble Index Tools* (DIt), « *Disassemble Index Move* (DIm) et « *Resilience Index* (Ri) ».

¹² Pour rappel, le script Dynamo (figure 27) permet de définir le potentiel de réemploi des éléments en se basant sur les valeurs DIt, DIm et Ri répertoriées dans le tableau 6. Le script lit les valeurs depuis le tableau 6 et applique le code couleur aux objets présents dans le modèle Revit.

Visualisation générale de la maquette numérique

La *figure 39* et la *figure 40* donnent une vue d'ensemble des résultats obtenus pour les éléments du rez-de-chaussée et du premier étage.

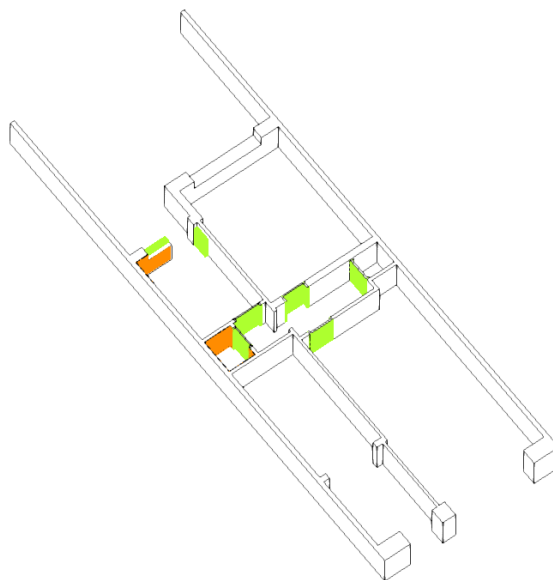


Figure 39 : Visualisation du rez-de-chaussée avec le code couleur

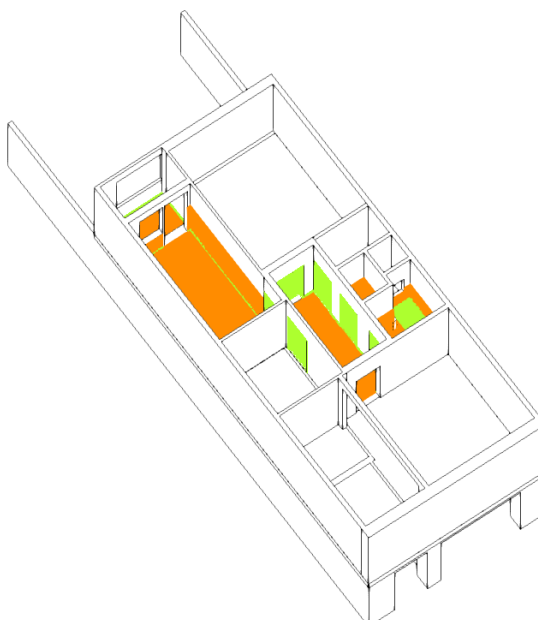


Figure 40 : Visualisation du premier étage avec le code couleur

Les portes (A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7)

- Résultat obtenu : couleur verte

Nous regroupons tous les types de portes (Portes A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7), car elles ont obtenu le même résultat (figure 41).

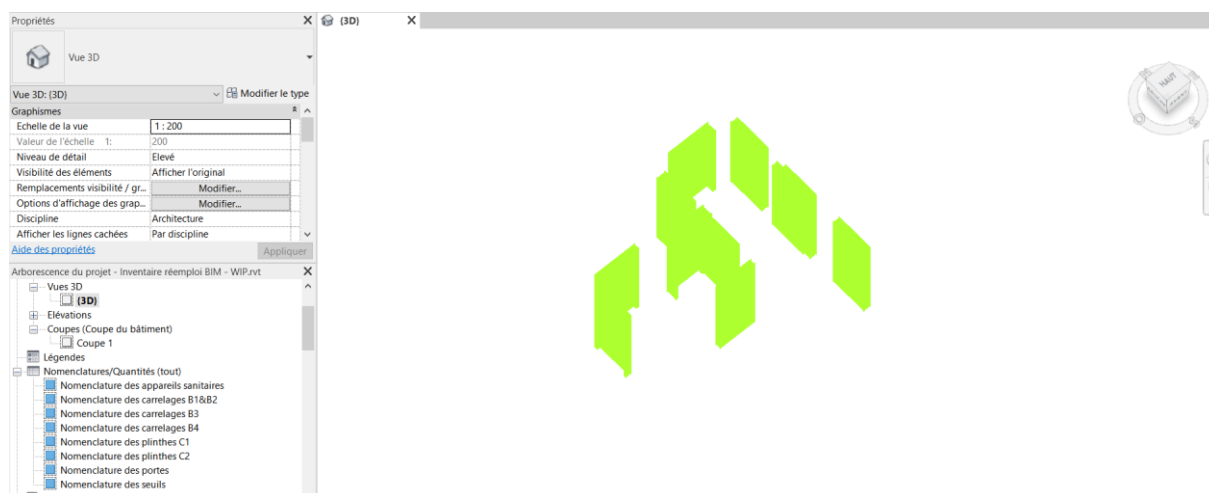


Figure 41 : Visualisation des portes avec leur code couleur dans le modèle Revit

Le tableau 6, le tableau 7 et le tableau 8 présentent les valeurs du DIm, du DIt et de la Ri des différents types de portes. Comme énoncé précédemment, le code couleur est attribué en fonction des différentes valeurs obtenues dans les tableaux suivants.

Tableau 6 : « Disassemble Index Tools » (DIt) des portes A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7

Keynote	Material	Volume (m3)	Densité de masse (kg/m3)	Masse (kg)	Hand Tool	Valeur DIt
A1	Porte simple	0,07	600	42,00	x	0,9
A1	Porte simple	0,07	600	42,00	x	0,9
A1	Porte simple	0,07	600	42,00	x	0,9
A1	Porte simple	0,07	600	42,00	x	0,9
A1	Porte simple	0,07	600	42,00	x	0,9
A2	Porte simple	0,07	600	42,00	x	0,9
A3	Porte simple	0,05	600	30,00	x	0,9
A4	Porte simple	0,05	600	30,00	x	0,9
A5	Porte simple	0,08	600	48,00	x	0,9
A6	Porte simple	0,08	600	48,00	x	0,9
A7	Porte simple	0,06	600	36,00	x	0,9

Tableau 7 : « Disassemble index move » (DIm) des portes A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7

Keynote	Material	Volume (m3)	Densité de masse (kg/m3)	Masse (kg)	Two people: < 42 kg	Valeur DIm
A1	Porte simple	0,07	600	42,00	x	0,9
A1	Porte simple	0,07	600	42,00	x	0,9
A1	Porte simple	0,07	600	42,00	x	0,9
A1	Porte simple	0,07	600	42,00	x	0,9
A1	Porte simple	0,07	600	42,00	x	0,9
A2	Porte simple	0,07	600	42,00	x	0,9
A3	Porte simple	0,05	600	30,00	x	0,9
A4	Porte simple	0,05	600	30,00	x	0,9
A5	Porte simple	0,08	600	48,00	x	0,9
A6	Porte simple	0,08	600	48,00	x	0,9
A7	Porte simple	0,06	600	36,00	x	0,9

Tableau 8 : « Resilience index » (Ri) des portes A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7

Keynote	Material	Volume (m3)	Densité de masse (kg/m3)	Masse (kg)	Reusable an infinite number of times	Valeur (Ri)
A1	Porte simple	0,07	600	42,00	x	1,0
A1	Porte simple	0,07	600	42,00	x	1,0
A1	Porte simple	0,07	600	42,00	x	1,0
A1	Porte simple	0,07	600	42,00	x	1,0
A2	Porte simple	0,07	600	42,00	x	1,0
A3	Porte simple	0,05	600	30,00	x	1,0
A4	Porte simple	0,05	600	30,00	x	1,0
A5	Porte simple	0,08	600	48,00	x	1,0
A6	Porte simple	0,08	600	48,00	x	1,0
A7	Porte simple	0,06	600	36,00	x	1,0

Les portes sont facilement réemployables parce qu'elles peuvent être démontées avec des outils manuels et nécessitent seulement deux personnes pour être déplacées. De plus, les différents cycles de démontage, de stockage et de remontage ne détériorent pas ces éléments ce qui les rend facilement réemployables. En effet, comme énoncé dans l'état de l'art, l'un des facteurs qui déterminent le réemploi des éléments est leur capacité à conserver leurs propriétés mécaniques et esthétiques tout au long des différentes étapes de démontage et de réinstallation.

Les carrelages (B1, B2, B3 et B4)

- Résultat obtenu : couleur orange

Nous regroupons les carrelages B1 (figure 42), B2 (figure 43) et B3 (figure 44),B4 (figure 45), car ils ont obtenu le même résultat.



Figure 42 : Visualisation du carrelage B1 avec leur code couleur dans le modèle Revit

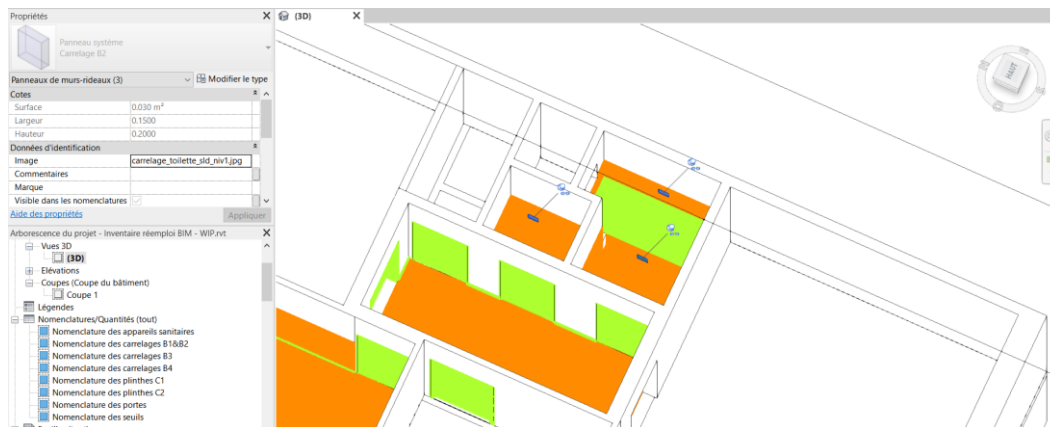


Figure 43 : Visualisation du carrelage B2 avec leur code couleur dans le modèle numérique

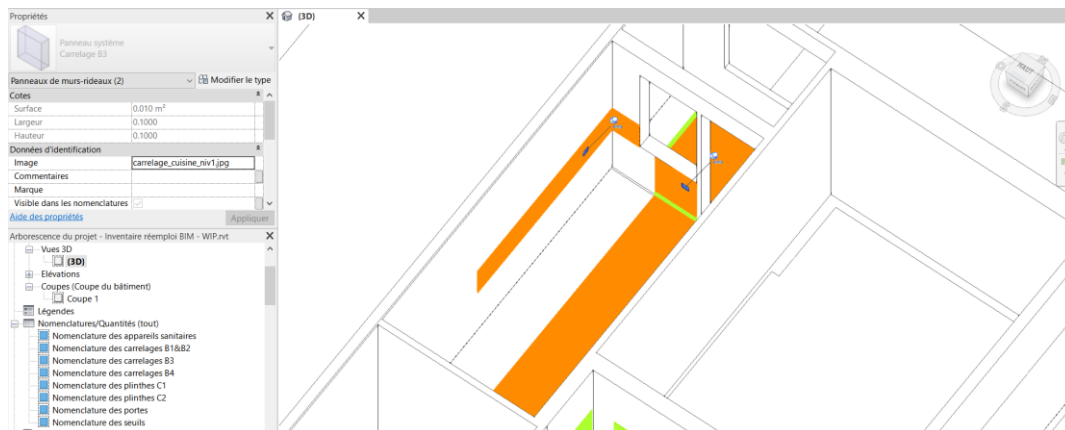


Figure 44 : Visualisation du carrelage B3 avec leur code couleur dans le modèle Revit

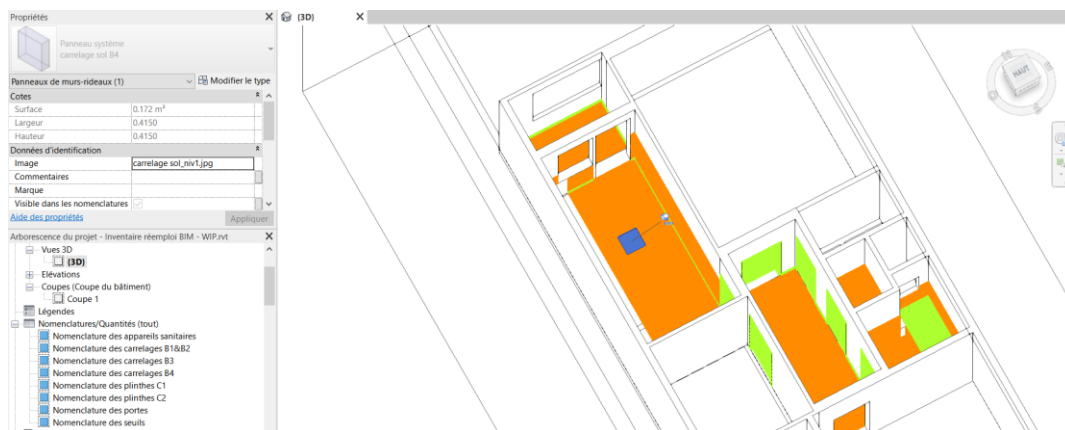


Figure 45 : Visualisation des carrelages B4 avec leur code couleur dans le modèle Revit

Pour les carrelages B1, B2 et B3, la couleur indique qu'ils sont difficilement réemployables. Ce code est défini en fonction des variables présentes dans le tableau 9, le tableau 10 et le tableau 11. Ce résultat est obtenu parce qu'ils peuvent être démontés avec des outils manuels, tels qu'une palette de plafonnage et un marteau. Pour définir la valeur du DIT, nous avons pris en compte le poids total du lot de carreaux. En effet, si ces derniers doivent être transportés ou déplacés sur le chantier, ils le seront à l'aide d'un chariot élévateur, plutôt que d'être déplacés un par un. La valeur R_i est déterminée par le fait que les carrelages ne sont réutilisables qu'une seule fois. Cette variable a été choisie par le chercheur, car la littérature illustre que les carreaux supportent mal les cycles de démontage. Cela se traduit par le taux de pertes élevé sur chantier. Ce facteur est directement influencé par le mode de fixation utilisé pour les carrelages. En effet, la colle ou le mortier utilisés pour fixer les carrelages peuvent rendre difficile leur récupération.

