
Mémoire de fin d'études : "Le BIM as-built comme outil d'aide à la décision entre démolition ou déconstruction ?"

Auteur : Halbach, Amélie

Promoteur(s) : Jancart, Sylvie

Faculté : Faculté d'Architecture

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

Année académique : 2018-2019

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/6888>

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.



UNIVERSITE DE LIEGE — FACULTE D'ARCHITECTURE

LE BIM « AS-BUILT » COMME OUTIL D'AIDE A LA DECISION ENTRE DEMOLITION OU DECONSTRUCTION

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

Sous la direction de : Sylvie JANCART
Année académique 2018-2019
Axe de recherche : Culture numérique

REMERCIEMENTS

Un travail de fin d'études est un travail personnel. Mais il ne pourrait être mené à terme si d'autres personnes n'avaient pas contribué à sa réalisation.

C'est dans cet esprit que je remercie tout d'abord ma promotrice, Madame Sylvie Jancart, pour ses innombrables conseils et remarques constructives. Sa disponibilité et sa patience m'ont permis d'aller de l'avant durant ces deux années de travail.

Je remercie Madame Marie Roosen de m'avoir aidée à améliorer et clarifier le questionnaire en ligne adressé aux architectes. Par la même occasion, j'aimerais remercier tous les architectes ayant pris le temps de partager leur expérience en participant à l'enquête. Leurs nombreux commentaires ont enrichi ce travail de manière considérable.

Mes remerciements s'adressent tout particulièrement à Lionel Bousquet, Charlotte Dautremont, Laurent Naud, Casper Østergaard Christensen et Terry Pater, pour avoir accepté de me rencontrer pour un entretien. Leurs témoignages précieux ont une place importante dans ce travail.

Je tiens également à remercier Adeline Stals pour ses conseils et ses réponses à mes nombreuses questions.

Enfin, un tout grand merci à mes parents pour leur disponibilité à la discussion et pour avoir enrichi ce travail de fin d'études par leur propositions.

RESUME

Ce travail a pour objectif d'étudier les pratiques qui maximisent le réemploi futur des matériaux et composants neufs. En particulier de démontrer comment le BIM et sa complémentarité avec les passeports matériaux maintenus à jour tout le long du cycle de vie d'un bâti peut encourager et faciliter le réemploi des matériaux et des équipements. L'intégration des outils BIM et les passeports matériaux permettrait d'étudier la faisabilité technique et la rentabilité économique de différents scénarios de déconstruction sélective et de réutilisation sur site ou hors site afin d'établir plus facilement l'audit de pré-démolition. Dans cette hypothèse, le modèle BIM devrait pouvoir fournir le cadre de manipulation et de structuration de ces données.

Nous nous intéresserons aux motivations des architectes à combiner le BIM et l'économie circulaire et aux types de projets pour lesquels la démarche semble pertinente. Nous analyserons les difficultés rencontrées par les architectes par la combinaison des deux pratiques et les outils/fonctionnalités du BIM qu'ils aimeraient voir apparaître sur le marché. Nous examinerons également comment estimer le potentiel de recirculation d'un élément de construction, les critères à évaluer et à documenter dans le modèle « *as-built* » ainsi qu'où et comment stocker ces informations. De plus, nous observerons que l'avènement de ces nouvelles pratiques implique de nouvelles compétences à acquérir, voire de nouveaux métiers à créer.

MOTS CLES

BIM
Economie circulaire
Design for Deconstruction
Passeport matériau
Cycle de vie
Réemploi

ABSTRACT

The purpose of this work is to study practices that maximize the future reuse of new materials and components. In particular, to demonstrate how BIM and its complementarity with material passports maintained throughout the life cycle of a building can encourage and facilitate the reuse of materials and equipment. The integration of BIM tools and material passports would make it possible to study the technical feasibility and economic profitability of different scenarios for selective deconstruction and reuse on or off site in order to facilitate the pre-demolition audit. In this case, the BIM model should be able to provide the framework for manipulating and structuring this data.

We focus on the motivations of architects to combine BIM and circular economy and the types of projects for which the approach seems relevant. We analyse the difficulties faced by architects due to the combination of the two practices and the BIM tools/features they would like to see on the market. We also examine how to estimate the recirculation potential of a building element, the criteria to be evaluated and documented in the "as-built" model as well as where and how to store this information. Furthermore, we observe that the advent of these new practices implies new skills to be acquired, or even new professions to be created.

KEY WORDS

BIM
Circular Economy
Design for Deconstruction
Material Passport
Life Cycle
Reuse

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	2
RESUME	3
MOTS CLES	3
ABSTRACT.....	4
KEY WORDS	4
TABLE DES MATIERES.....	5

INTRODUCTION	8
--------------------	---

PARTIE I: ETAT DE L'ART	10
-------------------------------	----

1. DEUX PISTES DE SOLUTION POUR EVITER LES DECHETS DE DECONSTRUCTION	11
1.1 L'ECONOMIE CIRCULAIRE	11
1.2 LE BIM	13
2. L'ECONOMIE CIRCULAIRE.....	15
2.1 EXEMPLES DE PRATIQUES ANCIENNES DE REEMPLOI	15
2.2 LES FREINS ACTUELS AU REEMPLOI.....	16
2.3 LES THEMATIQUES DE L'ECONOMIE CIRCULAIRE DANS LE SECTEUR DE LA CONSTRUCTION	18
2.3.1 Urban mining.....	19
2.3.2 Modèles économiques d'une construction circulaire.....	25
2.3.3 Concevoir et construire circulaire.....	27
2.4 L'INFLUENCE DU REEMPLOI SUR LES DIFFERENTS CORPS DE METIERS	39
1. LE BIM.....	41
3.1 LES CONCEPTS ET JARGON DU BIM.....	41
3.2 ANALYSE D'UTILISATION	48
4. LE BIM EN TANT QUE SUPPORT DE L'ECONOMIE CIRCULAIRE.....	57
4.1 L'EVOLUTION DU BIM VS L'EVOLUTION DU DEVELOPPEMENT DURABLE	57
4.2 CONVERGENCE DE L'EVOLUTION DU BIM ET DE L'ECONOMIE CIRCULAIRE	58
4.3 EVOLUTION DU BIM DURANT LES DIFFERENTES PHASES DU PROJET.....	60
4.4 AUTRES OUTILS POUR FAVORISER L'ECONOMIE CIRCULAIRE	62
5. CONCLUSIONS ET QUESTIONS DE RECHERCHE.....	68

PARTIE II : QUESTIONNAIRE EN LIGNE	69
--	----

2.1 METHODOLOGIE	69
2.2 DESCRIPTION DE L'ÉCHANTILLON.....	70
2.3 RÉSULTATS	72
2.3.1 ECONOMIE CIRCULAIRE	72
2.3.2 BIM	78
2.3.3 COMBINAISON BIM ET ÉCONOMIE CIRCULAIRE	84
2.4 DISCUSSION.....	85
2.5 CONCLUSION	86

PARTIE III : ENTRETIENS D'APPROFONDISSEMENT	87
5.1 METHODOLOGIE	87
5.2 RENOVATION ET EXTENSION D'UNE MAISON UNIFAMILIALE ET PARTIE PROFESSIONNELLE	89
5.3 RENOVATION D'UN IMMEUBLE DE BUREAUX.....	92
5.4 RENOVATION D'UNE MAISON INDIVIDUELLE SUR BASE D'UN SCAN 3D	97
5.5 RENOVATION D'UN HOTEL DE VILLE ET CONSTRUCTION D'UN PETIT COMPLEXE DE BUREAUX	101
5.6 COMPLEXE DE SOIXANTE LOGEMENTS	106
5.7 CONCLUSION DES ENTRETIENS.....	111
DISCUSSION.....	113
CONCLUSION.....	117
LEXIQUE	118
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	127
LISTE DES TABLEAUX	129
BIBLIOGRAPHIE.....	130
LIVRES	130
ARTICLES.....	131
CONFÉRENCES.....	133
WEBOGRAPHIE.....	134
RAPPORTS ET PUBLICATIONS.....	134
ETUDES	135
SITES.....	136
ANNEXES	138
QUESTIONNAIRE EN LIGNE : LISTE DES QUESTIONS POSEES.....	138
ENTRETIEN SEMI-DIRECTIF : LISTE DES QUESTIONS POSEES	140
ACCORD D'UTILISATION DE PRODUCTION ET DE DROIT D'IMAGE.....	142

*« God has lent us the earth for our life; it is a great entail. It belongs as much to those who are to come after us, and whose names are already written in the book of creation, as to us; and we have no right, by any thing that we do or neglect, to involve them in unnecessary penalties, or deprive them of benefits which it was in our power to bequeath. »*¹
(Ruskin, 1849, p163)

¹ Traduction personnelle : « Dieu nous a prêté la terre pour y vivre ; c'est une grande implication. Elle appartient autant à ceux qui viendront après nous, dont les noms sont déjà écrits dans le livre de la création, qu'à nous ; et nous n'avons pas le droit, par tout ce que nous faisons ou négligeons, de les entraîner dans des peines inutiles, ou de les priver des avantages qu'il était en notre pouvoir de léguer. »

Introduction

« On Spaceship Earth there are no passengers; everybody is a member of the crew. We have moved into an age in which everybody's activities affect everybody else. »²

(Marshal McLuhan, 1965 cité par Rau & Oberuber, 2016, p51)

Thomas Rau est un architecte hollandais qui conçoit des bâtiments produisant de l'énergie au lieu d'en utiliser. Sabine Oberhuber est diplômée en management d'entreprise. Ils sont auteurs du livre « Material Matters » publié en 2016. Inspirés par cette citation du philosophe canadien Marshal McLuhan, ils comparent la Terre à un vaisseau spatial en mission dans l'espace. Tout ce dont l'équipage pourrait avoir besoin lors de leur mission est à bord du vaisseau, mais aucun approvisionnement supplémentaire n'est possible. Si un problème apparaît, il faudra le résoudre avec les moyens du bord. Il en est de même sur Terre car, tout le monde le sait, les ressources naturelles ne sont pas inépuisables (Rau & Oberuber, 2016).

Il n'est donc plus suffisant d'avoir une empreinte écologique « moins mauvaise », car celle-ci aura toujours un impact négatif sur la planète (Braungart & Mc Donough, 2013). Autrement dit, s'efforcer de réduire la consommation des ressources ne changera rien à la nature limitée des réserves et ne pourra que retarder l'inévitable (Servigne & Stevens, 2015), c'est-à-dire l'épuisement des ressources. D'ailleurs, le Worldwatch Institute (2012) a estimé que d'ici 2030, le monde sera à court de nombreux matériaux de construction bruts et que le secteur industriel dépendra du recyclage et des décharges.

D'après la Commission Européenne (2018), le secteur de la construction est responsable de :

- 50% du total des ressources naturelles exploitées,
- 36% des déchets produits (en poids),
- 42% des consommations totales d'énergie,
- 35% des émissions de gaz à effet de serre,
- 30% des consommations d'eau.

En Belgique, plus de 15 millions de tonnes de déchets de construction et de démolition sont générés par an (Ceraa & Rotor, 2012).

Ces chiffres sont la conséquence d'activités essentiellement inscrites dans un modèle économique dit « linéaire » : « Take, Make, Waste » (extraction des ressources, transformation et distribution de biens, abandon) et appliquées depuis la révolution industrielle.

Selon Martinez (2013), 70 % de l'ensemble des déchets générés par l'industrie de la construction sont dus à des activités en fin de vie, principalement de démolition. Une façon de limiter le besoin d'extraire des ressources naturelles est de favoriser le réemploi présent et futur de ces déchets de démolition. Ce travail a pour objectif d'étudier les pratiques qui maximisent le réemploi futur des matériaux et composants neufs, en particulier de montrer comment le BIM et sa complémentarité avec les passeports matériaux maintenus à jour tout le long du cycle de vie d'un édifice. Ces outils peuvent encourager et faciliter le réemploi des matériaux et des équipements. L'intégration des outils BIM et les passeports matériaux

² Traduction personnelle: « Dans le vaisseau spatial Terre, il n'y a pas de passagers ; tout le monde fait partie de l'équipage. Nous sommes entrés dans une ère où les actions de chacun affectent tout le monde. »

devrait permettre d'étudier la faisabilité technique et de comparer la rentabilité économique de différents scénarios de déconstruction sélective et de réutilisation sur site ou hors site et d'établir plus facilement l'audit de pré-démolition tel que proposé par la Commission européenne. Le modèle BIM devrait pouvoir fournir le cadre de manipulation et de structuration de ces données.

La méthodologie de recherche suivie s'articule en trois étapes distinctes et complémentaires.

Dans un premier temps, une étude approfondie de la littérature m'a permis de prendre connaissance et d'analyser les pratiques existantes de l'économie circulaire et du BIM dans le secteur de la construction. Questionner le potentiel de la combinaison de ces deux approches pour maximiser le réemploi futur des matériaux et composants neufs mis en œuvre dans les nouvelles constructions, a conduit à la formulation des questions de recherche plus précises.

Dans un second temps, la participation à divers colloques et séminaires ainsi qu'un stage d'un mois au sein du bureau d'architecture Samyn & Partners³ m'ont donné l'opportunité d'observer, d'expérimenter et de questionner les pratiques actuelles d'usage des outils du BIM et du réemploi, ainsi que d'identifier les difficultés rencontrées. L'expérience acquise lors de ce stage a facilité la mise au point d'un questionnaire adressé aux bureaux d'architectures utilisant le BIM et/ou mettant l'économie circulaire au cœur de leurs projets. Les objectifs de cette enquête ciblée ont été d'identifier les défis rencontrés par les architectes, les solutions apportées et leurs désirs par rapport au BIM et/ou leur approche envers l'économie circulaire.

L'analyse des réponses à l'enquête m'a permis d'identifier un groupe de bureaux d'architectes plus avancés que les autres dans l'usage du BIM et de la conception en vue de la déconstruction. Dans la troisième partie de ce travail, je me suis donc intéressée aux pratiques de ces précurseurs dans ces deux domaines. Grâce à un entretien rétrospectif d'environ une heure avec chacun d'entre eux, j'ai analysé en détail quelques projets qu'ils avaient réalisés. Ces interviews ont eu pour but de déceler les solutions trouvées et les problèmes spécifiques rencontrés par ce groupe de précurseurs et d'en tirer des conclusions utiles au développement de ces pratiques peu répandues à l'heure actuelle.

Le présent rapport comporte trois parties relatives aux trois étapes de recherche. La première partie résume l'état de l'art et pose les questions de recherche plus précises. La deuxième partie analyse les réponses à l'enquête. La troisième et dernière partie résume le point de vue d'un groupe de précurseurs sur l'usage de la combinaison du BIM et de l'économie circulaire dans des conditions réelles de projets réalisés.

³ Philippe SAMYN and PARTNERS sprl, architects & engineers, <https://samynandpartners.com/>

PARTIE I: Etat de l'art

L'état de l'art est le résultat d'une analyse approfondie de la littérature sur les pratiques actuelles de l'économie circulaire et du BIM dans le secteur de la construction. Le fil conducteur est d'identifier le potentiel du BIM « *as-built* » à faciliter la déconstruction future et favoriser le réemploi des matériaux dans un concept d'économie circulaire. Il s'articule autour de cinq chapitres.

Le premier chapitre introduit de manière sommaire l'économie circulaire et le BIM. Il donne une définition, explique l'origine et illustre comment ces approches peuvent aider à réduire les déchets. Les deux chapitres suivants détaillent les deux concepts.

Le chapitre consacré à l'économie circulaire tente de démontrer l'importance de ce nouveau modèle économique pour le secteur de la construction et comment il peut s'y appliquer.

Il est suivi d'un chapitre dédié à l'apport du BIM au développement du secteur de la construction et les changements que cela implique par rapport aux méthodes de travail traditionnelles.

Le quatrième chapitre présente le BIM en tant que support à l'économie circulaire. Il identifie les atouts et les freins du BIM sur cette question particulière.

Enfin, le dernier chapitre précise les questions de recherche que traite ce travail de fin d'études.

1. Deux pistes de solution pour éviter les déchets de déconstruction

1.1 L'économie circulaire

« The way we see it, waste is what you call something when you have no idea what to do with it. The fact that waste exists anywhere is more a testament to our lack of imagination than it is to the inherent value of any material. If you have a purpose for it, it's no longer waste. »⁴

(Freilla, 2008 cité par Gorgolewski, 2017, p11)

Contrairement à l'économie linéaire (« Take, Make, Waste »), l'économie circulaire adopte une approche à long terme. Elle vise à remplacer un modèle linéaire basé sur l'extraction de ressources naturelles par un cycle fermé où la production de déchets est évitée (Figure 1). En effet, le « déchet » d'un procédé devient la matière première de l'autre et ainsi de suite. Les sources d'énergie renouvelables et l'aspect social du modèle économique jouent également un rôle important au sein de ce nouveau modèle économique (Braungart & Mc Donough, 2002).

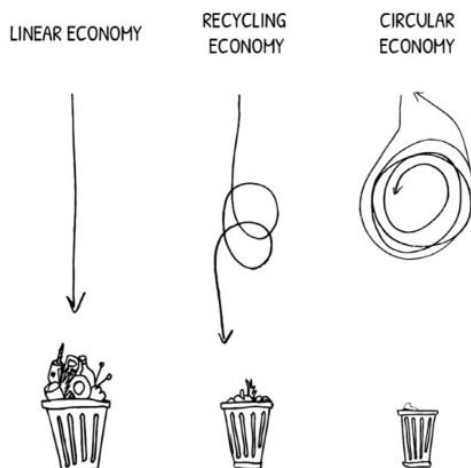


Figure 1: De l'économie linéaire à circulaire (source : Vlaanderen Circulair)

La Fondation Ellen MacArthur⁵, pionnière dans l'étude des implications d'une économie circulaire, définit cinq principes décrivant un ensemble d'actions afin de mettre en œuvre ce nouveau modèle économique (Ellen MacArthur Foundation, 2013) :

1. Prévenir la production de déchets: la production des déchets n'existe plus lorsque les composants biologiques et techniques d'un produit sont conçus dans l'intention de s'inscrire dans un cycle biologique ou technique, conçus pour être désassemblés et réutilisés.

⁴ Traduction personnelle : « D'après nous, un déchet est l'appellation de quelque chose quand on n'a aucune idée de ce qu'il faut en faire. Le fait que des déchets existent témoigne davantage de notre manque d'imagination que de la valeur inhérente à tout matériau. Si vous lui trouver un usage, ce n'est plus un déchet. »

⁵ La **Fondation Ellen MacArthur** est une association caritative britannique fondée en 2009 qui vise à promouvoir l'économie circulaire.

2. Renforcer la résilience à travers la diversité : la modularité, la polyvalence et l'adaptabilité sont des caractéristiques précieuses qui doivent être préétablies dans un monde incertain et en évolution rapide.
3. Utiliser des énergies renouvelables : tout concept circulaire doit commencer par examiner l'énergie impliquée dans le processus de production.
4. Concevoir un ensemble : la capacité de comprendre comment les parties s'influencent les unes les autres au sein d'un tout, et la relation du tout avec les parties, est cruciale.
5. Fonctionner en cascades : la création de valeur réside dans la possibilité d'extraire une valeur supplémentaire des produits et des matériaux en les faisant passer en cascade par d'autres applications.

Le concept d'économie circulaire a des origines profondément ancrées et ne peut être retracé à une seule date ou à un seul auteur. Ses applications aux systèmes économiques et aux processus industriels modernes ont toutefois pris de l'ampleur depuis la fin des années 1970. C'est alors que le paysagiste américain John T. Lyle développe la théorie autour de la notion « conception régénérative » (« Regenerative Design »). Il s'agit d'un processus qui vise à restaurer, revitaliser ou renouveler l'énergie et les matières nécessaires à la production et qui peut s'appliquer à tous les systèmes industriels. Walter Stahel, architecte et économiste, esquisse dans son rapport de recherche de 1976 à la Commission européenne la vision d'une économie fonctionnant en circuit fermé (économie circulaire). Cette économie en boucle promeut quatre objectifs principaux : l'impact de l'économie circulaire sur l'emploi, la prolongation de la durée de vie des produits, la consommation des ressources et la prévention des déchets. Le concept d'économie circulaire gagne en notoriété en 2002 grâce à William McDonough et Michael Braungart, auteurs du livre « Cradle to Cradle » (du berceau au berceau) (Braungart & McDonough, 2002)(Ellen MacArthur Foundation, 2013).

La fondation Ellen McArthur, a identifié le secteur de la construction comme un des secteurs avec le plus haut potentiel pour appliquer les idées de ce nouveau modèle économique. En effet, la construction et la démolition génèrent 35 à 40 pourcents des déchets, tous secteurs confondus. Or on estime que 75 pourcents des déchets de démolition (en poids) possèdent une valeur résiduelle qui pourrait être mieux utilisée si on pouvait les réinjecter dans le bâti par réutilisation ou recyclage (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

1.2 Le BIM

Dans la littérature, plusieurs définitions du BIM existent. La lettre « M » de l'acronyme « BIM » a en effet plusieurs significations. Dans le BIM signifiant « Building Information Model », le « M » fait référence à un modèle numérique ou base de données. Lorsqu'on parle de « Building Information Modelling », il s'agit d'un processus ou une méthode de structuration des données. Finalement, le « Building Information Management » désigne une gestion des flux d'informations ainsi créées (Le-Moniteur, 2014).

A l'heure actuelle, la définition « Building Information Modelling » est la plus couramment utilisée car elle fait d'avantage référence au processus de construction et à la méthodologie avant d'être principalement assimilé à une modélisation 3D ou à un outil informatique. Car le BIM n'est pas un logiciel mais bien un processus (complexe) de travail collaboratif. L'aspect technologique de ce processus est effectivement fondamental, mais il n'est pas le seul à considérer : l'information générée est le pilier du système (De Maestri, 2017).

Selon Lennert Rasking, le BIM est « *un processus intégré qui permet aux professionnels de la construction de concevoir un projet numérique, de le développer, de l'explorer et de le corriger avant qu'il ne soit construit* » (Rasking & Decroos, 2017, p12). Le processus BIM bouleverse fondamentalement la façon de travailler de tous les intervenants du secteur de la construction (Figure 2). Aussi bien lors de la conception que de l'exploitation du bâtiment. Cette méthode de travail rassemble tous les partenaires d'un projet autour d'une maquette numérique 3D d'un bâtiment qui intègre toutes les caractéristiques des éléments composant ce bâtiment (Rasking & Decroos, 2017).

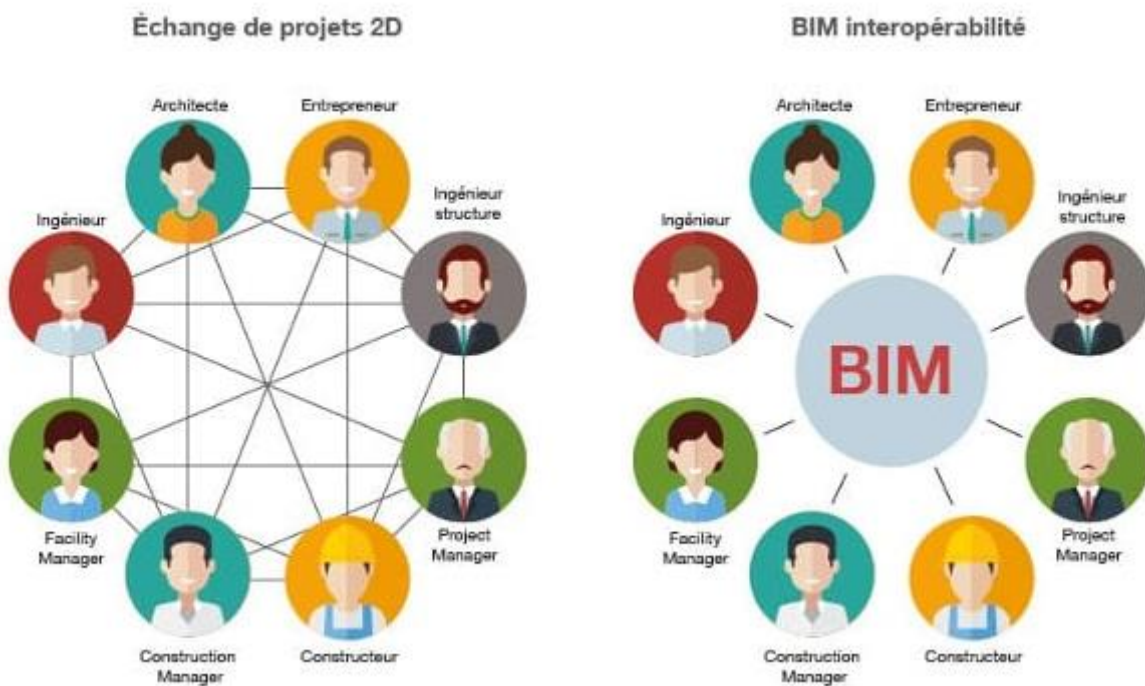


Figure 2: Evolution du processus de construction vers le BIM (Source: Biblus)

Aujourd'hui, le BIM est un mot à la mode et peut sembler nouveau pour beaucoup, mais en réalité, les idées et les technologies qui sous-tendent le BIM existent depuis la fin des années '40 (Silva, 2011). L'invention du concept BIM est attribuée au professeur Charles Eastman. En 1974, il a en effet développé le précurseur du BIM : le « Building Description System » ou BDS. L'objectif du BDS est de créer une base de données informatique capable de décrire la construction des bâtiments en détail et d'élaborer un ensemble d'opérations pour cette base de données (Eastman et al., 1974).

Le BIM est d'ores et déjà imposé pour les marchés publics dans certains pays de l'Union européenne : Norvège, Finlande, Danemark, Pays-Bas et Grande-Bretagne. La Belgique ne dispose pas encore de plan stratégique pour l'implémentation obligatoire du BIM dans le secteur de la construction. En revanche, en 2015, un guide de bonnes pratiques intitulé « Guide to Building Modelling » a vu le jour. Ce guide est destiné aux propriétaires, architectes, ingénieurs, entrepreneurs, bureaux de contrôle et gestionnaires d'installations techniques. Il définit des règles et des lignes directrices permettant l'utilisation du BIM dans le cadre d'un processus classique de construction (Denis, 2015).

Un levier pour augmenter le taux de réutilisation est de disposer de plus d'informations sur les éléments de construction et matériaux présents dans le bâti. A l'heure actuelle, toutes ces informations ne sont pas toujours générées lors de la conception, ni détaillées, ni mises à jour lors du cycle de vie du bâtiment. Le BIM est aujourd'hui l'une des approches les plus prometteuses pour atteindre la numérisation dans l'industrie de la construction tout au long du cycle de vie du bâtiment (Krämer & Besenyoï, 2018).

En effet, le BIM n'est pas seulement utilisé en phase de conception. Il peut également servir au facility management et comme support pour réaliser un inventaire pré-déconstruction/audit de pré-démolition et un planning de déconstruction (Guhyyot et al., 2018).

A ces fins, il s'agira d'exploiter un modèle BIM représentant la réalité tel que construite (« *as-built* ») et non comme le bâtiment a été conçu. Ce modèle BIM « *as-built* » informe sur l'état actuel des bâtiments et contient toutes les informations techniques nécessaires à la maintenance du bâtiment. Le BIM « *as-built* » impose trois exigences: premièrement, la modélisation géométrique du composant, deuxièmement, l'attribution d'une catégorie et des propriétés concernant les matériaux, et enfin, l'établissement de relations entre eux (Hichri et al., 2013).

Avant de développer le potentiel du BIM (processus de collaboration et maquette numérique) en tant que support de l'économie circulaire, nous allons approfondir ces deux approches dans les deux prochains chapitres.

2. L'économie circulaire

*« Imagine an economy in which today's goods are tomorrow's resources, forming a virtuous cycle that fosters prosperity in a world of finite resources. »*⁶

(Ellen MacArthur Foundation, 2013, p2)

2.1 Exemples de pratiques anciennes de réemploi

Depuis l'antiquité, le réemploi est présent en architecture. Dans certaines parties du monde, cette pratique est encore largement répandue aujourd'hui. Avant l'ère industrielle, l'utilisation de nouveaux matériaux de construction provenant d'ailleurs se limitait aux projets de grande envergure, tels que les édifices et palais religieux, cérémoniels et gouvernementaux. La plupart des matériaux de construction destinés aux constructions plus modestes provenaient de la proximité du site. Ils utilisaient des matériaux tels que le bois, la roche et la terre qui étaient facilement disponibles. Ces solutions vernaculaires étaient basées sur la localité car la production et l'acheminement de nouveaux matériaux représentaient un effort considérable et un investissement financier important (Gorgolewski, 2017).

Dans leur livre, publié en 2018, Rotor⁷ présente trois exemples de pratiques anciennes de réemploi: Stonehenge, la spolia romaine et la culture japonaise.

Selon Rotor, les archéologues ont découvert que les mégalithes qui constituent le monument historique de Stonehenge, ont en réalité été taillés des centaines d'années avant leur mise en œuvre sur le site actuel. Selon les historiens, les mégalithes auraient servi dans une autre structure, plus proche de la carrière d'origine.

Les pratiques de réemploi étaient également présentes du temps de l'empire romain. Les « spolia » désignent la réutilisation d'anciennes pièces et œuvres d'art de monuments romains en tant que matériaux de construction dans un nouveau bâtiment. Les romains pratiquaient essentiellement le réemploi pour des raisons économiques et de facilité d'approvisionnement.

Dans la culture japonaise, le sanctuaire d'Ise, est reconstruit à son image tous les vingt ans, permettant ainsi un gage de pureté. Les bâtiments actuels (datant de 2013), sont les 62^{èmes} à avoir été construits. La valeur du bâtiment réside dans son idée, et non dans la réalité matérielle. Les traditions et consignes de reconstruction, extrêmement précises, sont transcrites dans un ensemble de textes datant du X^{ème} siècle (Guhyyot et al., 2018).

⁶ Traduction personnelle : « Imaginez une économie dans laquelle les biens d'aujourd'hui sont les ressources de demain, formant un cycle vertueux qui favorise la prospérité dans un monde de ressources limitées. »

⁷ **Rotor**, fondé en 2005, est une association sans but lucratif qui travaille sur la question du réemploi. Rotor fonctionne à travers des travaux de recherches, des aménagements d'intérieur à partir de matériaux de réemploi ou encore des collaborations avec des architectes, entreprises et maîtres d'ouvrages. Outre des projets d'architecture et d'architecture d'intérieur, ils proposent également des expositions, des livres, des modèles économiques et des propositions politiques. En 2016, la spin-off Rotor Deconstruction a été fondée en tant qu'entité distincte. Sa mission est de faciliter la réutilisation des éléments de construction.

2.2 Les freins actuels au réemploi

Aujourd'hui, le réemploi d'éléments de construction est une pratique moins courante qu'elle ne l'était jusqu'à la révolution industrielle. Le réemploi rencontre actuellement un grand nombre de freins. L'étude de publications de Gorgolewski (2017), Durmisevic (2017) et Guhyoot (2018) nous ont permis de synthétiser les barrières au réemploi en neuf points.

1. L'image négative du « déchet » et manque de confiance et d'intérêt

Dans notre société, le mot « déchet » hérite d'une connotation négative et peut amener les consommateurs potentiels à associer ce terme à des produits de qualité inférieure. Actuellement, le vendeur de matériaux de réemploi est perçu comme un brocanteur, un bouquiniste ou une friperie. Il est vrai que l'on ne trouve pas toujours ce que l'on cherche, mais on peut y saisir de belles opportunités.

2. Le manque de certifications et de garanties

La méfiance que nous évoquions au point précédent est due à un manque d'information et de certifications des matériaux. En effet, bien souvent les matériaux de réemploi ne sont pas documentés et ne jouissent donc d'aucune certification ; performances structurelles, thermiques, environnementales, santé et sécurité. Ce manque de certifications des matériaux de réemploi est une des préoccupations principales par rapport à la qualité et la fiabilité des matériaux, surtout quand il s'agit d'éléments structurels. En Europe, on ignore actuellement comment les marquages CE (Conformité Européenne) doivent être utilisés lorsqu'il s'agit de composants réutilisés.

Dans bien des cas, il est difficile de convaincre le client d'investir dans ce climat d'incertitude, surtout s'il ne voit pas les avantages qu'il peut en tirer.

3. L'absence de connaissances procédurales

Etant donné le faible attrait du secteur de la construction envers les filières de réemploi, les architectes et maîtres d'ouvrages voulant mettre en œuvre des matériaux de réemploi dans leurs projets ne savent pas toujours vers qui se tourner pour se procurer ces matériaux et comment les mettre en œuvre.

4. L'allongement des délais de construction

L'utilisation de composants de réemploi implique bien souvent une augmentation du délai de construction. Ce temps supplémentaire est dû à la recherche de sources d'approvisionnement, au démontage et à la remise à neuf, ainsi que qu'aux adaptations sur le chantier en fonction des dimensions non standards des matériaux réutilisés.

5. Le coût des matériaux de réemploi

En fin de vie d'un bâtiment, la démolition classique est perçue comme étant la méthode la plus économique. En effet, malgré les coûts d'enfouissement lors d'une démolition classique, le coût de la main-d'œuvre supplémentaire en déconstruction prend rapidement le dessus (Figure 3).

Dans un bâtiment traditionnel, non conçu pour être déconstruit, la déconstruction sélective implique à peu près sept fois plus de main-d'œuvre que la démolition classique (Policy Ordinance Markets & CCLBA,

2014). Au coût de déconstruction il faudra ajouter les coûts de stockage dans la période transitoire entre la déconstruction et le réemploi et les coûts de remise à neuf.

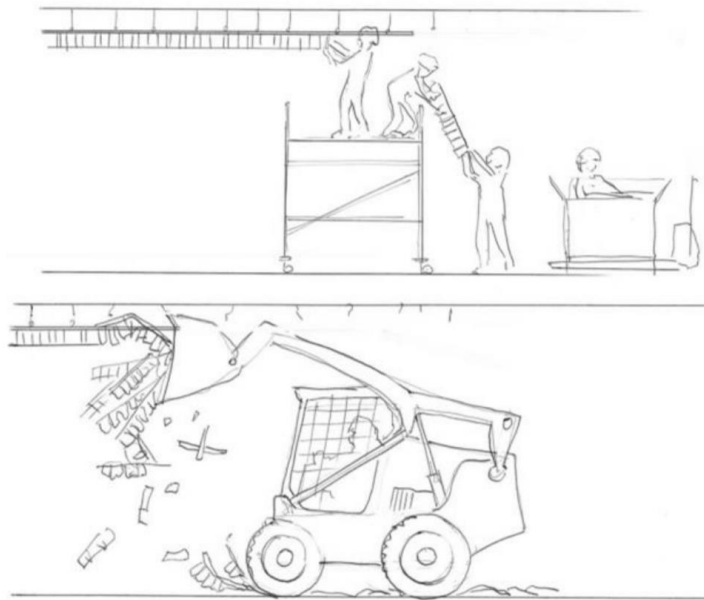


Figure 3: Illustration du besoin de main d'œuvre supplémentaire que nécessite la déconstruction sélective par rapport à une démolition classique (Source : Dessin de Lionel Billiet, Rotor)

6. La disponibilité incertaine

Une difficulté supplémentaire concernant le réemploi est de garantir la stabilité de l'offre dans le temps.

Il existe un décalage temporel entre les phases de conception et de réalisation : il se passe parfois plusieurs années entre ces deux phases. Lorsqu'un projet fait recourt à des produits de filières industrielles, il est plus facile de garantir la disponibilité des matériaux au moment de la mise en œuvre qu'avec des matériaux de réemploi dont la disponibilité varie en fonction des déconstructions.

De plus, le secteur de la construction est en manque de filières de réemploi. Actuellement, les plateformes de réemploi conviennent particulièrement aux bricoleurs et auto-constructeurs qui peuvent adapter leurs projets en fonction de la disponibilité des matériaux. L'acquisition d'un approvisionnement uniforme en grandes quantités convenant à de grands projets est particulièrement problématique.

Cette instabilité a également une influence sur le prix de vente des matériaux qui varie en fonction de l'offre et de la demande. Les filières de réemploi doivent traiter des flux de déchets dont ils ne maîtrisent pas toujours les volumes et les qualités, et la demande ne cesse de fluctuer en fonction du prix des matières premières vierges.

7. Le transport et stockage

Afin de garantir une certaine stabilité de l'offre, des espaces d'entreposage sont nécessaires. Cette gestion de stock occasionne des frais supplémentaires qui se répercutent sur le prix de vente des matériaux. De plus, le décalage entre la phase de conception et de construction nécessite parfois de stocker les matériaux en attendant leur mise en œuvre sur le chantier, ce qui fait encore une fois grimper les prix.

8. La propriété

La propriété des matériaux doit être clairement définie. Ils peuvent appartenir au propriétaire du bâtiment, à l'entreprise de déconstruction, au fabricant d'origine, etc. À l'heure actuelle, les matériaux et les composants récupérés sont souvent la propriété de l'entrepreneur.

9. La santé et la sécurité

Le secteur de la construction manque de méthodes de déconstruction sûres afin de garantir la santé et la sécurité des personnes qui extraient les éléments de construction d'un ancien bâtiment par rapport à une démolition classique.

2.3 Les thématiques de l'économie circulaire dans le secteur de la construction

Selon l'« Innovation Paper » du CSTC⁸ (Romnée & Vrijders, 2017), l'économie circulaire dans le secteur de la construction peut être répartie en trois grandes thématiques: (1) **urban mining**, (2) **modèles économiques d'une construction circulaire** et (3) **concevoir et construire circulaire** (Figure 4).

Dans ce travail, nous nous attarderons plus longuement sur le développement de la section « concevoir et construire circulaire ». Ce point semble être le plus porteur par rapport à l'objectif de ce travail puisqu'il développe les stratégies à développer lors de la conception du projet, afin de privilégier la déconstruction par rapport à la démolition en fin de vie, condition sine qua non pour garantir un gisement de ressources de réemploi.

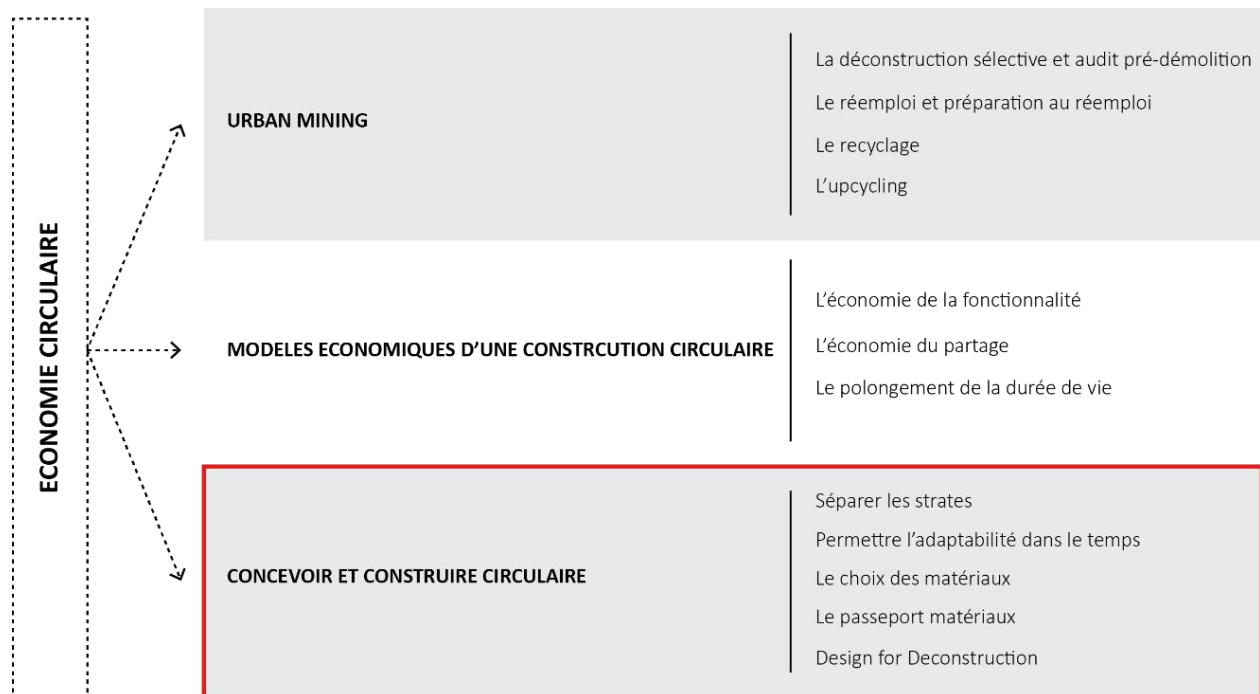


Figure 4: Economie circulaire et ses sous-section (Basé sur la catégorisation de Romnée & Vrijders, 2017)

⁸ CSTC « Centre Scientifique et Technique de la Construction » : <https://www.cstc.be/homepage/>

2.3.1 Urban mining

Avant la révolution industrielle, le transport était beaucoup moins évident et donc plus cher que de nos jours. Ceci encourageait les individus à innover en utilisant des matériaux ayant eu une vie antérieure. Cependant, pour la plupart des architectes actuels, utiliser des ressources présentes sur le site ou dans les environs peut paraître étrange (Gorgolewski, 2017).