En ce qui concerne le carrelage B4, le code couleur est également orange. La distinction par rapport aux autres carrelages est qu'il est utilisé au sol. Les carreaux de sols sont fixés avec du mortier hautement résistant qui nécessite des outils électriques tels qu'un burineur pour être démontés.

En théorie, ce changement d'outils n'affecte presque pas le potentiel de réemploi du carrelage B4 par rapport aux autres carrelages présents dans le modèle.

Tableau 9 : « Disassemble Intdex Tools » (Dit) des carrelages B1,B2,B3 et B4

Keynote	Material	Volume (m3)	Masse (kg)	Hand Tool	Power Tool	Valeur Dit
B4	Carrelages	0,21356	854,00		x	0,9
B3	Carrelages	0,09	378,00	x		0,9
B2	Carrelages	0,1	410,00	x		0,9
B1	Carrelages	0,07	261,00	x		0,9

Tableau 10 : « Disassemble index move » (DIm) des carrelages B1,B2,B3 et B4

Keynote	Material	Volume (m3)	Masse (kg)	Forklift: < 2000	Valeur
B4	Carrelages	0,21356	854	x	0,9
B3	Carrelages	0,09	378	x	0,9
B2	Carrelages	0,1	410	x	0,9
B1	Carrelages	0,07	261	x	0,9

Tableau 11 : « Resilience index » (Ri) des carrelages B1,B2,B3 et B4

Keynote	Material	Volume (m3)	Masse (kg)	Reusable only once	Valeur Ri
B4	Carrelages	0,21356	854,00	x	0,7
B3	Carrelages	0,09	378,00	x	0,7
B2	Carrelages	0,1	410,00	x	0,7
B1	Carrelages	0,07	261,00	x	0,7

Les plinthes (C1 et C2)

- Résultat obtenu : couleur verte

Les plinthes C1 (figure 46) et C2 (figure 47) ont obtenu le même résultat.

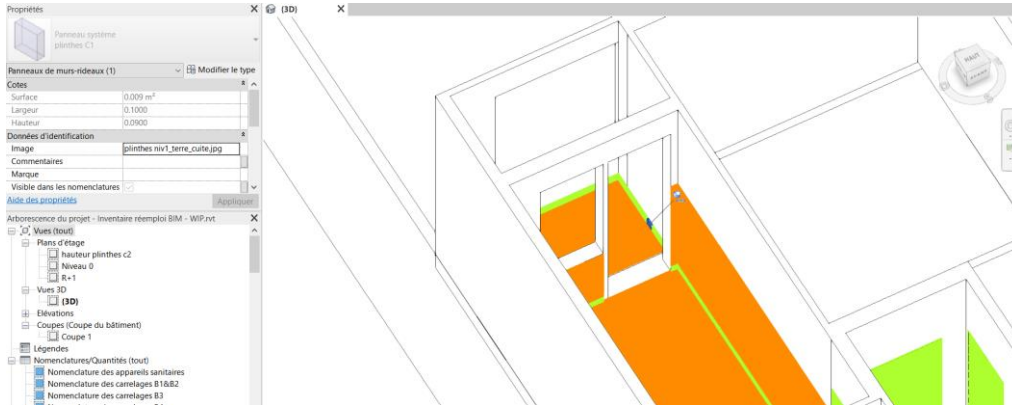


Figure 46 : Visualisation des plinthes C1 avec leur code couleur dans le modèle Revit

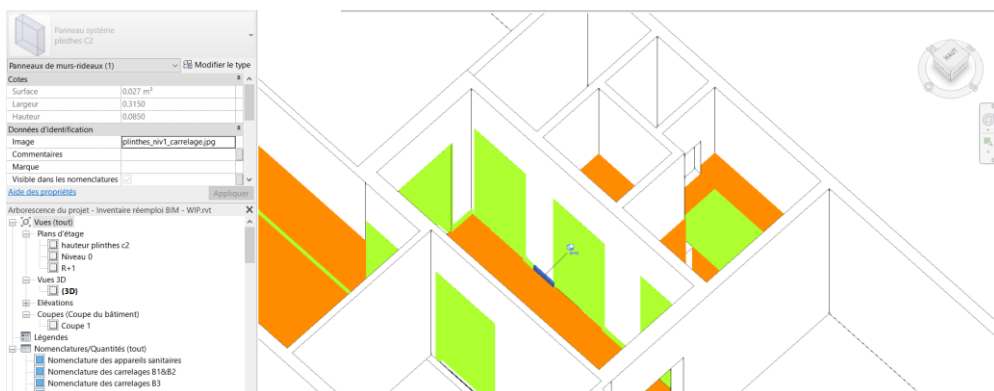


Figure 47 : Visualisation des plinthes C2 avec leur code couleur dans le modèle Revit

D'après le résultat obtenu, les plinthes C1 et C2 sont facilement démontables. *Le tableau 12, le tableau 13 et le tableau 14* expriment le résultat obtenu. Les plinthes sont facilement démontables parce qu'elles peuvent être démontées avec des outils manuels. Les mêmes outils utilisés pour le carrelage peuvent être utilisés pour démonter les plinthes.

Enfin, ce qui différencie le résultat des plinthes avec celui des carrelages est principalement le poids total du lot de carreaux. En effet, les plinthes peuvent être déplacées par deux personnes ou avec un chariot manuel. Également, les plinthes résistent mal au cycle de démontage, ce qui explique la valeur de Ri.

Tableau 12 : « Disassemble Intdex Tools » (Dit) des plinthes C1 et C2

Keynote	Material	Volume (m3)	Masse (kg)	Hand Tool	Valeur Dit
C2	Plinthes	0,01	53,55	x	0,9
C1	Plinthes	0,01	21,53	x	0,9

Tableau 13 : « Disassemble index move » (DIm) des plinthes C1 et C2

Keynote	Material	Volume (m3)	Masse (kg)	One person: < 20 kg	Hand trolley: < 50 kg	Valeur DIm
C2	Plinthes	0,01	53,55		x	0,9
C1	Plinthes	0,01	21,53	x		0,9

Tableau 14 : « esilience index » (Ri) des plinthes C1 et C2

Keynote	Material	Volume (m3)	Masse (kg)	Reusable only once	Valeur
C2	Plinthes	0,01	53,55	x	0,7
C1	Plinthes	0,01	21,53	x	0,7

Les appareils sanitaires (D1 et E3)

- Résultat obtenu : couleur verte

Les appareils sanitaires D1 (figure 48) et E3 (figure 49) ont obtenu le même résultat

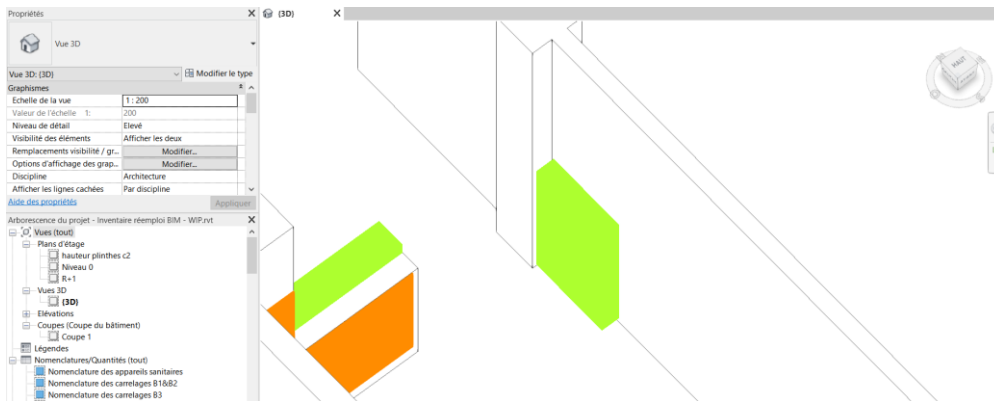


Figure 48 : Visualisation du radiateur D1 avec code couleur dans le modèle Revit

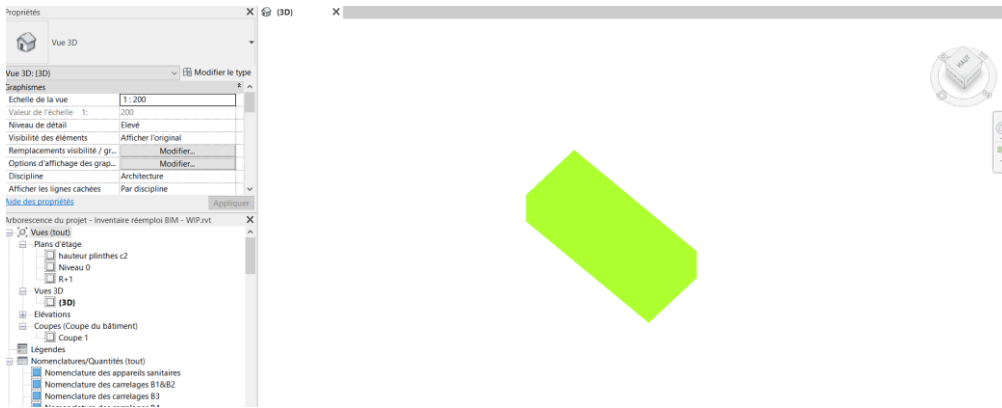


Figure 49 : Visualisation de la baignoire E3 avec code couleur dans le modèle Revit

D'après l'analyse, les appareils sanitaires sont facilement réemployables. Comme déjà énoncé, le résultat est obtenu en fonction des valeurs déterminées dans le tableau 15, le tableau 16 et le tableau 17.

Les appareils sanitaires sont relativement faciles à démonter. Le point important pour ce type d'appareils est la réinstallation. Comme énoncé dans l'état de l'art, certains systèmes sanitaires doivent être fournis avec toutes les pièces nécessaires à leur fonctionnement pour être réinstallés.

Tableau 15 : « Disassemble Intdex Tools » (Dit) des appareils sanitaires D1 et E3

Keynote	Material	Volume (m3)	Hand Tool	Valeur Dit
D1	Radiateur	0,05	x	0,9
E3	Baignoire	0,66	x	0,9

Tableau 16 : « Disassemble index move » (Dlm) des appareils sanitaires D1 et E3

Keynote	Material	Volume (m3)	Two people: < 42 kg	Valeur Dlm
D1	Radiateur	0,05	x	0,9
E3	Baignoire	0,66	x	0,9

Tableau 17 : « Resilience index » (Ri) des appareils sanitaires D1 et E3

Keynote	Material	Volume (m3)	Reusable an infinite number of times	Valeur Ri
D1	Radiateur	0,05	x	1,0
E3	Baignoire	0,66	x	1,0

Seuil de fenêtre (F1)

- Résultat obtenu : couleur verte (figure 50)

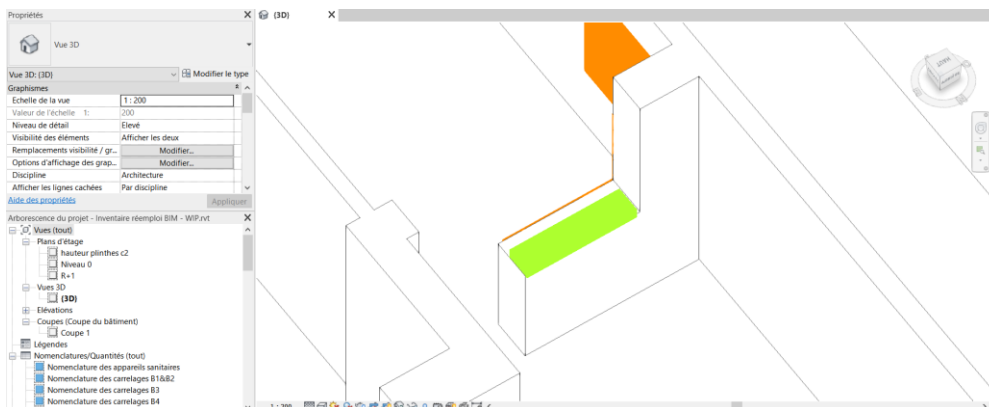


Figure 50 : Visualisation du seuil F1 avec code couleur dans le modèle Revit

Le seuil en pierre calcaire est catégorisé comme facilement démontable. Ce résultat est dû aux valeurs obtenues dans le tableau 18, le tableau 29 et le tableau 20.