Or, la population mondiale se rassemble de plus en plus dans les grandes villes. D'ici 2050, septante pourcents de la population mondiale vivra dans des zones urbaines (Kitamori, 2012). Cette migration vers les villes engendre un grand stock de matériaux issus de la démolition et de déchets industriels qui sont actuellement éliminés alors qu'ils possèdent encore de la valeur. A l'heure actuelle, la valeur résiduelle des stocks bâtis est perçue comme étant négative puisque la démolition est payante. Le secteur de la construction pourrait considérer la ville comme un grand réservoir de matériaux, la mine du futur, où l'on peut extraire des matériaux pour de nouvelles constructions. Ce concept est connu sous le nom de « urban mining » : plutôt que de considérer les bâtiments uniquement comme des consommateurs de ressources et d'énergie, l'économie circulaire met davantage l'accent sur le matériau ou l'élément de construction en fin de vie (Delcourt et al., 2018).

Selon Delcourt et ses collègues (2018), l'urban mining permet de :

1. « Diminuer la pression sur l'exploitation des ressources naturelles et rendre l'économie locale plus forte en diminuant l'importation des ressources naturelles. »
2. « Améliorer l'impact environnemental de la construction en diminuant la quantité de déchets produits et en augmentant la qualité de tri de ces déchets. »
3. « Encourager le développement d'une économie non délocalisable en favorisant la déconstruction, le tri et le réemploi de matériaux locaux. »

Tel qu'illustré à Figure 4, nous pouvons distinguer quatre sections de l'urban mining :

1. La déconstruction sélective et audit de pré-démolition
2. Le réemploi et préparation au réemploi
3. Le recyclage
4. L'upcycling

Nous les développons ici plus en détail.

La déconstruction sélective et audit de pré-démolition

« While waste remains valueless it will be wasted. »⁹
(Pawley, 1975, cité par Gorgolewski, 2017, p57)

Afin de considérer les bâtiments comme des banques de matériaux, un changement d'approche de tout le secteur de la construction et de la démolition est nécessaire car il s'agit de voir le stock de déchets comme des ressources et le stock bâti comme source potentielle de matériaux. La réutilisation de matériaux peut prendre différentes formes (Figure 5). Les matériaux réutilisés peuvent provenir du bâtiment

⁹ Traduction personnelle: « Tant que les déchets restent sans valeur, ils seront jetés. »

préalablement déconstruit, des bâtiments déconstruits dans les environs, d'entreprises de déconstruction, de plateformes d'échanges ou être disponibles sur site (Gorgolewski, 2017).

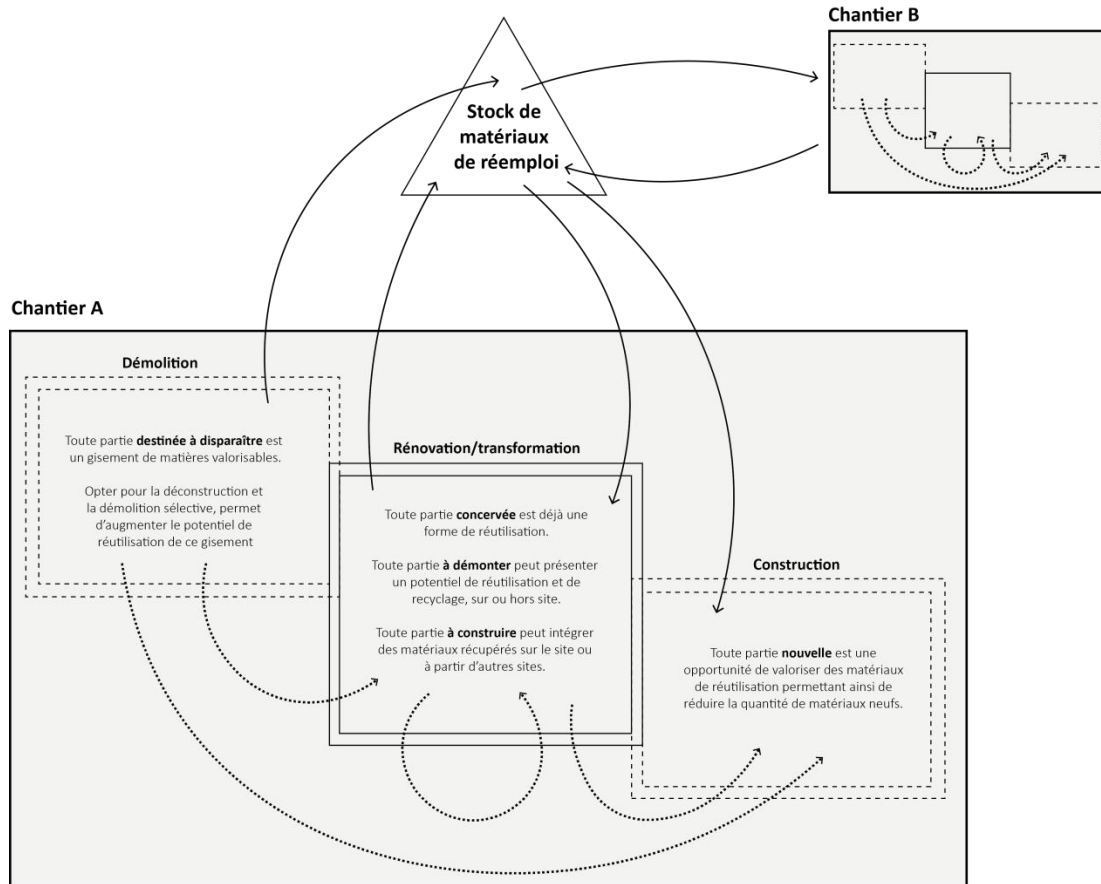


Figure 5: La réutilisation sous toutes ses formes (Source: inspiré du guide pratique et réemploi, 2013)

De façon à exploiter les matériaux issus des bâtiments en déconstruction, une connaissance du stock du bâti (inventorisation) est primordiale. Cette inventorisation sert à évaluer les possibilités de valorisation de chaque type de matériaux et/ou produit de chaque bâtiment afin que les matériaux puissent être valorisés au travers de filières de réemploi ou du recyclage. De plus, l'inventorisation sert à savoir si la déconstruction sélective est rentable ou non par rapport à une démolition classique et peut servir pour la planification et l'optimisation des étapes de déconstruction ou de démolition d'un bâtiment. Réaliser un inventaire de pré-déconstruction/audit de pré-démolition, mettant en avant le potentiel de valorisation de certains éléments, devrait donc être réalisée le plus tôt possible dans le projet (Nordby et al., 2008)(Romnée & Vrijders, 2017)(Guhyyoot et al, 2018).

Un exemple d'audit de pré-démolition a été réalisé en 2007 par l'Atelier d'Architecture Alain Richard pour le projet *l'Escale* à Esneux. Il s'agissait de la transformation d'un entrepôt et d'une téléboutique. Les architectes ont porté une attention particulière à la déconstruction sélective des éléments pouvant faire l'objet d'un réemploi sur site. Toutes les spécifications envers le démontage, la mise en dépôt, les moyens d'exécution et de sécurité et l'évacuation des décombres ont été spécifiées dans le métré descriptif du projet.

Le réemploi et préparation au réemploi

La deuxième section de l'urban mining concerne le réemploi et la préparation au réemploi. En effet, après avoir récupéré les matériaux à réemployer, les matériaux nécessitent un traitement en plusieurs étapes avant d'entamer un nouveau cycle de vie. Ces étapes de préparation au réemploi sont le démontage, la préparation et nettoyage éventuel, la réparation, la documentation, l'emballage, le transport, le stockage, la promotion et la vente (Guhyoot et al, 2018).

Certains outils ont déjà été mis en place afin de répondre à cette demande, tels que les plateformes d'approvisionnement de matériaux de réemploi qui promeuvent le réemploi de matériaux et composants existants en regroupant les revendeurs et les types de matériaux. Par l'analyse du contenu, des fonctions, des forces et des faiblesses d'une liste non exhaustive de ces plateformes, nous constatons que la description des produits disponibles est souvent très restreinte (Tableau 1).

TABEAU 1: COMPARAISON DES PLATEFORMES DE REVENTE DE MATERIAUX EN LIGNE (SOURCE : AUTEUR, 2019)

Nom	Type de plateforme	Vente et achat par les particuliers	Matériaux				
			Localisation	Quantité	Prix	Etat	Infos techniques
<i>Backacia</i>	Revente en ligne	✓	✓	✓	✓	✓	✗
<i>Cycle-up</i>	Revente en ligne	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Harvestmap</i>	Revente en ligne	✗	✓	✓	✓	✗	✗
<i>Materialenmarktplaats</i>	Revente en ligne	✗	✓	✓	✓	✓	✗
<i>Opalis</i>	Cartographie des revendeurs de matériaux	✗	✓	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
<i>PlanetReuse</i>	Revente en ligne	✓	✗	✗	✗	✗	✗
<i>Re.Source</i>	Revente en ligne	✗	✓	✗	✓	✗	✗
<i>Readymader</i>	Revente en ligne	✓	✓	✓	✓	✓	✗
<i>Rotor DC</i>	Magasin physique	✗	✓	✓	✓	✗	✗
<i>R-place</i>	Revente en ligne	✓	✓	✓	✓	✗	✗
<i>Salza</i>	Vente avant déconstruction	✓	✓	✓	✗	✗	✗
<i>Youbric</i>	Revente en ligne	✓	✓	✗	✓	✗	✗

Un exemple de réemploi est la façade du musée *Kaap Skil* à Oudeschil (Texel, Pays-Bas) construit en 2011. Les architectes, *Mecanoo Architecten*, ont opté pour un bardage composé de palplanches de bois dur scié récupérées sur le Canal de la Hollande-Septentrionale (Figure 6)(Gorgolewski, 2017).



Figure 6: Bardage en palplanches de bois dur scié (Source: Mecanoo Architecten)

Le recyclage

« Circular economy is not about recycling of volume, but about recycling of value »¹⁰
(Guldager Jensen & Sommer, 2016, p243)

La troisième section de l'urban mining s'intéresse au recyclage. Certains pays européens, comme la Belgique, les Pays-Bas et le Danemark, déclarent déjà recycler environ nonante pourcents de leurs déchets de construction et de démolition. La plupart des activités de recyclage consistent en réalité à broyer et à utiliser ce broyat comme base routière ou pour d'autres utilisations de moindre valeur. Or, même s'il s'agit de « produits recyclés », on assiste à une perte de valeur d'usage et de valeur d'échange. Dans la littérature, cette perte de valeur est appelée sous-cyclage ou « downcycling » (Gorgolewski, 2017).

Ce broyat d'inertes contient encore bien souvent des éléments de construction qui pourraient faire l'objet d'un réemploi. Aujourd'hui le prix des inertes concassés approchent zéro euro par tonne car leurs débouchés sont limités. Les matériaux qui constituent ce broyage représentent pourtant un prix vingt à cinquante fois supérieur. Rotor cite les exemples suivants : les seuils en pierre bleue (700 €/tonne), les briques de réemploi (220 €/tonne), les carrelages en céramique (800 €/tonne), etc. Un tri plus fin sur le chantier permettrait non seulement d'éviter à ces matériaux ayant encore de la valeur d'être réduit à du remblai mais il permet également aux entreprises de démolition de revendre les matériaux soigneusement démontés. Les entreprises de démolition ont donc tout intérêt à « déconstruire » les bâtiments au lieu de les démolir (Guhyoot et al, 2018).

Selon le CSTC (Romnée & Vrijders, 2017), plusieurs conditions doivent être rencontrées pour qu'un matériau soit recyclable :

1. « Les matériaux doivent être techniquement recyclables selon des procédés conformes. »
2. « Les composants doivent être facilement accessibles et non contaminants. »
3. « L'opération de recyclage (comme toute opération de retraitement de la matière) doit être rentable économiquement. »

¹⁰ Traduction personnelle: « L'économie circulaire ne concerne pas le recyclage du volume, mais le recyclage de la valeur. »

Le recyclage peut être catégorisé en deux grandes sections : le recyclage en boucle ouverte ou en boucle fermée. Le recyclage en boucle ouverte (« open loop ») signifie que les matériaux recyclés sont destinés à une autre application, par exemple, le concassage des inertes pour une utilisation en fond de fondation. Le recyclage en boucle fermée (« closed loop »), quant à lui, implique un recyclage dans la même application, par exemple le recyclage du gypse. Cependant, tous les matériaux de construction ne présentent pas le même potentiel de recyclage. Le CSTC les a catégorisés en quatre familles : bien recyclés, moyennement recyclés, peu recyclés, pas ou très peu recyclés (Tableau 2)(Romnée & Vrijders, 2017).

TABEAU 2: POTENTIEL DE RECYCLAGE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION (SOURCE : ROMNEE & VRIJDEERS, 2017)

Bien recyclés	Moyennement recyclés	Peu recyclés	Pas ou très peu recyclés
– Inertes – Métaux – Bois non traité – Terre – Emballages papier et carton	– Profils (châssis) – Béton cellulaire – Conduites et les câbles en PVC – Verre – Emballages en bois et emballages en plastique	– Plastiques en PP ou PE (hors emballages) – Films PVC – Plâtre – Produits composites en bois (MDF, OSB, contreplaqué, etc.) – Petits déchets dangereux	– Isolants (XPS, EPS, PUR, PIR, organiques, etc.) – Couches de finition – Eléments composites – Couvertures de toit (élastomère ou bitume) – Bois imprégné

Des recherches récentes indiquent que le recyclage en lui-même ne suffit pas à résoudre les problèmes de ressources, car il ne permet pas de dissocier le développement économique de l'épuisement des matières premières non-renouvelables. L'Union européenne utilise 8 566 millions de tonnes de matières premières, dont 7 654 (89 %) millions de tonnes ne sont pas renouvelables. Par conséquent, le recyclage est une composante importante mais non suffisante des politiques de durabilité pour remédier à l'épuisement des ressources primaires et à la production de déchets (Gorgolewski, 2017).

Un exemple de recyclage est la moquette de Desso¹¹. En 2008, Desso a lancé son programme « Take Back » qui consiste à récupérer des moquettes usagées. Un an plus tard, ils ont développé « DESSO Refinity », une technique qui leur permet de séparer le fil et les fibres de la sous-couche afin de les recycler séparément. Le fil est recyclé par leurs fournisseurs et le bitume de la sous-couche sert de matière première à la fabrication de routes et de toitures. L'industrie du ciment récupère tous les déchets non recyclables afin de les utiliser comme combustible secondaire (Romnée & Vrijders, 2017).

L'upcycling

« Si les humains upcyclaient, ils pourraient arpenter cette planète de manière féconde. Pour formuler autrement, à ce stade, après tant de dégâts, la question n'est plus d'avoir une empreinte écologique moins négative, puisque désormais nous pouvons en avoir une positive. »

(Braungart & Mc Donough, 2013, p50).

¹¹ Desso : <http://www.desso.com/>

L'idée principale du développement durable est le principe des « 3R », à savoir la réduction, la réutilisation et le recyclage. Sur base du principe des « 3R » et de l'idée de faible émission de carbone, l'upcycling repose sur un nouveau concept : « 4R » (Figure 7). Ce quatrième « R » divise le recyclage en deux parties : recyclage et régénération. La régénération implique que l'on porte une attention particulière au prolongement de la durée de vie du produit et à la diminution de l'utilisation de ressources naturelles (Xu & Gu, 2015).

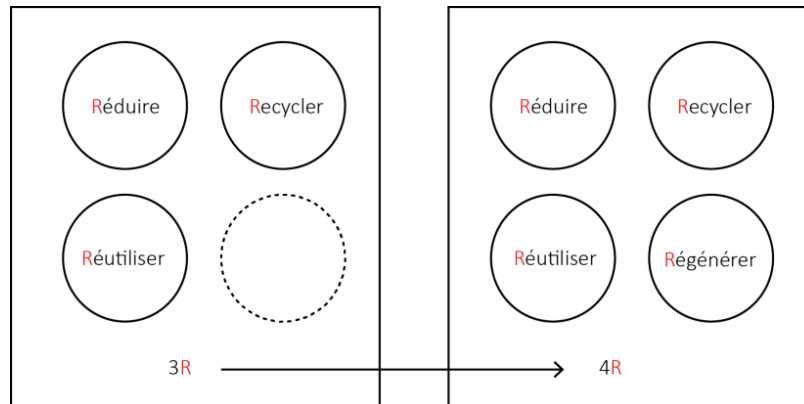


Figure 7: Du « 3R » au « 4R » (Source : traduit de l'original de Xu & Gu, 2015)

L'upcycling est une réponse à l'inefficacité du sous-cyclage (« downcycling ») expliqué dans la section précédente. En effet, l'upcycling, également appelé « surcyclage », désigne un processus qui consiste à transformer des objets ou de matériaux de récupération en produits de plus haute valeur que les objets ou matériaux d'origine. Le terme « upcycling » a été introduit par Reiner Pilz en 1994 et a ensuite été popularisé par William McDonough et Michael Braungart grâce à leur livre publié en 2002 intitulé « Cradle to Cradle. Remaking the Way We Make Things » (Braungart & Mc Donough, 2002)(Xu & Gu, 2015).

Ils développent ce terme plus en détail dans leur second livre « The Upcycle. Beyond sustainability - Designing for abundance », publié en 2013. Sur la Figure 8, la courbe supérieure représente la philosophie de l'upcycling, un effort pour être « meilleur » et pas « moins mauvais » pour la planète. Cette philosophie résulte en des produits qui non seulement sont moins mauvais pour l'environnement, mais surtout meilleurs (Braungart & Mc Donough, 2013).

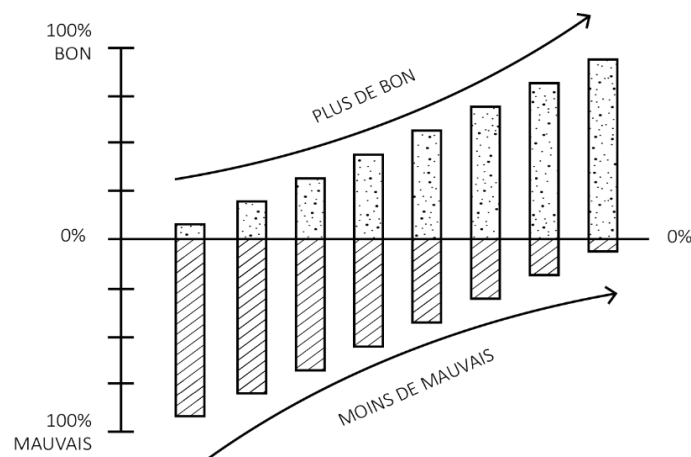


Figure 8: Changement de paradigme eco-efficacité vs. eco-efficience (Source: Braungart & Mc Donough, 2013, p48)

Un exemple d'upcycling est le programme « Net-Works »¹² d'Interface qui travaille en collaboration avec les pêcheurs de pays en développement. Les pêcheurs récupèrent les filets usagés jetés à la mer pour les revendre en tant que matière première afin d'en faire des moquettes. Ce programme combine donc une solution commerciale à un enjeu écologique et social (Haenen, 2018).

2.3.2 Modèles économiques d'une construction circulaire

La deuxième grande thématique de l'économie circulaire concerne les modèles économiques. En effet, le modèle économique linéaire que l'on connaît actuellement, ne laisse pas de place pour une réflexion sur le prolongement de la durée de vie ou le traitement en fin de vie des matériaux ou produits : les ressources sont utilisées pour produire des choses qui seront consommées avant d'être jetées. L'économie circulaire supprime la notion de déchets : ce qui est déchet pour l'un peut être ressource pour un autre, lorsque les modèles de production sont adaptés en conséquence. Rien ne se perd, rien ne crée, tout se transforme, comme l'avait dit Lavoisier. L'économie circulaire a donc besoin de nouveaux modèles économiques afin de former des boucles de production. L'objectif commun de ces nouveaux modèles économiques est que la croissance ne dépende plus de l'exploitation des ressources naturelles (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

Nous analysons trois modèles économiques novateurs qui soutiennent cette approche : l'économie de la fonctionnalité, l'économie du partage et le prolongement de la durée de vie.

L'économie de la fonctionnalité

Walter Stahel, dont nous parlons dans le point 1.1, s'implique également dans ce qu'il appelle le concept de « functional service economy » (« économie de la fonctionnalité ») qui consiste à vendre le service rendu par un produit, plutôt que de vendre le produit en tant que tel. Dans ce modèle, les consommateurs ne sont plus les propriétaires des produits mais en quelque sorte, des locataires. En 2010, Thomas Rau développe le modèle « Turntoo » basé sur l'idée de Stahel (Figure 9) (Rau & Oberuber, 2016).

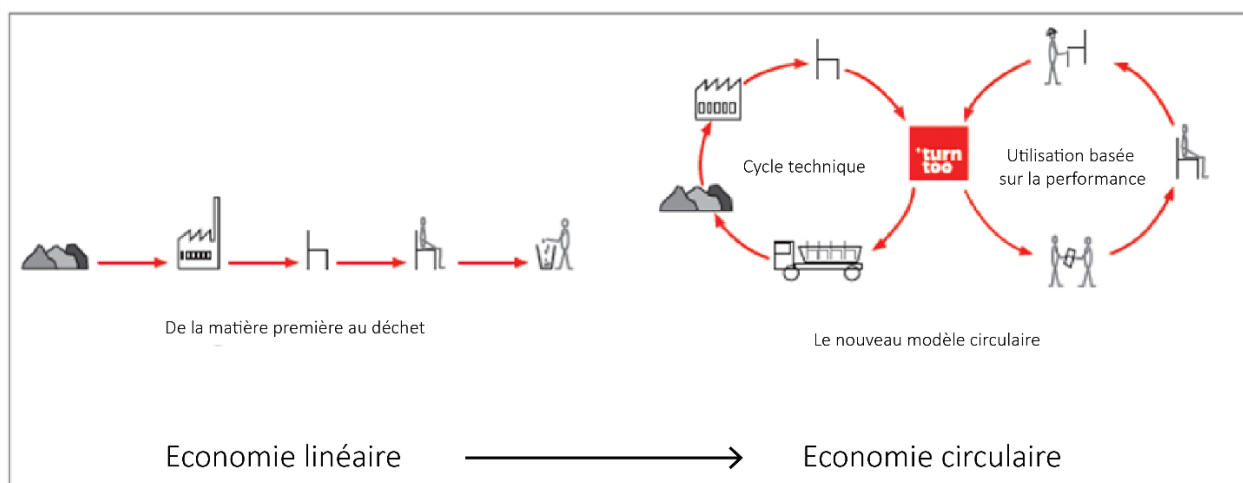


Figure 9 : Modèle Turntoo (Source : traduction de l'original de Thomas Rau)

¹² Net-Works : <http://net-works.com/>

Ce modèle présente de nombreux avantages, aussi bien pour les fabricants que pour les clients. D'une part les fabricants conservent un plus grand contrôle sur les produits qu'ils produisent ainsi que sur l'énergie et les matériaux incorporés, permettant de cette façon un meilleur entretien, un nouveau conditionnement et une récupération des matériaux optimisée. Les fabricants ont donc tout intérêt à prévoir une durée de vie la plus longue possible et à rendre leurs produits plus robustes et plus facilement démontables pour en faciliter la réparation. Contrairement à un modèle économique linéaire, c'est aux fabricants de s'assurer la réparation et/ou le remplacement du produit. Les clients, quant à eux, en tire également parti, car ils ne paient que pour le service dont ils ont besoin, et souvent reçoivent un meilleur service puisque le fabricant a un plus grand intérêt à fournir un produit qui a une longue durée de vie (Rau & Oberhuber, 2016).

Appliquer les principes de l'économie de la fonctionnalité au secteur de la construction n'est pas une chose aisée. Pour les entreprises de fabrication, il est en effet difficile d'envisager la reprise des matériaux de construction dû à la durée de vie particulièrement longue comparativement aux autres biens de consommation. Pourtant, certains éléments du bâtiment pourraient plus aisément convenir à ce mode de pensée et plus particulièrement les techniques spéciales et des équipements : éclairage, chaudières, panneaux solaires et photovoltaïques, double flux, pompe à chaleur, etc. (Romnée & Vrijders, 2017).

Un exemple d'économie de la fonctionnalité dans le secteur de la construction est l'exemple de l'aéroport de Schiphol et le partenariat avec Philips Lighting (aujourd'hui Signify) et leur programme « Pay per lux » où la lumière est vendue comme un service. Cette solution permet à l'aéroport de payer uniquement pour le nombre de lux consommés et non les lampes ni l'électricité qu'elles consomment. Philips Lighting reste propriétaire et responsable des installations (Rau & Oberhuber, 2016).

L'économie du partage

L'économie de partage se caractérise par des pratiques de consommation qui ne conduisent pas à un transfert de propriété. Elle promeut donc l'accès plutôt que la propriété.

L'économie du partage offre de nombreux avantages : offrir la possibilité d'épargner et/ou de gagner de l'argent ; changer les habitudes des consommateurs ; réduire l'utilisation des ressources et favoriser une consommation plus durable ; faciliter une croissance économique durable ; et renforcer la cohésion sociale dans les villes (Curtis & Lehner, 2019).

Le CSTC identifie trois piliers sur lesquels repose l'économie du partage (Romnée & Vrijders, 2017) :

1. Créer des plateformes qui relient l'offre et la demande ;
2. Offrir des logiques alternatives de propriété et d'accès aux produits. Par exemple la location, le prêt, l'échange, l'abonnement, la donation, etc. ;
3. Offrir des formes plus collaboratives de consommation.

Un exemple d'économie du partage sont les espaces de coworking, aussi appelé espace de travail collaboratif. Le principe du coworking est que le travailleur ou l'entreprise loue un ou plusieurs bureaux, privés ou non, à l'heure, à la demi-journée, à la journée, à la semaine, au mois, au trimestre ou « à la carte », avec un tarif dégressif. La location d'un bureau donne accès aux équipements communs tels qu'une photocopieuse, une imprimante, un accès Internet, des salles de réunion et de visioconférence,

etc. Souvent, les espaces de coworking proposent également des espaces de convivialités partagés comme une salle de repos et une cuisine avec une machine à café. Ces espaces de convivialités favorisent les rencontres et aux échanges (Scaillerez & Tremblay, 2016).

Le prolongement de la durée de vie

L'économie circulaire promeut le « recyclage à l'infini » des matériaux, ce qui rend l'investissement en une qualité de matériaux supérieure attrayante. Une étude d'OVAM affirme qu'il est essentiel de choisir un matériau de haute qualité car il aura potentiellement une durée de vie plus longue qu'une alternative moins couteuse.

Prenons l'exemple d'un complexe de plancher. Une réalisation conventionnelle est moins couteuse à l'achat que la variante adaptable proposée (Figure 10). Imaginons qu'après dix ans, on veuille remplacer ce plancher. Par conséquent, il faudra le démolir, puis le remplacer, ce qui génère une grande quantité de déchets et engendre un coût important. L'alternative avec des matériaux de haute qualité et démontables est donc la plus économique, même si l'investissement est plus onéreux (Debacker et al., 2015).

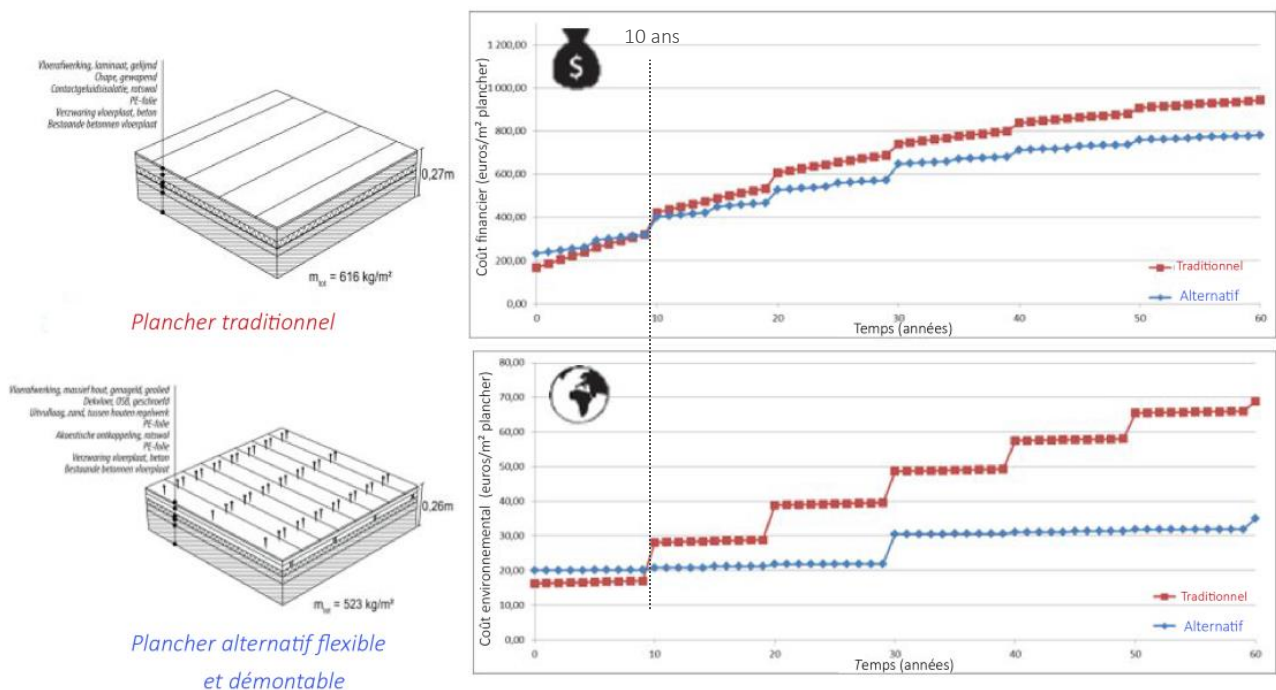


Figure 10 : Comparaison du coût financier et environnemental d'un plancher traditionnel et un plancher alternatif flexible et démontable (Source : traduction de l'étude d'Ovam)

2.3.3 Concevoir et construire circulaire

La troisième thématique de l'économie circulaire concerne la conception et la construction d'un bâtiment dans l'esprit de circularité. Aujourd'hui, il n'existe pas de directives officielles sur la façon de concevoir et de construire les bâtiments afin qu'ils puissent être déconstruits. Les bâtiments actuels sont construits afin de répondre aux besoins présents, sans (ou avec peu) de considération sur la manière dont ils

pourront être adaptés, rénovés ou déconstruits en fin de vie. Par conséquent, chaque intervention dans ce type de bâtiments engendre une grande quantité de déchets (Delcourt et al., 2018).

Concevoir des bâtiments plus flexibles, qui peuvent être adaptés dans le temps, permet au bâtiment de répondre plus longtemps aux exigences qui lui sont imposées. De plus, concevoir des bâtiments qui peuvent être déconstruits en fin de vie plutôt que démolis, est une piste intéressante pour éviter les déchets de démolition (Delcourt et al., 2018). Guldlager Jensen et Sommer (2016), y voit également d'autres avantages : éviter l'extraction de ressources naturelles, permettre une construction plus rapide et plus simple, optimiser l'exploitation et l'entretien, optimiser le recyclage et la réutilisation, utiliser les bâtiments en tant que banques de matériaux.

Ce chapitre aborde cinq thématiques qui sont autant d'outils d'aide à la conception et construction circulaire, à savoir :

- Séparer des strates
- Permettre l'adaptabilité dans le temps
- Le choix des matériaux
- Le passeport matériau
- Design for Deconstruction

Séparer les strates

En 1994, Stewart Brand s'intéresse au travail de Frank Duffy. Dans les années '70, Duffy imaginait le bâtiment en plusieurs couches distinctes : « *Our basic argument is that there isn't any such thing as a building. A building properly conceived is several layers of longevity of built components* »¹³ (Brand, 1994, p12).

Les quatre couches distinguées par Duffy sont : Shell, Services, Scenery et Set (coquille, services, scénario, décor) (Figure 11). La première couche désigne la structure, dont la durée de vie égale à celle du bâtiment car ces travaux sont compliqués à réaliser et très onéreux. Les « services » sont l'électricité, la plomberie, l'air conditionné, les ascenseurs et doivent être remplacés approximativement tous les quinze ans. Le scénario désigne l'aménagement des cloisons intérieures, faux plafonds etc. qui sont à changer tous les cinq à sept ans. Ce qu'il appelle « Set » désigne la position des meubles et des objets du quotidien des occupants, souvent une question de mois ou de semaines (Brand, 1994).

Stewart Brand (1994) analyse également ce concept de couches du bâtiment. Selon lui, il est préférable de concevoir les bâtiments comme une succession de couches, indépendantes les unes des autres, chacune avec des durées de vie différentes afin de faciliter l'intervention sur certains éléments sans toucher à d'autres. Cette durée de vie est représentée par les épaisseurs de traits sur la Figure 12.

¹³ Traduction personnelle : « Notre argument de base est qu'il n'existe pas de bâtiment. Un bâtiment bien conçu est constitué de plusieurs couches de longévité des composants de bâtiment »

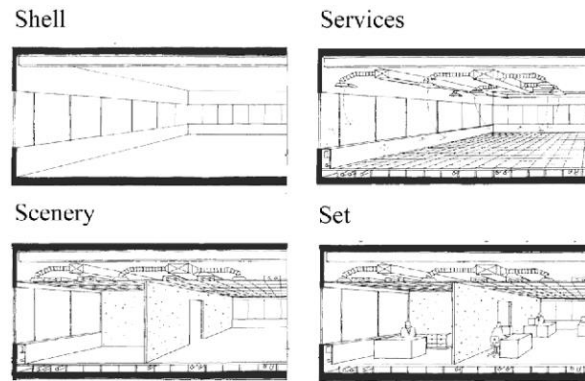


Figure 11: Frank Duffy – Shearing layers (Source : Brand, 1994)

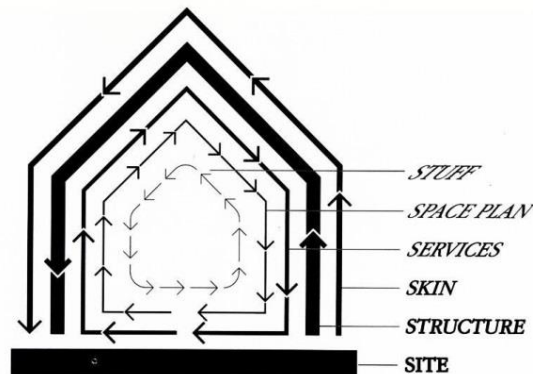


Figure 12 : Diagramme de Stewart Brand (Source : Brand, 1994)

Stewart Brand étend la liste de Duffy, à six couches (Figure 12) : Site, Structure, Skin, Services, Space plan, Stuff (site, structure, peau, services, aménagement, objets). Aux quatre couches de Duffy, il ajoute le « site » qu'il définit comme étant le cadre géographique, éternel. La « peau » désigne les surfaces extérieures, les façades, qui doivent être remplacées ou renouvelées en profondeur tous les vingt ans environ car elle subit les aléas du climat (Brand, 1994). Cette approche de conception se décline en deux principes. Tout d'abord, le « reconfigurable building » qui est la capacité de modifier la structure et les espaces d'un bâti pour s'adapter à de nouvelles exigences. Ensuite, le Design for Deconstruction, où un bâtiment et les éléments qui le composent sont conçus pour être désassemblés sans en altérer leur qualité (Durmisevic, 2006).

Un exemple de séparation des strates de la construction est la maison communale de Brummen par RAU Architecten. La commune de Brummen cherchait à construire une maison communale semi-permanente pour une durée de minimum vingt ans. Le projet a donc été conçu et construit en séparant les strates afin de pouvoir démonter le bâtiment en temps voulu. Ce qui résulte en un bâtiment dont plus de nonante pourcents des éléments pourront être démontés en fin de vie du bâtiment (Troost, 2018).

Permettre l'adaptabilité dans le temps

Le deuxième principe concerne l'adaptabilité d'un bâtiment dans le temps. Le besoin de changement est un phénomène de société qui a commencé au tournant du XXe siècle. De nombreux architectes et entrepreneurs vantent une flexibilité et liberté de choix pour l'utilisateur. Toutefois, la majorité des

bâtiments construits se caractérisent par leurs structures statiques rigides qui ne peuvent être modifiées sans démolition. Ils ne sont pas conçus pour être transformés afin de répondre à des exigences changeantes sans démolition ni production de déchets, et leurs éléments ne sont pas conçus pour être récupérés et réutilisés. Par convention, la durée de vie technique et fonctionnelle d'un bâtiment moderne est d'environ 50 ans. Pourtant, aujourd'hui, des bâtiments vieux de 15 ans sont démolis pour faire place à de nouvelles constructions (Durmisevic, 2006)(Durmisevic et al., 2017).

William McDonough et Michael Braungart (2002) ont divisé l'économie circulaire en deux grands cycles : les nutriments biologiques et les nutriments techniques. Concernant le secteur de la construction, Ana Aguiar et ses collègues prétendent qu'un bâtiment issu de matériaux biologiques (renouvelable) est tout aussi circulaire qu'un bâtiment démontable (réutilisable). Ils y ajoutent un troisième cycle : la conception réversible (Figure 13) (Aguiar et al., 2019). Ce qui signifie que les bâtiments doivent avoir la capacité d'évoluer afin de permettre l'utilisation le plus longtemps possible de ce qui est mis en place. Il peut s'agir d'un changement de fonction, d'un changement d'usage ou d'une adaptation à un usage multiple en fonction des nouvelles exigences.

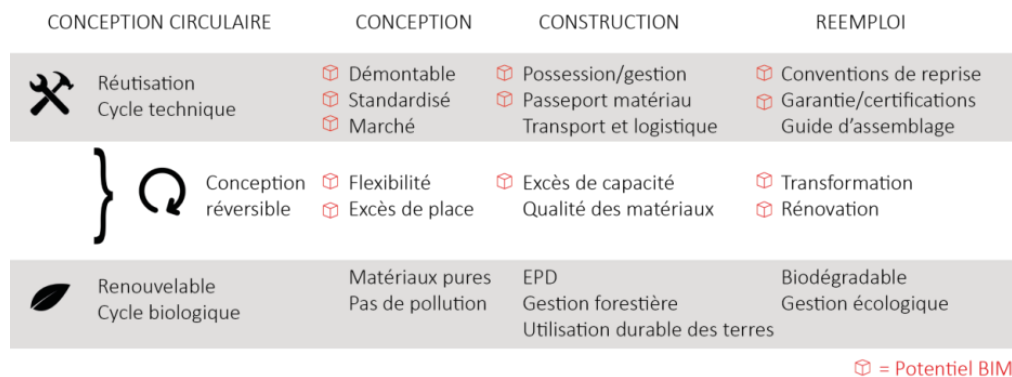


Figure 13 : Différents principes de conception circulaire (Selon l'original de Aguiar, Vonk, & Kamp, 2019)

Dans sa thèse publiée en 2006, Elma Durmisevic propose trois scénarios qui comparent le cumul des coûts de transformation dans des bâtiments après cinquante ans (Figure 14 : *Coût d'une habitation après 50 ans* (Source : traduit de Durmisevic, 2006)).