Tableau 18 : « Disassemble Index Tools » (Dit) du seuil F1

Keynote	Material	Volume (m3)	Masse (kg)	Power Tool	Valeur Dit
F1	Seuil pierre calcaire	0,01	27,38	x	0,8

Tableau 19 : « Disassemble index move » (Dlm) du seuil F1 avec code couleur dans le modèle Revit

Keynote	Material	Volume (m3)	Masse (kg)	One person: < 20 kg	Valeur
F1	Seuil pierre calcaire	0,01	27,38	x	0,9

Tableau 20 : « Resilience index » (Ri) du seuil F1 avec code couleur dans le modèle Revit

Keynote	Material	Volume (m3)	Masse (kg)	Reusable an infinite number of times	Valeur
F1	Seuil pierre calcaire	0,01	27,38	x	1,0

1.3. Démontage effectif

Cette partie présente les éléments qui ont été démontés et potentiellement réemployés. Elle permet également d'expliquer quelles informations ont été utiles pour planifier le chantier de déconstruction.

Il est important de rappeler que plusieurs acteurs interviennent sur le chantier de déconstruction. Ces acteurs sont les maîtres d'ouvrage, le chercheur et l'entrepreneur. De plus, contrairement à la maquette numérique où toutes les variables peuvent être contrôlées, le chantier présente des contraintes imprévisibles que le chercheur ne peut pas contrôler.

Tout d'abord, les informations de démontage et le code couleur présent dans la maquette numérique permettent d'identifier visuellement où les efforts doivent être concentrés sur le chantier. Les informations de démontage ont permis de planifier efficacement le chantier. Le modèle numérique fournit des informations précises sur le type d'outils à utiliser et les conditions de stockage des différents éléments. Les quantités et les volumes des éléments fournis par les nomenclatures nous ont permis d'organiser le stockage. En effet, les éléments qui doivent être stockés dans un espace couvert ont été placés dans la cave et les éléments qui peuvent être stockés à l'extérieur ont été entreposés dans le jardin.

Ensuite, certains éléments ont été démontés par le chercheur et les maîtres d'ouvrages et d'autres ont été démontés par l'entrepreneur. Nous commencerons à présenter les éléments qui ont été démontés par le chercheur et les maîtres d'ouvrage.

Démontage du carrelage B1,B2 et B4

Seuls les carrelages B1 (figure 53), B2 (figure 52) et B4 (figure 51) ont subi un démontage. Des outils tels qu'une palette de plafonnage, un marteau ont été utilisés pour les carrelages B1 et B2. Un burineur a été utilisé pour les carrelages B4.



Figure 53 : Démontage du carrelage B1



Figure 52 : Démontage du carrelage B2

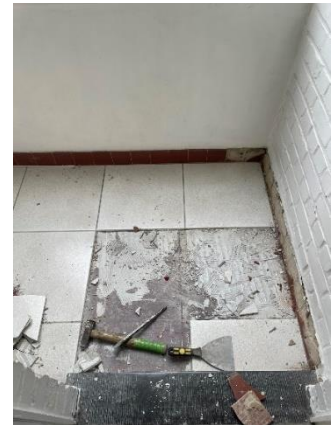


Figure 51 : Démontage du carrelage B4

La plupart des carreaux ont été endommagés lors du démontage. Seuls les carrelages B1 ont pu être démontés, car le taux de perte n'était pas très élevé. Pour les carrelages B2, le taux de perte élevé de carreaux a rendu l'opération de démontage non rentable.

Un premier test a été effectué avec des outils manuels pour démonter le carrelage B4. Le chercheur a ensuite utilisé un burineur, car le mortier utilisé pour fixer les carreaux était hautement résistant. L'opération de démontage a échoué pour les carreaux de sol qui n'ont pas pu être démontés à cause du mortier très résistant utilisé pour les fixer.

Démontage des plinthes C1

Les outils utilisés pour démonter les plinthes C1 (figure 54) sont une palette de plafonnage et un marteau.

Les plinthes C1 ont été démontées avec un taux de perte quasiment nul. Le mortier utilisé pour les fixer n'était pas très résistant, ce qui a permis un démontage aisé.



Figure 54 : Démontage des plinthes C1

Les portes

Toutes les portes du rez-de-chaussée (figure 55 & figure 56) ont été démontées à l'aide d'outils manuels tels qu'un tournevis.

Les portes sont relativement faciles à démonter. Elles ont été fixées dans le bâtiment de manière standard. Les charnières et les fixations peuvent être retirées sans endommager les portes, ce qui facilite leur réutilisation.

Les portes ont ensuite été stockées dans la cave, car elles doivent être protégées des intempéries (figure 57).



Figure 55 : Démontage des portes du rez-de-chaussée



Figure 56 : Photo après le démontage des portes du rez-de-chaussée



Figure 57 : Stockage des portes lors du chantier de déconstruction

Seuil de fenêtre F1

L'outil utilisé pour démonter le seuil de fenêtre (figure 59) est un burineur.

Le seuil en pierre a pu être démonté correctement conformément à son analyse lors de l'évaluation du potentiel de réemploi. Il a pu être stocké dans le jardin (figure 58).



Figure 59 : Photo avant démontage du seuil de fenêtre en pierre F1



Figure 58 : Photo après démontage du seuil en pierre F1

La suite de ce chapitre présentera les éléments qui ont été démontés par l'entrepreneur.

Les appareils sanitaires (baignoire E3)



Figure 60 : Photo de la baignoire E3 réinstaller



Figure 61 : Photo avant démontage de la baignoire E3

Conformément au résultat obtenu lors de l'évaluation du potentiel de réemploi, l'entrepreneur a pu démonter et réinstaller la baignoire (figure 60 & figure 61).

Seuil de fenêtre

Le monde du chantier est un terrain où il existe des contraintes imprévisibles. Durant le chantier de déconstruction, l'entrepreneur a aussi démonté un seuil de fenêtre (figure 63) similaire à celui démonté par le chercheur. Le seuil de pierre démonté par l'entrepreneur n'apparaît pas dans l'inventaire réemploi, néanmoins il a été réutilisé dans le projet de rénovation (figure 62).



Figure 63 : Seuil en pierre avant démontage par l'entrepreneur



Figure 62 : Seuil en pierre réinstaller par l'entrepreneur dans le chantier de rénovation

1.4. Confrontation des résultats

Cette étape consiste à valider ou invalider les résultats obtenus lors de l'Étape 3 : Application de la méthode 3DR

Tout d'abord, l'évaluation du potentiel de réemploi pour les carrelages était définie avec un code orange, ce qui indiquait une difficulté à les réemployer. Cette difficulté était surtout liée à la quantité de carreaux à déplacer. Cependant, le démontage du carrelage B4 (Figure 52 : Démontage du carrelage B) a échoué. Pour ce type de matériaux, il est important de prendre en compte la méthode de fixation. En effet, au-delà des outils utilisés, des quantités à déplacer ou du nombre de fois qu'on peut les réutiliser, le principal facteur qui détermine le potentiel de réemploi est la réversibilité. En raison de certains mortiers hautement résistants, les carrelages ne sont pas réversibles et par conséquent, ils ne peuvent pas être réemployés.

Ensuite, en ce qui concerne les plinthes, elles avaient été évaluées comme étant faciles à réemployer, ce qui fut le cas. Cependant, comme énoncé pour les carrelages, le mode de fixation est particulièrement déterminant pour évaluer le potentiel de réemploi de ce type de matériaux.

De plus, le seuil de fenêtre a pu être démonté et réinstallé conformément à son évaluation de potentiel de réemploi. Cet élément a pu être démonté facilement, car il était fixé au bâtiment avec du mortier peu résistant. Comme pour les carrelages et les plinthes, le mode de fixation influence fortement le potentiel de réemploi du matériau.

Enfin, l'évaluation du potentiel de réemploi des portes et des appareils sanitaires a été définie avec un code vert. Les portes et les appareils sanitaires ont pu être démontés et réinstallés facilement. Pour ce type d'élément, les cycles de démontage et de réinstallation n'affectent pas leur qualité, ce qui rend le réemploi plus simple.

En résumé, l'évaluation du potentiel de réemploi à l'aide de la méthode 3DR est relativement efficace et fiable. Cependant, l'intégration de nouvelles variables telles que la méthode de fixation dans la méthode 3DR permettrait d'évaluer le potentiel de réemploi de manière plus précise, rendant ainsi le modèle BIM encore plus fiable.

1.5. Conclusion

Tout d'abord, le point 1.1 nous a permis de fournir une vue d'ensemble des éléments de réemploi qui ont été modélisés après la phase 1. Pour chaque type d'éléments présent dans le modèle, nous avons présenté les informations qui ont été intégrées à travers les nomenclatures. Les nomenclatures doivent être configurées dans Revit et permettent ainsi de générer automatiquement des listes des éléments de réemploi avec leurs informations. Ces listes sont personnalisables, permettant d'afficher les informations nécessaires pour chaque projet de déconstruction et chaque phase de projet.

Ensuite, la méthode 3DR (point 1.2) nous a permis d'évaluer le potentiel de réemploi de chaque élément. En attribuant un code couleur en fonction de différentes variables, la méthode 3DR facilite l'identification des éléments qui sont facilement réemployables, difficilement réemployables ou non réemployables.

Les éléments tels que les portes, les appareils sanitaires ou les seuils peuvent être démontés avec des outils manuels classiques. Ils nécessitent seulement une ou deux personnes pour être déplacés. Ces différents facteurs les rendent facilement réemployables. En revanche, les éléments avec un code couleur orange indiquent qu'ils sont difficilement réemployables. Cette codification est due à la nécessité d'outils spécifiques pour démonter et déplacer les éléments. Le taux de pertes qui peut être important lors du démontage influence également la codification.

Nous pouvons observer qu'aucun élément n'apparaît avec un code couleur rouge. Cette observation s'explique par le fait que le chercheur, en amont de la recherche, a sélectionné les éléments potentiellement réemployables. Les éléments jugés non réemployables par le chercheur n'ont pas été inclus dans l'inventaire réemploi. Ce travail de terrain souligne l'importance du rôle du prospecteur. Comme mentionné dans l'état de l'art, celui-ci identifie les éléments potentiellement réemployables pour aider et accompagner les maîtres d'ouvrage dans leur projet.

De plus, les éléments tels que les carrelages, les portes, les appareils sanitaires et les seuils sont considérés dans la littérature comme étant les « best-sellers » du réemploi. Ils sont connus pour avoir déjà été réemployés dans d'autres projets. Lorsqu'ils peuvent être récupérés, ils sont considérés comme ayant un haut potentiel de réemploi (Smeyers et al., 2022).

Enfin, les éléments de finition, en raison de leur accessibilité et parce qu'ils ne posent généralement pas de problème pour les démonter, sont les éléments qui sont plus facilement récupérables. Cette facilité de récupération est valable lorsqu'ils ne sont pas fixés de manière irréversible (Ghyoot et al., 2018).

Le démontage (point 1.3) a été particulièrement pertinent, car il a permis de tester les résultats obtenus lors de l'évaluation du potentiel de réemploi. Cette opération a permis aussi de démontrer l'utilisation des données de la maquette numérique sur le terrain.

En effet, les données générées par la maquette telles que les quantités, les volumes et les poids des éléments ont été utilisées pour organiser efficacement le chantier. Ces informations ont permis de planifier avant le chantier, les outils nécessaires et le stockage nécessaire. Pour les chantiers qui le nécessitent, les informations sur les masses sont également importantes pour planifier le type de transport à prévoir. En fournissant les informations à l'avance, cela permet de gagner du temps sur le chantier de déconstruction. Nous avons également observé que le démontage de certains éléments était influencé par leur mode de fixation.

La différence entre les résultats obtenus par le modèle BIM et les résultats réels sur le terrain est principalement due à la réversibilité des éléments. En effet, les variables utilisées dans la méthode 3DR ne prennent pas en compte le mode de fixation d'un élément. En complément de la variable qui repose sur les outils nécessaires pour démonter un élément, il serait pertinent d'ajouter une variable supplémentaire qui attribuerait des valeurs en fonction de la méthode de fixation utilisée pour chaque élément.

Enfin, en identifiant ces modes de fixation avant le chantier, il est possible de prévoir les difficultés qui seront rencontrées lors du chantier. De plus, la réalisation de tests de démontage, avant le début du chantier lorsque la situation le permet, sert à définir les modes de fixation.

2. Discussion

Dans ce chapitre, nous allons discuter des résultats obtenus par rapport aux résultats de l'état de l'art, mais aussi répondre à la question de recherche en validant ou non les hypothèses.

2.1. Les enjeux du BIM pour la réalisation d'un inventaire réemploi

Dans cette section, nous cherchons à répondre à notre question de recherche principale, à savoir : **« Quels sont les enjeux du BIM pour la réalisation d'un inventaire réemploi ? »**.

Nous cherchons donc à comprendre les opportunités et les limites du BIM pour la réalisation (et la gestion) d'un inventaire réemploi. Comme l'explique Vrijders et al., (2023), l'une des utilisations pertinentes du BIM pour l'EC est l'extraction automatique des données caractérisant les objets BIM. Connaissant l'importance des informations nécessaires au réemploi, leur mise en œuvre dans un logiciel

BIM faciliterait l'utilisation des modèles numériques BIM pour l'inventaire réemploi et favoriserait la réutilisation.

2.1.1. Opportunités du BIM pour la réalisation et la gestion d'un inventaire réemploi

En ce qui concerne la première hypothèse : **« l'utilisation d'une maquette numérique BIM permet de réaliser de manière plus efficace et plus structurée un inventaire réemploi dans le secteur de la construction »**, plusieurs éléments de réponse ont pu être recensés.

Premièrement, il n'y a aucune limitation concernant le nombre de paramètres qui peut être ajouté au BIM (Vrijders et al., 2023). L'une des principales opportunités du BIM par rapport au modèle classique d'inventaire que le chercheur a pu déterminer est que, grâce au BIM, un très grand nombre d'informations peuvent être stockées dans un modèle unique structuré de manière cohérente. À travers l'expérimentation, les nomenclatures sont définies comme une solution efficace pour gérer et structurer les informations. En effet, les nomenclatures permettent une gestion plus facile des éléments dans le modèle. En agissant comme un filtre, le chercheur choisit les éléments ou les informations qu'il veut voir apparaître, etc.