La première colonne de la Figure 14, montre le scénario d'une habitation traditionnelle qui n'est pas conçue pour être adaptée dans le temps. Imaginons qu'elle nécessite d'importantes transformations tous les vingt ans. Après cinquante ans, le cumul des changements apportés à cette habitation revient à trois fois le montant du bâtiment initial. La deuxième colonne de la Figure 14 : *Coût d'une habitation après 50 ans* (Source : traduit de Durmisevic, 2006), montre le scénario d'une habitation traditionnelle qui n'est pas non plus conçue pour être adaptée dans le temps et qui de plus, nécessite des ajustements spatiaux tous les cinq ans et un changement de la technique d'installation tous les dix ans. Après cinquante ans, ce scénario revient à quatre à cinq fois plus cher que le bâtiment d'origine. Le coût de la structure devient alors minime comparé aux coûts qu'engendrent les transformations du bâtiment. La troisième colonne de la Figure 14 : *Coût d'une habitation après 50 ans* (Source : traduit de Durmisevic, 2006), montre quant à elle, une habitation conçue pour être adaptée dans le temps. Le diagramme montre l'investissement total après cinquante ans en tenant compte de l'approche de la conception pour le démontage ; les changements

apportés coûtent la moitié du bâtiment d'origine. D'après la ligne rouge sur les graphiques, le surcoût dû à l'application des principes d'adaptabilité dans le temps est rentabilisé après dix ans (Durmisevic, 2006).

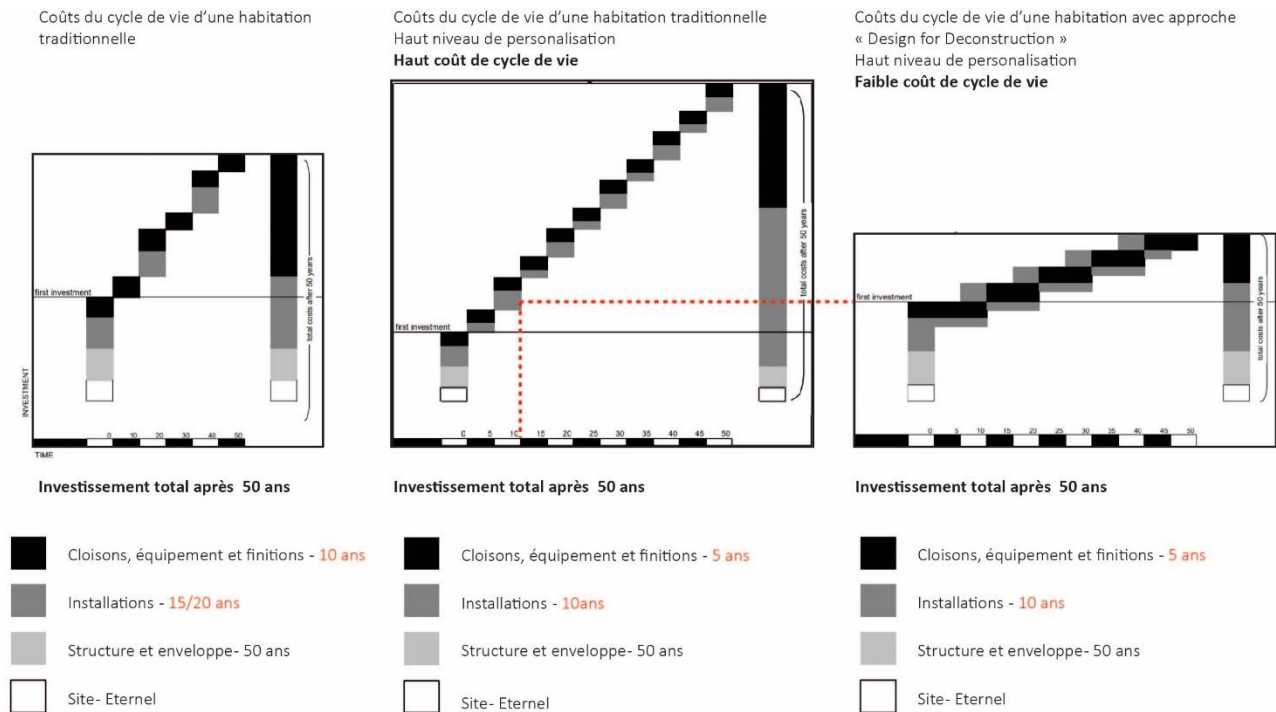


Figure 14 : Coût d'une habitation après 50 ans (Source : traduit de Durmisevic, 2006)

Concevoir des bâtiments pouvant être adaptés dans le temps permet donc de diminuer considérablement le coût lors de l'exploitation, des transformations et de la démolition tout en offrant des possibilités de modifications bien supérieures à une conception traditionnelle. Même si l'investissement initial est sensiblement plus élevé qu'une habitation traditionnelle, les calculs du cycle de vie (*Life Cycle Costs – LCC*) prouvent que l'investissement est rentable à long terme. Les décisions prises tôt dans le processus de conception peuvent donc avoir une influence importante sur les coûts totaux du cycle de vie (Durmisevic, 2006).

Afin de pouvoir mesurer le potentiel de réutilisation des éléments de construction, leur potentiel de démontage doit être mesuré et évalué. En 2006, Elma Durmisevic identifie deux indicateurs clés pour un potentiel de réutilisation élevé. Le premier est l'indépendance fonctionnelle/physique des éléments, le deuxième est le potentiel de remplacement. En continuant ses recherches, elle ajoute un troisième indicateur. Ce dernier facteur examine les possibilités de réutilisation afin de fournir une évaluation précise du potentiel de réutilisation des systèmes, composants et éléments du bâtiment. Cet indicateur est calculé en fonction de de l'ampleur des dommages qui peuvent survenir au cours du processus de démontage (Durmisevic et al., 2017).

Jeroen Verberne s'appuie sur les recherches d'Elma Durmisevic pour développer ce qu'il appelle le « Building Circularity Index » (BCI) (Figure 15). Il s'agit d'un indicateur de circularité à l'échelle globale du bâtiment. Le BCI peut être utilisé pour comparer le potentiel circulaire de bâtiments entre eux.

L'élaboration du BCI repose sur l'hypothèse qu'un bâtiment est un assemblage de matériaux qui sont reliés les uns aux autres d'une certaine manière. Chaque matériau a son propre index de circularité. Un bâtiment entièrement circulaire serait donc composé de 100 % de matériaux réutilisés et d'un potentiel de réutilisation de 100 % en fin de vie. Tous les indicateurs, décrits ci-après, donnent des scores factoriels compris entre 1 (entièrement circulaire) et 0 (entièrement linéaire) (Verberne, 2016).

Le BCI est calculé en quatre étapes (Figure 154) (Verberne, 2016) :

1. Indicateur de circularité des matériaux (« Material Circularity Indicator » - MCI)

Le MCI est calculé à partir du pourcentage de matière première utilisée (*vierge/secondaire*), du rendement de la matière première utilisée (valorisation énergétique/mise en décharge) et du cycle de vie technique. Le MCI représente cinquante pourcent du potentiel circulaire des produits (Ellen MacArthur Foundation & Granta Design, 2015)

2. Indicateur de circularité du produit (« Product Circularity Indicator » - PCI)

Le PCI est calculé en combinant le MCI et les possibilités de démontage du produit, appelé « Disassembly Potential » (DP) par Elma Durmisevic. Les possibilités de démontage du produit sont évaluées à l'aide de sept facteurs déterminants du démontage (Durmisevic, 2006).

3. Indicateur de circularité du système (« System Circularity Indicator » - SCI)

Le SCI cumule le MCI et le PCI. Le PCI se calcule en fonction des couches de Brand (Brand, 1994), ce qui donne un indicateur de circularité du système (SCI) pour chaque couche.

4. Indicateur de circularité du bâtiment (Building Circularity Indicator – BCI)

L'indicateur de circularité du bâtiment permet de synthétiser tous les résultats en une seule note corrigée par le niveau d'importance basé sur les couches de Brand (Brand, 1994). En effet, les produits ayant une durée de vie plus courte ont un devoir d'être circulaire plus important que les produits ayant une durée de vie plus longue.

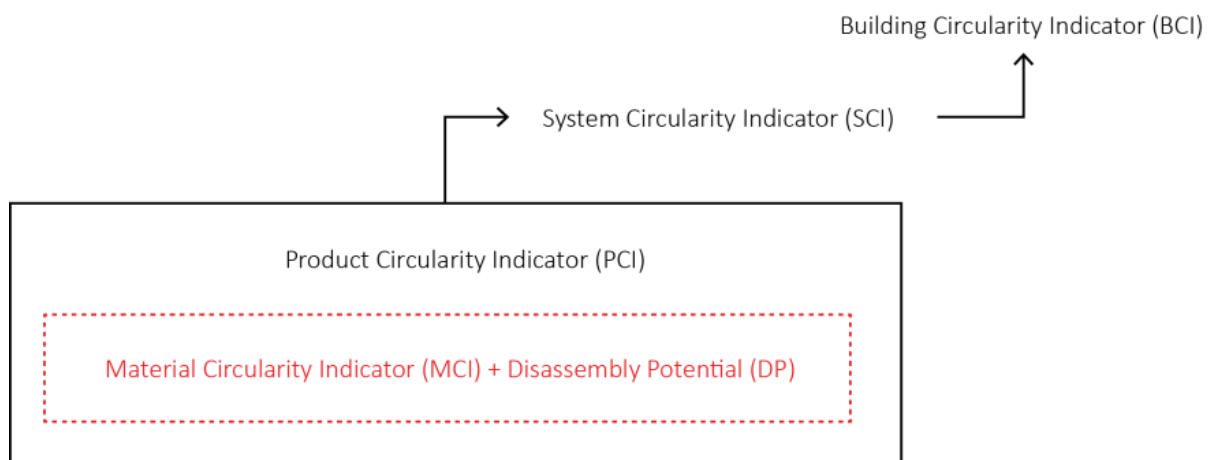


Figure 15 : Building Circularity Index (Source : inspiré de l'original d'Alba Concepts)

Un exemple d'adaptabilité dans le temps est le projet finlandais « Tila », un bâtiment de 39 appartements à Helsinki, construit en 2011. Les appartements sont vendus à l'état brut et sont prêts à être occupés au moment de l'achat (Figure 16). Les résidents déterminent et construisent les subdivisions intérieures

comme ils l'entendent. Il s'agit donc d'un projet en deux temps. Premièrement, la construction du « squelette », puis le « remplissage » effectué par les habitants (Ilonen, 2017).

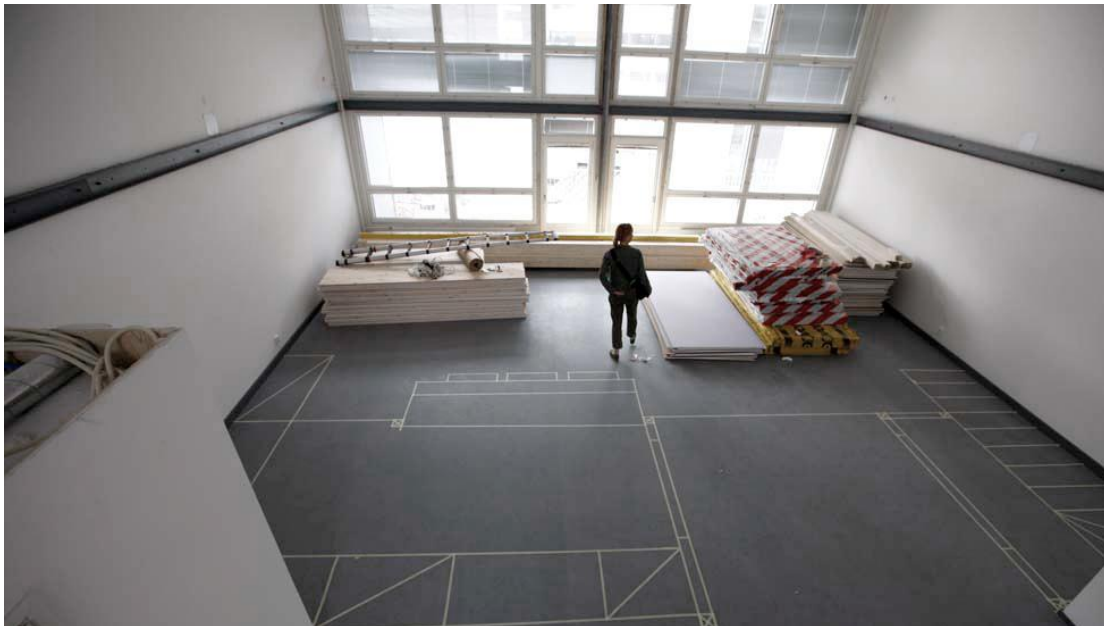


Figure 16: Tila housing (Source: Talli Architecture & Design)

Choix des matériaux

Le troisième principe concernant la conception et la construction circulaire est le choix des matériaux. Dans le cadre de l'économie circulaire, le choix des matériaux mis en œuvre est primordial car l'objectif est qu'ils circulent dans une boucle fermée. Le choix des matériaux doit porter attention à la qualité technique, l'aspect esthétique, l'impact environnemental, l'accessibilité, la provenance ainsi que la fin de vie du matériau (Braungart & Mc Donough, 2002).

En 2005, McDonough and Braungart Design Chemistry (MBDC) a lancé « Cradle to Cradle » (C2C), une certification de l'impact sur l'environnement de tout type de produits, y compris les matériaux de construction, les produits de décoration intérieure, les textiles, les tissus, les cosmétiques, les produits de soins à domicile, le papier, les emballages et les polymères. Selon le principe de C2C, les matériaux mis en œuvre dans une économie circulaire appartiennent soit au cycle de nutriments biologiques, soit au cycle de nutriments techniques. Ce modèle s'inspire des « métabolismes biologiques » naturels et le transpose au secteur industriel : les composants doivent être capables de retourner dans leur cycle biologique ou technique. Ainsi, les produits certifiés C2C, sont manufacturés avec des éléments (ou nutriments) que l'on peut récupérer et réutiliser continuellement, sans danger pour l'environnement ni la santé. Ce modèle tend à éliminer la notion de déchet et repose sur l'emploi d'énergies renouvelables. Plusieurs « cascades » existent dans le modèle mais l'économie circulaire préfère que le composant soit réutilisé sous sa forme actuelle plutôt que simplement recyclé car il demande moins de transformations et donc moins de consommation de ressources (Figure 17). A côté de la réutilisation sous sa forme actuelle et le recyclage, William McDonough et Michael Braungart listent d'autres pistes de revalorisation de matériaux :

maintenance, remise à neuf, utilisation comme nutriment biologique ou comme matière première (Braungart & Mc Donough, 2002).

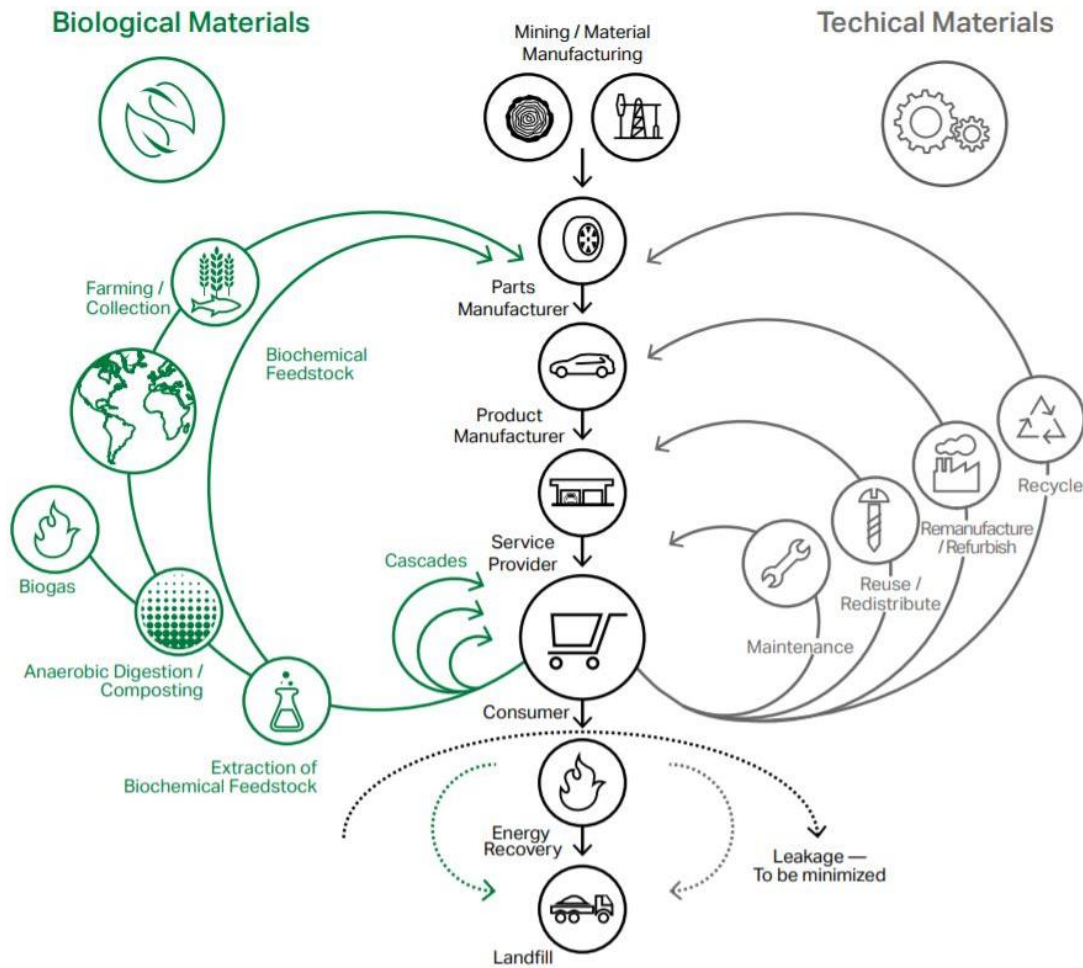


Figure 17 : The circular economy (Source : 3XN selon l'original de la fondation Ellen MacArthur)

Le CSTC définit trois principes de base afin d'assurer la circularité des matériaux (Romnée & Vrijders, 2017) :

- Utiliser des matériaux de haute qualité qui peuvent supporter plusieurs cycles de vie ;
- Utiliser des produits ne contenant pas de composants toxiques pour l'environnement et la santé humaine ;
- Utiliser des matériaux aussi purs que possible, ce qui facilitera leur réutilisation ou recyclage.

Un exemple de matériau issu du cycle biologique est « GreenSulate », une innovation d'Ecovative Design. Il s'agit d'un panneau d'isolation fabriqué à base de champignons. Dans ce matériau, les champignons filamenteux sont utilisés pour lier les cosse de graines, comme les bardanes de coton et les écorces de sarrasin, en un panneau rigide résistant. Le résultat est un matériau isolant biodégradable, très résistant au feu et exempt de tout composé chimique dangereux (Rosenberg & Guldager Jensen, 2012).

Passeport matériaux

« Afval zijn grondstoffen die in de anonimiteit terecht gekomen zijn. »¹⁴

(Thomas Rau, 2016, p111)

Le quatrième point de la conception et construction circulaire que nous analysons est l'intérêt du passeport matériau. En effet, les fabricants et leurs clients recherchent des données fiables et facilement exploitables concernant les matériaux. Ils ont également besoin d'informations concernant les manières d'accéder à un matériau ou composant et pour en connaître sa composition. Ces données récoltées sont nécessaires afin de déterminer le potentiel de circularité, les bénéfices du recyclage par rapport au sous-cyclage (downcycling) et l'optimisation de la valeur résiduelle des matériaux. Les outils existants ne répondent que partiellement à ces besoins car ils mettent davantage l'accent sur la mesure et la réduction de l'impact négatif des matériaux sur l'environnement (Luscuere, 2016).

Basé sur le concept décrit dans la publication « Resource Re-Plation » (Hansen et al., 2012) sous le nom de « Nutrient Certificates », les passeports matériaux regroupent des informations telles que :

- les fiches techniques,
- le numéro d'identification apposé sur l'élément physique,
- la durée de vie estimée,
- la procédure de maintenance,
- les instructions de sécurité pour la manipulation des éléments,
- les instructions pour le désassemblage,
- le transport,
- le stockage,
- les opportunités potentielles de réutilisation.

Pour chaque composant ou matériau, les informations recueillies doivent être décrites selon deux catégories. La première catégorie concerne les caractéristiques initiales, tels que fournies par le fournisseur ou fabricant. La deuxième répertorie les caractéristiques et les conditions du composant après utilisation, c'est-à-dire l'exposition historique aux intempéries, le transport, le démontage, le contact avec des produits chimiques, etc. (Guldlager Jensen & Sommer, 2016).

Au besoin, le passeport matériau est mis à jour tout au long du cycle de vie de l'élément physique. Il s'agit donc de l'historique du produit qui contient de précieux renseignements sur les matériaux ou composants qui sont destinés à être réutilisés. Le passeport matériau est un outil indispensable pour mettre l'économie circulaire en pratique. Il sécurise la réutilisation dans le processus de conception et est le lien entre la conception et la disponibilité des matériaux récupérables. Afin d'assurer la sécurité de la construction de l'immeuble, toutes les informations doivent être certifiées et conservées mise à jour par une autorité qui peut garantir l'exactitude des données (Luscuere, 2016).

¹⁴ Traduction personnelle : « Les déchets sont des matières premières qui ont fini dans l'anonymat. »

Ces passeports ont le potentiel d'incorporer les informations existantes tels que des certifications environnementales, fiche de sécurité, analyse du cycle de vie, etc. On évite ainsi de reproduire les données et de réinventer la roue. Ceci est une des préoccupations majeures des fabricants de matériaux et de leurs fournisseurs, car ce sont eux qui génèrent les passeports matériaux. Il est important de signaler que le passeport matériau n'est pas normatif comparé à un certificat. Avoir un passeport ne rend pas nécessairement le matériau adapté à l'économie circulaire. Ce qui importe dans ce cas, c'est le contenu de ce passeport (Luscuere, 2016).

Le bureau d'architecture 3XN/GXN a établi cinq principes à prendre en compte dans l'établissement d'un passeport matériau (Guldager Jensen & Sommer, 2016) :

1. Afin de s'assurer de la qualité et la valeur du matériau et des ressources, la **documentation** durant toutes les phases de la durée de vie est cruciale :
 - La documentation reprend toutes les informations utiles du niveau des matériaux à l'ensemble du bâtiment ;
 - Toutes les informations doivent être accessibles tout au long du processus par les partenaires de projet ;
 - La propriété, l'accessibilité et la responsabilité de l'information doit être définie.
2. L'**identification** physique sur le matériau est importante pour trouver l'information correcte
 - Chaque matériau devrait avoir une étiquette unique pour faciliter l'identification (code d'identification) ;
 - Une base de données contenant toutes les informations pertinentes concernant le matériau doit être créée ;
 - Un lien entre le code d'identification et la base de données doit être établi et entretenu ;
3. Pour garantir la valeur et la qualité des matériaux, un **entretien** minutieux est nécessaire :
 - Les lignes directrices concernant l'entretien physique des matériaux doivent être accessibles ;
 - Le passeport numérique doit être mis à jour si des modifications ou des rénovations sont apportées au bâtiment ;
 - Les lignes directrices concernant la façon dont les matériaux peuvent être restaurés (à valeur identique) après désassemblage doivent également être accessibles.
4. Fournir des procédures de **sécurité** pour gérer toutes les phases de la vie de l'immeuble :
 - Prévoir un document spécifique concernant les procédures de sécurité spécifiques à la construction ;
 - Prévoir un document spécifique concernant les procédures de sécurité spécifiques à la l'exploitation et l'entretien ;
 - Prévoir un document spécifique concernant les procédures de sécurité spécifiques à la déconstruction ;
5. Fournir les informations nécessaires sur la façon de manipuler les matériaux durant le **stockage entre la déconstruction et la réutilisation**.
 - Documenter qui est responsable des matériaux et des composantes durant la période de transfert (propriétaire) ;
 - Privilégiez le transfert direct de matériaux entre sites de construction afin de réduire le stockage ;

- Documenter comment les matériaux doivent être manipulés et stockés

Un exemple de bâtiment qui a été documenté à l'aide de passeports matériaux est le prototype « Circular Building » d'Arup. Une base de données des matériaux a été créée sur base d'une plateforme dans le *cloud*. Les données figurant dans cette base de données sont liée au modèle BIM ainsi qu'au site internet du projet¹⁵. Chaque matériau utilisé est accompagné d'un QR-code contenant les informations nécessaires pour faciliter la réutilisation future (un passeport matériau)(Gorgolewski, 2017).

Design for Deconstruction

*« The **longevity** of a building is determined by the building's ability to maintain structural integrity for a long time, as well as its desirability in terms of function and style. The structural integrity of a building is determined by the **durability** of materials and the quality of construction. Desirability is determined by the building's ability to adapt to change over time. Striking a balance between durability and **adaptability** in the design of a building, results in building **flexibility** – an important quality in buildings that are constructed according to the principles of sustainable construction. »¹⁶*

(Macozoma, 2001, p23)

Lorsque les ressources se faisaient rare, les bâtiments ont été construits afin que les matériaux de construction soient de nouveau disponibles en fin de vie du bâtiment (Guldager Jensen & Sommer, 2016). Une grande partie du patrimoine bâti actuel, dans toute sa diversité, se prête d'ores et déjà à des opérations de démontage et de désassemblage en vue du réemploi (Guhyoot et al, 2018). Ces bâtiments ont été construits en respectant certains principes qui anticipent et facilitent leurs adaptations aux changements.

Il existe une abondante littérature scientifique en architecture et en ingénierie qui formule des recommandations à l'égard des concepteurs d'aujourd'hui pour faciliter le travail des déconstructeurs de demain. Ces mesures permettent aux constituants d'un bâtiment d'être insérés dans un cycle de production fermé où ils peuvent être réutilisés, réassemblés ou recyclés en nouveaux produits de qualité similaire ou supérieure.

Dorsthorst et Howalczyk (2002) appellent cette pratique le « design for recycling », c'est-à-dire la conception pour le recyclage. D'autres appellations sont également utilisées telles que « design for change » (conception en vue du changement), « design for adaptability » (conception en vue de l'adaptabilité), « design for disassembly » (conception en vue du désassemblage), « design for

¹⁵ Circular Building : <http://circularbuilding.arup.com/>

¹⁶ Traduction personnelle : « La **longévité** d'un bâtiment est déterminée par sa capacité à maintenir son intégrité structurelle pendant une longue période, ainsi que par son attrait en termes de fonction et de style. L'intégrité structurelle d'un bâtiment est déterminée par la **durabilité** des matériaux et la qualité de la construction. La désirabilité est déterminée par la capacité du bâtiment à s'adapter aux changements au fil du temps. Trouver un équilibre entre la durabilité et l'**adaptabilité** dans la conception d'un bâtiment se traduit par une **flexibilité** et une qualité de construction importante dans les bâtiments construits selon les principes de la construction durable. »

deconstruction » (conception en vue de la déconstruction) ou « design for dismantling » (conception en vue d'une séparation aisée des matériaux)¹⁷.

La mise en pratique de ces principes du « design for change » et du « design for adaptability » permet de définir un concept de bâti qui supporte le changement de façon plus effective. Le « design for deconstruction » (DfD) rend la déconstruction sélective techniquement et économiquement faisable.

Dans leur livre « Building a Circular Future », le bureau danois 3XN/GXN résume une série de recommandations pratiques en cinq principes de base. Ces principes sont également repris dans la littérature à ce sujet (voir Gorgolewski, 2017).

Les cinq principes de base établis par 3XN/GXN sont (Guldager Jensen & Sommer, 2016) :

1. Choisir des **matériaux** qui ont les propriétés pour être réutilisés :
 - Choisir des matériaux de haute qualité qui pourront assumer plusieurs cycles de vie ;
 - Choisir des matériaux non-toxiques pour la santé ni l'environnement ;
 - Utiliser les matériaux sous une forme la plus pure possible, qui peut facilement être recyclée ;
2. Concevoir le bâtiment en tenant compte du **cycle de vie** complet du bâtiment :
 - Rendre les éléments dissociables couche par couche afin de pouvoir remplacer facilement les couches qui présentent une durée de vie moins longue (ex. bardage) ;
 - Concevoir le bâtiment de manière à ce qu'il puisse s'adapter à différentes fonctions (flexibilité) ;
 - Concevoir le bâtiment en tant qu'assemblage temporaire de matériaux qui conserve la valeur des matériaux.
3. Concevoir un bâtiment simple qui entre dans certains **standards** :
 - Utiliser des systèmes modulables qui peuvent être remplacés facilement (ex. panneaux de façade) ;
 - Utiliser des éléments préfabriqués qui sont plus rapide à assembler et prévus pour être désassemblés facilement ;
 - Créer des composants lorsque la composition des éléments devient trop complexe ;
4. Choisir des **connections** réversibles qui peuvent être assemblées et désassemblées plusieurs fois :
 - Ménager une voie d'accès aux systèmes de fixation
 - Préférer les assemblages mécaniques qui n'endommagent pas le matériau lors de l'assemblage et le désassemblage
 - Eviter les liants, mais si nécessaire, préférer des liants pouvant être dissous
5. En plus d'élaborer un plan de construction, prévoir également la **déconstruction**
 - Imaginer un plan de déconstruction simple afin d'accélérer le processus de désassemblage (stratégie)
 - Assurer la stabilité durant la déconstruction du bâtiment
 - Veiller à ce que le plan de déconstruction respecte les bâtiments environnants, la nature et les personnes.

¹⁷ Voir lexique

Un exemple de DfD est le projet « Alliander » de Rau Architects. Par exemple, pour concevoir la toiture, les architectes ont fait appel à un fabricant de montagnes russes pour sa grande expérience dans la conception en utilisant une quantité minimale de matériaux. Le résultat est une structure 30 % plus légère qu'une conception classique, en utilisant 35 % de matériaux en moins, et qui en plus permet le démontage en fin de la vie du bâtiment (Ellen MacArthur Foundation, 2016).

2.4 L'influence du réemploi sur les différents corps de métiers

Dans son ouvrage intitulé « Déconstruction et réemploi. Comment faire circuler les éléments de construction. », Rotor cite une liste nouvelles tâches à effectuer par l'introduction du réemploi : identification des réutilisables, démantèlements, opérations de manutention, ponçages, nettoyages, découpages, réparations diverses, restaurations, traitements de surface, promotion des éléments, documentations, remontages, etc. Toutes ces pratiques du réemploi pourraient s'accompagner d'une spécialisation et créer ou redécouvrir de nouveaux métiers (Guhyoot et al, 2018).

Une autre piste est que les opérateurs existants du secteur de la construction prennent en charge certaines de ces fonctions. Dans ce cas, le réemploi implique des changements importants concernant les rapports entre les acteurs de l'économie et provoque un bouleversement dans la division du travail qui caractérise aujourd'hui le secteur de la construction. A l'heure actuelle, cette division du travail repose sur la séparation légale entre la profession d'architecte et celle d'entrepreneur. Or, le réemploi entraîne une certaine proximité entre l'architecte, les fournisseurs et l'entrepreneur (Figure 18)(Guhyoot et al, 2018).

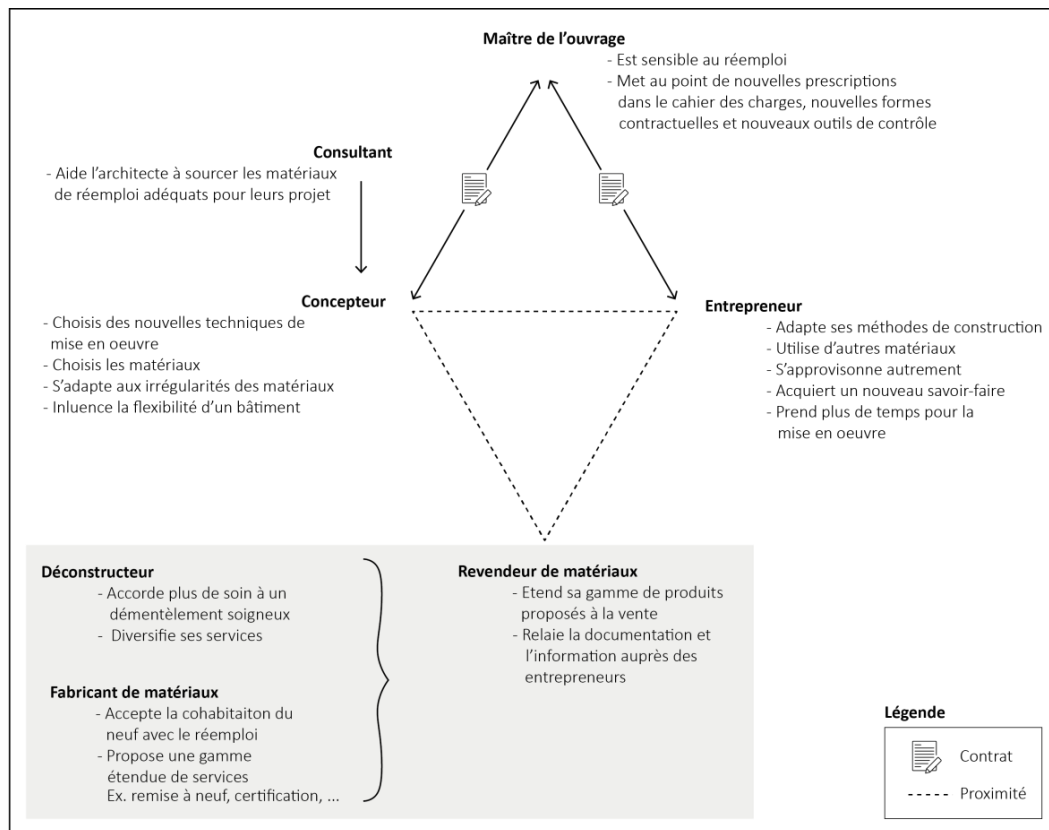


Figure 18: Reconfigurations des métiers (Source : Auteur, 2019)

Maître de l'ouvrage, propriétaire et gestionnaire de patrimoine bâti

Ils sont la source de la commande. C'est donc à eux que revient la possibilité de spécifier le recours à des matériaux de réemploi ou la déconstruction de leur bien. Le maître de l'ouvrage devra mettre au point de nouvelles prescriptions dans le cahier des charges, nouvelles formes contractuelles et nouveaux outils de contrôle (Guhyoot et al, 2018).

Concepteur

L'architecte concevra d'une manière différente. Il choisit des méthodes et des matériaux de construction durables et conçoit un bâtiment facile à transformer ou à démonter. Les matériaux de réemploi obligent le concepteur à s'adapter aux irrégularités que ces matériaux peuvent présenter. Toutefois, son rôle dans la chaîne ne change pas mais le choix des matériaux devient une étape particulièrement importante dans le processus de conception. L'architecte peut se faire aider par un consultant afin de l'aider à sourcer les matériaux de réemploi adéquats à ses projets (Guhyoot et al, 2018).

Entrepreneur

Si le marché du réemploi se développe et les filières d'approvisionnement deviennent plus régulières, prévisibles, de bonne qualité et en quantité suffisante, le métier d'entrepreneur ne change pas fondamentalement. En revanche, il utilise d'autres méthodes de construction, des matériaux de construction durables et recycle les matériaux de construction en les achetant chez des revendeurs ou entreprises de démolition. L'irrégularité de la source d'approvisionnement peut néanmoins nécessiter un savoir-faire particulier ou se traduire en un temps de mise en œuvre plus long (Guhyoot et al, 2018).

Déconstructeur

Actuellement, les pratiques des entreprises de démolition sont bien éloignées du soin que demande la déconstruction. Pourtant, si le client en fait la demande et donne un délai raisonnable, une entreprise de démolition acceptera volontiers de procéder à un démantèlement soigneux. Selon Rotor, les entreprises de démolition vont diversifier leurs services. La déconstruction en vue du réemploi peut devenir une de ces prestations (Guhyoot et al, 2018).

Fabricant de matériaux

La cohabitation du neuf et du réemploi deviendra plus courante. Un revendeur pourrait par exemple compléter un lot de briques de réemploi avec des briques neuves. Le chiffre d'affaire du fournisseur de matériaux proviendra désormais d'une gamme de service proposée à la clientèle, par exemple proposer un contrat de maintenance (Guhyoot et al, 2018).

Revendeur de matériaux

Les revendeurs ont la possibilité d'acheter et de revendre des matériaux qui seraient normalement destinés à une incinération ou à la décharge. Grâce à sa banque de matières premières ainsi créée et à son réseau d'entrepreneurs, ses bénéfices ont de grandes chances de fleurir. Les revendeurs peuvent également constituer un relais important en matière d'information et de documentation auprès des entrepreneurs (Guhyoot et al, 2018).

1. Le BIM

Ce chapitre est consacré à une analyse des concepts et vocabulaire utilisés dans le cadre d'un processus BIM ainsi qu'une analyse de l'influence du BIM sur le métier d'architecte. Dans la première partie, nous abordons les dimensions du BIM, les niveaux de maturité BIM, les niveaux de développement, les rôles des acteurs, les échanges entre logiciels et la sauvegarde des données. L'analyse de l'influence du BIM est développée dans la deuxième partie. Elle concerne les potentialités et les limites du BIM, la place de l'architecte dans le processus BIM et l'intégration du BIM dans les bureaux d'architecture.

3.1 Les concepts et jargon du BIM

3.1.1 Les dimensions du BIM

La maquette numérique BIM ne contient pas uniquement des informations géométriques, mais également des informations qu'elle intègre ou permet de créer. Ces types d'informations sont répartis de la 2D à la 7D, certaines sources vont même au-delà (Guldager Jensen & Sommer, 2016)(De Maestri, 2017)(Rasking & Decroos, 2017).

BIM 2D

La 2D correspond aux dimensions géométriques X-Y d'un plan papier ; plans, coupes, détails. Même si les architectes travaillent en 3D, la 2D reste la base contractuelle de validation pour la plupart des projets BIM. Ces informations 2D doivent obligatoirement être issues de la maquette numérique 3D afin d'assurer la concordance des documents

BIM 3D

Le BIM 3D correspond aux trois dimensions géométriques X-Y-Z, c'est-à-dire largeur, profondeur et hauteur. Ces dimensions sont essentielles afin de créer une maquette numérique BIM 3D. La 3D permet la visualisation, la mise à jour automatique des coupes et détails, la détections d'interférences, les relevés de l'existant, le calcul des quantités, etc.

BIM 4D

La 4D ajoute la dimension du « temps » aux trois dimensions géométriques d'un projet. Cette dimension supplémentaire permet de voir et d'analyser l'évolution du projet dans le temps en associant la modélisation géométrique au planning de construction. Elle permet ainsi de visualiser la progression d'une phase de construction dans le temps.

BIM 5D

La 5D intègre la notion de coût et de quantités d'un ouvrage. Le BIM 5D permet non seulement d'estimer le temps mais également le coût de la construction ou d'obtenir un aperçu de la situation financière d'un projet à un moment donné.

BIM 6D

A partir de la 6D, les définitions diffèrent selon les sources. Certaines préfèrent parler d'intégration de données pour la maintenance et d'un aperçu du « LCC » (« Life Cycle Costs »). D'autres associent la 6D à tout ce qui concerne le développement durable d'un bâtiment, par exemple les analyses énergétiques.

BIM 7D

Encore une fois, la littérature diverge à propos de la 7D. Pour certains, le BIM 7D intègre la gestion, la maintenance et l'intégration des informations du cycle de vie du bâtiment. Généralement délivré à la fin de la construction, le modèle 7D tel que construit (« *as-built* ») contient toutes les informations nécessaires au maître de l'ouvrage pour l'utilisation et la maintenance du bâtiment. Il contient toutes les informations nécessaires pour le facility management, le property management et l'asset management (De Maestri, 2017)(Rasking & Decroos, 2017).

D'autres préfèrent parler d'un modèle BIM qui renseigne les possibilités de désassemblage et réutilisation des composants d'un bâtiment en fin de vie. Ce modèle est alors utilisé pour l'audit de pré-démolition en fin de vie du bâtiment et permet au client de revendre les matériaux qui constituent son bien. Penser à la fin de vie du bâtiment dès la conception de celui-ci, permet de concevoir un bâtiment avec un haut potentiel de circularité des matériaux (Guldager Jensen & Sommer, 2016).

3.1.2 Les niveaux de maturité BIM

Il existe plusieurs niveaux de maturité BIM, autrement dit des étapes vers le BIM collaboratif (Figure 19). Ces niveaux de maturité permettent de mieux comprendre le parcours nécessaire pour évoluer d'un processus classique (CAD) vers un processus BIM (De Maestri, 2017)(Rasking & Decroos, 2017).

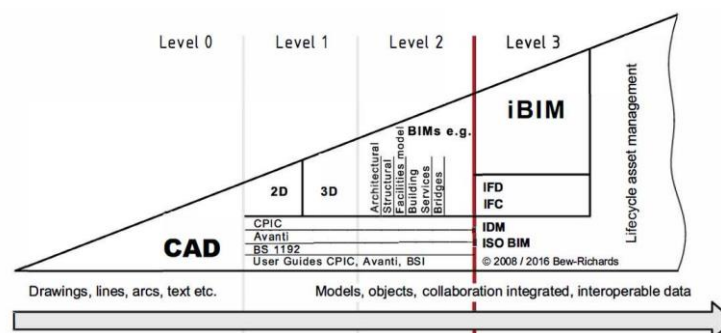


Figure 19 : Niveaux de maturité BIM (Source : BEW et Richards, 2008)

Niveau 0

Le niveau 0 correspond à un dessin 2D papier ou numérique, il s'agit du « pré-BIM ». La plupart des bureaux belges se trouvent actuellement à ce stade. La collaboration est difficile car chacun utilise ses normes de dessin, il n'existe pas de structuration commune (Rasking & Decroos, 2017).

Niveau 1

Le niveau 1 est souvent référencé comme « lonely BIM ». Il est ici question d'un mélange de 2D et de maquette numérique 3D. Il n'est pas encore question d'objets renseignés ni de LoI (Level of Information) pour chaque objet. La différence avec le niveau 0 est qu'ici, les données sont structurées et répondent à

une norme spécifique (en Angleterre BS 1192:2007). Cette norme définit entre autres la géolocalisation, la présentation, la numérotation des plans, le système d’approbation et de diffusion des plans, etc. Ce n’est pas parce qu’un projet est réalisé dans un logiciel BIM qu’il est question de BIM. S’il n’y a pas de structure, les échanges sont impossibles ; il ne s’agit même pas de BIM niveau 1 (De Maestri, 2017)(Rasking & Decroos, 2017).

Niveau 2

La réelle collaboration débute à partir du BIM niveau 2. Malgré que chaque intervenant produise une maquette numérique 3D individuellement, il s’agit bien de BIM niveau 2 car il est désormais possible d’échanger ces modèles par l’utilisation du fichier natif, IFC ou Cobie. Cet échange permet de combiner toutes les maquettes en un seul modèle unique. C’est avec ce modèle unique qu’il est possible de procéder à la détection d’erreurs (clashes). Le BIM niveau 2 permet l’utilisation du BIM 4D et 5D (Rasking & Decroos, 2017).

Niveau 3

Le niveau 3 est également appelé « iBIM ». Il est considéré par beaucoup comme étant le seul « vrai BIM ». Ici, un modèle unique est stocké sur un serveur centralisé, accessible par tous les acteurs du projet et durant tout le cycle de vie du bâtiment. Actuellement, cette collaboration totale suscite de nombreuses questions à propos de la propriété intellectuelle, la responsabilité et la réglementation de l’accès/modification/enregistrement de la maquette numérique unique. Le niveau 3 est actuellement peu répandu (Rasking & Decroos, 2017).

3.1.3 Les niveaux de développement, de détail et d’information

Les acteurs du projet n’ont pas besoin des mêmes informations en fonction de l’évolution du projet. Pour répondre à ce besoin, les objets de la maquette numérique BIM sont définis selon leur niveau de développement (LOD). Il s’agit de la définition des données définitives et fiables (en rouge sur la Figure 20) aussi bien au point de vue de la géométrie que de l’information. (De Maestri, 2017)(Rasking & Decroos, 2017).

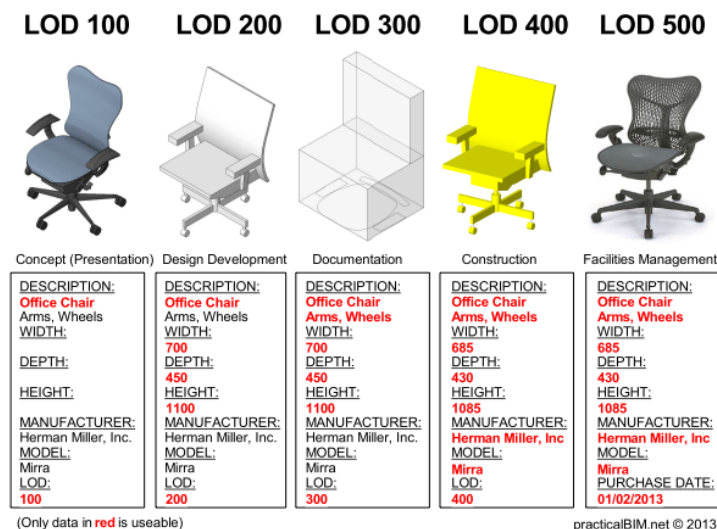


Figure 20 : Les LOD illustrés à l’aide d’une chaise (Source : practicalBIM, Anthony McPhee)

Le LOD (niveau de développement) combine le niveau de détail géométrique (Level of Detail) avec le niveau d'information (Level of Information). Le LoD (Level of Detail) est un niveau de détail qui mesure essentiellement la quantité de détails graphiques représentés dans l'élément modélisé dans la maquette numérique. Le LoI (Level of Information), quant à lui, concerne les données correspondant au contenu non représenté graphiquement. On peut donc formuler que : $LOD = LoD + LoI$ (De Maestri, 2017)(Rasking & Decroos, 2017).

Les LOD sont classés en cinq niveaux : le LOD 100 à LOD500. Ils correspondent aux étapes clé du projet, comme le démontre le Tableau 3 élaboré par Annalisa De Maestri dans son livre (De Maestri, 2017).

TABEAU 3 : LES NIVEAUX DE DEVELOPPEMENT (LOD) SELON LA CONVENTION AMERICAINE (AIA G202-2013) (SOURCE : DE MAESTRI, 2017, P47-48)

<i>Classification US</i>	<i>Phase</i>	<i>Graphisme (LoD)</i>	<i>Information (LoI)</i>
LOD 100	Concours	Diagrammes, volumétries, symboles 2D, représentation d'éléments génériques	Nomenclature générale
LOD 200	APS, APD	Définition des objets	Renseignements basiques permettant la sélection des produits et leur identification
LOD 300	PRO, DCE	Représentation 3D des objets détaillée selon les spécificiques du cahier des charges	Ajout de renseignements spécifiques sur l'allocation des espaces, le fonctionnement, l'accès et l'entretien (informations génériques)
LOD 400	Exécution-DOE	Les objets génériques sont remplacés au fur et à mesure de l'évolution de la phase par les objets des fabricants	Les informations génériques sont remplacées par les informations fabricants
LOD 500	Maintenance et gestion	Aucun ajout de détail graphique	Toutes les informations nécessaires sont incluses dans les documents d'export, y compris la maintenance, les dossiers de mise en service, la santé et les exigences de sécurité, et ainsi de suite. Les données pour l'exploitation sont toutes à disposition de l'utilisateur et leur réorganisation et mise à jour est possible si nécessaire.

3.1.4 La maquette métier et la maquette globale

Le BIM porte à croire qu'il n'existe qu'une seule maquette numérique intégrant toute l'information souhaitée du projet ; ce n'est pourtant pas le cas. Bien qu'il y ait en effet qu'un support unique d'information, celui-ci peut prendre la forme de maquette intégrée, maquette métier ou maquette fédérée. Ces trois types peuvent coexister pour un même projet selon l'avancement de celui-ci (De Maestri, 2017).

Maquette intégrée

La maquette intégrée est une maquette unique en un seul fichier regroupant tous les éléments du projet. Elle peut être stockée sous forme de format natif ou export (IFC) (De Maestri, 2017).

Maquette métier

La maquette métier est, comme son nom l'indique, spécifique à un métier, discipline ou lot de construction. Elle forme une partie de l'entité globale que constitue le projet : maquette architecturale, maquette structure, maquette CET, etc. (De Maestri, 2017).

Maquette fédérée

Aussi appelée « coordination model », la maquette fédérée est une maquette globale du projet. Elle regroupe les informations de plusieurs maquettes métiers à l'aide de liens informatiques. Il s'agit de la maquette d'assemblage du projet. Créer une maquette fédérée peut se faire en utilisant un serveur partagé organisé, soit en utilisant un logiciel compatible avec les différents corps de métiers. (De Maestri, 2017).

3.1.5 Les rôles des acteurs

Afin d'organiser le flux d'échanges d'information, de gérer les responsabilités, les accès, la propriété des données produites et leur exploitation, il est essentiel de définir le rôle de chacun des acteurs du projet.

Manager BIM

Le Manager BIM a, comme son nom l'indique, un rôle de manager du processus. Il ne s'agit pas de la personne qui modélise les objets dans la maquette numérique mais bien la personne qui est responsable du *processus BIM*. Le Manager BIM est responsable du bon fonctionnement du processus dans sa globalité, sans être compétent dans toutes les étapes de la construction ni dans tous les logiciels utilisés.

Le Manager BIM, conçoit la mise en place du BIM sur un projet. Il en est le pilote. Ses responsabilités sont entre autres ; la mise en place du processus et l'implémentation du BIM, la gestion des banques de données, la coordination des différentes maquettes métiers et des synthèses, la détection des clashes et le suivi des modifications, etc. Le profil du Manager BIM est un professionnel du bâtiment qui maîtrise aussi bien divers logiciels de modélisation et d'intégration de données et qui possède une expérience dans le management de projets et d'équipes d'acteurs avec des besoins et attentes différentes. « *Le rôle du manager BIM n'est pas celui de décideur du projet, il a plutôt un rôle de facilitateur de la mise en place du processus BIM pour l'ensemble des intervenants.* » (De Maestri, 2017, p39).

Une des tâches du manager BIM est d'établir un *protocole BIM* ; un descriptif du rayon d'action de chaque intervenant dans le BIM. Il s'agit d'un document légal attaché aux contrats de tous les professionnels impliqués dans le projet de construction ou de rénovation. Il a un aspect juridique et organisationnel car il définit le cadre dans lequel les acteurs du projet agissent en BIM. Mais aussi « comment » cette interaction a lieu, selon quelles méthodologies et avec quels moyens. Il définit l'ensemble des droits, règles et devoirs de chaque acteur du projet par rapport à la production de données BIM. Ce document est évolutif et est affiné durant tout le cycle de vie du projet. Ces choix peuvent se répercuter dans un

protocole interne au bureau qui devient alors la référence des « bonnes pratiques » de modélisation, de communication et d'échange entre collaborateurs au sein du bureau d'architecture (De Maestri, 2017).

Les principes suivants doivent figurer dans le protocole BIM (De Maestri, 2017) :

- Les caractéristiques de projet
- L'objectif ou les objectifs
- Les outils
- Les rôles en BIM et l'organigramme
- Les flux de travail et échanges
- Les chartes de modélisation
- La charte de nomenclature et nommage des éléments
- La fabrication

Coordinateur BIM

Jouer l'interface BIM entre l'équipe et le Manager BIM de projet, est le rôle du Coordinateur BIM. Il est responsable des différentes maquettes métier que son entité produit pour un certain projet. Le Coordinateur BIM est expert en BIM et connaît les processus et les besoins de son équipe. Il est l'interlocuteur du BIM Manager afin que la maquette numérique respecte les critères définis par le Manager BIM. Il applique et assure le respect de la convention BIM (protocole) au sein de son entreprise. Il est le garant de la qualité de la maquette numérique dont son entreprise à la charge et porte la responsabilité en cas d'erreur dans la maquette. Aussi bien le Coordinateur BIM que le Manager BIM ont des compétences de management mais à deux niveaux différents de responsabilité. Le BIM Manager intervient au nom de l'équipe tandis que le Coordinateur BIM intervient au nom de chaque membre du groupe (De Maestri, 2017).

Modeleur BIM

Chaque collaborateur (modeleur BIM) modélise en 3D les ouvrages suivant les recommandations établies par la convention (protocole) et les chartes graphiques établies par le BIM Manager. Il édite les modèles et les plans nécessaires à chaque phase du projet. Il contribue à compléter les données de la maquette par d'autres informations qui lui sont transmises (fiches techniques, notes de calculs). Il est le producteur de la maquette au sein de son entreprise et est responsable de créer les éléments BIM du processus (De Maestri, 2017).

3.1.6 Les échanges entre logiciels

Le secteur de la construction est partagé en de nombreux corps de métiers indépendants. Afin de concevoir, construire et entretenir un bâtiment, il est primordial que ces acteurs collaborent de façon optimale et disposent des mêmes informations. Lors d'un processus traditionnel, l'information est transmise sur papier, ce qui laisse une part d'interprétation et donc une source d'erreur potentielle. Ces erreurs sont dues à un manque d'informations cohérentes.

Avec l'avènement du BIM niveau 2, il est nécessaire de mettre en œuvre un ensemble de processus BIM dédiés non seulement à l'élaboration de la maquette numérique, mais également aux échanges des

modèles d'informations entre acteurs du projet. Les échanges peuvent se faire selon un procédé « closed BIM » ou « open BIM » (De Maestri, 2017)(Rasking & Decroos, 2017).

Closed BIM

Dans le closed BIM, tous les acteurs du projet utilisent un format commun de fichier qui nécessite une compatibilité entre les logiciels sans passer par un format d'échange. C'est le cas des « suites » d'un même éditeur, comme par exemple Autodesk avec sa suite Revit, Robot, BIM 360, Dynamo Studio, Navisworks, etc. (De Maestri, 2017).

La collaboration au sein du closed BIM peut se dérouler de deux manières ; soit en travaillant avec des fichiers liés, soit en travaillant sur un seul modèle enregistré dans le *cloud* ou sur un serveur (Rasking & Decroos, 2017).

Open BIM

Contrairement au closed BIM, l'open BIM est associé au concept d'interopérabilité et reflète la vision d'un marché de logiciels hétéroclites provenant de nombreux éditeurs. Les différents acteurs de projets n'ont en effet pas les mêmes besoins et choisissent donc les logiciels les mieux adaptés à leur métier. Ensuite, ces logiciels communiquent entre eux grâce à un format commun d'échange de fichiers. En partageant les informations parmi tous les acteurs du projet dans un seul fichier d'échange, tous les acteurs peuvent travailler efficacement sans faire d'erreurs car tous les acteurs ont accès aux informations dont ils ont besoin (De Maestri, 2017).

L'appellation « open BIM » a été déposée par buildingSMART International. BuildingSMART, auparavant IAI (International Alliance for Interoperability), est une organisation internationale qui vise à améliorer l'échange d'informations entre les applications logicielles utilisées dans l'industrie du bâtiment. Cette organisation a défini trois types de fichiers d'échange et de structuration de l'information ; l'IFC, le BCF et le format COBie (buildingSMART, 2019).

Le format IFC (Industry Foundation Classes) est un fichier d'échange qui crée un langage commun. Il permet de fournir des données utilisables tout au long du cycle de vie du bâtiment, évitant ainsi la saisie multiple des mêmes données et les erreurs qui en découlent. Il s'agit d'un format commun, standard, non propriétaire (De Maestri, 2017).

Afin que les propriétés des objets ne soient pas perdues ou modifiées lors de l'échange de fichiers par IFC, le buildingSMART Data Dictionary (bsDD) a été instauré. Il s'agit d'une bibliothèque d'objets et de leurs *attributs* qui est utilisée pour identifier les *objets* et leurs propriétés spécifiques indépendamment du logiciel utilisé (buildingSMART, 2019).

Cependant, générer un fichier IFC n'est pas aussi simple qu'« une pression sur un bouton ». L'importation ou l'exportation IFC, nécessite encore un nombre considérable de réglages à effectuer afin d'éviter les pertes ou les altérations des informations échangées. Le format IFC impose en effet une certaine rigueur de modélisation dans le logiciel natif afin que les données générées lors de l'échange soient correctement interprétées par l'IFC (De Maestri, 2017).

Le BCF (BIM Collaboration Format) est un format de fichier ouvert qui favorise la communication et la collaboration dans le cadre d'un processus BIM. Il permet d'ajouter des commentaires, des captures d'écran et plus encore sur le modèle IFC. Grâce à ce « post-it BIM », qui sépare la communication du modèle lui-même, les acteurs du projet assistent à une collaboration efficace et ouverte entre les parties dans tout projet de construction (Rasking & Decroos, 2017).

Le format COBie structure les informations majoritairement non-graphiques utiles à l'exploitation du bâtiment, c'est-à-dire au facility management. Le fichier COBie est en général une feuille Excel annexé au modèle IFC (Rasking & Decroos, 2017).

3.2 Analyse d'utilisation

3.2.1 Les potentialités du BIM

Le BIM est en train de devenir un pilier important concernant la gestion de l'information au sein de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction ainsi que des secteurs de l'exploitation, de maintenance et de gestion des installations. Il permet à tous ces acteurs d'échanger et de gérer l'information sur les éléments de construction tout au long du cycle de vie du bâtiment (De Maestri, 2017).

Nous résumons les différents atouts à partir de publications récentes en se basant sur les avantages identifiés par Le Moniteur¹⁸ (2014), Analissa De Maestri (2017) et Rasking et Decroos (2017). Nous énumérons les potentialités du BIM dans l'ordre chronologique du cycle de vie d'un bâtiment ; conception, construction et exploitation.

Conception

Améliorer la connaissance du bâti existant

Dans de nombreux cas de rénovation, les plans existants d'un bâtiment sont peu fiables, illisibles ou introuvables. Grâce aux nouvelles technologies et aux techniques, le BIM peut également être utilisé dans ces cas. Au lieu que l'architecte aille mesurer l'existant, il peut avoir recours à un scan 3D. En quelques minutes, voire quelques heures, il enregistre des milliers de points dans un fichier grâce à un faisceau laser envoyé à travers l'espace. Les points obtenus peuvent alors être assemblés à l'aide de logiciels en un « nuage de points ». Le résultat de ce scan 3D est une image 3D très précise de l'espace mesuré. Le nuage de points peut également être chargé en tant que géométrie de référence dans un logiciel BIM. Ceci permet de faciliter la modélisation et de placer les éléments dans le contexte du site (Rasking & Decroos, 2017).

Permettre la conception paramétrique

Les outils de modélisation paramétriques (a) offrent aux architectes la possibilité d'explorer des formes complexes (Figure 21). Aujourd'hui, aussi bien le BIM que les logiciels paramétriques ont gagné en notoriété tout en induisant parfois certaines formes de confusion. En effet, ces deux processus de

¹⁸ Le Moniteur des travaux publics et du bâtiment est un magazine hebdomadaire de référence dans la construction et le cadre de vie en France.

modélisation partagent le même objectif d'intégration de diverses données dans le projet architectural. Le processus BIM (c), implique l'intégration d'une couche de données supplémentaire à un modèle géométrique. Alors que la modélisation paramétrique (b), basée sur une géométrie associative, intègre directement les données dans un processus de morphogenèse. La modélisation paramétrique peut donc aussi être appelée conception par ordinateur ou « computational design » (Dautremont et al., 2019).

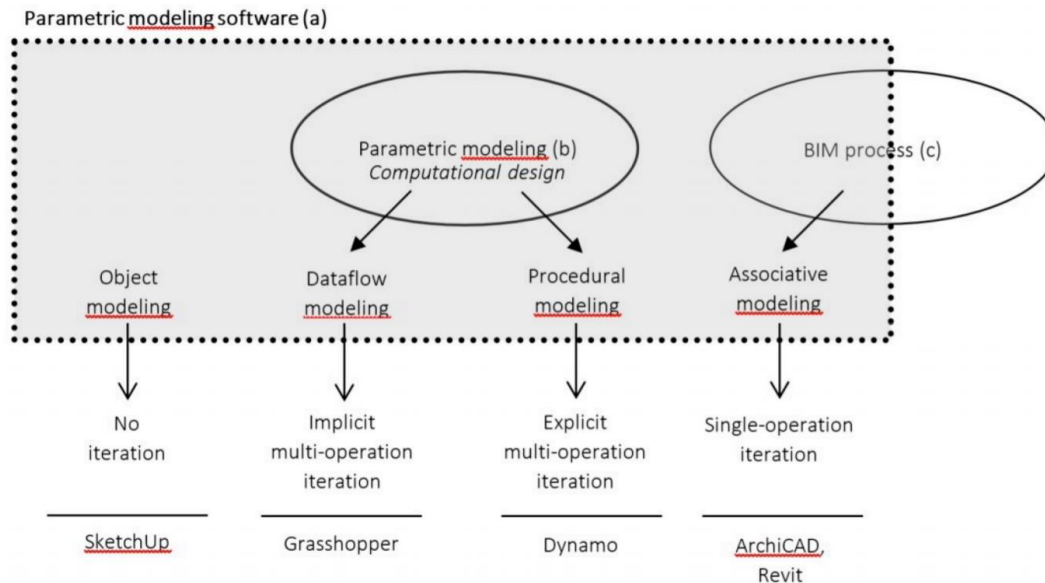


Figure 21 : Relation entre la modélisation paramétrique et le processus BIM

(Source : Dautremont et al., 2019)

Permettre de contrôler la faisabilité d'un projet

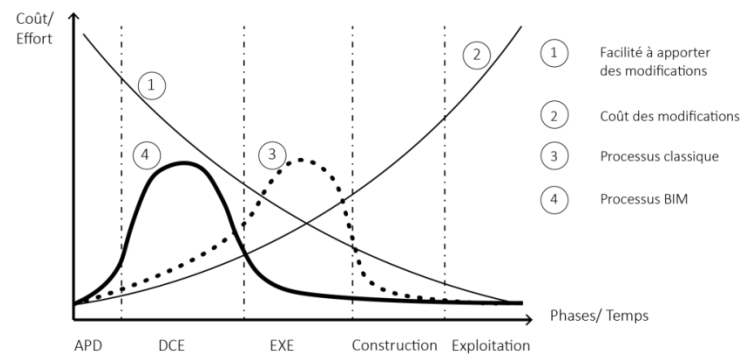
Le BIM peut intervenir très tôt dans le processus de conception. En effet, le BIM permet d'analyser et de valider rapidement le parti architectural et le programme face à des critères de budget et de temps. Il permet également de vérifier la faisabilité du projet (Le-Moniteur, 2014)

Améliorer la collaboration

Le processus d'exécution de projet classique est souvent critiqué. Le Moniteur évoque plusieurs raisons. La première est que les corps de métiers sont divisés en « silos », où chacun travaille de son côté rendant la coordination et la communication entre eux plus difficile. Une deuxième critique concerne la séparation des rôles, ce qui rend une collaboration moins efficace. La troisième s'adresse à la division du processus en différentes phases : APD, DCE, EXE, Construction et exploitation. Cette division des phases sépare entièrement la conception de la construction (Le-Moniteur, 2014).

Le BIM va à l'encontre de l'approche traditionnelle où l'architecte intervient en premier lieu, puis l'ingénieur stabilité et techniques et en dernier lieu l'entrepreneur et les sous-traitants. Le BIM adopte une approche collaborative. Il rassemble tous les acteurs clés de la conception et de la construction, ainsi que le maître de l'ouvrage dès la phase de conception. Cette mise en relation dès les phases préliminaires du projet permet d'engager une collaboration entre tous les acteurs du projet et leur permet d'accéder à la solution optimale au moyen de la simulation (Rasking & Decroos, 2017).

Dans un processus BIM, le temps de préparation du projet est plus long que lors d'un processus classique. Les courbes de Patrick MacLeamy expliquent le décalage de la temporalité (Figure 22). La courbe 1 montre que la facilité d'apporter des modifications diminue en fonction de l'avancement des phases du projet. La courbe 2 exprime que plus le projet avance dans les phases, plus il devient difficile et coûteux de le modifier. MacLeamy compare ensuite un processus classique à un processus BIM. Le processus classique type AutoCAD et échange de plan 2D (courbe 3), montre que les efforts sont surtout fournis en phase EXE. La courbe 4 représente le processus BIM et indique que les efforts tendent à se déplacer en amont de la conception du projet, limitant ainsi le risque d'erreurs et donc un gain de temps et de budget par la suite. Un projet BIM prendra donc autant de temps qu'un processus classique mais il décale la temporalité des phases et permet d'intervenir sur le projet avant la phase d'exécution (LU et al., 2014).



Faciliter la détection des interférences (clash detection)

Le BIM permet d'automatiser le processus de détection d'interférences. C'est-à-dire détecter des collisions physiques d'éléments du projet. Certains logiciels peuvent détecter si par exemple l'espace requis pour le passage d'une gaine est respecté ou non. Cette détection d'interférences permet de minimiser les erreurs et fournit une grande compréhension du bâtiment avant la construction sur le site (Le-Moniteur, 2014).

Faciliter les analyse et vérification

Grâce aux informations extraites directement de la maquette numérique BIM (tels que la géolocalisation, l'orientation, la compacité, le type de parois, les surfaces vitrées, les ombres générées et les ombres portées), l'architecte peut analyser de manière dynamique des choix de conception sur la consommation énergétique d'un bâtiment. Le but n'est pas de remplacer le travail de l'ingénieur par un outil de simulation mais de fournir une aide à la conception (Le-Moniteur, 2014).

D'autres analyses peuvent également être réalisées à partir du modèle BIM. Annalisa De Maestri (2017), départage ces outils en plusieurs grandes catégories :

- Les outils de calculs (thermiques, structurels, feu, etc.) ;
- Les outils de fabrication, qui lient géométrie et production industrielle ;
- Les outils de gestion (patrimoine, maintenance, etc.)
- Les outils d'OPR, de levée de réserve ;
- Etc.

Faciliter l'application des réglementations

Certains outils BIM, par exemple Solibri Model Checker, sont capables de comparer des données extraites d'une maquette numérique BIM à un ensemble de règle. Il est ainsi possible de vérifier la conformité du bâtiment par rapport aux normes (Le-Moniteur, 2014).

Faciliter la labellisation

Afin d'obtenir un label qui certifie un bâtiment durable, tel que la certification *BREEAM*, *LEED*, *HQE*, ou autre, il est indispensable de passer le test LCA (« Life Cycle Assesment »). Le LCA examine l'impact environnemental des produits et des éléments qui sont utilisés dans un bâtiment et sur une période temporelle depuis l'extraction de la matière première jusqu'à un éventuel recyclage.

Semblable au LCA, le LCC (« Life Cycle Costing ») évalue les coûts liés à l'entretien sur toute la durée de vie d'un bâtiment (Rasking & Decroos, 2017).

Effectuer une analyse LCA ou LCC semble actuellement difficile à intégrer dans le BIM. Cette difficulté est due au fait que ce sont deux monde séparés, travaillant chacun avec leur propre logiciel, leurs standards et leurs méthodes de travail (Rasking & Decroos, 2017).

Automatiser la documentation

Les logiciels de modélisation BIM ont la capacité de générer des documents 2D et autres, tels que des tableaux quantitatifs des surfaces, des éléments, des matériaux, etc. Ces documents sont précis et coordonnés dans toutes les vues. Ils sont automatiquement mis à jour si des modifications sont apportées au modèle BIM (Le-Moniteur, 2014).

Certains acteurs du projet ont besoin de visualiser le projet, sans nécessairement modéliser. C'est le cas du maître de l'ouvrage, du directeur de projet ou de chantier, etc. Des logiciels, appelés visionneuses ou « viewers », ont été mis en place afin de permettre l'assemblage de maquettes métiers pour créer une Maquette fédérée du projet, la coordination d'études, l'analyse de quantitatifs, les simulations 4D (De Maestri, 2017).

Le BIM va encore plus loin, il est désormais possible grâce à des lunettes 3D de plonger dans le monde virtuel, voire de superposer les deux réalités. De même qu'il est maintenant possible de visualiser sur une tablette les réseaux situés derrière un mur ou faux, plafond, et ce, sans y toucher (Le-Moniteur, 2014).

Faciliter l'estimation des coûts

La simulation 5D permet au maître de l'ouvrage d'avoir une meilleure vision budgétaire de son projet. Le BIM permet d'étudier plus facilement plusieurs scénarios (Le-Moniteur, 2014).

Construction

Faciliter la planification de la construction

Le BIM offre la possibilité de faire la liaison de la maquette numérique avec le planning du projet.

Ce modèle BIM 4D permet ainsi de simuler les phases de chantier et de produire des documents graphiques nécessaires pour faciliter le suivi du chantier (De Maestri, 2017).

D'après Le Moniteur (2014), d'autres avantages liés à la liaison du planning et de la maquette numérique BIM sont :

- La coordination des différentes phases de travaux
- La simulation des séquences de construction et l'interdépendance entre différents métiers, ce qui permet de les valider et de détecter erreurs et omissions ;
- La synchronisation des livraisons ;
- La sécurisation de travail sur le chantier ;
- L'étude de l'accessibilité des engins et leur installation.

L'optimisation du temps sur chantier, aussi appelé « construction lean » est une démarche empruntée à l'industrie manufacturière. Elle vise à éliminer toute forme de perte de temps en améliorant continuellement le processus. Le but est d'augmenter la productivité et d'optimiser le bénéfice (De Smedt, 2018).

Le BIM a la capacité de réduire considérablement les frais d'exécution car il permet de simuler virtuellement la construction d'un projet et d'en visualiser tout son processus. La collaboration entre les différents acteurs permet d'optimiser ces coûts et limiter les erreurs de mise en œuvre (De Smedt, 2018).

Faciliter le contrôle des travaux

Le BIM peut être utilisé comme moyen de contrôle par rapport à ce qui a été réalisé sur chantier. La superposition d'un scan 3D avec la maquette numérique permet de révéler la justesse de l'ouvrage réel par rapport à son modèle virtuel. Il permet ainsi d'identifier les écarts et erreurs de construction (Le-Moniteur, 2014).

Exploitation

Faciliter le Facility Management

La représentation numérique du bâtiment tel que construit réellement (BIM « *as-built* ») peut être utilisée tout au long du cycle de vie du bâtiment, c'est-à-dire également lors de l'utilisation, de la maintenance et de l'entretien. Cependant, l'utilisation pratique du BIM en phase opérationnelle dans le facility management est encore rare. L'une des raisons en est l'absence de projets construits, qui possèdent un modèle BIM « *as-built* » exploitable pour le facility management. Or, même dans les projets en cours de construction qui utilisent le BIM, beaucoup d'incertitudes persistent concernant les informations à inclure dans ce modèle BIM propice au facility management. Les standards tels que définis par *BuildingSMART* devraient prochainement éclaircir cette incertitude. Une autre raison est qu'un modèle BIM ne peut être utilisé pour le facility management que si les informations nécessaires ont été anticipées avant la construction (Krämer & Besenyoi, 2018).

3.2.2 Les limites du BIM

Le BIM paraît avoir un grand nombre d'avantages, pourtant, il reste faiblement utilisé au sein des bureaux d'architecture. Marin et Segura (2014) identifient deux limites d'ordre techniques et ergonomiques et quatre freins d'ordre juridique, économique, méthodologique et affectif.

Limites techniques

Le format d'échange IFC rencontre actuellement quelques difficultés techniques. L'exportation en IFC engendre en effet des erreurs ou des pertes d'information. De plus, le format IFC est un format statique et ne permet pas le partage de modèles paramétriques. Au vu de la rapidité d'évolution des logiciels et des formats de fichier, la question se pose également quant à la pérennité de ce format (Marin & Segura, 2014).

Limites ergonomiques

Un des avantages majeurs de la maquette numérique repose sur une 3D enrichie. Pourtant elle n'autorise pas une gestion documentaire plus large.

De plus, chaque acteur modélise de son point de vue. Une des difficultés de la maquette numérique repose donc sur l'intégration de points de vue multiples et spécifiques dans cette unique base de données (Marin & Segura, 2014).

Freins juridiques

Marin et Segura identifient trois niveaux d'interrogation. Le premier concerne la valeur de l'information et la traçabilité des actions des acteurs dans la maquette numérique. Le deuxième questionne la valeur légale du modèle numérique par rapport à la représentation en plan. Même si de plus en plus d'acteurs de la construction travaillent en 3D, la représentation 2D reste la descriptive de référence. Le troisième point concerne la propriété intellectuelle d'un modèle numérique. Ce modèle est en effet partagé, ce qui induit un transfert de données confidentielles (Marin & Segura, 2014).

Freins économiques

Il ne faut pas sous-estimer le coût financier que représente le passage d'un processus traditionnel à un processus BIM. De plus, cet investissement ne sera probablement pas rentable à court terme. Par ailleurs, les bureaux en phase de transition doivent souvent faire appel à des personnes externes qui leur apportent les connaissances manquantes. Ces investissements humains sont importants et représentent une des conditions de succès de l'implémentation du BIM au sein des bureaux d'architecture (Marin & Segura, 2014).

En théorie, le BIM apporte une valeur ajoutée pour tout type de projet. Cependant, lorsqu'il s'agit d'une rénovation avec une quantité limitée de travaux, cela ne vaut souvent pas la peine de se lancer dans une maquette numérique. En général, ce type de travaux sont plus difficilement gérables avec le BIM qu'avec les méthodes traditionnelles (Rasking & Decroos, 2017).

Freins méthodologiques

Premièrement, les changements d'habitudes et de modes de travail bouleversent l'organisation de l'agence dans sa globalité. Etant donné qu'il s'agit de nouveaux processus et de nouvelles méthodes de travail, le passage de la méthode traditionnelle au BIM peut être long à mettre en place, allant de quelques mois à une année, parfois même plus longtemps. Il demande beaucoup d'efforts tout en engendrant une baisse de productivité et un ralentissement du processus (Marin & Segura, 2014) (Rasking & Decroos, 2017).

Deuxièmement, les formalisations des processus et protocoles doivent rester flexibles et évolutifs afin de ne pas pénaliser l'objet de la conception. Enfin, les maquettes issues des différents acteurs doivent être compatibles entre-elles (Marin & Segura, 2014).

Freins affectifs

Le BIM engendre un décalage temporel entre l'investissement en temps nécessaire lors de la conception et son intérêt au moment de la construction. Ce décalage temporel par rapport au retour sur investissement est parfois mal perçu par les agences d'architecture. De plus, la charge d'élaboration de la maquette numérique incombe à l'architecte alors qu'il ne bénéficie pas d'une responsabilité établie ou d'une lisibilité claire quant à l'exploitation et usages futurs de la maquette produite (Marin & Segura, 2014).

En outre, le BIM nécessite un changement de mentalité car il faut s'adapter à un tout nouveau processus de travail. Ce changement de mentalité peut prendre du temps et nécessite l'implication de tous les maillons de la chaîne. Si un acteur de la chaîne est peu coopératif, cela empêche le reste de fonctionner pleinement et de s'exécuter correctement (Rasking & Decroos, 2017).

3.3.3 La place de l'architecte dans le processus BIM

Le BIM présente de nombreux avantages pour les architectes. Travailler en maquette numérique « orientée *objets* » lui permet tout d'abord de maîtriser l'ensemble des éléments constructifs lors de la conception du projet et d'aborder la conception de manière intégrée. Il lui permet également d'offrir un outil unique de communication de ses idées (qui peuvent être ajustées au fur et à mesure de l'évolution du projet). Le BIM permet également à l'architecte de simuler les phases de chantier et d'ainsi mieux coordonner les phases de travaux (Boutemadja, 2016).

Or, le BIM n'est pas seulement utilisé par les architectes mais il s'agit d'un processus global qui fait intervenir différents acteurs de la construction. Il est donc primordial de définir la place de l'architecte dans ce processus. L'Ordre des Architectes belge s'est d'ores et déjà prononcé à ce sujet : « *Le contrat établi entre l'architecte et le maître d'ouvrage devra par conséquent définir la part que prend le BIM dans la mission confiée à l'architecte. Valoriser le travail de l'architecte qui utilise le BIM et cerner les honoraires qui sont liés à son utilisation permettront de créer des missions complémentaires pour les architectes qui lui donneront en parallèle une meilleure maîtrise du projet* » (Boutemadja, 2016, p12).

Cependant, selon l'enquête de Palindroom et architectura.be sur 374 architectes belges, seulement sept pourcents des architectes belges sont bien au courant des possibilités qu'offre le BIM. La majorité (66%) ne connaît le BIM que dans les grandes lignes. La plupart des architectes pensent que le BIM aura des conséquences sur le métier d'architecte. Selon les participants à cette enquête, l'architecte aura un plus grand rôle de coordination comparé au processus de conception ordinaire. Un peu plus d'un tiers des architectes pensent que le BIM favorisera la collaboration et la rapidité des échanges avec les entrepreneurs (Rasking & Decroos, 2017).

3.3.4 L'intégration du BIM dans les bureaux d'architecture

La connaissance du BIM est, sans surprise, plus importante chez les jeunes architectes (15,62 %) que chez leurs aînés (11,5 %). Cela ne veut pourtant pas dire que cette génération ne s'y intéresse pas car ils manifestent autant d'intention d'apprendre que leurs collègues plus jeunes (Rasking & Decroos, 2017).

Toutefois, il existe une résistance au changement ; les architectes craignent un coût important engendré par l'achat d'ordinateurs et logiciels adaptés ainsi qu'une crainte de perte de rendement lors de la mise en place du BIM. L'implémentation du BIM ne se fait pas du jour au lendemain mais bien de manière progressive et réfléchie. Elle diffère également selon la taille du bureau d'architecture ; les petits bureaux auront plus facile de transformer leur manière de travailler que les grands bureaux. Ce qui leur offre un avantage compétitif par rapport aux grandes structures. Dans les bureaux d'architecture travaillant déjà en 3D, il est possible qu'adapter ses méthodes de travail soit suffisant pour évoluer vers une implémentation efficace du BIM (Boutemadja, 2016).

Malgré qu'il soit plus difficile d'implanter le BIM dans les grandes structures le BIM est actuellement majoritairement implanté que dans les grands bureaux. La moitié des architectes travaillant dans des structures de plus de dix personnes ont une expérience en BIM, contre seulement neuf pourcents des bureaux constitués d'une seule personne. Pourtant, les petits bureaux représentent septante pourcents des bureaux en Belgique (Rasking & Decroos, 2017).

Certains petits bureaux ne sont pas convaincus de la valeur et de la nécessité d'utiliser le BIM car ils le considèrent uniquement adapté pour des grands projets ou des grands bureaux. A l'heure actuelle, l'utilisation de logiciels de modélisation BIM par les petits bureaux se limite principalement à la production de visualisations 3D (Tableau 4). La collaboration par le BIM y est sous-développée. La plupart du temps, elle ne se produit qu'occasionnellement et dans la plupart des cas l'échange de données se fait au sein d'une même famille de logiciels (Leeuwis et al., 2012).