Cette manière de structurer et de filtrer les informations permet également d'anticiper et d'optimiser le stockage et le transport des éléments de réemploi. Le chercheur s'est appuyé sur les estimations de quantité et de volume générées par la maquette pour choisir les lieux de stockage les plus optimisés pour y entreposer les éléments. Par exemple, en déterminant la surface ou le volume total des éléments, il est possible d'estimer l'espace nécessaire pour stocker les éléments (de Roissart, 2022).

De plus, en intégrant les informations de démontage dans la maquette numérique, le chercheur a pu anticiper, avant le début du chantier, les types d'outils et le nombre de personnes nécessaires pour la déconstruction des éléments. Cela s'est avéré être efficace pour gagner du temps pendant le chantier et éviter de rencontrer de mauvaises surprises, telles que l'absence d'outils adéquats pour le démontage.

Comme énoncé précédemment, les inventaires réemploi et démolition (déchet) peuvent être réalisés soit en parallèle de manière distincte, soit de manière combinée. Dans ce dernier cas, le BIM apporte une plus-value pour lier les deux inventaires. Par exemple, si lors de l'évaluation du potentiel de réemploi, un élément se révèle non réemployable, il sera alors directement catégorisé comme déchet. Un autre exemple est le fait que l'on peut intégrer dans la maquette numérique le paramètre de toxicité. En filtrant les objets en fonction de ce paramètre, il devient plus facile d'éliminer les éléments qui ne peuvent pas être réemployés. L'identification des déchets dangereux lors de l'inventaire réemploi est important car elle permet d'évaluer les mesures de sécurité nécessaires pendant la déconstruction et d'identifier plus rapidement les éléments toxiques sur le chantier (de Roissart, 2022).

Un autre avantage du BIM observé lors de l'expérimentation est qu'une maquette numérique BIM permet d'obtenir une meilleure connaissance du bâtiment existant. Les informations relatives au réemploi peuvent être facilement associées aux éléments dans le modèle 3D, qui sont positionnés de manière exacte dans le bâtiment (de Roissart, 2022; Halbach, 2019). Cette méthode simplifie énormément la déconstruction en gagnant du temps sur chantier pour identifier correctement les différents éléments à démonter.

Concernant notre hypothèse secondaire, nous l'avons formulée comme suit : **« la manipulation de la maquette numérique permet de déterminer de manière efficace le potentiel de réemploi des matériaux de construction »**. Cette hypothèse a été vérifiée par la manipulation de la maquette numérique BIM réalisée par le chercheur. Cette manipulation a été effectuée avec Dynamo, en appliquant la méthode 3DR au modèle Revit. Il est important de noter que le chercheur n'a utilisé qu'une partie des possibilités qu'offre la méthode 3DR. L'objectif de cette partie de l'expérimentation était de définir de manière très

visuelle, le potentiel de réemploi des éléments. À travers la manipulation de la maquette, le chercheur cherche à rendre l'inventaire réemploi visuellement plus efficace, en facilitant l'identification des éléments qui nécessitent des efforts particuliers lors du chantier de déconstruction. Cette classification permet aux acteurs présents sur le chantier de prioriser leurs actions, optimisant ainsi le processus de déconstruction.

2.1.2. Limites du BIM pour la réalisation et la gestion d'un inventaire réemploi

Dans l'état de l'art, nous avons pu identifier le principal problème des logiciels BIM pour la déconstruction. Initialement, ces logiciels n'ont pas été conçus pour la déconstruction. Ils ont été créés pour optimiser le processus de conception et de construction (de Roissart, 2022; Vrijders et al., 2023). Ce problème engendre des limites telles que le manque de standardisation des outils BIM et la manque d'interopérabilité entre les outils numériques (Akbarieh et al., 2020; de Roissart, 2022; Vrijders et al., 2023).

L'absence de standardisation des objets BIM pour le domaine de la déconstruction a été rencontrée par le chercheur. Par exemple, la méthode employée par le chercheur pour modéliser les carrelages n'est pas adéquate, en particulier pour des projets de plus grande envergure. Une approche envisagée pour modéliser les carreaux était de les définir par des zones. Cependant, cette méthode ne correspondait pas à l'utilisation prévue de la maquette. Pour intégrer des informations dans la maquette et utiliser la méthode 3DR, il est essentiel que les éléments soient des objets BIM.

2.2. Le stockage des informations dans le modèle numérique BIM

Au fur et à mesure de la recherche, une question plus secondaire a été formulée : **« Comment stocker les informations nécessaires au réemploi dans le modèle numérique ? »**.

Le chercheur démontre à travers la méthode expérimentale que l'intégration des informations spécifiques au réemploi peut se faire de plusieurs manières. Certaines informations, à savoir, l'identification, les quantités, les dimensions, les volumes, les masses, la visualisation 3D et la localisation de l'élément dans le bâtiment sont déjà présentes dans le BIM, car elles sont liées directement aux objets BIM. D'autres informations telles que les informations de démontage, l'état et la destination future de l'élément doivent être ajoutées dans la maquette BIM. Ces informations sont définies par les paramètres de type ou les paramètres d'occurrence. La distinction entre type/occurrence dépend des paramètres spécifiques et des conventions de modélisation de chaque projet de déconstruction. Cette manière de gérer et de structurer l'information facilite l'inventaire et l'évaluation du potentiel de réemploi (Vrijders et al., 2023).

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le monde de la construction est en constante évolution. D'une part, la prise de conscience de l'impact environnemental de la construction suscite un intérêt croissant pour l'EC. En mettant l'accent sur le réemploi, il est possible de maintenir les éléments de construction au sein d'un cycle continu. D'autre part, les technologies numériques, telles que les logiciels BIM, se développent rapidement. Ces technologies ont prouvé leur efficacité pour faciliter la transition vers une EC. C'est pourquoi, tout au long de ce mémoire, nous avons décidé d'analyser les enjeux du BIM pour la réalisation et la gestion d'un inventaire réemploi.

Pour analyser de façon pertinente notre sujet, nous avons d'abord établi, sur base d'ouvrages et de revues scientifiques, un cadre théorique divisé en deux parties. La première partie nous a permis de définir ce qu'était l'économie circulaire (EC) et de comprendre l'importance d'un inventaire réemploi. La seconde partie s'est intéressée au BIM et à sa complémentarité avec l'inventaire réemploi. Sur la base de ces éléments théoriques et grâce à une méthodologie inductive, nous avons établi deux hypothèses de réponses qui ont orienté notre étude. Pour tenter de répondre à ces hypothèses, nous avons réalisé un inventaire de réemploi à l'aide d'un logiciel BIM dans le cadre d'une recherche expérimentale.

À travers nos deux hypothèses de recherche, nous avons analysé les enjeux de l'utilisation du BIM pour la réalisation et la gestion d'un inventaire réemploi. Nous avons constaté que les opportunités du BIM résident principalement dans sa capacité à centraliser et à structurer efficacement les informations. De plus, le BIM permet de faciliter l'évaluation du potentiel de réemploi des éléments de construction en manipulant la maquette numérique. Cependant, nous avons observé qu'il existait encore des limites pour que le BIM puisse être une véritable aide à la réalisation et la gestion d'un inventaire réemploi.

Il est important de préciser que la méthode expérimentale développée dans ce mémoire ne couvre pas toutes les opportunités du BIM pour la réalisation d'un inventaire réemploi. De plus, les résultats obtenus ne peuvent pas être généralisés à tous les chantiers de déconstruction. En effet, pour être en mesure de généraliser les résultats, la méthode qualitative devrait être accompagnée d'une méthode quantitative et le nombre de chantiers analysés devrait être beaucoup plus important. Néanmoins, les résultats permettent de mieux appréhender l'utilisation d'une maquette numérique BIM pour l'inventaire réemploi.

Une perspective consisterait à étudier les inventaires basés sur le BIM sur plusieurs chantiers de déconstruction à des échelles différentes. De plus, travailler avec tous les acteurs qui réalisent les inventaires réemploi permettrait de mieux comprendre leur besoin et les défis qu'ils rencontrent avec l'utilisation du BIM.

En conclusion, le BIM représente un potentiel pour la gestion, la structuration et le partage de l'information. Toutefois, on soulève encore le besoin d'une adaptabilité des logiciels BIM pour le réemploi, et plus particulièrement en ce qui concerne la réalisation des inventaires réemploi.

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : L'économie linéaire, le recyclage et l'économie circulaire (Vlaanderen Circulair, 2023).	11
Figure 2 : Le diagramme papillon : visualisation du métabolisme biologique et technique (Ellen MacArthur Foundation, 2020).	12
Figure 3 : Différence entre l'économie linéaire et l'économie circulaire propre au secteur de la construction (Durmisevic, 2019).	13
Figure 4 : Les trois principaux piliers de l'économie circulaire dans la construction (Romnée & Vrijders 2018).	14
Figure 5 : Le caractère linéaire du métabolisme urbain (Gobbo, 2021).	15
Figure 6 : L'urban mining selon une perspective circulaire (Gobbo, 2021).	16
Figure 7 : L'échelle d'analyse de « l'urban mining » (Gobbo, 2021)	17
Figure 8 : Représentation de la hiérarchie des déchets sur base de l'échelle de Lansink (1979) (Luxembourg Institute of Science and Technology, 2022).	18
Figure 9 : Les voies alternatives partant de l'action du détenteur jusqu'à la qualification de produit ou de déchet (Naval, 2021).	19
Figure 10 : Le diagramme papillon : visualisation du métabolisme technique (Ellen MacArthur Foundation, 2020).	21
Figure 11 : Les voies alternatives partant de l'action du détenteur jusqu'à la qualification de produit ou déchet (Naval, 2021).	22
Figure 12 : Les voies alternatives partant de l'action du détenteur jusqu'à la qualification de produit ou déchet (Naval, 2021).	24
Figure 13 : Les différentes approches du réemploi (image issue du webinar « Réemploi et construction » par Susie Naval, le 24 juin 2020).	25
Figure 14 : L'impact du recyclage et du réemploi sur les modules du cycle de vie (Douguet & Wagner, 2021).	26
Figure 15 : Déconstruction vs démolition (Ghyoot et al., 2018).	27
Figure 16 : Les deux types d'inventaires dans le domaine de la construction (Buildwise, 2022).	34
Figure 17 : Pourcentage de composants et de produits identifiés dans un bâtiment ayant un potentiel de réemploi par différents acteurs de la construction (Wassink, 2016).	37
Figure 18 : Schéma illustrant quand réaliser l'inventaire démolition et l'inventaire réemploi (Bruxelles Environnement, 2023).	38
Figure 19 : Schéma illustrant la différence entre un processus de construction classique et un processus de construction BIM (Celnik et al., 2016).	40
Figure 20 : Schéma des documents BIM selon la forme de contrat (Euben & Boeykens, 2019).	42
Figure 21 : Exemple de maquette numérique renseignée (De Maestri, 2017).	43
Figure 22 : Les différents niveaux de développement (LOD) (Akbarieh et al., 2020).	44
Figure 23 : Les dimensions de la modélisation des données du bâtiment (BIM) (Akbarieh et al., 2020).	46
Figure 24 : schéma du flux d'information entre la base de données BIM, la plateforme de vente et le nouveau projet incorporant l'élément de réemploi (de Roissart, 2022).	48
Figure 25 : Temporalité de la recherche.....	60
Figure 26 : Script Dynamo pour appliquer le code couleur avec la méthode 3DR (image provenant du fichier Revit du chercheur).	61
Figure 27 : Modélisation du rez-de-chaussée	64
Figure 28 : Modélisation du premier étage.....	65
Figure 29 : Modélisation des portes dans le modèle Revit	66
Figure 30 : Nomenclature des portes dans le modèle Revit	67