TABEAU 4 : MODELISATION PAR CATEGORIE SOUS FORME DE TABLEAUX CROISES (SOURCE : LEEUWIS, KOUTAMANIS, & PRINS, 2012)

		Catégories		Total
		Plus de 4 projets en BIM	Moins de 4 projets en BIM	
Quelle est la méthode de dessin/modélisation la plus utilisée au sein du bureau d'architecture ?	Entièrement en 2D	0	48	48
	CAD avec visualisations en 3D	2	93	95
	CAO 2D et 3D orientée <i>objets</i>	14	62	76
	Entièrement 3D orientée <i>objets</i>	29	35	64
	TOTAL	45	238	283

Pourtant, le BIM présente de nombreux avantages pour les petites structures : meilleure collaboration entre les membres du bureau, augmentation de la productivité, plus grande capacité d'analyse et de simulation, amélioration de la précision dans la planification du projet, etc. (Boutemadja, 2016).

D'après une enquête de l'Université de Delft (2012) sur 283 architectes travaillant dans des petites structures de moins de dix architectes, les résultats que les petits bureaux obtiennent en utilisant la BIM

sont positifs ; l'utilisation du BIM est rentable pour tous les bureaux interrogés. Cependant, les obstacles souvent citée sont le temps et l'argent nécessaires pour mettre en œuvre la BIM. Selon cette même étude, l'introduction du BIM devrait être deux fois plus rapide que celle du CAO (Conception Assistée par Ordinateur) dans les années '80 et '90 (Figure 23) (Leeuwis et al., 2012).

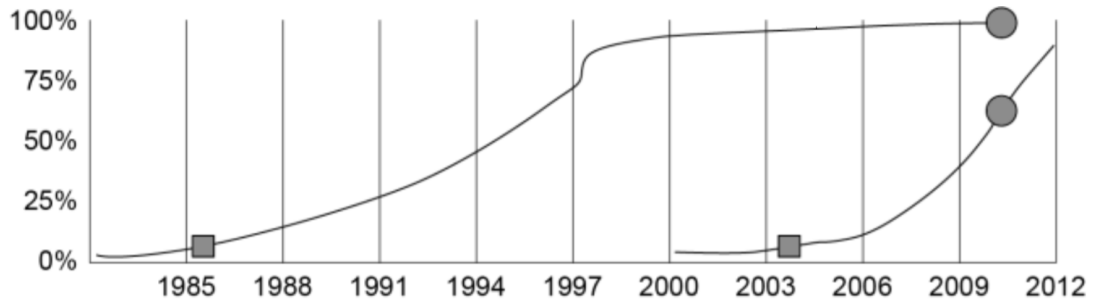


Figure 23 : Adoption CAD par rapport BIM (Source : Leeuwis et al., 2012)

4. Le BIM en tant que support de l'économie circulaire

4.1 L'évolution du BIM vs l'évolution du développement durable

Le choc pétrolier de 1979 et la prise de conscience générale qui s'en suit, a donné naissance à une volonté commune de développement durable de notre société. Cette notion de développement durable est apparue en 1987 dans le rapport Brundtland (boule jaune, en bas sur la Figure 24). Le but de ce rapport était de promouvoir le développement de la société sans compromettre le développement et les besoins des générations futures (Dautremont et al., 2018).

Dans ce contexte, la méthode de l'analyse du cycle de vie (LCA – première goutte orange, en bas de la Figure 24) voit le jour dans le secteur de la construction. Le cycle de vie du bâtiment est analysé en amont en questionnant les matières premières exploitées et en aval en se préoccupant de la fin de vie d'un élément. Le LCA est l'une des premières méthodes à prendre en considération l'impact environnemental d'un produit ou d'un système tout au long de son cycle de vie.

Depuis les années 90, la méthode LCA a influencé de nombreux labels tels que LEED aux Etats-Unis, BREEAM en Angleterre et HQE en France évaluant l'impact environnemental des éléments. En Belgique, l'architecture durable est depuis longtemps synonyme d'économie d'énergie et d'énergie pour le bâtiment (PEB – première goutte rouge, en bas de la Figure 24), résultant de la directive européenne de 2002 (Dautremont et al., 2018)(Dautremont et al., 2019).

Il est important d'attirer l'attention sur ce que le LCA entend par « cycle de vie ». Le LCA prend en compte les étapes depuis l'extraction des ressources jusqu'à la mise en décharge. Cela suppose donc que le matériau finira nécessairement à la déchèterie (« cradle to grave »). Cette idée est contraire à l'esprit « cradle to cradle » de l'économie circulaire (Ayres, 1995).

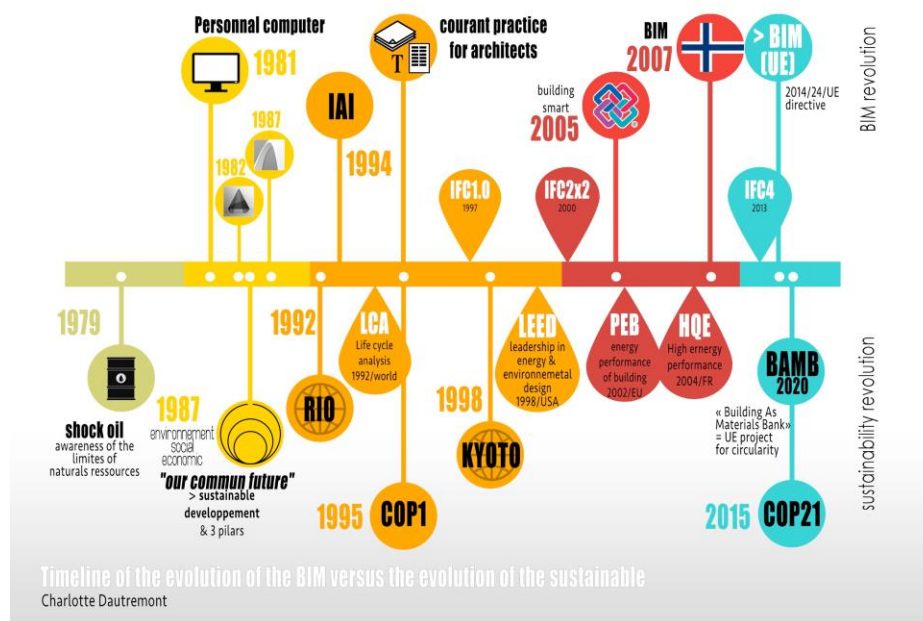


Figure 24 : Evolution du BIM (haut) versus l'évolution du développement durable (bas) (Source : Dautremont et al., 2019)

L'évolution du BIM, quant à lui, est représentée en haut sur la Figure 24. Pendant trente ans, le processus de conception architecturale s'est métamorphosé. L'arrivée des ordinateurs a bouleversé le processus de travail traditionnel en remplaçant le dessin à la main par un dessin digital. Ce bouleversement concerne non seulement les outils de conception mais également la communication avec les autres intervenants de l'industrie de la construction. Cette métamorphose n'a cessé d'évoluer et de s'intensifier pour atteindre son apogée avec la naissance du BIM (Dautremont et al., 2019).

4.2 Convergence de l'évolution du BIM et de l'économie circulaire

Les matériaux mis en œuvre dans un projet d'architecture peuvent être approvisionnés par deux sources : les matériaux neufs, les matériaux de réemploi. Selon les scientifiques, les matériaux 100 % neufs vont peu à peu disparaître suite à l'épuisement des ressources naturelles (Servigne & Stevens, 2015). Le secteur de la construction dépendra alors des filières restantes, c'est-à-dire des matières premières secondaires (Worldwatch Institute, 2012). Pour s'assurer que le secteur de la construction puisse continuer à s'approvisionner, il est primordial de les faire circuler en boucle et d'ainsi éviter l'extraction de matières premières vierges.

Les « 4R », introduits au chapitre 2.3.1 et plus particulièrement au paragraphe sur L'upcycling, sont quatre manières d'éviter l'extraction des ressources : réduire, recycler, réutiliser et régénérer (Xu & Gu, 2015). Dans ce travail, nous nous concentrons sur la réutilisation de matériaux de construction (**Error! Reference source not found.**).

Afin d'entrer dans une démarche d'économie circulaire, l'idée est de pouvoir récupérer les composants en fin de vie du bâtiment afin d'éviter qu'ils ne finissent à la décharge. Mais pour cela, il faut qu'il y ait une demande envers ce type de matériau. S'il n'y a pas de demande, le matériau n'aura aucune valeur et ne pourra être revendu. Or, dans le contexte de l'économie capitaliste actuelle, les entreprises ne voient pas l'intérêt de stocker des matériaux exempt de valeur et sans pistes de revalorisation (Guhyoot et al., 2018).

La première condition afin de réemployer un matériau de construction est de l'extraire du bâtiment existant. Pour cela, il faut démonter le matériau. Deux aspects entrent en jeu, d'une part la faisabilité technique et d'autre part la faisabilité économique (Durmisevic, 2006).

Pour qu'il soit techniquement faisable de récupérer les composants du bâtiment, il est primordial que celui-ci ait été pensé de manière à ce que l'on puisse en récupérer les composants (Design for Deconstruction). La littérature révèle que le DfD est encore loin d'atteindre son potentiel de minimisation des déchets puisque moins d'un pourcent des bâtiments existants sont entièrement démontables (Dorsthorst & Kowalczyk, 2002).

Trois aspects sont indissociables afin de pouvoir déconstruire un bâtiment (Guldager Jensen & Sommer, 2016). La première est la conception modulaire. Pour que les matériaux puissent trouver plus facilement une nouvelle application, il faut qu'il respecte un certain standard. De plus, il est essentiel que les connections soient réversibles, sans quoi, il sera impossible de démonter les matériaux et/ou composants.

Le troisième aspect concerne le choix des matériaux. Il faut que le matériau puisse assumer plusieurs cycles de vie et donc être robuste et non-toxique (Guldager Jensen & Sommer, 2016).

Le BIM intégrant les passeports matériaux permet de transmettre la connaissance de la géométrie, des propriétés, de l'empreinte écologique, des possibilités de démontage et du potentiel de recyclage des matériaux utilisés. Le bâtiment devient alors une banque de matériaux (Urban mining) pour la construction d'autres bâtiments (Honic et al., 2019).

A côté de ces trois aspects, le processus BIM peut être d'une grande aide dans la prise de décision concernant la mise en œuvre du DfD. En effet, les atouts du BIM tels que la collaboration, les visualisations, l'estimation des coûts, les analyses de scénarios, etc. seront très utiles afin d'améliorer la solution proposée (Bilal et al., 2016).

Lorsque la déconstruction est techniquement faisable, encore faut-il que ce soit rentable. Une démarche de DfD est économiquement intéressante lorsque les maîtres d'ouvrages évoquent un besoin de flexibilité (Durmisevic, 2006). Les logiciels de modélisation BIM pourront alors aider à anticiper différents scénarios. Le plan de déconstruction, qui devrait pouvoir être généré à partir du modèle BIM « *as-built* », servira de guide aux déconstructeurs et permettra de minimiser le temps de main d'œuvre (Bilal et al., 2016). De plus, ces plans de démontage forment une base informationnelle utile pour anticiper et optimiser le déroulement des phases de chantier en vue de raccourcir les délais (Faciliter la planification de la construction) (De Smedt, 2018).

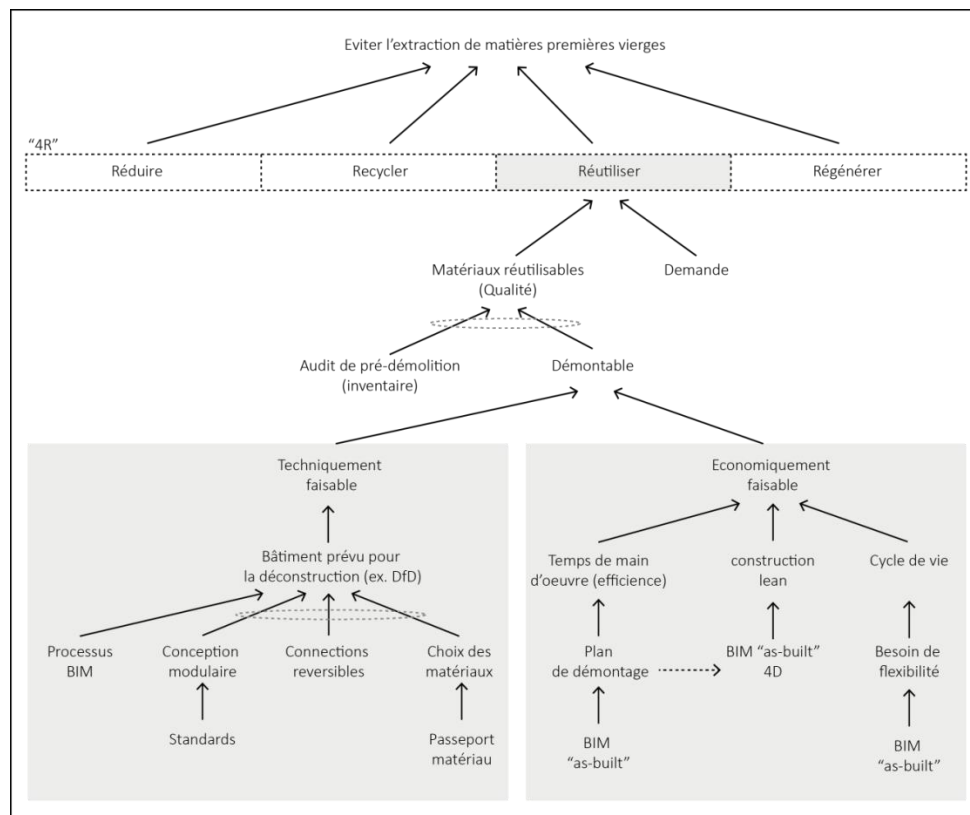


Figure 25: Goal tree (Source : Auteur, 2019)

4.3 Evolution du BIM durant les différentes phases du projet

Dans cette section, nous analysons le potentiel du BIM en tant que support de l'économie circulaire par rapport aux différentes phases d'un bâtiment : la conception, la construction, l'exploitation et la démolition. Afin d'obtenir un BIM contenant toutes les informations utiles en fin de vie, il est important de rappeler que le BIM évolue en fonction de l'état d'avancement du projet afin d'évoluer vers un BIM « *as-built* » (Figure 26) (Aguiar et al., 2019).

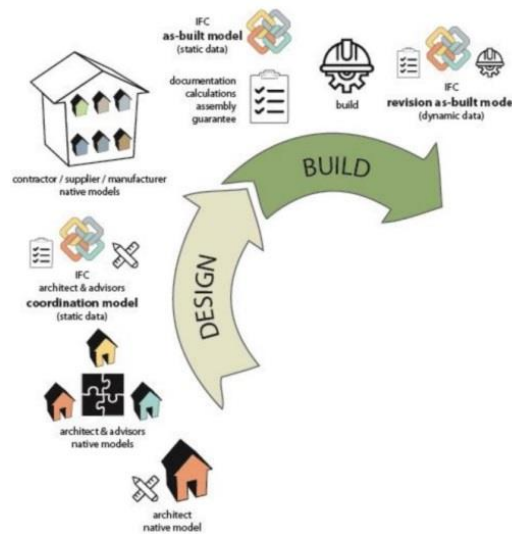


Figure 26 : Développement des maquettes de la conception à la réalisation (Source : Aguilar et al., 2019)

Conception

La maquette numérique BIM devient le support de l'économie circulaire dès la conception du projet. Elle contient les informations de base, tels que le type de matériaux, les murs, planchers, toits, etc. Cette phase est décisive pour le réemploi futur des matériaux car il dépend du choix des matériaux et de la manière dont ils seront mis en œuvre (Aguiar et al., 2019).

C'est en effet dans la phase de conception qu'intervient la construction en vue de la déconstruction (Design for Deconstruction). « *We know that end-of-life activities are influenced by decisions made at all building stages. As such, to ensure that buildings are demountable at the end-of-life, project teams must use tools that are relevant from the design stage throughout the entire building cycle.* »¹⁹ (Akinade et al., 2017)

Au cours de cette phase, les autres acteurs du projet ajoutent également des informations au modèle BIM, chacun dans leur maquette métier. Toutes ces maquettes sont alors combinées en une maquette unique : la Maquette fédérée ou « coordination model » (Figure 26). La collaboration entre les acteurs, qui caractérise le processus BIM, joue donc un rôle tout aussi important que la maquette numérique elle-même (Aguiar et al., 2019).

¹⁹ Traduction personnelle : « Nous savons que les activités de fin de vie sont influencées par les décisions prises à toutes les étapes de la construction. Ainsi, pour s'assurer que les bâtiments sont démontables en fin de vie, les équipes de projet doivent utiliser des outils pertinents dès l'étape de la conception tout au long du cycle de construction. »

Construction

La maquette fédérée est utilisée par l'entrepreneur pour produire la maquette « *as-built* ». Les informations de l'entrepreneur sont combinées avec celles des sous-traitants, des fournisseurs et des fabricants. Dans ce modèle BIM, les formes exactes des profilés, les fixations, les matériaux et autres détails sont modélisées de manière fidèle à la réalité. Le bâtiment sera construit selon ce modèle « *as-built* ». Néanmoins, des changements peuvent survenir au cours de la mise en œuvre. A la livraison des travaux, une révision du modèle « *as-built* » doit être réalisée contenant précisément ce qui est construit. L'entrepreneur est responsable de cette révision et s'assure que le BIM contient des informations fiables sur l'état actuel du bâtiment (Aguiar et al., 2019).

Un problème récurrent est de savoir dans quel modèle les adaptations doivent se faire. De bons accords dans le *protocole BIM* sont indispensables pour parvenir à un résultat conforme et effectif. Un des problèmes fréquents est le manque de motivation de l'architecte ou de l'entrepreneur pour appliquer les changements dans le modèle car ils n'y voient pas l'intérêt ; la livraison du bâtiment est leur principal objectif. Le maître de l'ouvrage peut avoir une influence sur ce point car il peut exiger qu'un dossier « *as-built* » soit fourni à la livraison des travaux (Rasking & Decroos, 2017).

Exploitation

L'utilisation du BIM lors de l'exploitation est encore peu répandue. Actuellement, ce modèle « *as-built* » est rarement transmis au client, sauf si celui-ci le demande explicitement. A l'avenir, ce modèle BIM devrait prendre de l'importance car chaque euro dépensé au cours du processus de conception, revient à une vingtaine d'euros lors de la construction et pas moins de soixante euros lors d'entretien et la gestion du bâtiment (Rasking & Decroos, 2017).

Le modèle BIM 6D présente de nombreux atouts car le temps d'exploitation d'un bâtiment est des dizaines de fois plus long que la réalisation du projet lui-même. Il est donc important d'également tenir compte des changements qui peuvent être apportés au bâtiment durant cette phase de vie du projet. La maquette numérique permet, à ce stade, d'améliorer la gestion du bâtiment par la précision des informations sur les espaces et les équipements, de rationaliser la maintenance par un gain de temps pour alimenter son système de facility management, de faciliter la rénovation par une meilleure information sur les conditions existantes, d'améliorer la gestion du cycle de vie du bâtiment par l'intégration des durées de vie et coûts de remplacement (Zignale, 2018).

Déconstruction

Lorsqu'un bâtiment arrive à sa phase de déconstruction, il existe deux alternatives. La première possibilité est d'exploiter la maquette « *as-built* » complète maintenue à jour tout au long du cycle de vie du bâtiment. La deuxième consiste à exploiter un « modèle BIM circulaire » qui est une maquette BIM « *as-built* » simplifiée et qui ne contient que les informations pertinentes concernant la déconstruction, c'est-à-dire les passeports matériaux (Aguiar et al., 2019).

Dans les deux cas, il est nécessaire de s'interroger de la fiabilité des informations présentes dans le modèle car la quantité d'informations ne signifie pas qu'elles sont de qualité. Un modèle BIM peut contenir beaucoup d'informations et être très détaillé mais plus on recueille des informations, plus elles

sont susceptibles d'être erronées. De plus, trop d'informations peut rendre la navigation pour trouver le contenu dont les acteurs du projet ont besoin plus difficile. C'est pourquoi le modèle BIM circulaire doit être simplifié et ne doit contenir que les informations essentielles à l'objectif spécifique : la déconstruction (Aguilar et al., 2019).

« Using BIM to determine the gross quantity of commodity materials (steel, copper, etc.) will continue to be important. With natural resources and commodities being subject to global demands and market volatility, the ability to develop commodity hedging practices is becoming important. »
(Pramod Reddy, 2012, p25)²⁰

Le BIM permet de recueillir toutes les informations sur les différents éléments dans une base de données où chaque matériau peut être identifié et suivi. Il est important de développer davantage cette idée afin d'offrir aux maîtres d'ouvrages actuels et futurs la possibilité d'utiliser les bâtiments qu'ils construisent ou possèdent en tant que « banque de matériaux ». Cette banque peut alors être exploitée lors de la construction de de futurs bâtiments. Ainsi, elle transforme la responsabilité de devoir payer pour la démolition future d'un bâtiment en une opportunité de vendre les matériaux utilisés dans le bâtiment actuel pour les utiliser dans de futurs bâtiments (Guldlager Jensen & Sommer, 2016).

4.4 Autres outils pour favoriser l'économie circulaire

D'après notre analyse de la littérature sur les pratiques et outils BIM soutenant l'économie circulaire, aucun outil permettant de prévoir la démolition/déconstruction n'est actuellement sur le marché. Les concepteurs ont pourtant besoin d'outils au moment de la conception afin de prévoir la déconstruction. Dans ce chapitre, nous développeront six outils en cours de développement qui visent à réduire l'impact environnemental des matériaux grâce aux outils numériques. Chacun de ses outils agit à un niveau différent.

La digitalisation de la déconstruction

Le CSTC et le bureau d'architecture 3XN/GXN identifient trois manières de digitaliser la (dé)construction afin de mesurer le potentiel de réemploi et de l'état des éléments ; manuelle, passive ou active (Romnée & Vrijders, 2017)(Guldlager Jensen & Sommer, 2016).

Vérification manuelle

La première consiste à vérifier manuellement l'état actuel des matériaux à l'aide d'éléments de mesures ou d'outils simples et spécifiques : appareil photo, carnet de notes et mètre/télémètre laser. Ce test visuel peut être appliqué à des dommages évidents ou en surface, comme des moisissures dans le bois et des fissures dans l'acier ou le béton mais il n'est pas toujours possible d'identifier les dommages internes des matériaux. Cette méthode est longue et fastidieuse et ne peut être effectuée automatiquement pour surveiller constamment le bâtiment. Par conséquent, un processus automatisé serait favorable lorsqu'une

²⁰ Traduction personnelle : « L'utilisation du BIM pour déterminer la quantité brute de matières premières (acier, cuivre, etc.) continuera d'être importante. Les ressources naturelles et les produits de base étant soumis à la demande mondiale et à la volatilité des marchés, la capacité d'élaborer des pratiques de couverture des produits de base devient importante. »

réutilisation à grande échelle des éléments est prévue (Romnée & Vrijders, 2017)(Guldlager Jensen & Sommer, 2016).

Monitoring passif

La surveillance passive, quant à elle, est une méthode automatisée de suivi de l'état d'un élément de construction. Chaque élément est muni d'un capteur qui mesure en permanence l'état du matériau. Le changement de couleur (analyse visuelle) du capteur indique que l'élément est altéré ou endommagé. Cela permet de déterminer plus rapidement l'état de l'élément, car il ne nécessite qu'une inspection visuelle. Ces indicateurs sont généralement simples, rentables et très efficaces. Ces capteurs sont d'ailleurs déjà utilisés dans le but de surveiller des éléments en béton (Romnée & Vrijders, 2017)(Guldlager Jensen & Sommer, 2016).

Monitoring actif

La dernière méthode proposée est le monitoring dit « actif », qui est considérée comme la méthode optimale. Cette méthode permet de suivre l'état d'un bâtiment de manière automatisée. Grâce à des capteurs intégrés (par exemple des puces RFID), le bâtiment enregistre et communique en temps réel les résultats des mesures au propriétaire ou à l'entité responsable de la maintenance du bâtiment via le passeport matériaux. Ce passeport n'est en effet utile que lorsqu'il représente l'état actuel du matériau. Ainsi, lorsque le bâtiment est déconstruit, le passeport matériau contient toute l'évolution des matériaux et affiche l'état actuel des propriétés des matériaux. Ces informations concernant le potentiel de réutilisation ou de réparation des différents éléments peuvent être utilisées par le déconstructeur (Romnée & Vrijders, 2017)(Guldlager Jensen & Sommer, 2016).

Afin de garantir la justesse des informations encodées, les informations contenues dans ce passeport matériau doivent être constamment mises à jour et rester accessibles aux différents acteurs tout au long de l'exploitation du bâtiment. Le principal défi du passeport matériau est de parvenir à gérer et structurer les exorbitantes quantités de données accumulées lors de la cartographie des éléments et des matériaux d'un bâtiment (Romnée & Vrijders, 2017)(Guldlager Jensen & Sommer, 2016).

Totem

Le projet Totem a été initié en 2011 par OVAM (Organisme public pour la gestion des déchets en Région flamande). L'acronyme signifie « Tool to Optimise the Total Environmental impact of Materials ». Il s'agit donc d'un outil d'analyse de cycle de vie de l'échelle des éléments de construction à celle du bâtiment. Il ne permet cependant pas l'analyse au niveau du matériau. Cette analyse permet de comparer les effets de choix de certains éléments par rapport à d'autres (Totem, 2019).

L'outil prend en compte la consommation d'énergie pour le chauffage pendant la phase d'utilisation. Dans un premier temps, Totem s'appuie sur la base de données suisse Ecoinvent²¹. Ces données ont préalablement été adaptées au contexte belge de la construction. Totem a choisi la méthode de monétarisation comme méthode de pondération. La valeur obtenue par l'outil, s'exprime donc en euro. Elle représente le coût financier qu'engendrerait la « réparation » des dommages causés à

²¹ Ecoinvent : <https://www.ecoinvent.org/>

l'environnement. A terme, l'objectif est de mettre Totem en lien avec le logiciel PEB. Cette fonctionnalité permettra de faciliter les calculs énergétiques et d'importer/exporter des données l'un vers l'autre. Actuellement, il est déjà possible d'importer un fichier IFC afin de réutiliser les données géométriques d'un modèle 3D (Totem, 2019).

Madaster

« Madaster » a vu le jour aux Pays-Bas. Il s'agit d'une plateforme en ligne (*cloud*) qui fonctionne tel un cadastre d'une ville accessible à tous (selon les paramètres de confidentialités) : particuliers, entreprises et pouvoirs publics. L'objectif de Madaster est d'éliminer les déchets en donnant une identité aux matériaux. La plateforme fonctionne comme une bibliothèque publique en ligne de matériaux dans l'environnement bâti. Il lie l'identité du matériau à l'emplacement et l'enregistre dans un passeport matériau (Cordis, 2017).

La plateforme Madaster peut également s'utiliser lors de la conception du projet ; les informations peuvent être introduites, stockées, consultées et partagées par les parties concernées. Le dossier de construction final peut être conservé indéfiniment et peut facilement être transféré au client. Les parties concernées peuvent obtenir un accès temporaire ou permanent à ces archives. Madaster permet également de disposer d'un aperçu du degré de circularité du projet grâce à l'indicateur de circularité Madaster (Madaster, 2019).

Materials Passports Platform (BAMB)

Dans le cadre du projet BAMB, la plateforme « Materials Passports Platform » (MPP) est en cours de développement. Cette plateforme, actuellement sous forme de prototype, est liée au BIM, aux outils de conception réversibles, aux modèles d'affaires et autres domaines pertinents. L'intégration des passeports matériaux dans le BIM a pour but de fournir des données pour les évaluations de la conception réversible et circulaire (BAMB, 2019).

L'un des principaux objectifs de cette plateforme est de soutenir la transition de l'industrie du bâtiment de linéaire à circulaire. Elle permet aux utilisateurs d'identifier le potentiel de valeur tout au long du cycle de construction, en fournissant une capacité continue à suivre la qualité et les modifications des composants et des matériaux (BAMB, 2019).

LCA et BIM

L'application de l'analyse LCA (Life Cycle Assessment) dans le secteur de la construction, en tant que stratégie visant à réduire les impacts environnementaux, s'avère complexe et prend beaucoup de temps (Durão et al., 2019).

En effet, l'analyse LCA comprend quatre grandes étapes (Figure 27). La première étape est la définition des objectifs et limites du système étudié. L'objectif d'une étude LCA doit indiquer l'application prévue, les raisons de la réalisation de l'étude et le public visé, c'est-à-dire à qui les résultats de l'étude sont destinés à être communiqués. Le champ l'étude doit être suffisamment bien défini pour atteindre l'objectif fixé.

La deuxième étape est d'établir l'inventaire du cycle de vie de tous les éléments du système étudié. Ces données prennent compte de l'utilisation de matières premières et les sources d'énergie, du transport,

des étapes de production, de l'utilisation du produit et la gestion de fin de vie. La troisième étape est l'évaluation des impacts sur l'environnement. Le niveau de détail, le choix des impacts évalués et les méthodologies utilisées dépendent du but et de la portée de l'étude. Cette étape est sujette à la subjectivité car l'évaluation dépend du choix et de l'évaluation des catégories d'impact. La dernière étape est l'interprétation des résultats, c'est-à-dire établir des conclusions et expliquer les limites de l'analyse réalisée (ISO 14040, 1997).

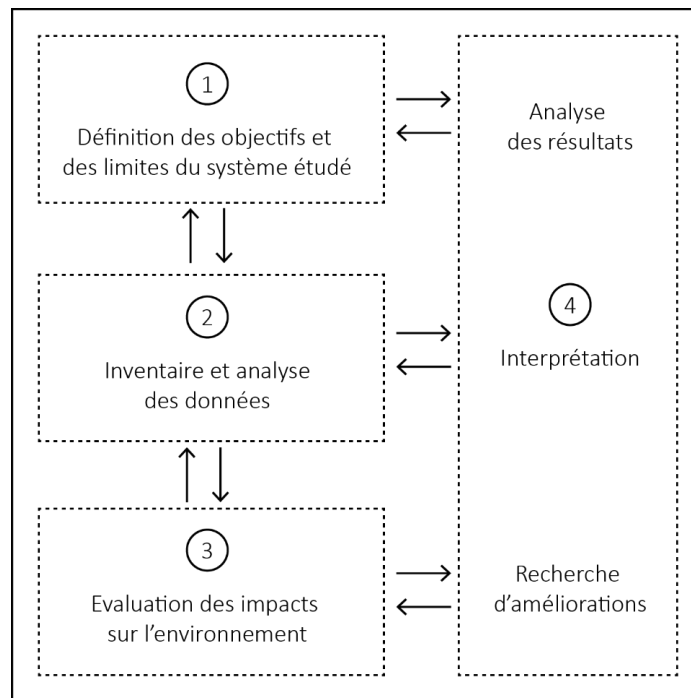


Figure 27: Phases du LCA (Source : basé sur l'original de l'ISO 14040)

Ces analyses sont généralement effectuées par des experts en recherche ou en conseil et non directement par les concepteurs du bâtiment. L'objectif de Durão et ses collègues (2019) est d'intégrer le principe d'analyse LCA dans les outils de modélisation BIM afin de pouvoir évaluer en continu l'impact environnemental du cycle de vie d'un scénario de conception.

Ils ont remarqué que toutes ces informations contenues dans le LCA ne sont pas utiles lors de toutes les phases de conception du projet. Par exemple, en début de projet, il n'est pas nécessaire de choisir un matériau spécifique ; par exemple le type d'isolation, l'essence de bois utilisée pour le bardage, la marque des châssis, etc. A ce stade, il est suffisant de se donner comme objectif de trouver un matériau qui présente des propriétés particulières dont un éco-indicateur inférieur à un maximum.

Ces chercheurs proposent dès lors une simplification du LCA dans les phases précoces du projet et un affinage des données au fur et à mesure de l'état d'avancement. Cette idée de simplification s'inspire du système de LOD, où la précision de l'information augmente au fur et à mesure de l'avancement des phases du projet.

Dans le cadre de cette approche, les objets ayant un LOD faible, incluent l'information environnementale sous la forme d'un indicateur de résultat unique (Tableau 5). Les objets ayant un LOD plus élevé, incluent

des indicateurs intermédiaires comme la production de CO₂ et l'énergie primaire. Les informations environnementales des EPD (Environmental Product Declaration) ne peuvent être incluses que dans les objets LOD 400 et LOD 500 car seuls ces niveaux contiennent des informations précises sur les matériaux choisis. Ainsi, les éléments BIM à partir du LOD 400 présenteraient des informations détaillées et complètes sur les impacts environnementaux.

TABEAU 5 : APPROCHE PROPOSEE POUR LE PARAMETRAGE DE L'INFORMATION ENVIRONNEMENTALE SUR LES OBJETS BIM.
(SOURCE : TRADUIT DE DURÃO ET AL., 2019)

<i>LOD de l'objet</i>	<i>LOD 100</i>	<i>LOD 200 – LOD 300</i>	<i>LOD 400 – LOD 500</i>
<i>Information LCA concernant l'objet BIM</i>	Indicateur unique tel que l'Eco-indicateur (unité : Éco-point) ou Eco-coûts (unité : unité monétaire, par exemple EUR)	CO ₂ et énergie primaire	Paramètres décrivant les impacts environnementaux, l'utilisation des ressources et les émissions de polluants provenant des matériaux, ainsi que les informations environnementales décrire les flux de sortie et les catégories de déchets, tels que définis par les contenus EPD
<i>Type d'information</i>	Bases de données génériques	Bases de données génériques	Spécifique au produit / spécifique au secteur (EPD)

Les propriétés environnementales utiles aux analyses LCA pourront ainsi être directement intégrées dans un objet BIM. De cette manière, il sera possible de réaliser des analyses LCA à chaque étape de conception et d'utiliser les résultats obtenus pour améliorer le scénario de projet. Le LCA devient alors un outil d'aide à la conception et non un résultat d'analyse figé (Durão et al., 2019).

Processus d'analyse du rendement en matière de gestion des déchets du bâtiment basé sur la BIM

Bilal et ses collègues (2016) ont évalué les principaux logiciels de conception BIM et conclu qu'aucun d'entre eux ne supporte actuellement les déchets de construction. Il s'agissait des logiciels Autodesk Revit, Bentley MicroStation, Graphisoft ArchiCAD, Vectorworks et Digital Project. D'après leur enquête, un plugin concernant la prévision et la gestion des déchets en fin de vie est nécessaire. Nous nous penchons plus en détail sur leur recherche.

Après un examen rigoureux de la littérature disponible et quatre entrevues avec un groupe d'architecte, Bilal et al. ont dressé une liste de douze facteurs BIM impératifs qui devraient être exploités afin de prévoir et de gérer les déchets de construction. Ces facteurs sont classés en quatre couches, à savoir « BIM Core Features Layer », « BIM Auxiliary Features Layer », « Waste Management Criteria » et « Application Layer » (Tableau 6).

La dernière couche « Application Layer » pourrait recevoir un plugin BIM pour la prévision et la minimisation des déchets de construction. Le but de ce plugin est d'étendre les fonctionnalités des logiciels BIM existants afin de prévoir et de minimiser les déchets de construction. Les utilisateurs interagiront avec le plugin depuis leurs outils de conception natifs.

Ce plugin devrait intégrer les fonctions suivantes :

- Analyse de la maquette numérique existante (« Building Model Analysis »)
- Estimation des déchets (« Waste Prediction »)
- Visualisation des déchets (« Waste Visualisation »)
- Minimisation de la production de déchets (« Waste Minimisation »)

TABLEAU 6 : LA CAPACITE DES SOFTWARES BIM A SOUTENIR LA PREVISION ET LA GESTION DES DECHETS DE CONSTRUCTION
(SOURCE : BILAL ET AL., 2016)

BIM Design Software Products Critical BIM Features & BWA Proces	Autodesk Revit	Bentley MicroStation	Graphisoft ArchiCAD	Vectorworks	Digital Project
Layer 1 – BIM Core Features Layer					
Object Parametric Modelling	✓	✓	✓	✓	✓
Bi-directional Associativity	✓	✓	✓	✓	✓
Intelligent Modelling	✓	✓	✓	✓	✓
Layer 2 & 3 – BIM Auxiliary Features Layer & Waste Management Criteria					
Design	✓	✓	✓	✓	✓
Visualisation	✓	✓	✓	✓	✓
Data	✓	✓	✓	✓	✓
Holistic	✓	✓	✓	✓	✓
Lifecycle	✓	✓	✓	✓	✓
Interoperability	✓	✓	✓	✓	✓
Technology Centric	✓	✓	✓	✓	✓
Cost Benefit Analysis	✗	✗	✗	✗	✗
Layer 4 – Application Layer					
Plugin Support	✓	✓	✓	✓	✓
BIM based Building Waste Performance Analysis (BWA) Process					
Building Model Analysis	✗	✗	✗	✗	✗
Waste Prediction	✗	✗	✗	✗	✗
Waste Visualisation	✗	✗	✗	✗	✗
Waste Minimisation	✗	✗	✗	✗	✗

Les données recueillies lors de l'analyse de la maquette numérique servent de base pour l'estimation des quantités de déchets issus du bâtiment. La représentation visuelle des déchets de construction permettra une communication efficace et stimulera l'engagement des concepteurs à employer des stratégies efficaces en matière de déchets. Ensuite, le système fournira des prévisions en temps réel des déchets en fonction des changements apportés lors de la conception. Grâce à tout ce processus, les concepteurs auront la possibilité de concevoir des bâtiments ayant de meilleures stratégies de conception, un meilleur choix des matériaux et de meilleures sources d'approvisionnement. De plus, les modifications seront apportées lors de la phase de conception du bâtiment (Bilal et al., 2016).

5. Conclusions et questions de recherche

Suite à l'élaboration de l'état de l'art, la combinaison de l'économie circulaire et du BIM semble être une piste prometteuse afin de réduire la quantité de déchets de déconstruction. La combinaison des deux pratiques pourrait en effet aider à privilégier les pistes de déconstruction au lieu de la démolition.

Nous y avons relevé l'hypothèse que la mise en œuvre d'un passeport matériau et son intégration avec un modèle BIM « *as-built* » livré au maître d'ouvrage peut conduire à une réutilisation future plus efficace des matériaux et des composants. L'objectif est d'obtenir une maquette numérique (mise à jour durant le cycle de vie du bâtiment) qui permette de comparer différents scénarios de déconstruction sélective et de réutilisation sur site ou hors site. De plus, cette maquette numérique facilitera l'audit de pré-démolition. Le BIM « *as-built* » ainsi obtenu sera un réel support aux modèles circulaires.

La littérature fait référence à la difficulté de maintenir une maquette numérique « *as-built* » contenant les informations utiles pour une évaluation ultérieure de la rentabilité de la déconstruction sélective.

Suite à ces constatations, plusieurs questions de recherche émergent :

- Quelles sont les motivations des architectes à envisager la combinaison de l'économie circulaire et du BIM ? Pour quels types de projets, la démarche est-elle pertinente ?
- Quelles sont les difficultés que les architectes rencontrent par la combinaison des deux pratiques et quelles sont les pistes de solution ?
- Quels outils/fonctionnalités du BIM les architectes aimeraient-ils voir apparaître sur le marché ?
- Où et comment stocker ces informations dans le modèle « *as-built* » ?
- Quelles sont les nouvelles compétences à acquérir, voir quels sont les nouveaux métiers créés par la mise en œuvre des bonnes pratiques ?