Figure 31 : Modélisation des carrelages dans le modèle Revit	68
Figure 32 : Nomenclature des carrelages dans le modèle Revit	69
Figure 33 : Modélisation des plinthes dans le modèle Revit	70
Figure 34 : Nomenclature des plinthes dans le modèle Revit	71
Figure 35 : Modélisation de la baignoire dans le modèle Revit.....	71
Figure 36 : Nomenclature des appareils sanitaires dans le modèle Revit	72
Figure 37 : Modélisation du seuil de fenêtre dans le modèle Revit	72
Figure 38 : Nomenclature des seuils de fenêtres dans Revit.....	73
Figure 39 : Visualisation du rez-de-chaussée avec le code couleur.....	74
Figure 40 : Visualisation du premier étage avec le code couleur	74
Figure 41 : Visualisation des portes avec leur code couleur dans le modèle Revit	75
Figure 42 : Visualisation du carrelage B1 avec leur code couleur dans le modèle Revit	76
Figure 43 : Visualisation du carrelage B2 avec leur code couleur dans le modèle numérique.....	76
Figure 44 : Visualisation du carrelage B3 avec leur code couleur dans le modèle Revit	77
Figure 45 : Visualisation des carrelages B4 avec leur code couleur dans le modèle Revit	77
Figure 46 : Visualisation des plinthes C1 avec leur code couleur dans le modèle Revit.....	78
Figure 47 : Visualisation des plinthes C2 avec leur code couleur dans le modèle Revit.....	78
Figure 48 : Visualisation du radiateur D1 avec code couleur dans le modèle Revit	79
Figure 49 : Visualisation de la baignoire E3 avec code couleur dans le modèle Revit	80
Figure 50 : Visualisation du seuil F1 avec code couleur dans le modèle Revit	80
Figure 51 : Démontage du carrelage B4.....	82
Figure 52 : Démontage du carrelage B2.....	82
Figure 53 : Démontage du carrelage B1.....	82
Figure 54 : Démontage des plinthes C1	82
Figure 55 : Démontage des portes du rez-de-chaussée	83
Figure 56 : Photo après le démontage des portes du rez-de-chaussée	83
Figure 57 : Stockage des portes lors du chantier de déconstruction	83
Figure 58 : Photo après démontage du seuil en pierre F1	83
Figure 59 : Photo avant démontage du seuil de fenêtre en pierre F1.....	83
Figure 60 : Photo de la baignoire E3 réinstaller	84
Figure 61 : Photo avant démontage de la baignoire E3	84
Figure 62 : Seuil en pierre réinstaller par l'entrepreneur dans le chantier de rénovation.....	84
Figure 63 : Seuil en pierre avant démontage par l'entrepreneur	84
Figure 64 : Modèle d'inventaire réemploi : Données de base (Smeyers et al., 2022)	98
Figure 65 : Modèle d'inventaire réemploi : fiche d'élément (Smeyers et al., 2022).....	99
Figure 66 : Modèle d'inventaire réemploi (CRTI-B, 2022).	100
Figure 67 : Modèle d'inventaire réemploi (Amand & Mekhalfa, 2019).....	101
Figure 68 : Vue aérienne « rue du Rouanda, 10 Etterbeek ».....	103
Figure 69 : Plan de démolition du rez de chaussée.....	104
Figure 70 : Plan de démolition du 1er étage	105
Figure 71 : Plan de rénovation du rez de chaussée.....	106
Figure 72 : Plan de rénovation du 1er étage	107
Figure 73 : Cartographie générale de la modélisation	109
Figure 74 : Inventaire réemploi réalisé par le chercheur lors de l'étape 1 de la méthode expérimentale	114
Figure 75 : Tableau Excel « Disasemnl Index Tools (DIt) » réalisé par le chercheur.	115
Figure 76 : Tableau Excel « Disasemnl Index Move (DIIm) » réalisé par le chercheur.	115
Figure 77 : Tableau Excel « Resilience Index (Ri) » réalisé par le chercheur.	115

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Les informations que doit contenir un inventaire réemploi (réalisé par le chercheur sur base de la littérature).....	35
Tableau 2 : Tableau des différents acteurs qui peuvent mener un inventaire réemploi avec les divers avantages et inconvénients ainsi que des recommandations (Bruxelles Environnement, 2023).	36
Tableau 3 : Liste des paramètres liés aux éléments de construction (Vrijders et al., 2023).	51
Tableau 4 : Tableau détaillant les variables utilisées pour la méthode 3DR (réalisé par le chercheur sur base de O’Grady et al., (2021)).	53
Tableau 5 : Tableau comprenant les différentes valeurs DIt, DIIm, Ri des éléments (réalisé par le chercheur)	62
Tableau 6 : « Disassemble Intdex Tools » (DIt) des portes A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7	75
Tableau 7 : « Disassemble index move » (DIIm) des portes A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7.....	75
Tableau 8 : « Resilience index » (Ri) des portes A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7	76
Tableau 9 : « Disassemble Intdex Tools » (DIt) des carrelages B1,B2,B3 et B4.....	78
Tableau 10 : « Disassemble index move » (DIIm) des carrelages B1,B2,B3 et B4.....	78
Tableau 11 : « Resilience index » (Ri) des carrelages B1,B2,B3 et B4	78
Tableau 12 : « Disassemble Intdex Tools » (DIt) des plinthes C1 et C2	79
Tableau 13 : « Disassemble index move » (DIIm) des plinthes C1 et C2.....	79
Tableau 14 : « Resilience index » (Ri) des plinthes C1 et C2	79
Tableau 15 : « Disassemble Intdex Tools » (DIt) des appareils sanitaires D1 et E3	80
Tableau 16 : « Disassemble index move » (DIIm) des appareils sanitaires D1 et E3.....	80
Tableau 17 : « Resilience index » (Ri) des appareils sanitaires D1 et E3	80
Tableau 18 : « Disassemble Intdex Tools » (DIt) du seuil F1.....	81
Tableau 19 : « Disassemble index move » (DIIm) du seuil F1 avec code couleur dans le modèle Revit ..	81
Tableau 20 : « Resilience index » (Ri) du seuil F1 avec code couleur dans le modèle Revit	81
Tableau 21 : Paramètres à extraire pour l'exploitation réalisé par le chercheur	111
Tableau 22 : Tableau des informations à intégrer en fonction des paramètres de types ou des paramètres d'occurrences (réalisé par le chercheur sur base de Vrijders et al., (2023)).	112

LISTE DES ÉQUATIONS

Équation 1 : Équation déterminant la valeur de DI (O’Grady et al., 2021).	52
Équation 2 : Équation déterminant la valeur de DE (O’Grady et al., 2021).	52
Équation 3 : Équation déterminant la valeur de R (O’Grady et al., 2021).....	52
Équation 4 : Équation déterminant l’indice de circularité 3DR (O’Grady et al., 2021).	52

BIBLIOGRAPHIE

- Ajayi, S. O., et al., (2016).** Reducing waste to landfill : A need for cultural change in the UK construction industry. *Journal of Building Engineering*, 5, 185-193.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2015.12.007>
- Akbarieh, A., et al., (2020).** BIM-Based End-of-Lifecycle Decision Making and Digital Deconstruction : Literature Review. *Sustainability*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/su12072670>
- Autodesk. (2024a).** Aide | Concepts de base de Revit.
<https://help.autodesk.com/view/RVT/2023/FRA/?guid=GUID-D8835F8E-1330-4DBC-8A55-AF5941056C58>
- Autodesk. (2024b).** Aide | Dynamo pour Revit.
https://help.autodesk.com/view/RVT/2025/FRA/?guid=RevitDynamo_Dynamo_for_Revit_html
- Aziminezhad, M., & Taherkhani, R. (2023).** BIM for deconstruction : A review and bibliometric analysis. *Journal of Building Engineering*, 73, 106683. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106683>
- Barison, M. B., & Santos, E. T. (2010).** An overview of BIM specialists. *Nottingham University Press*.
- Bedrick, J., & Reinhardt, J. (2023).** Level of Development (LOD) Specification – Part I. BIMForum.
<https://bimforum.org/resource/lod-level-of-development-lod-specification/>
- Buildwise. (2022).** Faire un inventaire : Le premier pas pour l'économie circulaire avant la démolition.
- Buildwise. (2023a).** Protocole de déconstruction pour la région de Bruxelles-Capitale. Préparation et réalisation de l'inventaire de déconstruction et des travaux de démolition en vue d'obtenir des flux de déchets (inertes) de haute qualité pour le recyclage.
https://www.buildwise.be/media/iakklkhi/protocole-de-deconstruction-pour-la-region-de-bruxelles-capitale_fr.pdf
- Buildwise. (2023b).** Qu'est-ce que le BIM, pourquoi s'y intéresser ? Buildwise.
<https://www.buildwise.be/fr/themes/le-numerique-dans-la-construction/bim/comprendre-le-bim/quest-ce-que-le-bim-pourquoi-s-y-interesser/>
- Cai, G., & Waldmann, D. (2019).** A material and component bank to facilitate material recycling and component reuse for a sustainable construction : Concept and preliminary study. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21(10), 2015-2032. <https://doi.org/10.1007/s10098-019-01758-1>
- Celnik, O., et al., (2016).** BIM et maquette numérique pour l'architecture, le bâtiment et la construction. EYROLLES.
- Charef, R., Alaka, H., & Emmitt, S. (2018).** Beyond the third dimension of BIM : A systematic review of literature and assessment of professional views. *Journal of Building Engineering*, 19, 242-257.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.04.028>
- Chatterton, S. (2018).** Les dimensions du BIM. LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/dimensions-bim-scott-chatterton/>
- Cottafava, D., Ritzen, M., & van Oorschot, J. (2020).** Driving decarbonization of the EU building stock by enhancing a consumer centered and locally based circular renovation process. *Zuyd University of Applied Sciences, SURD*.
- Crowther, P. (2005).** Design for disassembly—Themes and principles. Environment Design Guide.
<https://eprints.qut.edu.au/2888/1/Crowther-RAIA-2005.PDF>
- CRTI-B. (2022).** Projet de CTG. 003. Déconstruction et démolition. <https://www.crtib.lu/fr/construction-durable/projet-ctg-deconstruction-demolition>
- De Maestri, A. (2017).** Premiers pas en BIM : L'essentiel en 100 pages. Eyrolles.

- De Wolf, C., Çetin, S., & Bocken, N. M. P. (Éds.). (2024).** *A Circular Built Environment in the Digital Age*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-39675-5>
- Delcourt, E., Romnée, A., & Lahaye, J.-P. (2018).** L'économie circulaire dans le secteur de la construction. *Revue Scientifique des Ingénieurs Industriels*, 32, 15.
- Densley Tingley, D., & Davison, B. (2012).** Developing an LCA methodology to account for the environmental benefits of design for deconstruction. *Building and Environment*, 57, 387-395. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.06.005>
- de Roissart, E. (2022).** Et si le BIM permettait de démolir de manière plus circulaire ? *Buildwise (anciennement CSTC)*.
- de Roissart, E., & Poncelet, F. (2021).** *Formation bâtiment Durable. Inventaire de démolition et de réemploi : Théorie et application pratique*. Buildwise (anciennement CSTC). https://environnement.brussels/sites/default/files/user_files/f08_ecin_211130_1_1_demo_fr.pdf
- Douguet, E., & Wagner, F. (2021).** *Les impacts environnementaux du réemploi dans le secteur de la construction*. FutuREuse. https://opalis.eu/sites/default/files/2022-02/FCRBE-booklet-01-environmental_impact-FR.pdf
- Eastman, C., et al., (2008).** *BIM handbook : A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors*. John Wiley & Sons, Inc.
- Ellen MacArthur Foundation. (2020).** *Built environment and the circular economy*. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/built-environment/overview>
- Ellen MacArthur Foundation. (2020).** *Circular economy introduction*. <https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>
- Ellen MacArthur Foundation (Réalisateur). (2020).** *Ellen MacArthur on the basics of the circular economy* [Enregistrement vidéo]. <https://www.youtube.com/watch?v=NBEvJwTxs4w>
- Euben, C., & Boeykens, S. (2019).** *Protocole BIM belge. Protocole de référence national pour les bâtiments*. Buildwise (anciennement CSTC).
- European Commission. (2012).** *Guidance on the interpretation of key provisions of Directive 2008/98/EC on waste*. https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/framework/guidance_doc.pdf
- European Commission. (2017).** *Le rôle de la valorisation énergétique des déchets dans l'économie circulaire*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52017DC0034&from=FR>
- F3DF. (2019).** LE PRINCIPE DE LA NOMENCLATURE SUR REVIT ? *F3DF*. <https://www.f3df.com/le-principe-de-la-nomenclature-sur-revit/>
- Fénard, G. (2021).** *Mémoire de fin d'études : « Conception circulaire et réemploi en architecture, expertises et acteurs : Le rôle du valoriste »*. 98.
- Ghyoot, M., et al., (2018).** *Déconstruction et réemploi—Comment faire circuler les éléments de construction*. Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Gobbo, E. (2015).** *Déchets de construction, matières à conception : Analyse des stocks et flux de matières dans le cadre des opérations de rénovation énergétique en Région de Bruxelles-Capitale* [Thèse, UCL- Université Catholique de Louvain]. <https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/fr/object/boreal%3A167680>
- Gobbo, E. (2021a).** *Construire une feuille de route. Stratégie pour encourager le réemploi dans le secteur de la construction*. FCRBE. https://opalis.eu/sites/default/files/2022-02/FCRBE-booklet-05-build_roadmap-FR.pdf

- Gobbo, E. (2021b).** *La ville comme réserve de matériaux. Comprendre les études de gisement urbain.* FCRBE. https://opalis.eu/sites/default/files/2022-02/FCRBE-booklet-06-urban_stocks-FR.pdf
- Gobbo, E., Trachte, S., & Massart, C. (2019).** Energy retrofit scenarios : Material flows and circularity. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 225, 012029. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012029>
- Göswein, V., et al., (2019).** Dynamic Assessment of Construction Materials in Urban Building Stocks : A Critical Review. *Environmental Science & Technology*, 53(17), 9992-10006. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01952>
- Groat, L. N., & Wang, D. (2013).** *Architectural Research Methods—Second Edition.* John Wiley & Sons, Inc.
- Guldager Jensen, K., & Sommer, J. (2016).** *Building A Circular Future.* The Danish Architectural Press. <https://issuu.com/3xnarchitects/docs/buildingacircularfuture/283>
- Halbach, A. (2019).** Mémoire de fin d'études : « Le BIM as-built comme outil d'aide à la décision entre démolition ou déconstruction ? » *Université de Liège.*
- Halbach, A., & de Boissieu, A. (2022).** *Quel écosystème de données pour un passeport matériau BIM ? Revue de la littérature et perspectives pour de futures recherches.* Ecosystème numérique, Paris, France. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/294705>
- Halbach, A., & Trachte, S. (2024).** *Passeport Matériau. Quelles données à intégrer pour en faire un réel support au réemploi ? [Paper presentation]* (Dialogue URA #04). Faculté d'architecture.
- Honic, M., Magalhães, P. M., & Van Den Bosch, P. (2024).** From Data Templates to Material Passports and Digital Product Passports. In C. De Wolf, S. Çetin, & N. M. P. Bocken (Éds.), *A Circular Built Environment in the Digital Age* (p. 79-94). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-39675-5_5
- Institut américain des architectes. (2013).** *Guide, Instructions and Commentary to the 2013 AIA Digital Practice Documents.*
- Koutamanis, A. (2024).** From Building Information Modelling to Digital Twins : Digital Representation for a Circular Economy. In C. De Wolf, S. Çetin, & N. M. P. Bocken (Éds.), *A Circular Built Environment in the Digital Age* (p. 3-20). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-39675-5_1
- Lejeune, C. (2019).** *Manuel d'analyse qualitative. Analyser sans compter ni classer.* (2e édition). De Boeck Supérieur.
- Lockrey, S., et al., (2018).** Concrete recycling life cycle flows and performance from construction and demolition waste in Hanoi. *Journal of Cleaner Production*, 179, 593-604. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.271>
- Madaster. (2021).** *Madaster Circularity Indicator Explained.*
- McDonough, W., & Braungart, M. (2011).** *Cradle to Cradle. Créer et recycler à l'infini* (A. Maillard, Trad.). Editions Alternatives.
- McDonough, W., & Braungart, M. (2013).** *The upcycle. Beyond sustainability-designing for abundance.* North Point Press.
- Naval, S. (2021).** *Produit ou déchet ? Critères pour le réemploi.* FCRBE. https://opalis.eu/sites/default/files/2022-02/FCRBE-booklet-04-Product_waste-FR.pdf
- Naval, S. (2020).** *Réemploi et construction* [Webinaire]. https://economiecirculaire.wallonie.be/sites/default/files/documents/ROTOR_WebinaireReemploi_juin2020_0.pdf.

- O'Grady, T., et al., (2021). Design for disassembly, deconstruction and resilience : A circular economy index for the built environment. *Resources, Conservation and Recycling*, 175, 105847. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105847>
- Rollot, M., & Rebois, D. (2014). Upcycler l'urbain : Quelles opportunités en jeu ? In MétisPresses (Éd.), *Recycler l'urbain. Pour une écologie des milieux habités*. <https://hal.science/hal-01851269>
- Romnée, A., & Vrijders, J. (2018). *Vers une économie circulaire dans la construction. Introduction aux principes de l'économie circulaire dans le secteur de la construction*. Buildwise (anciennement CSTC).
- Rose, C. M., & Stegemann, J. A. (2019). Characterising existing buildings as material banks (E-BAMB) to enable component reuse. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability*, 172(3), 129-140. <https://doi.org/10.1680/jensu.17.00074>
- Scribbr. (s. d.). *Méthodologie*. Scribbr. Consulté 16 juillet 2024, à l'adresse <https://www.scribbr.fr/category/methodologie/>
- Simion, I. M., et al., (2013). Ecological footprint applied in the assessment of construction and demolition waste integrated management. *Environmental Engineering and Management Journal*, 12(4), 779-788. <https://doi.org/10.30638/eemj.2013.097>
- Smeyers, T., Deweerdt, M., & Martens, M. (2022). *L'inventaire réemploi. Un guide pour l'identification du potentiel de réemploi des produits de construction avant la démolition*. FCRBE Interreg.
- United Nations. (2018). *The World's Cities in 2018: Vol. Data Booklet (ST/ESA/SER.A/417)*. UN. <https://doi.org/10.18356/8519891f-en>
- Vandenbergh, T. (2018). *BIM getuigenissen—Témoignages BIM (Buildwise) [Entretien]*. <https://www.youtube.com/watch?v=47t3CcCn0LY>
- Vlaanderen Circulair. (2023). *Wat en waarom? - Vlaanderen Circulair*. <https://vlaanderen-circulair.be/nl/onze-aanpak/wat-en-waarom>
- Vrijders, J., et al., (2023). *Digital tools for Reuse. Linking reuse and contemporary trends in the construction industry*. Interreg North-West Europe FCRBE.
- Wallonie Service Public SPW. (2023). *Législation/Déchets/Catégories de déchets/Catalogue*. <http://environnement.wallonie.be/legis/dechets/decat026.htm>
- Wassink Dirk. (2016). *Salvage Assessments in Seattle: Reflecting on a Policy Tool to Increase Building Material Recovery*. Decon'16. Seeding New Growth, Raleigh, du 29.02 au 02.03.2016.

INVENTAIRE RÉEMPLOI

FICHE D'ÉLÉMENT

Identification de l'élément

numéro ID
Nom de l'élément

photos complémentaires

Données éléments

Données contextuelles

Données concernant l'assemblage

Bénéfices environnementaux

Substances dangereuses

la boîte peut contenir : une mise en garde explicite sur

Vert : l'élément a été testé et ne contient pas de substance dangereuse
Rouge : l'élément a été testé et contient une substance dangereuse mais peut éventuellement être réutilisé après traitement
Gris : l'élément n'a pas été testé mais l'auditeur a voulu mettre en évidence un danger potentiel
Blanc : l'élément n'a pas été testé et l'auditeur ne souhaite pas mettre en évidence un danger potentiel

DEFAULT - l'élément n'a pas été testé et l'auditeur ne souhaite pas mettre en évidence un danger potentiel

Documents additionnels

Applications suggérées

Autre

Potentiel de réutilisation identifié : conclusion provisoire

Figure 65 : Modèle d'inventaire réemploi : fiche d'élément (Smeyers et al., 2022)

PIÈCES DE VIE (SALON, CHAMBRES, BUREAU, COULOIR)

Élément							
Photos							
Taille et quantité							
Mode de fixation							
Type / Marque / Info techniques							
Âge / Données historiques							
État général							
Votre première intention							

Figure 67 : Modèle d'inventaire réemploi (Amand & Mekhalfa, 2019)



Université de Liège - faculté d'Architecture

PROTOCOLE BIM

Le BIM en tant que support à la réalisation et la gestion d'un inventaire réemploi

Travail de fin d'études présenté par Charles PAREE en vue de l'obtention du grade de Master
en Architecture

Sous la direction de : Aurélie DE BOISSIEU & Amélie HALBACH
Année académique 2023-2024
Axe de recherche : Culture numérique

1. Contexte et objectif

Les objectifs BIM consistent en :

- la production d'un inventaire réemploi BIM,
- l'exploitation de la maquette numérique pour évaluer le potentiel de réemploi des éléments de construction,
- l'exploitation de la maquette numérique sur chantier.

1.1. Contexte : Le projet

Le bâtiment à analyser, modéliser et exploiter est une « maison bruxelloise » située rue du Rouanda à Etterbeek en Belgique (figure 68).



Figure 68 : Vue aérienne « rue du Rouanda, 10 Etterbeek »

Cette maison bruxelloise va subir différentes transformations intérieures dans le cadre d'une rénovation. L'enjeu principal est de récolter un maximum d'informations sur les éléments de construction situés dans la zone de transformation afin d'évaluer leur potentiel de réemploi. Les informations récoltées seront ensuite importées dans un inventaire qui prend la forme d'un modèle numérique préalablement modélisé. Il sera ensuite question d'exploiter la maquette numérique dans le cadre de la déconstruction et de la rénovation.

Afin de mieux comprendre la transformation prévue pour le bâtiment, la figure 69 et la figure 70 présentent les plans de démolition. La figure 71 et la figure 72 présentent les plans de rénovation.