Partie II : Questionnaire en ligne

2.1 Méthodologie

Cette enquête a été réalisée dans le but de recueillir les expériences et les opinions des architectes sur les pratiques actuelles de l'économie circulaire et l'utilisation du BIM. Elle a permis d'identifier les défis que les architectes rencontrent, les solutions apportées et leurs désirs par rapport aux outils BIM existants.

Afin de récolter les expériences des architectes, nous utilisons un questionnaire standardisé en ligne. En effet, le questionnaire est un moyen pratique de recueillir des informations auprès d'un grand nombre de personnes au cours d'une période donnée. L'avantage principal de ce type de questionnaire est qu'il offre une passation structurée et identique pour tous les utilisateurs. Il permet de comparer les différents profils d'utilisateurs entre eux (Lallemand et Gronier, 2015).

La cible de ce questionnaire sont les architectes qui appliquent les principes de l'économie circulaire et/ou utilisent le BIM. Il est cependant ouvert à ceux qui ne sont pas impliqués dans ces pratiques, car leur avis quant à la non-utilisation de ces pratiques importe également. Un système de branchement conditionnel a été mis en place afin d'orienter les architectes vers les questions qui les concernent. Nous avons testé le questionnaire sur quelques personnes afin de vérifier si les questions étaient correctement posées et afin d'évaluer le temps nécessaire pour y répondre.

Suite à une recherche dans la littérature et sur le net, nous avons envoyé le questionnaire par e-mail à une trentaine d'agences d'architecture concernées par l'économie circulaire et/ou par l'utilisation du BIM. Dans cet e-mail, nous invitons un architecte de l'agence à remplir le questionnaire. Les bureaux choisis sont situés en Belgique et ses pays voisins. De plus, le questionnaire a été diffusé sur les réseaux sociaux. Il ne s'agit donc pas de faire une étude quantitative, mais de comparer les pratiques des précurseurs concernant le BIM et/ou l'économie circulaire.

Le questionnaire est majoritairement constitué de questions à choix multiples pour faciliter le traitement des réponses. Cependant, il comporte également plusieurs questions ouvertes afin que les architectes puissent s'exprimer librement sur le sujet. Nous avons opté pour la méthode en ligne pour la facilité de diffusion et la collecte automatisée des réponses. Le questionnaire est disponible en trois langues : français, anglais et néerlandais.

Le questionnaire est composé de quatre parties. La première section vise à recueillir les données démographiques des participants afin de contextualiser l'information. La seconde section porte sur l'approche des architectes envers l'économie circulaire. La troisième concerne l'utilisation ou non des outils de modélisation BIM. Pour terminer, quelques questions sur la combinaison du BIM avec l'économie circulaire pour les bureaux concernés par les deux pratiques.

2.2 Description de l'échantillon

Nous comptons 26 bureaux d'architecture ayant répondu au sondage : 46 % d'entre eux ont été contactés par message privé, 38 % par les réseaux sociaux et 15 % par recommandation.

Les architectes des bureaux ayant participé au sondage peuvent être répartis en cinq catégories (Figure 28) :

1. Ni adepte du BIM, ni du réemploi (1/26)
2. Adepte uniquement du réemploi (7/26)
3. Adepte uniquement du BIM (8/26)
4. Adepte des deux pratiques mais ne les combinant pas sur un même projet (6/26)
5. Adepte des deux pratiques et les combinant sur un même projet (4/26)

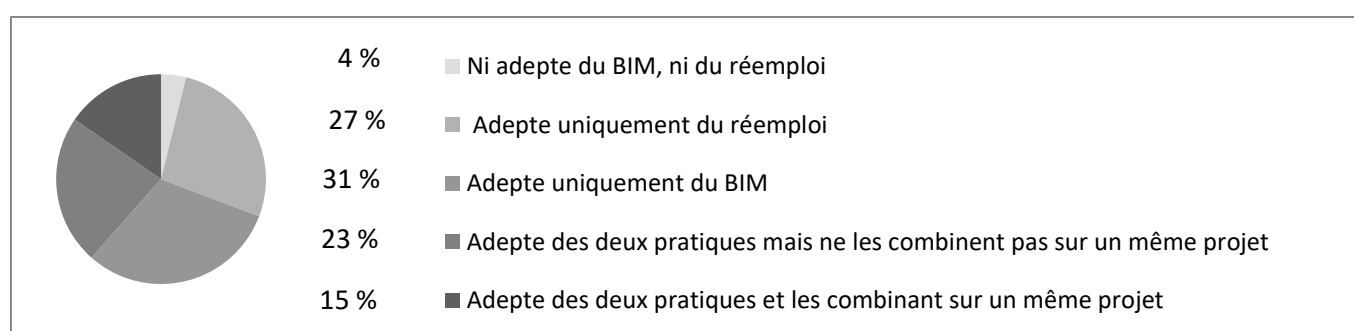


Figure 28 : Catégorisation des bureaux ayant participé au sondage

Nous remarquons qu'uniquement les adeptes de l'une et/ou l'autre pratique se sentent concernés par le questionnaire. Seulement un architecte n'appliquant pas ces pratiques a répondu au sondage.

D'après notre sondage, six bureaux sont adeptes des deux pratiques mais n'ont pas encore eu l'occasion de les combiner sur un même projet, quatre les combinent sur un même projet. Nous analyserons plus en détail les pratiques de ces dix bureaux dans la partie III de ce travail.

L'échantillon représente 35 % de bureaux exerçant en Wallonie, 15 % à Bruxelles, 12 % en Flandre et 38 % à l'étranger : France, Pays-Bas, Finlande, Suisse, Danemark (Figure 29). Parmi les bureaux sondés, 50 % sont des petits bureaux de 1 à 5 collaborateurs, 19 % des bureaux médiums de 6 à 20 collaborateurs, 8 % des grands bureaux de 21 à 50 collaborateurs et 23 % des très grands bureaux ayant plus de 51 collaborateurs (Figure 30). Les petits bureaux wallons sont les plus représentés dans cette étude (Figure 31).

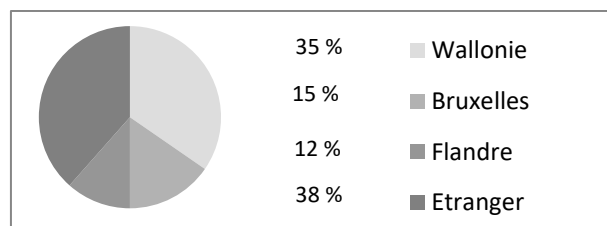


Figure 29: Localisation des bureaux sondés

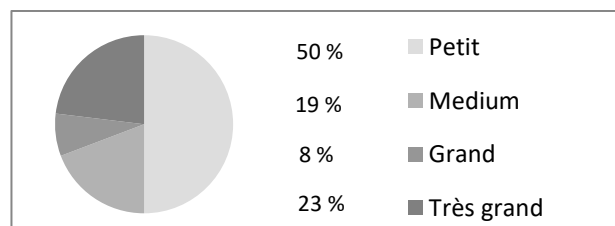


Figure 30: Taille des bureaux sondés

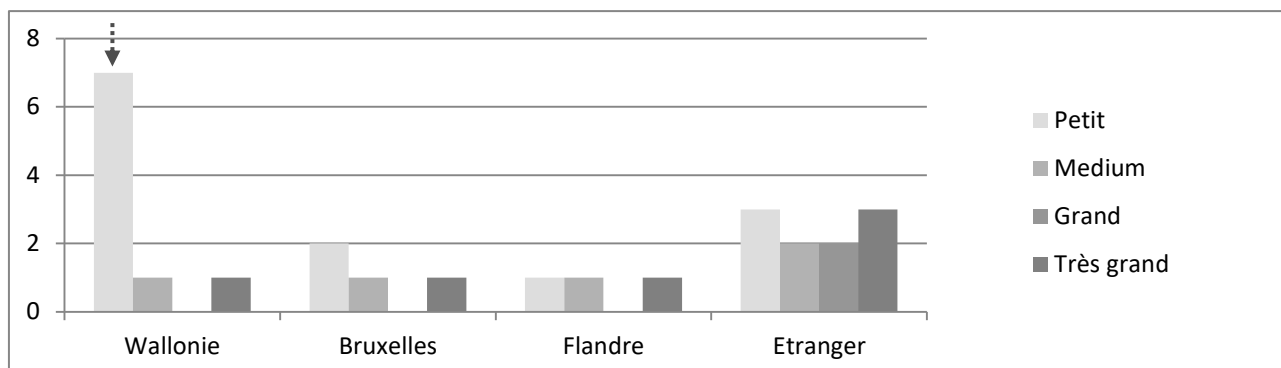


Figure 31 : Taille et localisation des bureaux

D'après cette enquête, les donneurs d'ordre des petits bureaux sont majoritairement des particuliers (52 %), 24 % sont des entreprises privées et 24 % des institutions publiques (Figure 32). Les bureaux médiums, quant à eux, ont majoritairement des entreprises privées comme donneurs d'ordre (57 %) contre 29 % d'institutions publiques et 14 % de particuliers. Les grands bureaux travaillent dans 40 % des cas pour des entreprises privées, 40 % des cas pour des institutions publiques et 20 % pour des particuliers. Les très grands bureaux sondés sont uniquement tournés vers des entreprises privées (75 %) et des institutions publiques (25 %).

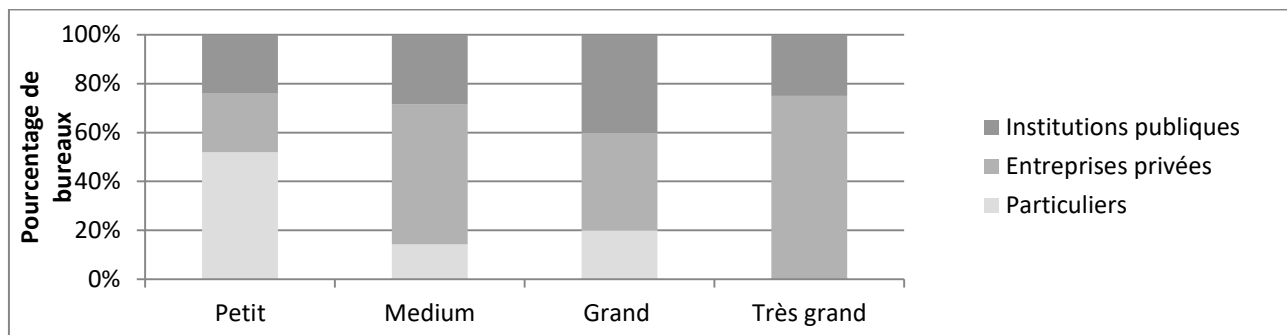


Figure 32 : Donneurs d'ordre des projets en fonction de la taille du bureau

Parmi les bureaux sondés, les petits bureaux ont majoritairement (69 %) des projets entre 101 et 1000 m² (Figure 33). Il en est de même pour les bureaux de taille moyenne. Les grands bureaux ont exclusivement des projets de 1001 à 5000 m² et les très grands bureaux ont tous des projets de plus de 5000 m².

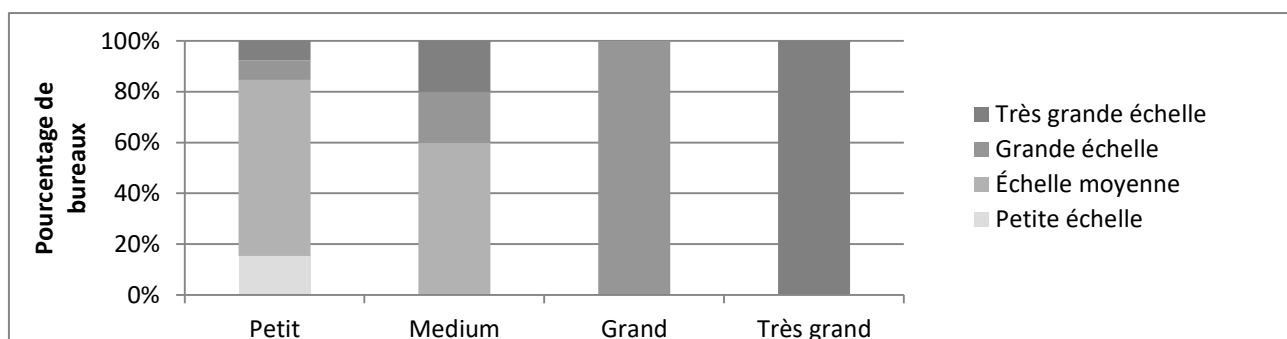


Figure 33 : Grandeur des projets en fonction de la taille du bureau

2.3 Résultats

2.3.1 Economie circulaire

Connaissances de l'économie circulaire

Nous remarquons que les petits bureaux sondés ont majoritairement de l'expérience dans le domaine : 46 % disent appliquer les principes de l'économie circulaire quand cela est possible et 31 % appliquent le plus possible tous les principes. Seulement 23 % disent ne pas savoir ce qu'est l'économie circulaire ou savoir ce que c'est mais ne pas en appliquer les principes. Selon notre sondage, les très grands bureaux sont moins familiers avec l'économie circulaire que les petits : 33 % disent ne pas savoir ce qu'est l'économie circulaire et 17 % savent de quoi il s'agit mais sans en appliquer les principes (Figure 34). Une grande partie de ces très grands bureaux connaît et applique néanmoins les principes de l'économie circulaire : 33 % les appliquent dès que possible, 17 % se disent même experts en économie circulaire.

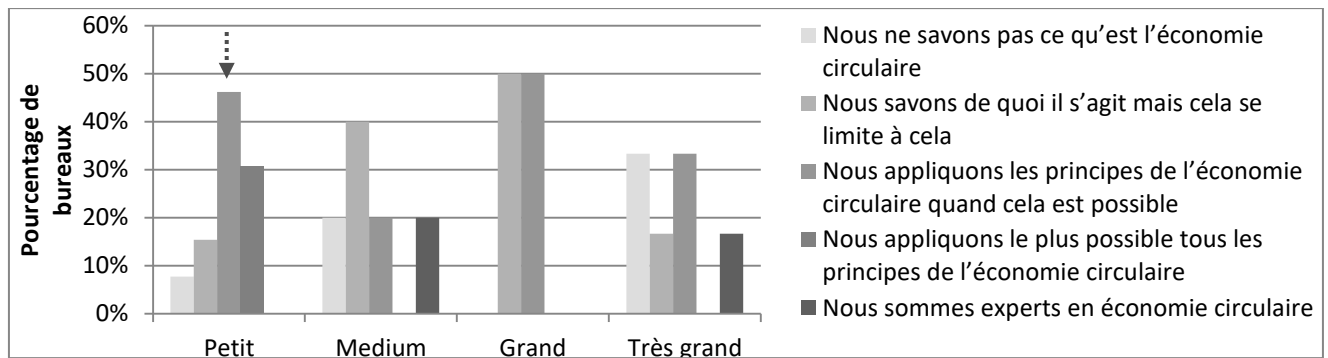


Figure 34 : Connaissance et application des principes de l'économie circulaire en fonction de la taille du bureau

Nous remarquons que les bureaux sondés attachent le plus d'importance à la flexibilité des installations techniques : 73 % trouvent qu'il est assez ou très important de concevoir une installation technique qui peut s'adapter ou être désassemblée ou déconstruite au lieu de la démolir (Figure 35). La flexibilité de l'enveloppe/façade a de l'importance pour 69 % des participants tandis que l'organisation spatiale (cloisons intérieures) n'obtient que 65 % d'avis favorables au « Design for Deconstruction ». Les architectes ont nettement moins d'intérêt pour la réversibilité de la structure que pour les autres strates du bâtiment. Une structure démontable a peu ou pas d'importance pour 35 % des bureaux sondés.

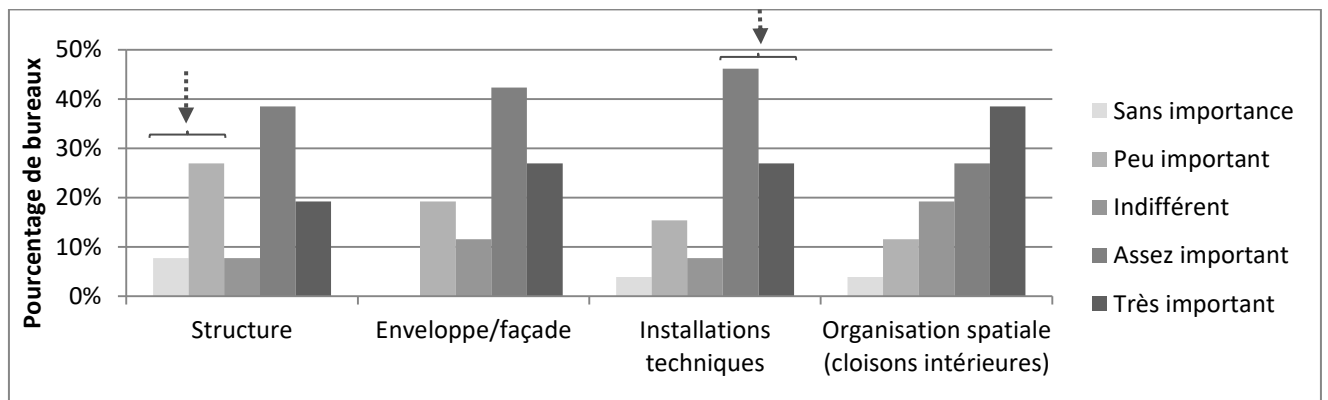


Figure 35 : importance de la flexibilité des strates de construction

Parmi les bureaux sondés, 69 % disent avoir déjà appliqué les principes de « Design for Deconstruction » (évoqués précédemment) dans au moins un projet, toutes tailles de bureaux confondues (Figure 36).

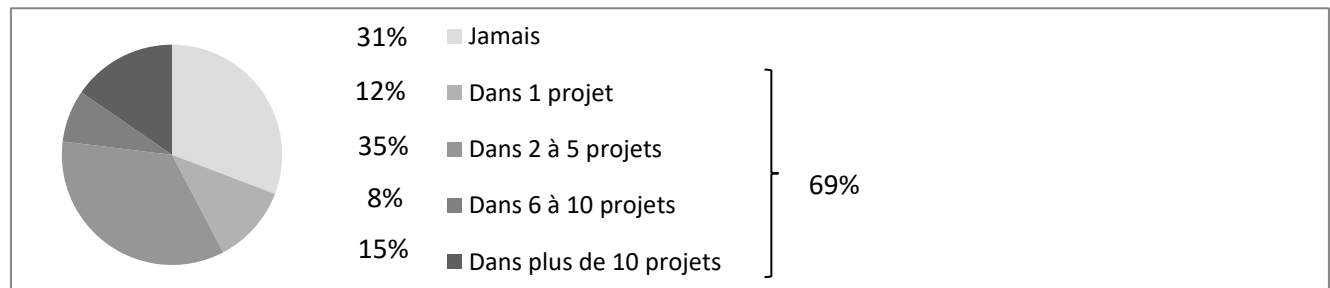


Figure 36 : Nombre de projets dans lesquels les bureaux d'architecture ont appliqué les principes de DfD

Application des principes de l'économie circulaire

A la question « avez-vous ou votre bureau d'architecture déjà utilisé des matériaux de construction récupérés ou réutilisés dans de nouveaux projets de conception, de construction ou de rénovation ? », 65 % y répondent favorablement.

Les raisons principales de l'utilisation de matériaux de réemploi évoquées par les architectes sont (par ordre d'importance) :

1. Eviter la production de déchets
2. Economie de coût
3. Choix esthétique
4. Répondre à une demande particulière du client
5. Obtention de certificat vert/LEED/ BREEAM/HQE etc.

Par une question à choix multiple, nous avons demandé au 35 % restants pourquoi ils n'ont pas (encore) utilisé de matériaux de réemploi (Figure 37). Parmi les réponses proposées, les plus souvent évoquées sont les suivantes : absence de connaissances procédurales (33 %), jamais venu à l'esprit (31 %), les matériaux souhaités ne sont pas disponibles (25 %), tentative infructueuse (8 %) (Figure 37).

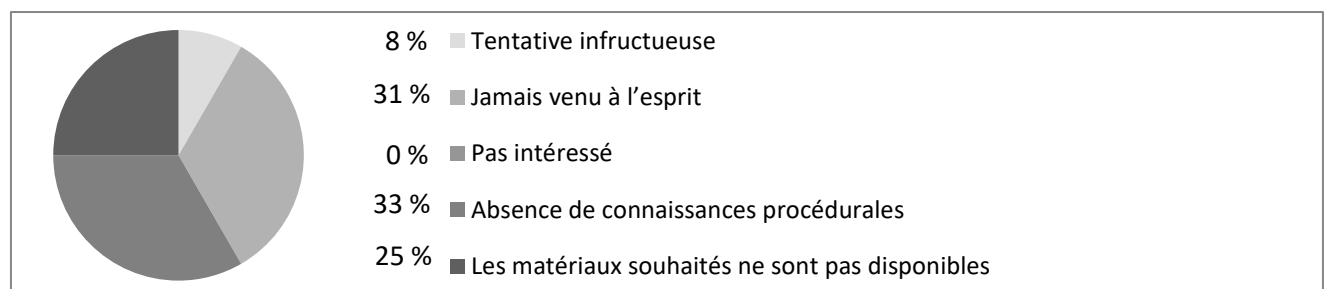


Figure 37 : Raisons pour laquelle les bureaux n'utilisent pas de matériaux de réemploi

Les architectes ne sont pas contre l'utilisation de matériaux de réemploi dans leurs projets, 80 % se disent favorable à l'utilisation de matériaux de réemploi s'il y avait plus d'incitations et/ou d'outils mis en place (Figure 38).

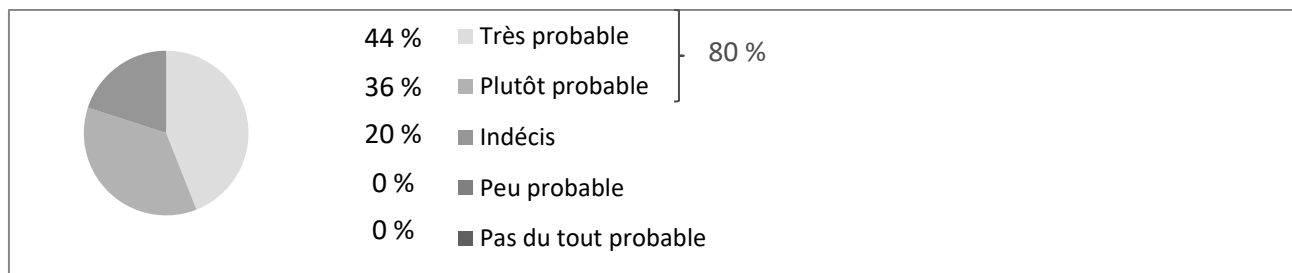


Figure 38 : Probabilité d'utilisation de matériaux de réemploi s'il y avait plus d'incitations ou d'outils mis en place

Provenance des matériaux de réemploi

Nous voyons sur la Figure 39 que dans 32 % des cas, toutes tailles de projets confondus, les matériaux de réemploi étaient disponibles sur le site du projet. L'emploi de matériaux disponibles sur le site du projet s'avère surtout vrai pour les projets de très grande échelle (plus de 5000 m²) où cela représente 43 % des matériaux de réemploi.

Les matériaux provenant d'autres bâtiments en cours de déconstruction sont également une source importante pour les très grands projets (43 %). Il en est de même pour les grands projets de 1001 à 5000 m² où ce pourcentage représente 40 % du total de matériaux de réemploi utilisés.

Les plateformes de réemploi (site d'échange et/ou de vente de matériaux de récupération) sont utilisées dans 40 % des cas pour des projets de petite échelle (1 à 100 m²) et un peu moins (17 à 20 %) dans les projets de moyenne (101 à 1000 m²) et grande échelle (10001 à 5000 m²). En revanche, les plateformes de réemploi ne sont pas du tout utilisées pour les très grands projets.

Les magasins de matériaux de réemploi (physiques) remportent le moins de succès comparé aux autres sources proposées, suivis de près par les entreprises de démolition. Seulement 8 % du total des bureaux s'est procuré des matériaux de réemploi dans ce type de magasins et les entreprises de démolition n'ont su convaincre que 11 % des bureaux pratiquant le réemploi.

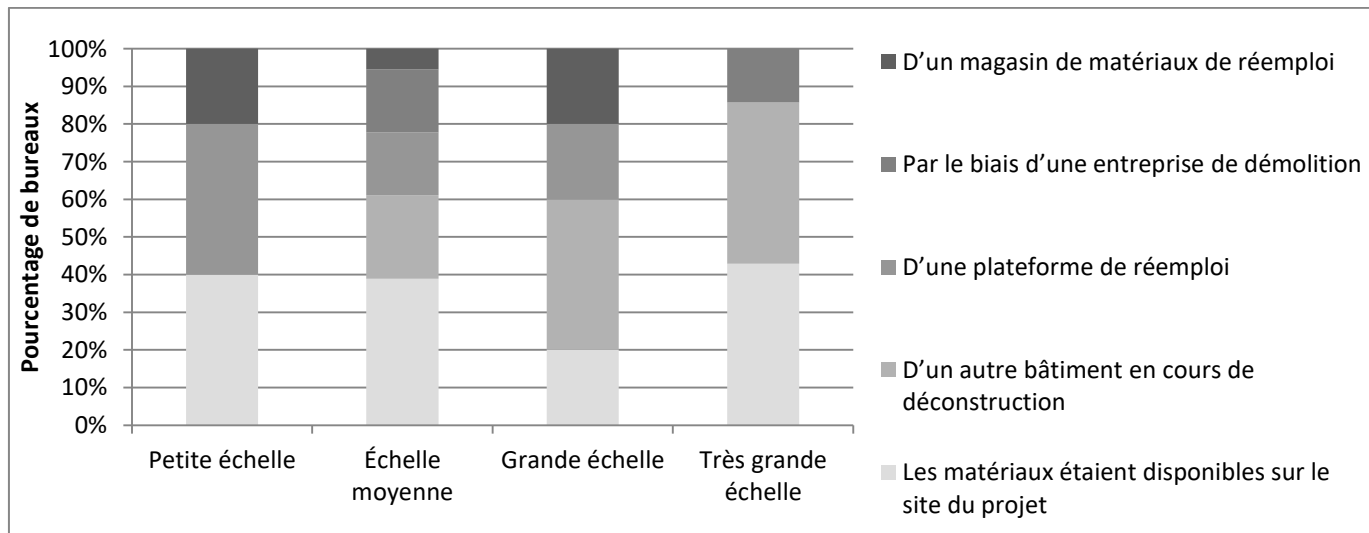


Figure 39 : Provenance des matériaux de réemploi en lien avec la taille des projets

Freins au réemploi

Lorsque nous demandons aux architectes de décrire leur expérience d'utilisation de matériaux de récupération via une question ouverte, il en ressort les freins suivants.

Tout d'abord, les architectes interrogés évoquent un manque d'intérêt pour l'utilisation de matériaux de réemploi, aussi bien de la part des clients, que des entrepreneurs. Dans notre société actuelle, un matériau de réemploi est perçu comme un déchet de moindre valeur et de moindre qualité qu'un matériau neuf.

Un architecte d'un petit bureau wallon témoigne : « *Le frein principal reste de faire payer plus cher à un M.O. dont les moyens sont (très) limités pour un produit 'usagé' pour lequel il est difficile, sinon impossible, d'avoir des garanties. La mentalité doit évoluer, et le moteur principal est la fiscalité et la législation (problématique des éléments classés en « déchets » en sortie de chantier et non en « matériaux », notamment).* »

De plus, il est demandé aux acteurs du projet d'être plus souple quant aux imprévus sur le chantier, les défauts des matériaux, les délais à respecter, etc. car tout ne se déroulera probablement pas comme prévu.

Un grand nombre de bureaux évoquent le manque d'informations concernant les matériaux réutilisés eux-mêmes. Ils se posent notamment des questions par rapport aux performances actuelles et futures des matériaux de réemploi et quelles normes le matériau réutilisé respecte (ou pas). Les matériaux de réemploi ne bénéficient pour l'instant d'aucune référence légale/garantie et ne peuvent donc pas être utilisés pour tous les projets. Cette problématique s'exprime surtout dans les projets de plus grande échelle ou les bâtiments publics, car ils doivent respecter des normes strictes et répondre à des enjeux financiers importants.

Nous avons demandé aux architectes de donner une note sur cinq à l'affirmation suivante : « Le manque de connaissances et d'informations sur les matériaux de construction réutilisés, est la plus grande contrainte de réutilisation. » Cette affirmation a reçu une moyenne de 3/5 par l'ensemble des participants à l'enquête. Ce sont surtout des bureaux n'ayant jamais utilisé de matériaux de réemploi qui s'accordent sur la justesse de cette expression (38 % d'entre eux lui donnent 5/5).

Ce manque d'information concerne aussi le manque de visibilité des matériaux de réemploi (réseaux et filières) et leur disponibilité (planning des chantiers et stockage). Les architectes ont des craintes par rapport à la sécurité d'approvisionnement. Il y a en effet un délai assez long entre l'étude du projet, l'octroi du permis et le début du chantier.

A l'heure actuelle et dans la majorité des cas, le réemploi revient globalement plus cher que l'utilisation du neuf et perd un attrait majeur à cause de cette différence de prix. Cette différence de prix est expliquée par un architecte exerçant en Wallonie : « *La main d'œuvre est chère, la transformation ou sublimation de ces matériaux pour la réutilisation dans le même projet devient parfois une contrainte budgétaire et esthétique plutôt qu'une plus-value. Elle reste un luxe inabordable face à l'économie des matériaux à bas budget. Encore une fois, entourée de lobbying et de soi-disant écologie, la réutilisation de matériau met tout le monde d'accord sauf le portefeuille. Ce n'est pas une pratique de la construction qu'il faut changer, mais un enjeu sociétal.* »

La recherche et vérification des matériaux de réemploi prennent plus de temps que l'utilisation de matériaux neufs : « *En tant qu'architecte, utiliser du remploi dans un projet nous demande plus de travail qu'un projet traditionnel, or nous n'avons pas spécialement d'honoraires complémentaires...* »

Les coûts supplémentaires évoqués par les architectes sondés portent également sur la manutention, le stockage et le transport que demande l'utilisation de matériaux de réemploi.

Toutefois, la réduction de l'impact environnemental par l'utilisation de matériaux réutilisés ainsi qu'éviter la production de déchets, est une motivation chez certains architectes. Ils ressentent une satisfaction personnelle d'avoir contribué au respect de l'environnement. Dans certains cas, une économie budgétaire est également envisageable.

Populariser l'emploi de matériaux réutilisés

Les bureaux ayant déjà utilisé des matériaux de réemploi dans au moins un de leurs projets, donnent en moyenne un score global de 6,5/10 à l'expérience d'utilisation de ce type de matériaux. Dans 82 % des cas, l'utilisation de matériaux de réemploi était une volonté de l'architecte contre 18 % de la part du client.

Nous nous penchons à présent sur les pistes que les architectes proposent afin d'améliorer l'expérience globale de matériaux de réemploi.

Augmenter les taxes sur les produits neufs et diminuer celles sur les matériaux réutilisés, est la piste la plus souvent évoquée par les architectes que nous avons sondés. En effet, le réemploi fait face à un problème de taxation : « *Il n'est pas normal qu'une tuile d'occasion dans une maison neuve soit taxée à 21 %, une tuile neuve dans une rénovation à 6 %. Cette perte de 15 % ne sera jamais comblée.* »²²

Selon plusieurs architectes, le gouvernement a donc un rôle à jouer afin de promouvoir le réemploi pour qu'il devienne plus attractif et accessible à tous : « *Je pense que le gouvernement peut stimuler l'économie circulaire en prélevant moins de taxes, ceci rendrait l'utilisation de matériaux de réemploi plus attrayant financièrement. Cela convaincra un grand groupe, et pas seulement les idéalistes.* »²³

Un des architectes sondés attire notre attention sur les immeubles de bureaux : « *Ce sont les immeubles de bureaux qui ont le plus d'impact sur le choix des matériaux, pourtant, ils visent à faire des économies. Si les matériaux recyclés étaient plus rentables pour eux (par le biais de taxes ou non), j' imagine qu'ils utiliseraient des matériaux recyclés.* »²⁴

Une autre piste très souvent évoquée rejoint le point de vue précédent. Il s'agit de l'introduction de subsidés pour les projets qui utilisent du réemploi : « *Les subsides permettent de créer des projets exemplaires qui montrent que la démarche est possible. Les pouvoirs publics doivent également créer des contraintes (obligation d'utiliser des matériaux de réemploi par exemple) comme cela a été fait pour les bâtiments neufs passifs en région Bruxelloise (et bientôt le Q-Zen en Wallonie).* »

²² Citation originale : « *Het is niet normaal dat een tweedehands dakpan in een nieuwbouwwoning aan 21% wordt belast, een een nieuwe dakpan in een renovatie aan 6% wordt belast. Die achterstand van 15% wordt nooit meer goedgemaakt* »

²³ Citation originale : « *Ik denk dat de overheid de circulaire economie een boost kan geven door minder belasting te heffen, waardoor het financieel aantrekkelijker word. Dat zal een grote groep over de streep trekken, en niet alleen de idealisten.* »

²⁴ Citation originale : « *Building offices have the biggest impact on the material choices in the end, and they aim to make savings. If recycled material is more cost efficient to them (via taxes or not), I would imagine them to use recycled material.* »

Pour d'autres, tant que le neuf aura une image plus flatteuse, il faudra pousser financièrement. En tous les cas, les architectes s'accordent à dire que *« l'argent est un moteur de choix auprès des entreprises comme des clients. »*

La troisième piste proposée est d'établir des normes de qualité et de performance des matériaux de réemploi : *« En tant que concepteur de gros projet nous sommes fort soumis aux respects des normes et au suivi des agréments techniques (bureau de contrôle) à cause des hauts enjeux financiers. »* Selon les architectes, les normes amènent la standardisation.

Une autre piste proposée par les architectes est la création des magasins de seconde main pour matériaux (plateforme physique) car *« la seule manière de s'en préoccuper est de physiquement quantifier les stocks et les possibilités matérielles et non pas virtuelles et informatives. »* Un architecte est d'avis que *« tout comme pour les vêtements, cela devrait exister »*.

Populariser le réemploi auprès des clients et des architectes (publicité positive) est également une piste de solution évoquée afin de sortir du cadre DIY (Do It Yourself) ou bricolage du réemploi.

« Les possibilités de réemploi (matériaux concernés, fournisseurs, garanties d'utilisation) sont très peu connues, je pense, des architectes. Comment conseiller le client, si le concepteur ignore ces alternatives ? »

Cette popularisation du réemploi implique également le développement de filières complètes sur la question du réemploi, en intégrant tous les acteurs de la construction, de la démolition à la construction neuve. *« Le réemploi dans la construction n'est aujourd'hui pas encore assez développé, et il s'agit encore aujourd'hui de pratiques marginales dans l'architecture. Si des filières complètes ne sont pas créées, cela semble difficile à mettre en place de manière plus globalisée. »*

2.3.2 BIM

Connaissances BIM

Tous les architectes sondés affirment au moins connaître le terme BIM (Figure 40). Cependant, tous les bureaux n'ont pas adopté ces nouvelles pratiques. Nous remarquons qu'aussi bien les petits que les bureaux mediums sont réticents envers l'utilisation du BIM. Les grands et très grands bureaux sondés sont tous adeptes du BIM.

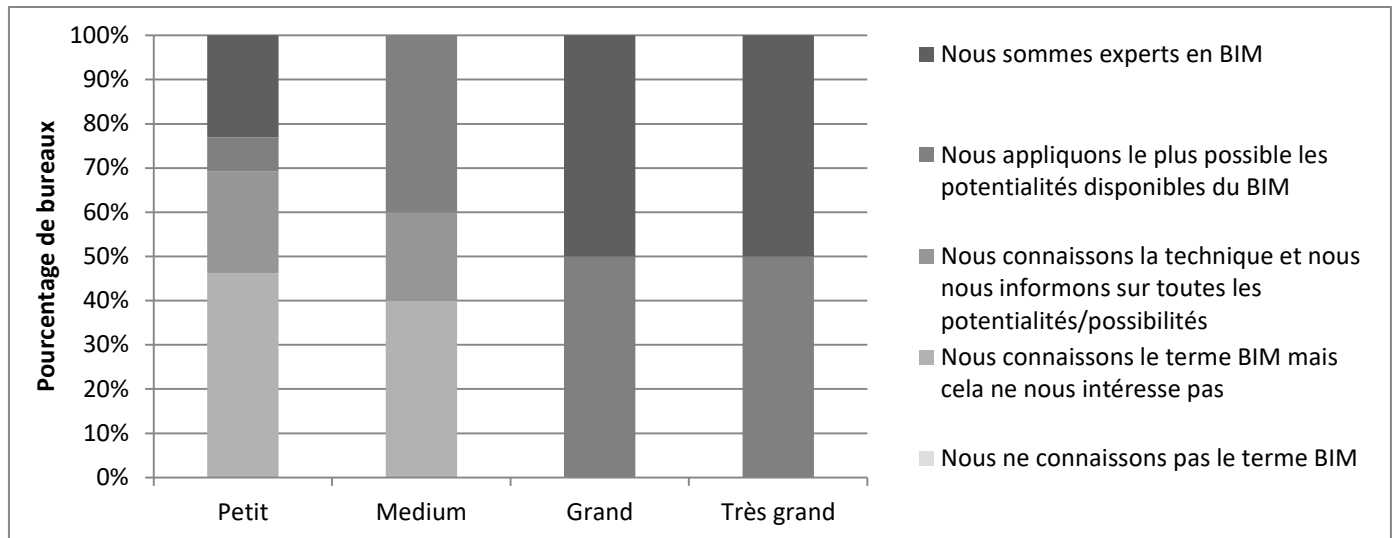


Figure 40 : Connaissances BIM en fonction de la taille du bureau d'architecture

En Wallonie, 67 % des bureaux disent connaître le terme BIM mais ne pas s'y intéresser, 2/3 des bureaux flamands sondés sont quant à eux favorables à son utilisation, les bureaux bruxellois sont mitigés (Figure 41). Pour les bureaux à l'étranger ayant répondu, 80 % des bureaux utilisent le BIM dans la majorité de leurs projets. Il faut cependant mentionner que le cadre légal envers l'utilisation du BIM diffère d'un pays à l'autre. Les résultats des bureaux étrangers en faveur du BIM ne sont donc pas nécessairement dus à un intérêt envers cette pratique mais bien à l'influence d'obligations légales.

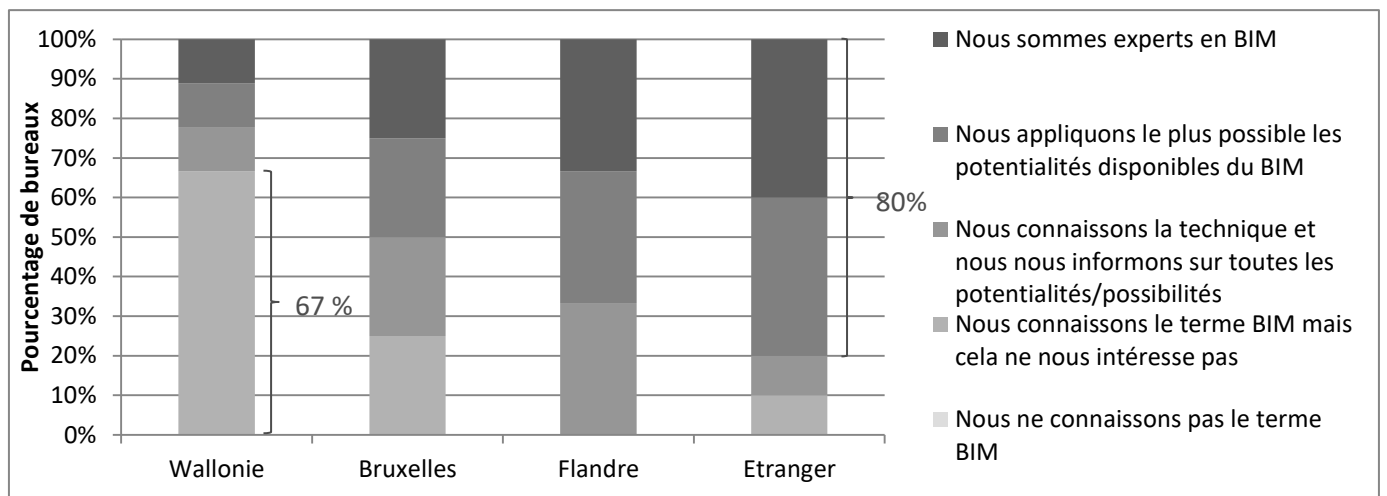


Figure 41 : Connaissances BIM en fonction de la localisation des bureaux

Nécessité d'utiliser le BIM

D'après cette étude, tous les architectes sondés, hormis 15 % de petits bureaux, sont convaincus de la nécessité de l'utilisation du BIM (Figure 42). Une grande partie (46 %) des petits bureaux et la majorité de bureaux médiums (60 %) admettent qu'ils devront utiliser le BIM mais ils n'ont pas encore sauté le pas. Dans les très grands bureaux, 67 % des architectes sont convaincus de la nécessité de l'utilisation du BIM, chez les 33 % restants c'est surtout la direction qui est convaincue.