1.1.1. Situation existante : plan de démolition

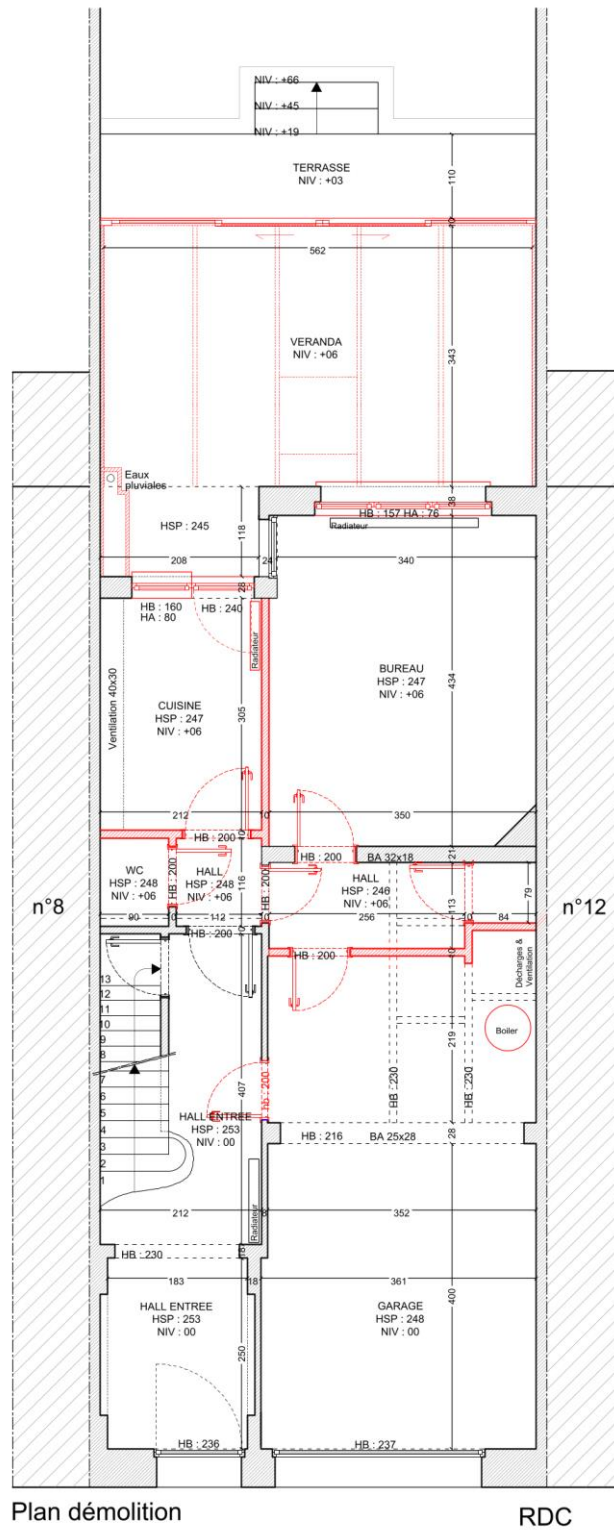


Figure 69 : Plan de démolition du rez de chaussée

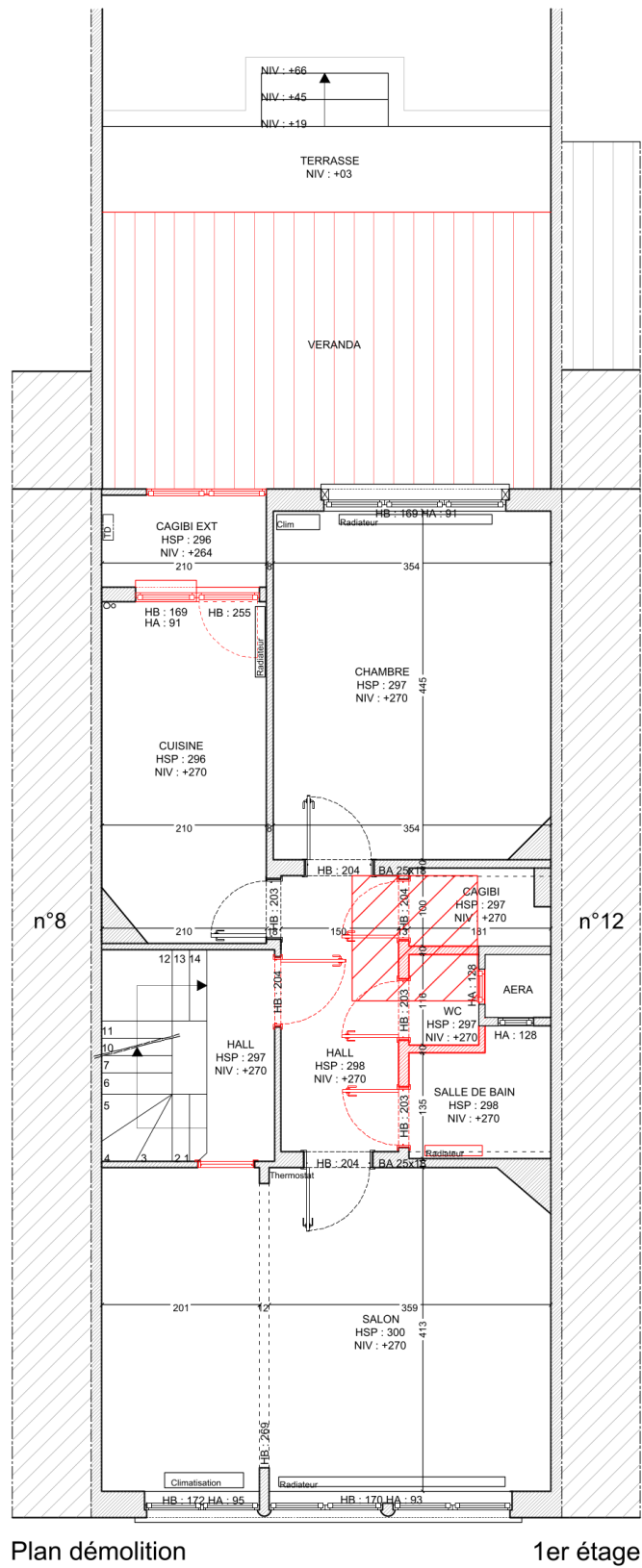


Figure 70 : Plan de démolition du 1er étage

1.1.2. Situation projetée : plan de rénovation

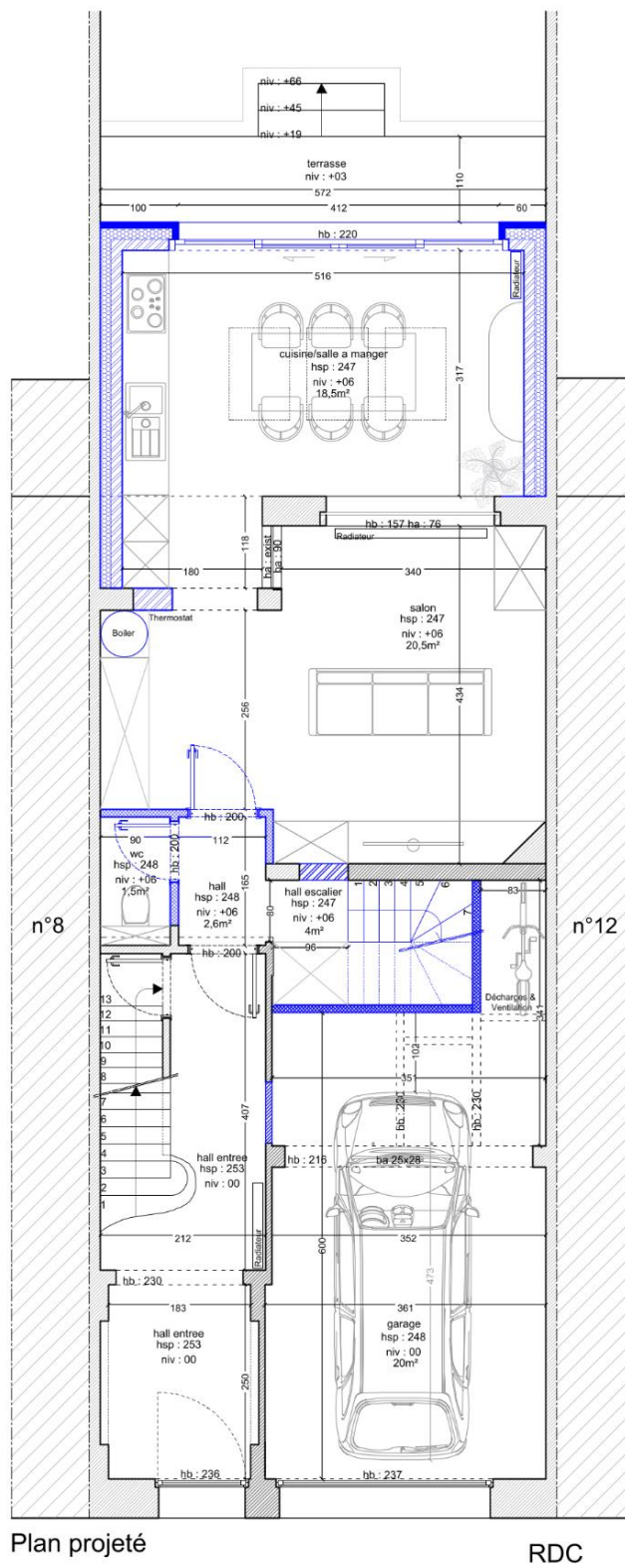


Figure 71 : Plan de rénovation du rez de chaussée

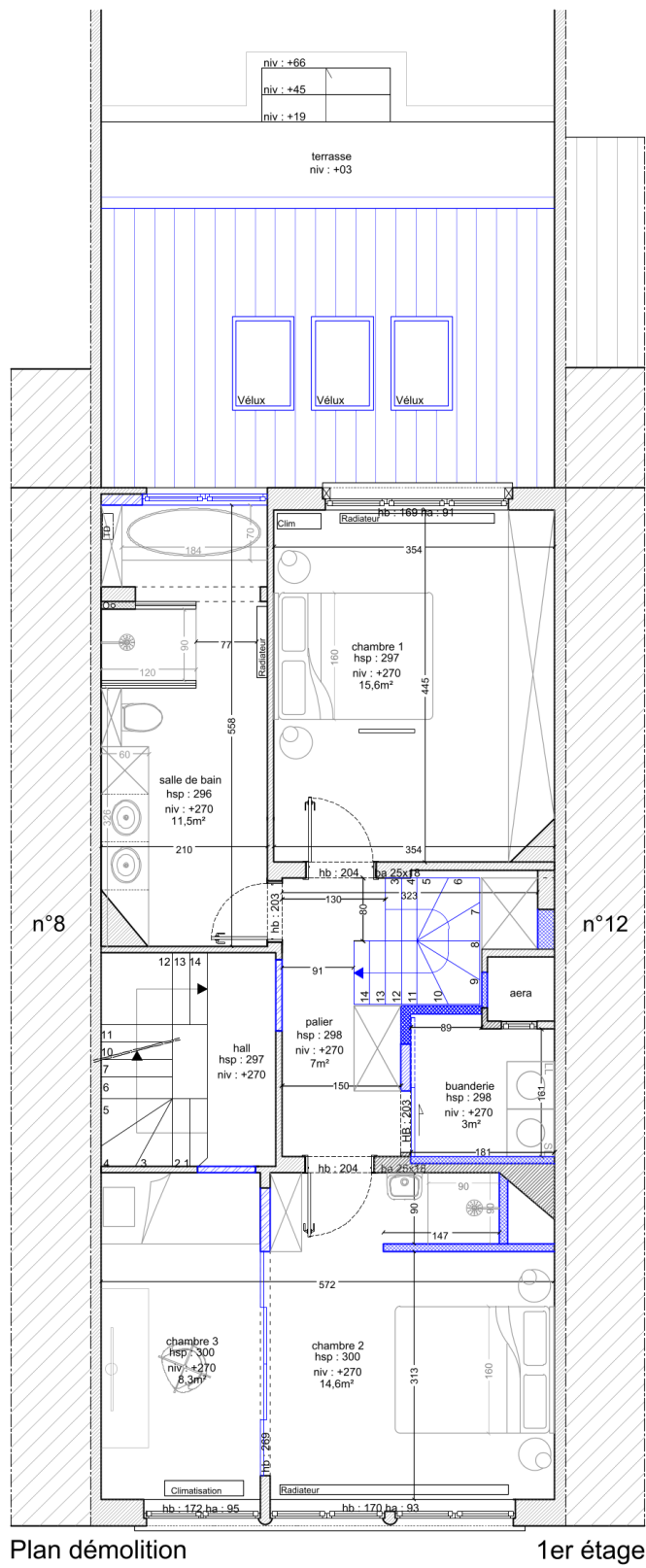


Figure 72 : Plan de rénovation du 1er étage

1.2. Objectifs

À l'échelle du projet, notre préoccupation sera concentrée sur deux niveaux du bâtiment, à savoir le rez-de-chaussée et le premier étage. Les exigences sont les suivantes :

- La modélisation des deux niveaux du bâtiment, y compris :
 - l'enveloppe extérieure,
 - structure intérieure (murs porteurs & plancher intermédiaire),
 - cloisonnement intérieur,
 - finitions intérieures,
 - mobilier fixe,
 - ne seront pas compris : les fenêtres extérieures.
- Définir le potentiel de réemploi de chaque élément de construction par l'intégration de données et par l'exploitation de la maquette numérique.
- L'exploitation de la maquette modélisée du bâtiment.
 - Définir le potentiel de réemploi des éléments.
 - Code couleur : rouge (impossible à réemployer) ; jaune (difficilement réemployable) ; vert (facilement réemployable)
 - La planification du chantier de déconstruction
 - préparation du matériel nécessaire à la déconstruction,
 - stockage « in situ » des éléments récupérés,
 - (le choix du transport des éléments qui seront potentiellement vendus).

1.3. Parties prenantes

Le présent protocole concerne deux parties prenantes principales, à savoir, des interlocuteurs et l'auteur du mémoire.

1.3.1. Interlocuteurs

- Maitres de l'ouvrage : Mathilde Parée et Barbara Vandercam. Elles sont les guides pour toutes les questions relatives à la mission de rénovation ;
- Promotrice : Aurélie de Boissieu, spécialiste en management BIM. Elle est la guide pour toutes les questions relatives à la modélisation de la maquette numérique et à l'organisation BIM ;
- Co-promotrice : Amélie Halbach.

1.3.2. Le chercheur

- Charles Parée

2. Processus BIM – Modélisation générale

2.1. Processus de modélisation générale

Le processus général (figure 73) s'organise en **trois parties principales**, à savoir :

- Les données de référence (INPUT),
- Le processus, qui reprend le traitement et l'exploitation de ces données ;
 - Intégration des plans qui serviront de base au processus de modélisation ;
 - Intégration des données à échanger (informations réemploi) dans la maquette numérique ;
 - Associer les données de réemploi préalablement établies à chaque élément correspondant ;
- Les informations produites (OUTPUT)

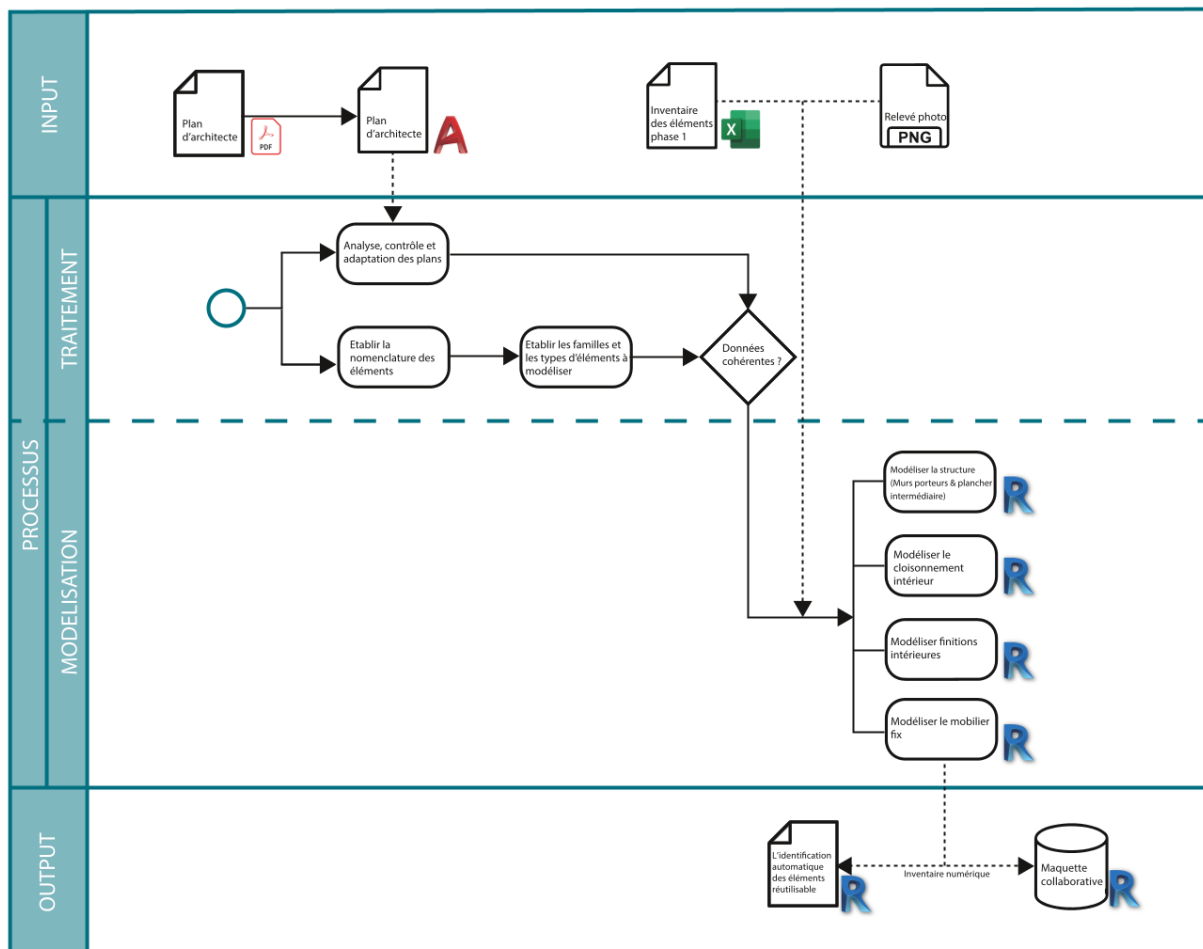


Figure 73 : Cartographie générale de la modélisation

Les données de référence (*Input*) sont issues des plans de la situation existante fournis par l'architecte aux maîtres de l'ouvrage. Ces plans permettent une première visualisation des éléments qui vont être déconstruits lors des travaux. Les plans servent de base pour la réalisation de la maquette numérique et sont liés directement au modèle.

La première étape consiste à répertorier de manière classique les éléments qui vont être démontés. Tout d'abord, un relevé photo permet une première vision des éléments présents dans les zones de travaux. Ensuite, nous répertorions les éléments identifiés dans un fichier Excel sous la forme d'un tableau (voir Annexe 3 : Inventaire réemploi (Étape 1 : Inventorisation des éléments de réemploi sur le site)).

De plus, il faut assurer la cohérence entre les éléments à modéliser et la nomenclature mise en place en vue de répondre aux objectifs de l'exploitation de la maquette. La première phase de l'inventaire (fichier Excel) fournit une liste des éléments à modéliser avec un numéro d'identification qui permet d'identifier les éléments dans les deux structures (Excel & BIM).

Ensuite, le chercheur modélise chaque élément préalablement répertorié dans le modèle BIM.

Les informations échangées (*Output*) comprennent tous les éléments réutilisables associés aux informations nécessaires pour leur réutilisation. De plus, la manière dont les informations sont intégrées dans le modèle est définie à la fin de ce protocole.

2.2. Définition et répartition de la modélisation

Dans le but de démarrer la modélisation, il est nécessaire de préparer ce travail par l'analyse et la modification des plans fournis par l'architecte afin qu'ils soient cohérents avec le bâtiment existant afin que la modélisation soit fiable à la réalité.