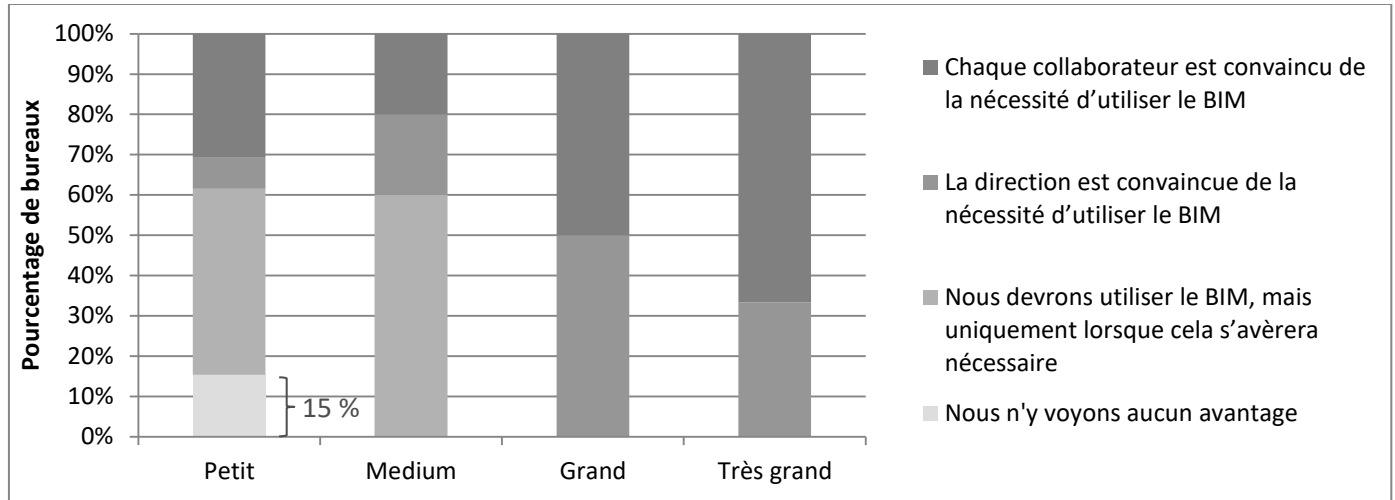


Figure 42 : Nécessité d'utiliser le BIM par rapport à la taille du bureau d'architecture

Dans 39 % des cas, les personnes ayant des capacités en BIM les ont acquises grâce à une formation externe au bureau d'architecture pendant les heures de travail, 28 % ont reçu une formation interne au bureau d'architecture et seulement 11 % avaient ces connaissances avant de rejoindre l'équipe (Figure 43). Dans les bureaux sondés qui utilisent couramment des logiciels de modélisation BIM, les logiciels les plus fréquemment cités sont Autodesk Revit et Graphisoft ArchiCAD avec respectivement 59 % et 35 % d'adeptes parmi les personnes sondées.

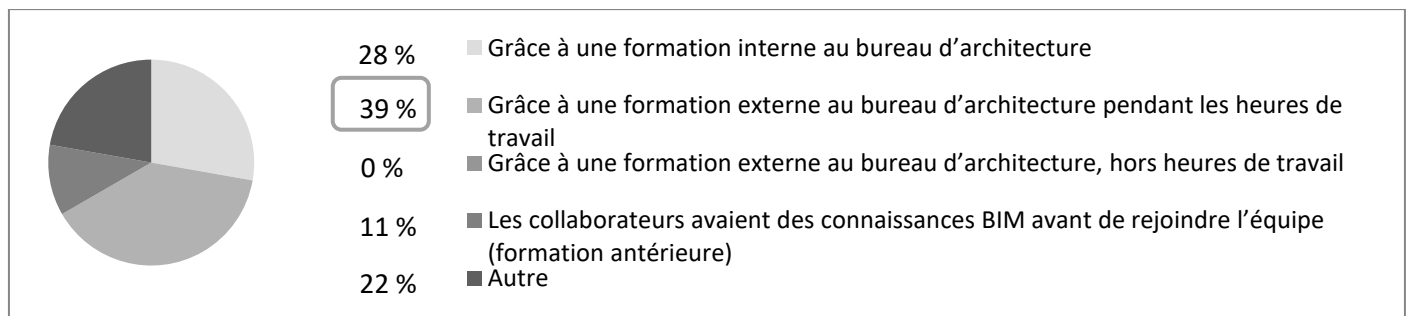


Figure 43 : Acquisition des connaissances BIM par les collaborateurs

Pour 58 % des architectes utilisant le BIM, le moment le plus opportun pour commencer la maquette numérique BIM est lors de la conception, 29 % trouvent qu'il est plus opportun de le faire à partir de la construction (Figure 44). Seulement 4 % y voient un intérêt lors de l'exploitation ou la déconstruction du bâtiment.

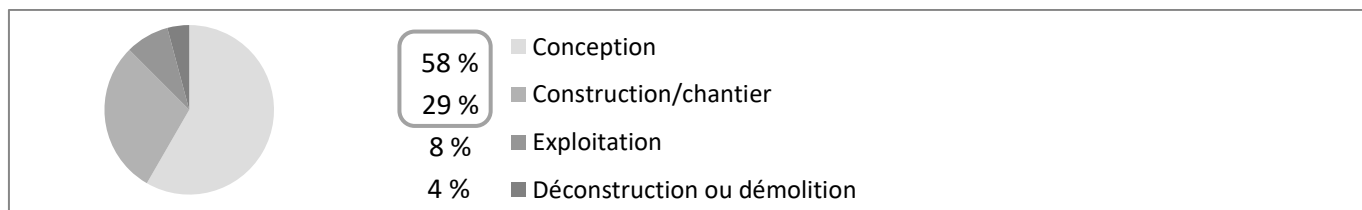


Figure 44 : Moment/étape du processus que les architectes trouvent le plus opportun pour l'utilisation du BIM

Aspect financier

Nous voyons sur la Figure 45 que plus le bureau est grand, plus il dispose de moyens financiers à investir dans le matériel informatique. Pour 23 % des petits bureaux, les moyens financiers ne permettent pas de développer le matériel informatique, 30 % disent avoir un budget limité. Chez 83 % des grands bureaux le budget pour les investissements IT en rapport avec les logiciels de modélisation BIM fait partie intégrante de leur business plan à long terme.

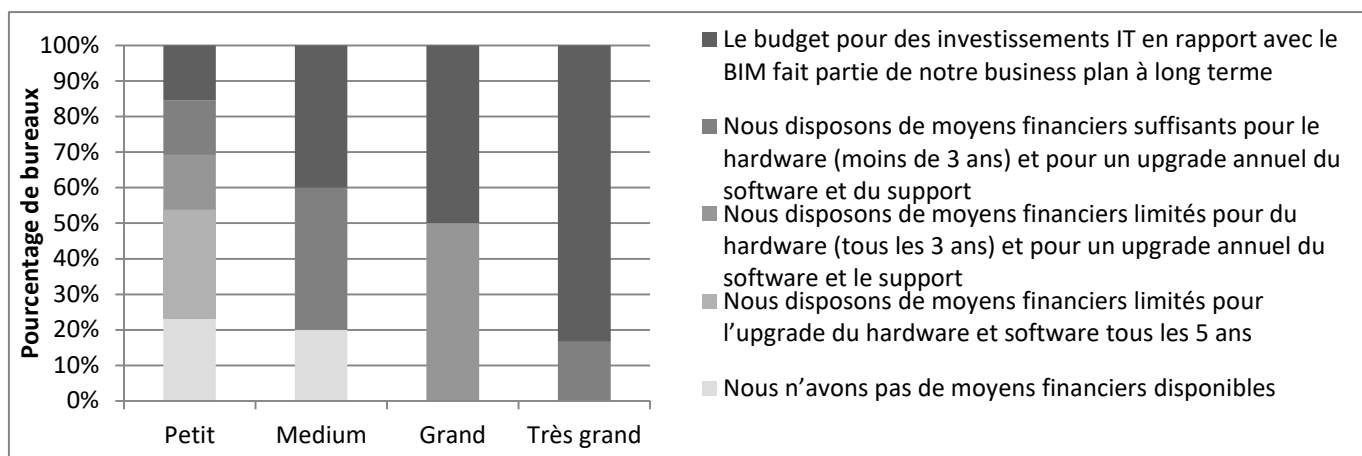


Figure 45 : Moyens financiers dédié au matériel informatique en fonction de la taille du bureau

Avantages et inconvénients du BIM

Nous avons demandé l'avis des architectes sur les avantages potentiels suivants du BIM (ordre sélectionné au hasard)(Figure 46) :

1. Améliore la collaboration et le dialogue entre les différents acteurs du projet
2. Offre la possibilité de faire des simulations/analyses
3. Réduction du coût global du projet
4. Centralisation de l'information
5. Détection d'erreurs
6. Gain de temps

Nous pouvons en conclure que les bureaux s'accordent majoritairement sur les avantages suivants : centralisation de l'information, détection d'erreurs, possibilité de faire des simulations/analyses et amélioration de la collaboration et le dialogue entre les différents acteurs du projet (Figure 46). Cependant, la majorité ne trouve pas que le gain de temps et la réduction du coût global du projet soient des avantages de l'utilisation du BIM.

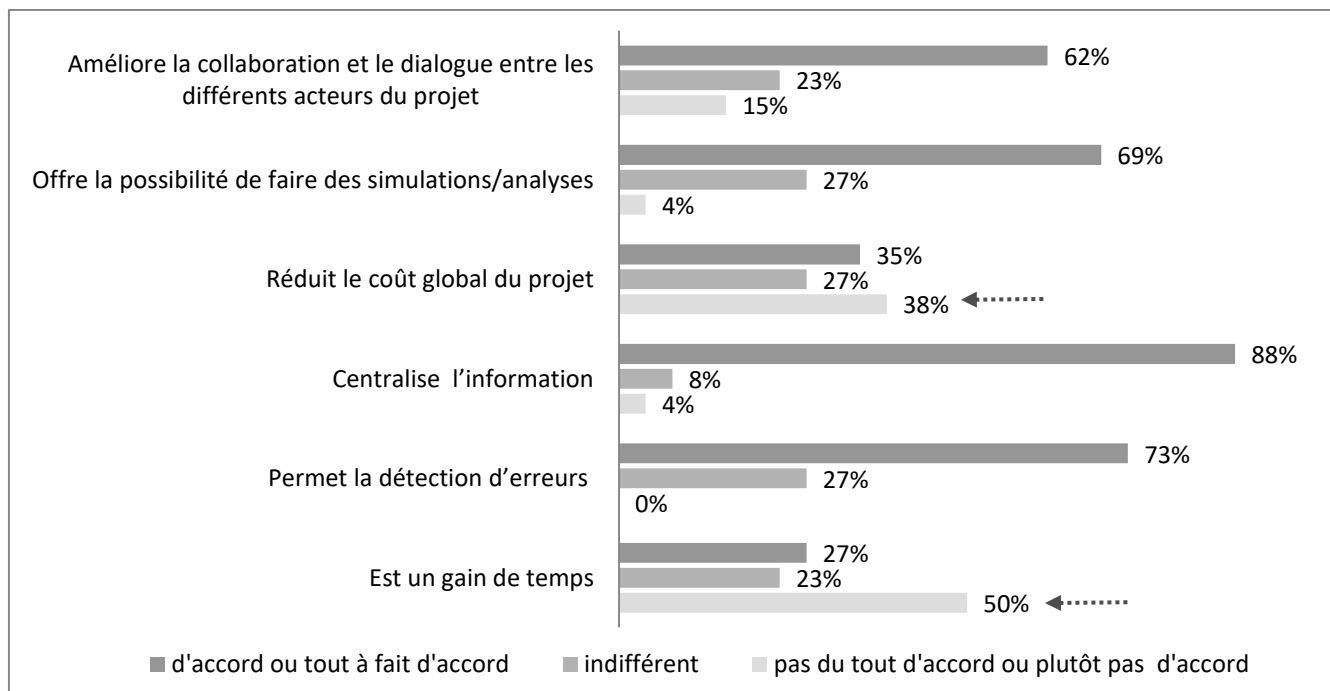


Figure 46 : Avantages et inconvénients du BIM

La moitié des architectes interrogés, issus de tout type de bureau confondus ne trouve pas que l'application d'un processus BIM engendre un gain de temps (Figure 47) Sur la Figure 47,nous remarquons toutefois que ce sont essentiellement les bureaux n'utilisant pas régulièrement le BIM qui réfutent catégoriquement cette idée. Le fait que le BIM puisse faire gagner du temps aux architectes, ne semble vrai que dans une minorité de cas.

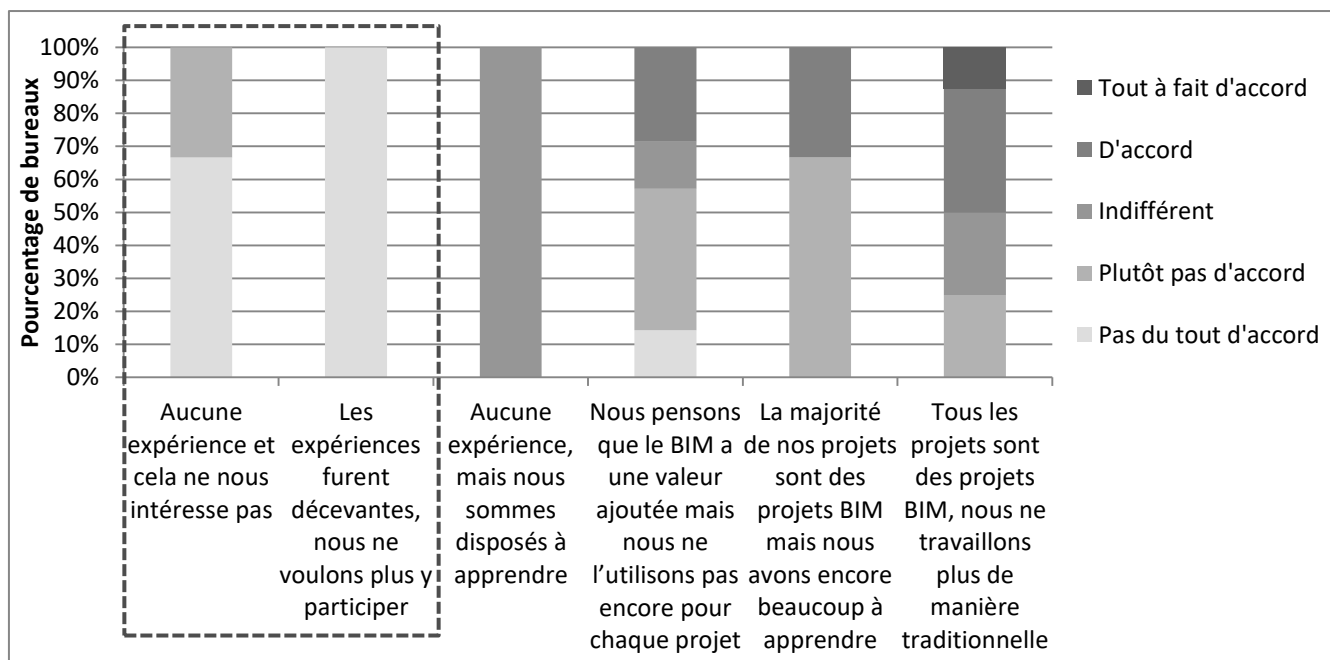


Figure 47 : Gain ou perte de grâce/à cause au BIM temps par rapport à un processus de conception classique selon l'expérience des bureaux

Le scénario est assez similaire quant à la réduction du coût global du projet grâce au BIM (Figure 48). Cette fois encore, ce sont les bureaux n'utilisant pas le BIM qui donne un avis négatif envers cette possibilité. La majorité des architectes (75 %) qui utilisent le BIM pour chaque projet sont eux favorable au potentiel de réduction des coûts globaux grâce au BIM.

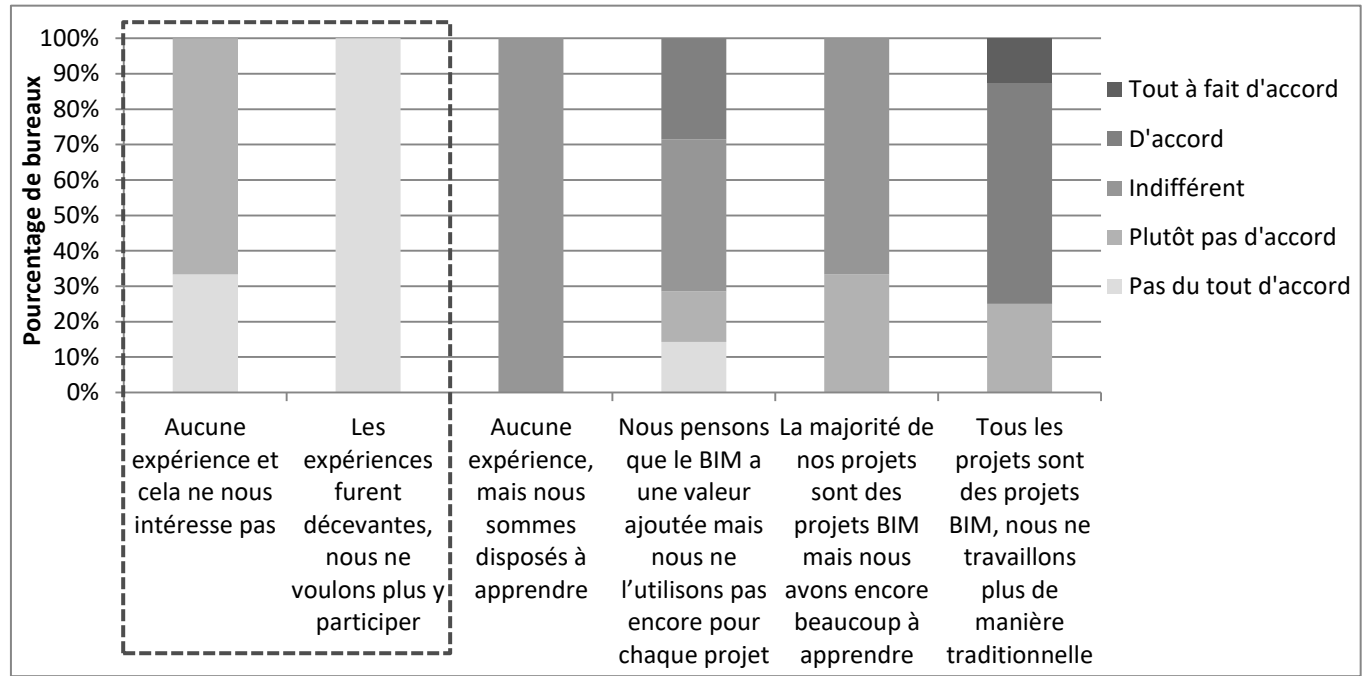


Figure 48 : Réduction du coût global du projet grâce au BIM par rapport à un processus de conception classique selon l'expérience des bureaux

Partage et gestion de l'information

Au niveau du partage de la maquette numérique BIM, 50 % des bureaux utilisant le BIM la transmettent au maître de l'ouvrage uniquement lorsque celui-ci la demande, 44 % disent le faire systématiquement.

Les avis sont mitigés quant au partage d'informations envers des partenaires de projet (entrepreneurs, ingénieurs, sous-traitants, spécialistes, fabricants, etc.) : 28 % des architectes sont réticents à l'idée de partager des informations avec des partenaires de projet (Figure 49). Ceux qui ont déjà collaboré avec des sous-traitants sur une maquette BIM disent qu'ils sont surtout intervenus lors de la modélisation des installations techniques : électricité, plomberie, chauffage, etc. Un des bureaux sondés dit déléguer la modélisation du projet, lors de délais courts, à une agence d'architecture qui pratique le BIM et en qui ils ont confiance.

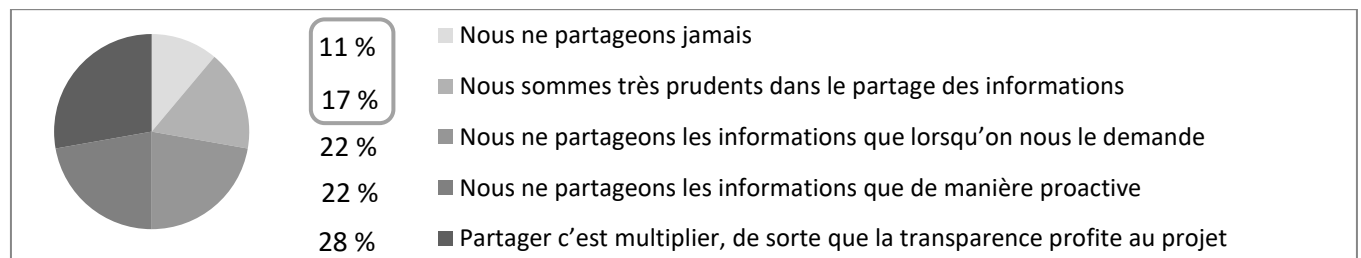


Figure 49 : Disposition au partage d'informations sur les projets avec des partenaires de projet

La plus grande partie des bureaux sondés qui utilisent le BIM, conserve la maquette numérique dans un système de back-up interne au bureau d'architecture (Figure 50). Seulement un bureau sur 26 % utilise des dispositifs en ligne (tel que « Madaster ») destinés à un usage ultérieur. Un autre bureau a indiqué l'enregistrer en interne pour le moment mais avoir l'ambition de stocker la maquette sur un dispositif en ligne dans le futur.

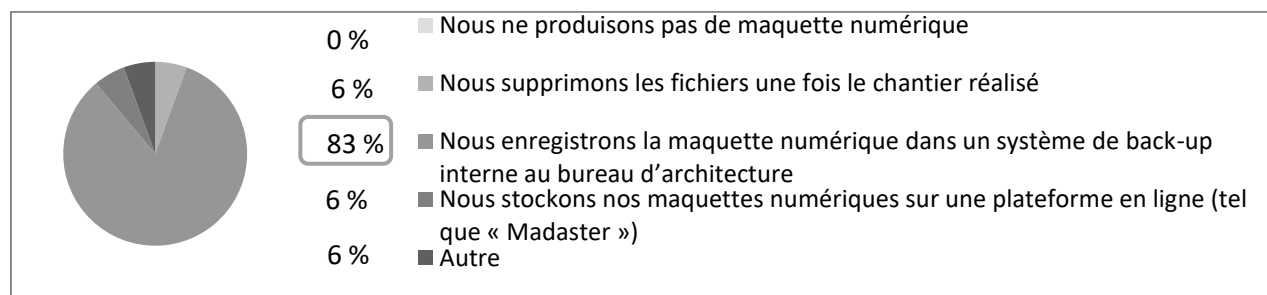


Figure 50 : Sauvegarde de la maquette numérique une fois le chantier finalisé

Complexifié/simplifié

Par une question ouverte, nous avons demandé aux architectes qui utilisent le BIM si l'arrivée du BIM leur avait facilité ou complexifié le travail.

Les bureaux d'architecture étant au début du processus, disent que le passage au BIM bouleverse les habitudes de travail ce qui engendre une baisse de productivité, des bibliothèques à refaire, des gabarits à créer, des softwares à paramétrer, démarche BIM à intégrer dans les contrats, etc. Ils y voient néanmoins une rentabilité à long terme. Un architecte travaillant dans un bureau médium (6 à 20 collaborateurs fixes) nous témoigne qu'il trouve que le BIM est « *une usine à gaz sans nom qui est beaucoup trop complexe pour les tâches demandées* ».

Les architectes évoquent également la complexité de la collaboration avec les différents intervenants dus aux différences de niveaux de maturité BIM. Un architecte travaillant dans un bureau de plus de 51 collaborateurs à l'étranger nous dit : « *Le BIM est la norme dans le secteur du bâtiment, mais tous les pays, les collaborateurs et les personnes sur le chantier ne le connaissent pas, c'est pourquoi nous modifions, concevons et développons nos propres flux d'informations et de données pour faciliter et s'adapter à chaque circonstance* »²⁵.

Un architecte travaillant dans un petit bureau de 1 à 5 collaborateurs ajoute que « *la mise en place et la gestion d'une plateforme collaborative est plus complexe que de simples envois de fichiers par mail* ».

Ce même architecte nous affirme que le BIM permet néanmoins de réduire les coûts dus aux erreurs évitées si la collaboration se passe bien. Pour d'autres, le BIM a simplifié la gestion et la production de documents et cela permet d'avoir un ensemble de données plus cohérentes.

²⁵ Citation originale: « *BIM is the standard in the building sector, but not all countries, collaborators and people on the building site knows about it, therefore we hack, design and develop our own workflows of information and data to help and adapt to each setup* »

2.3.3 Combinaison BIM et économie circulaire

Introduction de données de matériaux de réemploi dans le BIM

Selon notre sondage, 85 % des bureaux d'architecture disent ne jamais avoir essayé d'intégrer des informations concernant des matériaux de récupération dans un modèle BIM. Suite à une question à choix multiple, les raisons principales que les bureaux évoquent sont les suivantes :

- 25 % : « Nous ne savons pas comment nous y prendre »
- 21 % : « Nous n'utilisons pas de BIM »
- 24 % : « Le travail de numérisation est trop fastidieux »
- 11 % : « Nous sommes en manque de temps »
- 4 % : « Nous sommes en manque de moyens »
- 4 % : « Nous jugeons le travail de numérisation inutile »
- 21 % ont d'autres raisons

Un architecte nous explique pourquoi il n'a jamais tenté d'intégrer des informations concernant des matériaux de récupération dans un modèle BIM : *« Les éléments de réemploi peuvent faire leur apparition très tard dans le projet (dans notre expérience, 9/10 directement sur le chantier) : il n'y a donc aucun intérêt à une quelconque numérisation préalable pour nous, jusqu'ici. »*

Selon 80 % des adeptes de l'introduction des données dans le BIM, cette introduction doit se faire lors de la conception, 20 % trouvent qu'il est plus opportun de le faire lors de la phase chantier.

Pratiques actuelles

Les solutions actuelles trouvées par les bureaux, sont la modélisation et l'introduction manuelle des données dans le modèle BIM et/ou dans des fichiers connexes synchronisés.

Les problèmes évoqués concernent surtout la perte de temps afin d'introduire toutes les informations et le temps passé à paramétrer les nomenclatures permettant d'extraire et trier les informations.

Nous relevons trois types de connaissances que les architectes doivent acquérir afin de combiner les deux pratiques.

- La connaissance des matériaux et des modes constructifs conforme à l'économie circulaire
- La maîtrise d'un outil de modélisation BIM
- La connaissance des réseaux et filières de réemploi de la zone d'exercice du maître d'œuvre

Souhaits

Parmi les quatre habitués de la combinaison des deux pratiques, tous aimeraient disposer de passeports matériaux reprenant des informations concernant la quantité, la composition, les propriétés, l'impact environnemental, etc. Lors de la déconstruction sélective, trois sur les quatre architectes aimeraient disposer du modèle BIM du bâtiment dont ils veulent récupérer les matériaux. Enfin, deux d'entre eux aimeraient disposer d'un scan 3D (nuage de points) des objets récupérés. Ils demandent également des outils qui intègrent automatiquement les informations au modèle BIM afin de ne pas perdre de temps à le faire manuellement. Ils souhaitent aussi voir apparaître des outils afin d'avoir un aperçu plus clair des réseaux et filières de réemploi.

2.4 Discussion

Selon une étude récente sur plus de 700 architectes belges (Stals, 2018), la répartition des tailles des bureaux que nous avons sondés est représentative des agences d'architecture en Belgique. En effet, selon cette étude, 42,7 % des architectes travaillent dans une agence de 1 à 2 personnes, 22 % exercent dans une structure de 3 à 5 collaborateurs, 11,9 % dans un bureau de 10 à 20 collaborateurs et une minorité dans des bureaux au-delà de 20 collaborateurs.

Une autre étude, menée par Palindroom et Architectura.be, constate une différence de connaissances envers le BIM entre les différentes régions de Belgique. Selon leur étude sur 374 architectes belges, le BIM semble mieux implanté en Flandre qu'en Wallonie et à Bruxelles. En Flandre, 9 % des architectes utilisent couramment le BIM et 10 % ont déjà eu une première expérience en BIM. En Wallonie, ces chiffres sont respectivement 7 et 6 %. A Bruxelles, seulement 4 % des architectes utilisent couramment le BIM et 12 % ont eu une première expérience en BIM. Selon leur sondage, Bruxelles a donc le pourcentage le plus faible d'architectes ayant de bonnes connaissances en BIM (Rasking & Decroos, 2017). Malgré notre échantillon restreint, nos constatations sont similaires.

Toujours selon cette même enquête, le BIM n'est actuellement implanté que dans les grands bureaux. L'enquête a révélé que la moitié des architectes travaillant dans des agences de plus de dix personnes ont déjà une expérience BIM et 15 % l'utilisent régulièrement. La tendance s'inverse dans les petits bureaux pour lesquels seulement 9 % des architectes ont une expérience BIM et 4 % le pratiquent régulièrement (Rasking & Decroos, 2017).

2.5 Conclusion

Notre enquête montre qu'en général, l'image négative et la méconnaissance du réemploi sont un frein majeur à l'utilisation de matériaux de réemploi. Les architectes sont néanmoins favorables à l'utilisation de tels matériaux, mais ils manquent actuellement d'outils et de temps rémunéré pour mener à bien cette volonté. Pourtant, un certain nombre de bureaux n'hésitent pas à mettre l'économie circulaire en pratique.

Nous observons une grande différence d'utilisation du BIM entre la Belgique (et plus particulièrement la Wallonie) et les pays étrangers. Cette différence s'explique par le fait que le BIM soit d'ores et déjà imposés pour certains marchés à l'étranger, contrairement à la Belgique. Ce n'est donc pas toujours par conviction que les bureaux étrangers ont fait le choix d'utiliser le BIM. Globalement, le BIM est plus répandu auprès des grands bureaux. En parallèle, nous observons que l'investissement financier consacré au BIM est proportionnel à la taille de l'agence.

La combinaison des deux pratiques est très peu répandue, peu importe la taille ou la localisation du bureau. Les bureaux intéressés par l'économie circulaire ne le sont pas nécessairement par le BIM et inversement (mais pour d'autres raisons).

Parmi les architectes qui combinent les deux pratiques, tous aimeraient disposer de passeports matériaux reprenant les informations concernant la quantité, la composition, les propriétés, l'impact environnemental, etc. Les architectes passent actuellement beaucoup de temps à implémenter toutes les informations à paramétrer les nomenclatures permettant d'extraire et trier les informations.

PARTIE III : Entretiens d’approfondissement

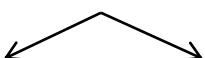
5.1 Méthodologie

D’après notre enquête en ligne, la combinaison du BIM et du DfD est encore très peu répandue au sein des bureaux d’architecture, et ce même si le questionnaire était ciblé envers les utilisateurs de l’une et/ou l’autre pratique.

D’après les réponses récoltées, certains architectes semblent néanmoins être plus avancés dans ce domaine que d’autres. Afin de déceler les solutions trouvées et les problèmes spécifiques rencontrés par ce groupe de précurseurs, nous avons réalisé une série d’entretiens rétrospectifs. Le but est d’en tirer des conclusions utiles au développement de ces pratiques peu répandues à l’heure actuelle.

Suite à l’analyse des réponses à l’enquête en ligne, nous avons identifié un groupe de dix bureaux d’architecture appliquant aussi bien les principes de l’économie circulaire que l’utilisation du BIM (Tableau 7). Six d’entre eux les utilisent séparément, les quatre autres les combinent sur un même projet. Lors de l’enquête en ligne, sept de ces dix bureaux ont répondu être prêts à participer plus amplement au développement du sujet. Sur les sept demandes envoyées, nous avons obtenu cinq réponses positives, les deux autres demandes restent sans réponse. Nous nous sommes donc entretenus avec les cinq architectes qui ont répondu à notre demande. Ces architectes sont issus d’horizons et de pays différents : Namur, Bruxelles, Paris, Amsterdam et Copenhague.

TABEAU 7: DESCRIPTION DE L’ÉCHANTILLON

Nombre de bureaux appliquant les principes de l'économie circulaire et utilisant le BIM		Nombre de bureaux ayant accepté être recontacté pour développer le sujet	Nombre de bureaux ayant répondu à la demande
10/26 		7 /10	5/7
Séparément	Combinaison		
6/10	4/10		

Selon Beaud (1996), trois conditions sont nécessaires au bon déroulement d’un entretien : le choix des enquêtés, la négociation du lieu et la durée de l’entretien, le ressort de la parole de l’enquêté. Un chercheur ne peut pas interviewer tout le monde. Il va donc repérer ses enquêtés à partir d’informations préalablement recueillies ou lors de discussions informelles.

Afin d’assurer les meilleures conditions pour un entretien, il faut négocier le lieu et la durée des entretiens des enquêtés. Il est indispensable de prévoir une plage horaire assez longue pour permettre au chercheur de conduire l’interview en toute quiétude d’esprit, sans avoir à bousculer son interlocuteur.

Un entretien répond à un certain nombre de phases. La première est une phase d’observation qui permet de faire connaissance, de briser la glace. Ensuite, l’entretien prend un rythme de croisière, mais peut connaître des bifurcations. Par exemple l’apparition d’un nouveau thème qui mérite d’être approfondi. Lorsque l’entretien touche à sa fin, on assiste souvent à des moments riches et plus personnels. L’interlocuteur ressent alors le besoin de se confier et de révéler des choses au dernier moment afin de ne

pas regretter de ne pas avoir dit certaines choses lors de l'entretien. Faire durer ce moment permet au chercheur d'explorer différentes pistes, car l'interlocuteur est mis en confiance (Beaud, 1996).

Une méthode très répandue de type d'entretien est l'entretien dit « semi-directif ». Il est réalisé grâce à un « guide de questions ». Il s'agit d'une « grille » de questions que le chercheur pose et adapte en fonction de la situation. Le chercheur adapte plus ou moins ses questions en fonction de la liberté qu'il veut donner, l'ordre et la formulation. L'approfondissement des questions varie en fonction des réponses à chacune d'elle (Brinkmann, 2014).

Nous avons donc établi une grille de questions semi-directives. Ces questions sont réparties en trois sections. La première concerne des informations globales sur l'architecte interviewé et l'agence dans laquelle il/elle travaille. La deuxième section est portée sur l'usage général du BIM, du DfD et de la combinaison ou non des deux pratiques. Dans la troisième section, nous analysons le projet le plus avancé dans ce domaine réalisé par l'architecte en question. Enfin, dans la dernière section, nous posons quelques questions globales sur l'utilisation de ces nouvelles pratiques.

Afin de faire un point sur la durée de l'entretien et d'affiner les questions établies, nous avons testé le questionnaire avec une des cinq architectes que nous avons sélectionnés, c'est-à-dire Charlotte Dautremont. Suite à cet entretien, certaines questions ont été modifiées et/ou précisées. Nous avons tout de même inclus son témoignage dans ce travail, car il est tout aussi pertinent que les autres.

Etant donné l'éloignement géographique de nos interlocuteurs, nous avons réalisé la majorité des interviews par vidéoconférence. Les entretiens avec les architectes exerçant en Belgique ont été menés en face-à-face. La durée approximative des entretiens est d'une heure.

Lors des entretiens, nous nous sommes munis de différents supports pour faciliter le traitement des réponses recueillies : grille d'entretien, prise de notes, enregistrement. Les enregistrements ont été réalisés avec l'accord des participants. Ils ont tous lu, approuvés et signés la convention qui figure en annexe de ce travail. La retranscription complète des entretiens est disponible sur simple demande à l'adresse suivante : amelie.halbach@gmail.com.

5.2 Rénovation et extension d'une maison unifamiliale et partie professionnelle

Présentation de l'architecte et du bureau

Charlotte Dautremont est une jeune architecte éco-conseillère, exerçant à son nom. Elle se sent très concernée par le développement durable et est fortement sensible à l'intérêt que représente le BIM pour le secteur de la construction. La combinaison du BIM et du DfD est encore nouveau pour elle. Néanmoins, Charlotte Dautremont est convaincue de l'intérêt de la démarche, même si cela demande une énergie supplémentaire considérable.

Usage général du BIM et de l'économie circulaire

Elle a commencé à s'intéresser au BIM et au réemploi il y a trois ans et quelque peu après au DfD. Elle a suivi la certification d'université « BIM pour les petites et moyennes structures » à l'ULiège et suit activement les conférences et formations proposées par l'IBGE qui abordent le développement durable.

Charlotte Dautremont est d'avis que l'introduction du BIM et le DfD sont deux bouleversements que l'on impose à l'architecte et aux autres acteurs de la construction : *« Pour moi, le BIM et toute cette question de réemploi passé ou future, peu importe, ce sont deux grosses contraintes. C'est pour cela que certains disent utiliser uniquement le BIM ou le réemploi, car il faut que les deux pratiques avancent parallèlement et puis à un moment donné convergent. Maintenant, nous sommes dans deux pratiques différentes et c'est compliqué. [...] Je peux comprendre que certains architectes soient complètement perdus en leur imposant les deux : le BIM les bouleverse dans leur pratique et en plus, tu leur rajoutes la seule chose qu'ils maîtrisent, c'est-à-dire la matérialité et la construction. »*

En effet, d'une part, le BIM change radicalement la collaboration entre les acteurs ; *« dans un processus BIM, tout le monde doit parler en même temps autour des mêmes documents, ce n'est déjà pas rien »*. D'autre part, le DfD change la pratique de la matière, c'est-à-dire la façon de concevoir. Dans une optique de déconstruction, l'architecte doit mettre de côté une grande partie de ce qu'on lui a enseigné durant toutes ces années et penser autrement : *« A partir du moment où tu penses en termes de « déconstruction », tu ne vas peut-être pas faire une dalle en béton classique comprenant chapes isolantes et de finition. Tout est à repenser. »*

Pour elle, la combinaison du BIM et du DfD découle essentiellement de la volonté de tous les acteurs de la construction : *« Je pense que dans un processus avec tous les acteurs, il faut que tous les acteurs soient convaincus. C'est déjà une telle énergie à se remettre à niveau pour adapter sa façon de travailler que si on a des freins de la part les autres acteurs cela ne marche pas. [...] Si toi en tant qu'architecte, tu es convaincu, et que tu as réussi à convaincre ton client, si les entrepreneurs ne savent pas comment faire la mise en œuvre, c'est un gros problème. »*

Le projet analysé

Le projet que nous analysons est situé dans la région namuroise. Il s'agit d'un projet en auto-construction de rénovation et d'extension d'une habitation unifamiliale avec une partie de bureau professionnel. L'architecte est également le maître de l'ouvrage, ce qui a influencé son rapport au projet : *« Je pense que c'est plus en tant que client que j'ai fait des recherches [sur le réemploi et la démontabilité]. Vu que c'est mon projet personnel, cela m'a semblé plus intéressant de savoir comment je pouvais faire pour que ce projet soit bien d'un point de vue construction et durabilité. Je pense que si j'avais seulement gardé ma casquette d'architecte, j'aurais voulu qu'il réponde aux normes en termes d'isolation et d'esthétique. »*

« Je n'ai pas été initié à cette vision préalablement dans les bureaux où j'ai travaillé. C'était toujours du neuf pour du neuf, on n'a jamais fait de réemploi ou du DfD. Cette dimension n'avait pas été envisagée avant le début du chantier ». Bien que le DfD soit entré très tard dans le projet, une attention particulière est portée à la démontabilité de la façade. Ce sont des panneaux fixés mécaniquement pouvant être démonté et réutilisé sous leur forme d'origine au moment de la déconstruction.