2.2.1. Appropriation et adaptation des données

La modélisation se fait sur base des documents graphiques fournis par l'architecte, qui comprennent :

- les plans de la situation existante

Et sur base de l'inventaire qui fournit une liste des éléments à modéliser :

- Tableau Excel (voir Annexe 3 : Inventaire réemploi (Étape 1 : Inventorisation des éléments de réemploi sur le site)).

Si certaines incohérences apparaissent entre les plans d'architecte et la situation réelle du bâtiment, le choix est donc posé sur la situation réelle de la maison. Les plans *dwg* des différents niveaux ont été liés sur Revit et servent de base pour la modélisation.

2.2.2. Organisation du travail de modélisation

Voici la liste par ordre de modélisation des différents éléments à modéliser ;

- Les éléments structurels :
 - structure intérieure (murs porteurs & plancher intermédiaire),
 - cloisonnement intérieur.
- Les éléments à modéliser fournis par l'inventaire de la phase 1 :
 - finitions intérieures,
 - mobilier fixe,
 - autres éléments divers.

2.2.3. Création sur revit

Une fois le tableau rempli, toutes les données nécessaires à la modélisation des objets BIM sont prêtes à être créées sur Revit. Les paramètres pourront être ajoutés lors de la création des objets tels que :

- paramètres de géométrie : non modifiables, intrinsèques à Revit, liés aux dimensions réelles de l'élément,
- paramètres de type : modifiables, à entrer lors de la création de la famille ou du type,
- paramètres occurrence : modifiables pour chaque élément individuel.

3. Processus BIM – Les informations à échanger

Le tableau 21 comprend les informations qui seront utilisées lors de l'exploitation de la maquette. Pour chaque objet, il reprend les informations à intégrer dans le modèle.

Tableau 21 : Paramètres à extraire pour l'exploitation réalisé par le chercheur

Paramètres		Objets					
		Portes	Carrelages	Plinthes	Radiateurs	Baignoire	Seuil de fenêtre
Note d'identification		x	x	x	x	x	x
Propriétés géométriques	Quantité	x	x	x	x	x	x
	Hauteur (m)	x	x	x	x	x	x
	Largeur/épaisseur (m)	x	x	x	x	x	x
	Longueur (m)	x	x	x	x	x	x
	Volume	x	x	x	x	x	x
	Masse	x	x	x			x
	Profondeur					x	
État							
Informations de démontage	La facilité de l'élément à être démonté	x	x	x	x	x	x
	La facilité de réinstallation	x	x	x	x	x	x
	La facilité de stockage	x	x	x	x	x	x
	Destination potentielle	x	x	x	x	x	x
Description supplémentaire	Présence d'une bouche d'aération	x					
Niveau		x	x	x	x	x	x
Image (photo)		x	x	x	x	x	x


3.1. Choix des paramètres

Il s'agit de choisir les paramètres de type ou les paramètres d'occurrence en fonction des besoins. Pour ce faire, il s'agira de choisir les paramètres de types ou les paramètres d'occurrence en fonction des données à échanger (tableau 22).

Tableau 22 : Tableau des informations à intégrer en fonction des paramètres de types ou des paramètres d'occurrences (réalisé par le chercheur sur base de Vrijders et al., (2023)).

Les données de base	Paramètre de type/ paramètre d'occurrence	Remarque
L'identification de l'élément	Occurrence	L'identifiant unique du logiciel peut être utilisé pour identifier les objets / un paramètre peut-être ajouté au niveau de l'occurrence si nécessaire Si une identification est nécessaire pour tous les éléments d'un même type, alors elle doit être ajoutée en tant que paramètre de type
Visualisation 2D et 3D	Occurrence	
Quantité	Type	Calculé en comptant le nombre d'éléments d'un type donné
Dimension	Type/Occurrence	Si tous les éléments d'un même type ont la même valeur → Type Si tous les éléments d'un même type peuvent varier → Occurrence
Volume	Type/Occurrence	Si tous les éléments d'un même type ont la même valeur → Type Si tous les éléments d'un même type peuvent varier → Occurrence
Masse	Type/Occurrence	Si tous les éléments d'un même type ont la même valeur → Type Si tous les éléments d'un même type peuvent varier → Occurrence
Localisation in situ	Occurrence	Peut-être extrait du modèle
La capacité d'un élément à conserver ses propriétés esthétiques (État de l'élément)	Type/Occurrence	État commun : Un état partagé par tous les éléments d'un même type → type État propre : Un état spécifique à un élément individuel, qui peut déferer de l'état commun des autres éléments du même type → occurrence
La facilité d'un élément à être démo	Type/Occurrence	Si tous les éléments d'un même type sont installés de manière identique → type (exemple, le carrelage : chaque carreau est collé identiquement) Si un élément d'un certain type a été installé dans des conditions différentes des autres éléments du même type → occurrence
Les performances techniques	Type	Ce critère dépend de l'élément : il y a des éléments qui ne nécessitent pas une fiche technique détaillée pour être remise en œuvre (exemple, élément de finition type)
L'identification du fabricant	Type	Si possible, identifiez la provenance du matériau
La toxicité de l'élément	Occurrence	Un élément au sein d'un groupe peut être en contact avec une substance toxique
La destination potentielle	Type	Tous les éléments d'un même type sont susceptibles d'être récupérés dans le projet de rénovation
La facilité de réinstallation	Type	Commun à tous les éléments du même type
Les données complémentaires		
Valeur estimée	Type/Occurrence	La valeur de marché peut être un paramètre de type. Si la valeur estimée est adaptée à l'état, alors c'est un paramètre d'occurrence.
Description détaillée si nécessaire	Occurrence	La description détaille un élément en particulier
Critère normatif	Type	
La facilité de transport	Type	
La facilité de stockage	Type	
Toute information supplémentaire s	Occurrence	

Annexe 3 : Inventaire réemploi (Étape 1 : Inventorisation des éléments de réemploi sur le site)

Données primaires												
Identification			Photo	Quantité		Dimensions				Localisation in situ		Etat
Numéro ID	Groupe	Nom de l'élément		quant.	unité	Hauteur	Longueur	Largeur/ép	unity	Niveau	Pièce	
A Interior doors												
A1		Porte int_couloir		4	pcs	202,5	70,5	5	cm	R+1	couloir	Bon état
A2		Porte int_cagibi		1	pcs	202,5	70,5	5	cm	R+1	cagibi	Bon état
A3		Porte int_garage		1	pcs	198,3	70,5	4	cm	R0	garage	Bon état
A4		Porte int_toilette		1	pcs	200	71	4	cm	R0	toilette	Bon état
A5		Porte int_chambre		1	pcs	200	73	4	cm	R0	chambre	Bon état
A6		Porte int_cuisine		1	pcs	203	81	5	cm	R+1	cuisine	Bon état
A7		Porte int_entrée		1	pcs	203	83	5	cm	R+1	entrée	Bon état
A8		Porte int_cuisine		1	pcs	200	83	4	cm	R0	cuisine	Bon état
B Carrelage												
B1		Carrelage_toilette_cuisine		264	pcs	15	15	0,8	cm	R0	toilette&cuisine	Très bon état
B2		Carrelage_toilette_sld		330	pcs	20	15	0,8	cm	R+1	toilette&sld	Très bon état
B3		Carrelage_cuisine			pcs	10	10	0,6	cm	R+1	cuisine	Très bon état
B4		Carrelage_sol			pcs	41,5	41,5	1	cm	R+1	couloir&cuisine&arrière cuisine	Très bon état






C		Plintes										
C1		Plintes_terre_cuite		1	pcs	9	10	2	cm	R+1	arrière cuisine	Très bon état
C2		Plintes_carrelage		1	pcs	8,5	31,5	2	cm	R+1	cuisine&coulloir	Très bon état
D		Radiateur										
D1		Radiateur_cuisine		1	pcs	90	50,5	11	cm	R0	cuisine	bon état
E		Mobilier fix										
E1		baignoire_std		1	pcs	56	157	69	cm	R+1	std	bon état
F		Seuil										
F1		Seuil_fenêtre_pierre bleu		1	pcs	7,8	78	18	cm	R+1	arrière cuisine	bon état

Figure 74 : Inventaire réemploi réalisé par le chercheur lors de l'étape 1 de la méthode expérimentale

Annexe 4 : Tableaux Excel du « Disassemble Index Tools (DIt), « Disassemble Index Move (DIm) et « Resilience Index (Ri) ».

Keynote	Material	Etat de la mesure (m2)	Volume (m3)	Densité de masse (kg/m3)	Masse (kg)	No Tool	Hand Tool	Power Tool	Gas/pneumatic Tool	Hydraulic Equipment	Valeur DIt	Valeur Dim	Calculé
A1	Porte simple	-	0,07	600	42,00		x				0,9	0,9	34,0
A1	Porte simple	-	0,07	600	42,00		x				0,9	0,9	34,0
A1	Porte simple	-	0,07	600	42,00		x				0,9	0,9	34,0
A1	Porte simple	-	0,07	600	42,00		x				0,9	0,9	34,0
A1	Porte simple	-	0,07	600	42,00		x				0,9	0,9	34,0
A2	Porte simple	-	0,07	600	42,00		x				0,9	0,9	34,0
A3	Porte simple	-	0,05	600	30,00		x				0,9	0,9	24,3
A4	Porte simple	-	0,05	600	30,00		x				0,9	0,9	24,3
A5	Porte simple	-	0,08	600	48,00		x				0,9	0,9	38,9
A6	Porte simple	-	0,08	600	48,00		x				0,9	0,9	38,9
A7	Porte simple	-	0,06	600	36,00		x				0,9	0,9	29,2
C2	Plinthes	-	0,01		53,55		x				0,9	0,7	33,7
C1	Plinthes	-	0,01		21,53		x				0,9	0,9	17,4
B4	Carrelages	-	0,21356		854,00			x			0,8	0,4	273,3
B3	Carrelages	-	0,09		378,00		x				0,9	0,4	136,1
B2	Carrelages	-	0,1		410,00		x				0,9	0,4	147,6
B1	Carrelages	-	0,07		261,00		x				0,9	0,4	94,0
D1	Radiateur	-	0,05				x				0,9	0,9	0,0
E3	Baignoire	-	0,66				x				0,9	0,9	0,0
F1	Seuil pierre calcaire	-	0,01		27,38		x				0,9	1,0	24,6

Figure 75 : Tableau Excel « Disassemble Index Tools (DIt) » réalisé par le chercheur.

Keynote	Material	Etat de la mesure	Volume (m3)	Densité de masse (kg/m3)	Masse (kg)	One person: < 20 kg	Two people: < 42 kg	Hand trolley: < 50 kg	Forklift: < 2000 kg	Crane: > 2000 kg	Valeur
A1	Porte simple	-	0,07	600	42,00		x				0,9
A1	Porte simple	-	0,07	600	42,00		x				0,9
A1	Porte simple	-	0,07	600	42,00		x				0,9
A1	Porte simple	-	0,07	600	42,00		x				0,9
A1	Porte simple	-	0,07	600	42,00		x				0,9
A2	Porte simple	-	0,07	600	42,00		x				0,9
A3	Porte simple	-	0,05	600	30,00		x				0,9
A4	Porte simple	-	0,05	600	30,00		x				0,9
A5	Porte simple	-	0,08	600	48,00		x				0,9
A6	Porte simple	-	0,08	600	48,00		x				0,9
A7	Porte simple	-	0,06	600	36,00		x				0,9
C2	Plinthes	-	0,01		53,55				x		0,7
C1	Plinthes	-	0,01		21,53		x				0,9
B4	Carrelages	-	0,21356		854,00				x		0,4
B3	Carrelages	-	0,09		378,00				x		0,4
B2	Carrelages	-	0,1		410,00				x		0,4
B1	Carrelages	-	0,07		261,00				x		0,4
D1	Radiateur	-	0,05				x				0,9
E3	Baignoire	-	0,66				x				0,9
F1	Seuil pierre calcaire	-	0,01		27,38	x					1,0

Figure 76 : Tableau Excel « Disassemble Index Move (DIm) » réalisé par le chercheur.

Keynote	Material	Volume (m3)	Densité de masse (kg/m3)	Masse (kg)	Reusable an infinite number of times	Reusable up to three times	Reusable only once	Recyclable	Downcyclable	Disposable	Valeur	Valeur * Masse
A1	Porte simple	0,07	600	42,00	x						1,0	42,0
A1	Porte simple	0,07	600	42,00	x						1,0	42,0
A1	Porte simple	0,07	600	42,00	x						1,0	42,0
A1	Porte simple	0,07	600	42,00	x						1,0	42,0
A1	Porte simple	0,07	600	42,00	x						1,0	42,0
A2	Porte simple	0,07	600	42,00	x						1,0	42,0
A3	Porte simple	0,05	600	30,00	x						1,0	30,0
A4	Porte simple	0,05	600	30,00	x						1,0	30,0
A5	Porte simple	0,08	600	48,00	x						1,0	48,0
A6	Porte simple	0,08	600	48,00	x						1,0	48,0
A7	Porte simple	0,06	600	36,00	x						1,0	36,0
C2	Plinthes	0,01		53,55			x				0,7	37,5
C1	Plinthes	0,01		21,53			x				0,7	15,1
B4	Carrelages	0,21356		854,00			x				0,7	597,8
B3	Carrelages	0,09		378,00			x				0,7	264,6
B2	Carrelages	0,1		410,00			x				0,7	287,0
B1	Carrelages	0,07		261,00			x				0,7	182,7
D1	Radiateur	0,05			x						1,0	0,0
E3	Baignoire	0,66			x						1,0	0,0
F1	Seuil pierre calcaire	0,01		27,38	x						1,0	27,4

Figure 77 : Tableau Excel « Resilience Index (Ri) » réalisé par le chercheur.