Pour elle, la maquette numérique BIM a permis de mieux gérer les quantités pour le calpinage de la façade et ainsi éviter les surcoûts et le gaspillage. En effet, la maquette numérique lui a facilité les calculs par rapport à une démarche traditionnelle à la main, car la maison a une forme particulière (Figure 51: Calpinage de la façade (Source: Charlotte Dautremont)).



Figure 51: Calpinage de la façade (Source: Charlotte Dautremont)

Grâce à la maquette numérique, elle a pu s'exercer sur la maquette et ensuite le réaliser sur le chantier. *«Entendu lors d'une conférence au BIM World 2018 à Paris, il y a toujours un rapport de 100 entre une erreur à vérifier sur ta maquette numérique et la réalité, c'est-à-dire où un clash te coûte 10 euro en BIM et t'en coûte 1000 sur le chantier ».* En revanche, ce travail de va-et-vient entre la maquette et le chantier est

long et fastidieux. Il faut toujours mettre la maquette à jour en fonction de l'évolution du chantier et donc en quelque sorte effectuer deux fois le travail.

La maquette numérique BIM, associée un viewer *BIMx* ont également permis d'améliorer la communication avec l'entrepreneur. Le fait de pouvoir montrer certains détails a aidé à une meilleure compréhension du projet.

Intérêt de la démarche

« Le principe qui est vraiment important pour moi, c'est le réemploi. C'est vraiment cela qui fait du sens. Le BIM, ce n'est jamais qu'un moyen. Dans le sens où le BIM permet d'éviter qu'un mur ne soit pas mis au bon endroit ou une canalisation HVAC traverse une poutre, etc. Le BIM peut servir pour cela aussi, évidemment. La question que je me pose en travaillant de cette manière est : est-ce que cela va être utilisable dans vingt ans ? C'est difficile à dire. On n'utilise plus les disquettes d'il y a 15 ans, qu'en sera-t-il du format IFC ? »

Pour Charlotte Dautremont, la combinaison du BIM et des principes de DfD sont compatibles si cette pratique est financièrement rentable et efficace. Elle n'est pas convaincue que le BIM soit réservé à des projets d'envergure. En revanche, elle est d'avis que les pratiques de déconstruction sont difficilement envisageables dans le contexte économique actuel ; *« Le principe du réemploi et de la déconstruction pour le futur sont très difficiles à concevoir dans notre société actuelle, car notre société est sédentaire. [...] Lors du colloque BAMB2020 en février dernier, l'un des orateurs émettait l'idée que pour une parfaite démontabilité il faut pouvoir accepter que notre projet soit éphémère. Mais alors, comment procéderont les prêts hypothécaires ? Tout deviendrait immatériel. Je pense que ce sont des mentalités très difficiles à changer. »*

En effet, l'application des principes de DfD demande un changement de paradigme ; *« Tous les acteurs doivent changer, mais pas seulement les architectes. [...] Les clients doivent voir le concept de démontabilité à la télévision [...]. Le maçon doit comprendre pourquoi il ne montera plus ses blocs de la même façon. Il va peut-être toujours les utiliser, mais pas de la même façon. Il faut changer tous les acteurs et pour moi cela me semble tellement colossal. »*

Selon Charlotte Dautremont, on assiste également à une dynamique de lobbying où les architectes vont faire l'effort si le projet va être vu et si on va en parler positivement ; *« Je peux comprendre qu'actuellement, il n'y ait que des gros projets pilote. Parce qu'ils ont un objectif : ils veulent être exemplaires et ils ont le budget et les ressources. »*

5.3 Rénovation d'un immeuble de bureaux

5.3.1 Présentation de l'architecte et du bureau

Laurant Naud est architecte et conseiller en méthodologie BIM. En tant qu'architecte, il travaille actuellement seul dans le bureau à son nom situé à Chamborand (Creuse, France). Il se rend deux jours par semaine à Paris pour son rôle de conseiller.

Avant d'exercer à son nom, il a acquis de l'expérience dans plusieurs agences d'architecture, dont Studios Architecture²⁶. Studios Architecture est une agence d'architecture internationale ayant plusieurs bureaux dans le monde : New York, Washington, Los Angeles, San Francisco, Mumbai et Paris. L'agence de Paris a été fondée en 1992.

5.3.2 Usage général du BIM et de l'économie circulaire

Laurent Naud a découvert Revit en 2006 lorsqu'il était stagiaire dans une agence d'architecture durant ses études. Ensuite, il a exercé dans divers bureaux qui n'utilisaient pas de logiciels de modélisation BIM. Lorsqu'il est embauché chez Studios Architecture en 2010, il a commencé à faire beaucoup de projets en BIM. *« En travaillant chez Studios, j'ai appris beaucoup de choses. J'ai également eu beaucoup d'échecs, vraiment beaucoup d'échecs, en BIM et l'organisation de ce que cela pouvait être. Chez Studios, j'ai dû faire une trentaine de projets en BIM en quatre ans et j'ai dû en voir aboutir à peu près cinq seulement. »* Laurant Naud est maintenant très à l'aise avec le BIM et l'utilise systématiquement pour chaque projet.

Selon lui, l'avantage majeur du BIM est le suivi global : *« On sait toujours où on en est, on n'a pas de problèmes de synthèse, on réussit vraiment à gagner un temps fou en termes de modifications. On ne doit pas reprendre l'intégralité des dessins, c'est le côté efficient de la production. Cela me fait toujours basculé du côté BIM quoi qu'il arrive. »*

Un autre avantage du BIM concerne la rénovation. Il s'agit de la pré-estimation des quantités de matériaux à récupérer, car le relevé est plus fiable. La pré-estimation des quantités permet donc d'optimiser le transport des matériaux déconstruits. Le désavantage est le temps que cette démarche demande. *« On passe du temps dessus qui n'est théoriquement pas rémunéré. Sur aucun de mes projets, je n'ai pu mettre en place un processus de déconstruction qui était un petit peu rémunéré au niveau des honoraires de l'architecte. C'est vraiment une question de conscience. »*

Il applique les principes de l'économie circulaire, car il y a été sensibilisé en travaillant avec des associations locales. Maintenant adepte de ces pratiques, il trouve cela aberrant de ne pas les appliquer. *« Je ne vois pas pourquoi on irait de stocker des briques dans le fin fond de la brousse en France en comblant des trous avec alors qu'on pourrait les réutiliser à autre chose »*. En revanche, la récupération d'éléments de déconstruction n'est pas systématiquement présente dans chacun de ses projets, car cela dépend principalement de l'entreprise qui va être sélectionnée pour effectuer les déconstructions. Il évoque le problème que la maîtrise d'ouvrage n'est pas toujours sensible au sujet. Par conséquent,

²⁶ Studios Architecture : <http://studios.com/home/>

l'entreprise choisie pour les travaux de démolition n'est pas toujours apte à le faire. *« Nous, quoi qu'il arrive, on utilisera la maquette et on utilisera les processus pour expliquer comment le déconstruire. On va pouvoir réussir à optimiser la chose si l'entreprise est compétente. Si l'entreprise n'est pas compétente sur le sujet, on pourra toujours parler, cela ne servira à rien »*. De plus, les matériaux que l'on démonte actuellement, ne sont pas toujours fait pour cela. Ce qui se résume en un pourcentage de casse : *« Plus l'entreprise sera expérimentée dans le domaine, moins il y aura de casse. »* Laurant Naud déplore le fait qu'actuellement, c'est aux architectes de faire plus de zèle, donc plus de travail pour réussir à aboutir à un projet qui soit plus vertueux. Il nous donne un l'exemple d'un de ces projets de déconstruction : *« Il a fallu qu'on décrive nous-mêmes, architectes, l'intégralité du processus de démontage du bâtiment. J'espère qu'à terme cela commencera à rentrer dans les entreprises elle-même. »*

En voulant intégrer la déconstruction dans le BIM, Laurent Naud a rencontré un problème majeur : *« Il n'y a pas de logiciel pour l'instant qui est optimisé pour cela. En créant un mur, on pourra lui affilier une donnée, on ne pourra pas lui affilier une géométrie donc on va quand même continuer à travailler sur quelque chose d'assez approximatif. Même en poussant très loin le niveau de développement, on va avoir cette problématique-là »*. Pour répondre à cette problématique, Laurant Naud et ses collègues ont mis en place un système de classification d'état physique des matériaux récupérés. Cette classification va de A à F, où A est un matériau en très bon état, que l'on pourra manipuler de la même manière que du neuf, et F un matériau quasi inutilisable.

5.3.3 Le projet analysé

Le projet que nous analysons, est la rénovation du projet « Allera y »²⁷ de Studios Architecture. Il s'agit de l'ancien siège de France Télécom devenu Orange, un bâtiment de bureaux d'une superficie de 20 000 m², construit en 1985. Le concours a été rendu en mai 2011 et les travaux ont commencé en 2012. La construction a pris du retard après avoir trouvé de l'amiante.

Le projet se trouve en milieu urbain très dense (Figure 52). La ville a beaucoup insisté sur la limitation des nuisances sonores dues aux travaux. Le BIM leur a été d'une grande aide afin de pré-estimer les volumes et donc de limiter le va-et-vient de camions. Les architectes n'ont pas eu de mal à mettre en place Revit, car c'était « une coque en béton » qui n'était pas d'une complexité au niveau technique.

Studios Architecture a pu démonter un grand nombre de matériaux existants. Les moquettes ont été enlevées et envoyées chez Desso afin d'être recyclées. Les cloisons modulaires ont été récupérées par une entreprise française. Les faux-plafonds ont été récupérés par Armstrong²⁸ et sont repartis dans la chaîne de production. Les fenêtres ont soigneusement été démontées. Les armatures ont été récupérées afin d'être réinsérées dans le cycle de production d'aluminium. Le verre a également été recyclé.

²⁷ Allera y : <http://studios.com/fr/projects/allera-y/>

²⁸ Armstrong : <https://www.armstrongceilings.com/commercial/fr-fr/>

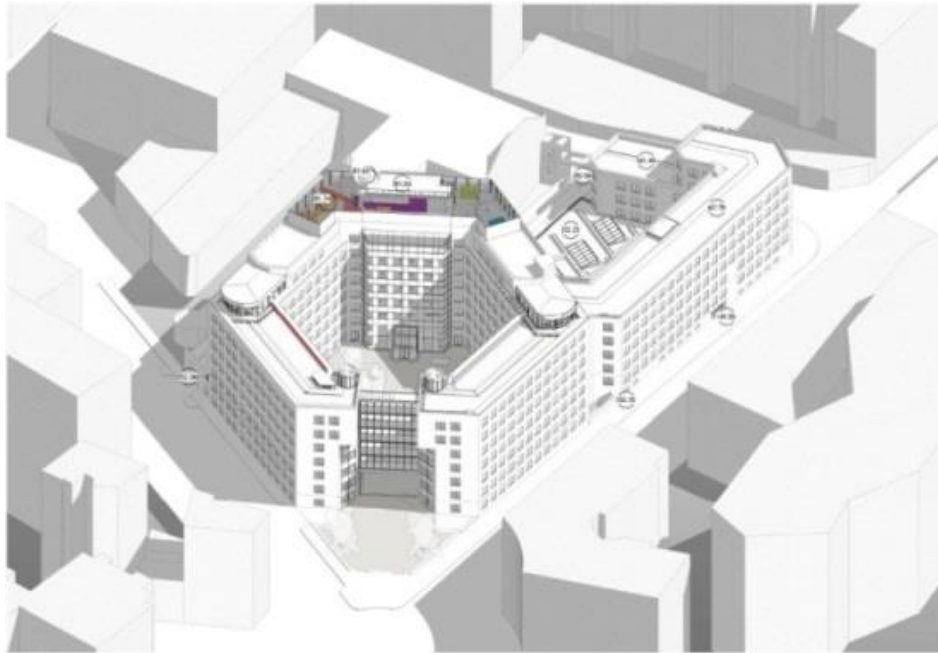


Figure 52 : Axonométrie du projet Alleray (Source : Studios Architecture)

Les nouveaux matériaux mis en œuvre ont été imaginés de manière à pouvoir les démonter en fin de vie (DfD). Par exemple, le mode de mise en place des fenêtres a été simplifié par rapport au système existant pour qu'elles puissent être changées à n'importe quel moment, sans intervention depuis l'extérieur.

L'intégralité des éléments mis en place sont accompagnés d'un **carnet de processus**. Par exemple, les fenêtres disposent d'un carnet imagé où chaque étape de déconstruction est dessinée de façon à expliquer comment les démonter sans les endommager. Cette volonté de disposer de carnets de processus ne venait pas de la part du client, mais du chef de projet qui a une vision portée sur l'impact sur l'environnement.

Studios Architecture a également pensé à une piste de revalorisation des fenêtres. Ils ont calculé qu'il faudrait remplacer plus ou moins 4 % des fenêtres d'ici dix ans pour cause de verre fendu. Les architectes ont prévu de réutiliser les profilés et le verre pour construire des serres sur le toit du bâtiment. Afin de pouvoir accueillir les serres, les architectes ont volontairement renforcé certaines zones de la toiture afin de disposer de plus de substrat végétal qu'ailleurs.

Toute cette réflexion par rapport à la déconstruction, a été introduite dans le BIM en fin de PRO/début DCE. Le tout a été intégré dans la GTB (Gestion Technique du Bâtiment). Cette GTB contient donc toutes les informations nécessaires à la maintenance du bâtiment et la gestion de fin de vie des éléments, c'est-à-dire les spécificités de montage, de démontage et la possibilité de recyclage.

Dans ce projet, le BIM a apporté d'autres avantages, aussi bien pour le maître de l'ouvrage que pour les architectes.

Le maître de l'ouvrage avait pour but de rentabiliser son bâtiment. En ayant à peine commencé le projet, il avait déjà l'idée de revendre le bâtiment. Le maître de l'ouvrage a donc accepté de rallonger le budget

dédié au BIM, car il a bien compris la plus-value que le BIM apporterait au bâtiment lors de la vente. Par rapport à son estimatif originel, il a réussi à le vendre 15 % plus cher.

Pour les architectes, le BIM a permis de phaser le bâtiment élément par élément afin de limiter l'impact sur le voisinage. Deuxièmement, la maquette numérique a permis de s'avoir qu'il y avait un problème d'éclairage, « chose qu'on n'aurait pas vu en 2D parce que cela nous paraissait normal et cela respectait la réglementation ». Troisièmement, le BIM a permis de mieux appréhender le système de CVC (Chauffage-Ventilation-Climatisation).

Studios Architecture a profité de ce projet pilote pour faire des tests de réalité virtuelle dans le bâtiment. « On pouvait se déplacer dans le bâtiment via une manette PlayStation. Donc c'était un peu en avance sur le moment, maintenant, c'est très en retard. »

Actuellement, la maquette est maintenue à jour par le propriétaire du bâtiment qui l'utilise comme outil de gestion du bâtiment. Le propriétaire a embauché quelqu'un pour former deux personnes en interne afin de maîtriser les outils. « Le défaut qu'il y a eu de notre part, c'est qu'on n'a pas vendu la maquette. On leur a donné la maquette en format numérique basique non-évolutif sur des DVD à l'époque, en Revit et en IFC. Puis on a donné deux disques durs. Un où ils étaient en capacité de revenir sur les originaux et un disque dur où ils avaient la possibilité de faire des évolutions dessus. »

5.3.4 Intérêt de la démarche

Laurent Naud trouve la démarche de combiner le DfD au BIM surtout pertinente pour les projets neufs. « Il n'y a aucun projet neuf qui pourrait avoir des réserves sur le sujet. » Il évoque plus de prudence par rapport à l'utilisation du BIM en rénovation, car la démarche occasionne parfois une perte de temps problématique. « Je dois avoir six ou sept hôtels particuliers parisiens à mon actif. Sur les sept, il y en a deux qu'on a dus abandonner en cours de route, car on perdait un temps fou. La moindre modification, cela nous faisait perdre une journée alors que c'était deux traits dans Autocad. »

L'utilisation du BIM dépend, selon lui, de trois critères : la compétence de l'équipe en BIM, la compétence dans la gestion de l'outil informatique et la capacité de gestion du projet. Si un de ces critères n'est pas rempli, le bon déroulement du processus est compromis.

En effet, Laurent Naud regrette la croyance en un « easy button » : « On a l'impression qu'en cliquant sur un bouton, l'intégralité du projet va se faire en BIM et on va pouvoir faire de l'Asset Management et du facility management juste avec une maquette qui a été faite en quatre secondes. »

De plus, afin d'avoir une collaboration optimale, « il faut [un BIM Manager qui ait] des prérequis, et en BIM, et en architecture, et en informatique. Ces profils-là, ils ne sont pas nombreux. »

Il est convaincu que la maquette numérique va devenir un standard. « Comme d'habitude, cela va devenir un élément qui va venir s'accumuler à nos pratiques. On gardera toujours le dessin à la main, on aura toujours le dessin en 2D, mais ce sera la maquette numérique qui sera d'ici peu dominante et qui prendra le relais ». Pour lui, la maquette numérique BIM contenant les informations concernant la déconstruction sera réutilisée si elle est mise à disposition des acteurs futurs. « J'ai déjà vu certains maîtres d'ouvrages envisager de faire payer la maquette numérique aux futurs acteurs. Donc ils cherchent déjà à la rentabiliser alors qu'ils l'ont déjà rentabilisée pendant la construction. »

Pour Laurant Naud, le logiciel idéal serait d'avoir un logiciel ultime. En effet, il n'est satisfait d'aucun logiciel actuel, car chaque logiciel a ses avantages et ces inconvénients. Pour lui, il faut arrêter de faire du format natif, car cela freine la capacité de compatibilité entre logiciels. *« On est 'x' intervenants sur un projet et le problème, c'est que nous utilisons tous des logiciels différents. A la fin, on se retrouve sur un format commun, qui finalement, n'est pas vraiment modifiable »*. Ce qui l'intéresserait, ce serait de disposer d'une plateforme d'échange qui ait des capacités de modélisation/logiciels.

5.4 Rénovation d'une maison individuelle sur base d'un scan 3D

5.4.1 Présentation de l'architecte et du bureau

Après ses études d'architecture à Strasbourg, Lionel Bousquet a débuté son activité professionnelle en tant qu'architecte indépendant à Marseille de 2000 à 2008. Après quoi, il a déménagé à Bruxelles, notamment, car il a effectué un Erasmus à La Cambre en 1996.

Depuis dix ans, Lionel Bousquet est BIM Manager chez XDGA²⁹, un bureau bruxellois qui compte à peu près 55 collaborateurs. Parallèlement à son activité chez XDGA, il dirige son propre bureau BxlMrs³⁰ avec son associé Antoine Chaudemanche.

5.4.2 Usage général du BIM et de l'économie circulaire

Lionel Bousquet utilise régulièrement Archicad depuis une quinzaine d'années. En 2014, il a commencé à en parler au bureau XDGA et une opération pilote a été mise sur pied afin d'introduire le BIM dans l'agence. L'implémentation du BIM a été faite par un projet pilote. Il s'agissait d'une résidence étudiante et d'un hôtel de 15 000 m² sur le plateau de Saclay, dans le sud de Paris. Ils ont mis en place des formations spécifiques avec cinq ou six personnes dont trois ou quatre ont participé au projet en question. Lionel Bousquet était le chef de projet. *« Ce projet-là, c'était vraiment l'occasion de le faire [introduire le BIM dans l'agence] et on a eu un retour assez rapide. Quand je dis assez rapide, c'est qu'au bout de la phase d'étude, après plusieurs mois, on a vu que malgré le fait que c'était nouveau, qu'on a dû former des gens et qu'il y a eu des complications, la rentabilité demandée par le bureau était là malgré tout. »*

La déconstruction de bâtiments existants ou la conception en vue de la déconstruction (DfD) ne font pas partie des priorités du bureau XDGA. Lionel Bousquet déplore ce manque d'intérêt : *« En général, nous travaillons sur des gros projets et récemment nous avons rendu un concours qui s'appelle 'City Gate' à Anderlecht. C'était pour faire des logements, des ateliers et des bureaux. Dans l'appel d'offres du concours, il y avait des demandes par rapport à l'économie circulaire. J'ai donc participé au concours par rapport à cela, mais j'ai fait une note A4. En plus, dans le projet (dont je n'étais pas chef de projet) il y avait par exemple pas mal de bâtiments en brique où il a été choisi d'en démolir beaucoup et de n'en conserver que les plus intéressants au point de vue esthétique. »*

Lionel Bousquet tente néanmoins de combiner le BIM et l'économie circulaire au sein de son bureau BxlMrs, car il est fort sensible au sujet et que cela l'intéresse. Il tente de combiner les deux pratiques depuis qu'il a été lauréat du prix « Be Circular » en 2017. *« Je n'ai pas de collègues qui s'y intéressent. Moi, je fais de la recherche [rires] parce que je n'ai pas de repères donc je vais un peu à la pêche. Au début, j'utilisais juste le BIM, c'est après qu'est venu l'intérêt de mélanger les deux. »*

²⁹ XDGA (Xaveer De Geyter Architects Brussels) : <http://xdga.be/>

³⁰ BxlMrs : <https://www.bxlmrs.eu/>

5.4.3 Le projet analysé

Le projet « Dethy » concerne la réhabilitation d'une maison bruxelloise typique située à Saint-Gilles. Lionel Bousquet en est le maître de l'ouvrage et l'architecte. Le début des travaux de déconstruction est prévu en avril 2019.

La rénovation de cette maison a pour objectif d'être passive. *« J'ai pas mal de collègues qui se moquent parfois un peu de moi, car je récupère des trucs, je fais la décharge en gros. Je ne suis pas du tout d'accord parce que justement, on a un stock de matières, on a des milliers de tonnes, je ne parle que de Bruxelles. Cette maison, au point de vue énergétique, elle est G, elle est à plus de 215 kWh/m² par an. L'idée, c'est de gagner 200 kWh et de passer à 15 kWh. Cela ne se fait pas par magie. Certes, j'y ai passé du temps, mais la prochaine maison j'y passerai beaucoup moins de temps parce que j'ai appris plein de choses. Tout le jeu de réarranger cette matière qui est sellée, qui est fixée dans une maison, c'est ça qui est intéressant. Ça aussi, c'est de l'architecture parce qu'on change la réalité, mais c'est juste qu'on essaie de moins puiser dans les ressources terrestres. C'est tellement basique et évident. »*

Lionel Bousquet compte aller très loin afin d'éviter les déchets de (dé)construction. Un des principes est qu'il n'y aura pas de benne sur le chantier. Par contre, qui dit quantité de matériaux de récupération, dit stockage. La maison dispose d'un rez-de-chaussée de 80 m² et d'une cour de 31 m², ces deux espaces serviront pour entreposer les matériaux récupérés (Figure 53). L'idée est de se procurer des étagères pour entreposer tous les matériaux démontés (tuiles, charpente, briques, plafonnage, etc.) et d'avoir tout ce stock à portée de main. Les étagères seront réutilisées à la cave une fois le chantier finalisé. De plus, Lionel Bousquet a trouvé une alternative aux « Big Bag » intransportables par la force musculaire. Il récupère les caisses en carton du Marché des Tanneurs de Bruxelles qu'ils ont l'habitude de jeter afin d'y stocker les matériaux récupérés. *« Si on veut dans un premier temps garder [les matériaux récupérés] il faut vraiment s'intéresser aux problèmes de logique et de stock. [...] Si on n'a pas de place, il faut réfléchir autrement. Ce qui est clair pour moi, c'est que chaque chantier, chaque projet à ses stratégies différentes que ce soit par rapport au BIM ou à l'économie circulaire. Il n'y a pas de méthode toute faite, c'est suivant les cas et suivant l'architecte et le client. Il faut s'adapter à chaque fois. »*



Figure 53: RDC pour le stockage des matériaux démontés (Source: BxlMrs)

Afin de faciliter la gestion des matériaux démontés, l'objectif est d'établir un inventaire ou un catalogue de tout ce qui peut être récupéré à partir du BIM. Puis de faire une mise à jour en fonction de ce qui a effectivement pu être récupéré. Grâce à cet inventaire, Lionel Bousquet veut montrer la quantité de matériaux qu'il est possible de récupérer d'une maison ordinaire quand on fait l'effort de démonter proprement de haut en bas. Pour lui, la déchetterie est uniquement envisageable si aucune piste de recyclage ou de réemploi ne peut être proposée. Grâce au BIM, la destination de certains éléments est déjà connue, avant même que ceux-ci ne soient démontés. Une partie des matériaux vont être réutilisés sur le chantier : la brique sera réutilisée pour construire le nouveau pignon, la charpente servira en tant que plancher, etc. D'autres éléments continueront leur cycle de vie sur un autre chantier. Les châssis vont, par exemple, être récupérés par la ferme « Nos Pilifs » au nord-ouest de Bruxelles pour rénover leur atelier. Lionel Bousquet leur a donc établi un inventaire où ils pouvaient indiquer les châssis qui les intéressaient.

De plus, le processus de déconstruction a minutieusement été détaillé : *« Je me suis mis à la place d'un ouvrier et j'ai essayé de faire en sorte que tous les démontages puissent se faire par un ou deux mains d'œuvres. C'est moi qui vais faire tous les démontages simples pour pouvoir monitorer et compter précisément les heures. »*

Dans ce projet de rénovation, la combinaison du BIM et de l'économie circulaire présente, selon lui, un avantage majeur : une meilleure connaissance de l'existant. *« La modélisation brute, géométrique, apporte une meilleure connaissance du bâti. Ensuite, quand on s'intéresse à comment est fait le bâtiment, on va récupérer des informations ; là, il y a du gîtage bois, là, c'est un mur en briques porteur, là, c'est un mur en brique pas porteur, là, c'est du gyproc, etc. On va rentrer toutes ces informations dans le modèle. On transforme donc un modèle géométrique en une base de données que l'on peut ensuite interroger. »*

Afin d'obtenir cette maquette numérique, fidèle à l'existant, la maison a d'abord été passée au scan 3D (Figure 54). Le nuage de points obtenu est d'une précision incomparable à un relevé à la main et a permis de préciser le dessin de la maison. *« J'ai gagné dix centimètres en hauteur par rapport à mon relevé 2D à la main et on s'est rendu compte qu'aucun mur n'était parallèle. »*



Figure 54 : Scan 3D de la situation existante du projet DETHY (Source : BxIMrs)

Le BIM continuera à être utilisé après la fin des travaux. En effet, il servira de base pour établir un guide de la maison en tant que support, au moins graphique, pour le facility management.

5.4.4 Intérêt de la démarche

Pour Lionel Bousquet, cette démarche de BIM combinée à l'aspect circulaire est particulièrement pertinente lorsqu'il s'agit de rénovation d'habitations. *« Des maisons comme celles-ci, il y en a des milliers à Bruxelles. Si on trouve un bon processus de travail pour modéliser et trouver ce qui est facilement démontable et le valoriser. Cela aura beaucoup d'impact au niveau rénovation énergétique et circularité des matériaux, mais cela demande beaucoup de boulot. »*

Il aimerait néanmoins voir apparaître un outil qui soit beaucoup plus intuitif et qui puisse lier et l'économie circulaire et l'éco-conception. C'est-à-dire, un modèle numérique/une base de données qui génère des documents graphiques, les plans, la représentation architecturale, les informations sur les matériaux en combinaison avec des outils comme *Totem*. *« L'intérêt majeur du BIM, c'est qu'on arrête d'encoder cinq fois de suite. »*

Pour lui, cela vaut la peine de faire tous ces efforts. Ce projet a d'ailleurs changé sa vision du métier et sur sa façon de travailler. *« C'est impensable maintenant de ne plus travailler avec l'économie circulaire, ni avec le BIM. Je ne vois pas quel serait l'intérêt de ne pas le faire. Il y a un côté très technologique et un côté très terre-à-terre (travailler avec la matière). Ce que je trouve très intéressant, c'est que ça redonne des lettres de noblesse à l'acte de construire, au fait que l'architecte soit aussi un constructeur. S'il ne connaît pas la matière, il lui manque quelque chose. »*

5.5 Rénovation d'un hôtel de ville et construction d'un petit complexe de bureaux

5.5.1 Présentation de l'architecte et du bureau

L'architecte néerlandais, Terry Pater, travaille chez Door Architecten, situé à Amsterdam. Il est concepteur, chef de projet, mais aussi un gestionnaire BIM. Il a acquis son expérience de conception chez Rudy Uytenhaak Architectenbureau et des connaissances en physique du bâtiment chez Bouwformatie.

Door Architecten a été fondé en 2014 par Karin Dorrepaal et Saskia Oranje et compte actuellement entre douze et quinze collaborateurs. Le bureau est situé dans le premier zoning industriel circulaire des Pays-Bas, appelé « Tuin van Bret »³¹. Le « PIT lab », leur bureau, est à lui seul un exemple de circularité. Ce bâtiment fait partie des deux projets que nous analyserons.

5.5.2 Usage général du BIM et de l'économie circulaire

Door Architecten est adepte du BIM depuis sa création en 2014. Selon Terry Pater, dix des douze collaborateurs maîtrisent les logiciels de modélisation BIM. L'utilisation du BIM est donc bien rodée dans l'agence. Il est d'ailleurs utilisé tout au long du processus de conception et de construction.

L'intérêt pour l'économie circulaire, et plus précisément le DfD n'était pas courante lors de la création du bureau. Cet intérêt est venu six mois à un an après la création du bureau. Cela fait maintenant un peu plus de trois ans et demi qu'ils s'y intéressent fortement. La combinaison du BIM et du DfD est devenue courante à partir de ce moment-là.

Terry Pater a appris à utiliser les logiciels de modélisation BIM chez leur employeur précédent. Il en est de même pour bon nombre de ses collègues. Certains l'ont appris lors de leur formation, d'autres ont été formés en interne. L'adoption et l'apprentissage du DfD se sont fait grâce à de l'expérience pratique : *« Nous avons dû apprendre cela nous-même, car il ne s'agit pas d'une façon ordinaire de travailler ou de faire. Pour cela, il faut l'expérimenter par la pratique »*.³² La conception et la construction de leur propre bureau, le « PIT lab » a fait partie de cet apprentissage.

Door Architecten a l'ambition de concevoir et de construire uniquement des projets circulaires, mais la demande ne suit pas. *« Nous ne sommes pas dans une position où nous recevons tellement de demandes que nous pouvons nous permettre d'en refuser. Cependant, en fonction des projets que l'on reçoit, nous essayons d'appliquer les principes de l'économie circulaire autant que possible et voir ce que l'on peut faire pour chaque projet. Parfois, il s'agit de beaucoup de choses, parfois, c'est minime. Cela dépend du maître d'ouvrage. »*³³

³¹ Tuin van Bret: <https://www.tuinvanbret.nl/>

³² Verbatim original : « dat hebben we zelf moeten ontdekken omdat dat nog geen gangbare manier van werken en doen is. Dat moet je echt in de praktijk ervaren. »

³³ Verbatim original : « Wij zijn niet in de positie dat we zo veel aanvragen krijgen dat we kunnen kiezen wat voor projecten we draaien natuurlijk. Desalniettemin, afhankelijk van de projecten die we hebben, proberen we wel zo circulair mogelijk aan te vliegen en zien wat we kunnen doen binnen een project. Soms is dat heel veel, en soms is dat minimaal. Dat hangt van de opdrachtgever af. »

Pour Terry Pater, le grand avantage du BIM réside dans l'apport du « Digital Twin ». Les passeports matériaux combinés à la plateforme « Madaster » sont une façon de savoir quels matériaux sont présents dans le bâtiment sans devoir entrer physiquement dans le bâtiment pour l'analyser. Selon lui, grâce au modèle BIM entretenu, il est plus facile d'évaluer à distance l'état de matériaux, de connaître les quantités, de savoir comment le démonter, de savoir quels sont les précautions à prendre lors du démontage, etc.

Certes, cela demande un investissement en temps, et donc d'argent en phase de conception, mais cet investissement sera d'autant plus fructueux dans trente ou cinquante ans. Pour Terry Pater, les coopératives, fonds de pension et investisseurs ont tout à y gagner, car il est fort probable qu'ils profitent eux-mêmes de cet investissement. Selon lui, les bâtiments généreusement documentés à l'aide de passeports matériaux, auront plus de valeur sur le marché que des bâtiments non documentés.

5.5.3 Les projets analysés

Hôtel de ville d'Eindhoven

A la demande de la ville d'Eindhoven, le groupe « !MPULS »³⁴, dont fait partie le bureau d'architecture Door, s'est engagé à rénover et/ou entretenir de manière durable sept bâtiments appartenant à la commune. L'objectif de la ville est de diminuer la consommation électrique de ses bâtiments et de faire la transition vers les nouvelles façons de travailler (« New Ways of Working »).

Le premier bâtiment à subir des transformations est l'hôtel de ville. Il s'agit d'un bâtiment en béton avec un habillage en pierre naturelle. Ce bâtiment abrite 500 postes de travail. La rénovation de l'hôtel de ville est axée sur la flexibilité des espaces (Figure 55). Les architectes offrent ainsi à la ville d'Eindhoven la liberté d'investir les lieux selon leurs besoins.

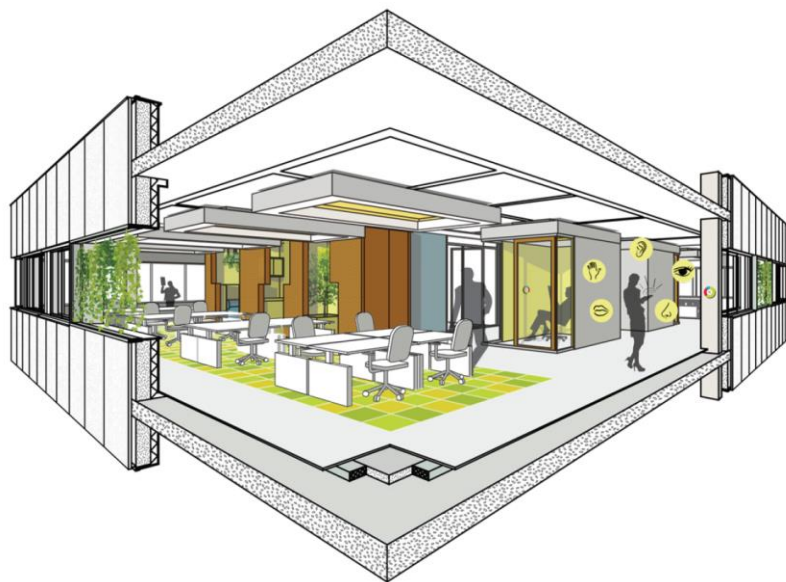


Figure 55 : Environnement de travail adaptable (Source : Door Architecten)

³⁴ !MPULS : <http://www.impulsgeeftenergie.nl/>

Lors de la déconstruction sélective de ce bâtiment pendant la rénovation, un grand nombre de matériaux ont été démontés pour être réutilisés dans le bâtiment même. Deux exemples de matériaux réutilisés dans le bâtiment-même les dalles de faux-plafonds réutilisées comme isolation de façade et les anciennes portes intérieures transformées pour en faire des armoires et des cloisons intérieures. D'autres matériaux démontés ont été proposés à la vente grâce à la plateforme de revente de matériaux en ligne « Materialenmarktplaats »³⁵ de Re Use Materials.

Grâce à tous ces efforts, 95 % des matériaux démontés ont pu trouver un nouvel usage. Beaucoup d'éléments déconstruits ont donc été déplacés au lieu d'être éliminé.

Les matériaux neufs introduits dans le bâtiment ont été mis en œuvre afin de pouvoir les démonter facilement. Ils pourront être réutilisés sous différentes formes. Certains pourront être réutilisés sous leur forme et leur fonction originale, d'autres en tant que matière première.

Depuis le début du projet, la ville était fortement demandeuse d'appliquer les principes de l'économie circulaire. En revanche, au début du projet, la ville n'avait pas de demandes spécifiques envers une maquette numérique BIM. Ils ont découvert l'utilité de ce processus au fur et à mesure de l'avancement du projet et étaient très enthousiastes. Ils ont trouvé ce processus progressiste et inventif.

Pour ce projet, Door Architecten a étroitement collaboré avec des constructeurs, des installateurs et des entreprises d'installations électrotechniques. La maquette numérique BIM est enregistrée dans le *cloud*. Ce qui permet à tous les intervenants du projet d'y avoir accès à tout moment et en temps réel. L'étroite collaboration avec les partenaires de projet ainsi que l'utilisation de logiciels de détection de clashes (Solibri), ont permis de déceler un grand nombre d'erreurs en amont de la construction. Ce processus a pris beaucoup de temps lors de la conception, mais a permis de faire des économies lors de la construction. Les visualisations 3D générées par la maquette numérique BIM ont permis aux architectes de mieux communiquer avec la ville et les autres acteurs de projet.

Etant donné que les architectes ont un accord de dix ans avec la ville d'Eindhoven, ce sont eux qui prendront en charge la mise à jour de la maquette numérique BIM durant le cycle de vie du bâtiment. De plus, les architectes seront impliqués dans d'autres projets de la ville. Il est donc important pour eux de savoir ce qui est modifié dans chacun des sept bâtiments.

PIT lab

Comme nous l'avons dit précédemment, le PIT lab est situé le premier zoning industriel circulaire des Pays-Bas. Le projet « Tuin van Bret » prône la réutilisation maximale des éléments et des matières premières. Le terrain de 1500 m², de forme triangulaire, accueille sept pavillons. Ces pavillons sont composés de conteneurs maritimes d'occasion rouge vif (Figure 56). Le bureau d'architecture Door, a conçu et occupe l'un de ces pavillons. Il a été conçu en 2016 et la construction a commencé en janvier 2017. Leur but était de concevoir un bâtiment le plus circulaire possible, à partir de matériaux de réemploi et de bio-matériaux.

³⁵ Plateforme de Re Use Materials : <http://materialenmarktplaats.nl/>

Le terrain sur lequel ces pavillons sont construits, appartient à la ville d'Amsterdam. Le collectif *Tuin van Bret*, le loue pour une durée de dix ans. Ce qui veut dire que dans dix ans, ils devront quitter les lieux, sans laisser de traces durables sur le terrain. Cette condition incite à réfléchir à la fin de vie des bâtiments. Terry Pater nous donne l'exemple de pieux de fondation que l'on enfonce de trente mètres dans le sol. Certes, les fondations seront très solides, mais il sera impossible de les enlever dans dix ans. Les architectes se sont posé la même question pour tous les matériaux et éléments mis en place : « *Comment faire en sorte qu'il soit facile de l'enlever dans dix ans ?* »³⁶ Le DfD est donc devenu le principe de conception central du projet.



Figure 56 : Intérieur du « PIT lab » (Source : Door Architecten)

Pour ce projet, les architectes ont privilégié le DfD au BIM. Ils n'ont donc pas réalisé de maquette numérique BIM. La principale raison pour la non-utilisation du BIM est la petite taille de ce projet (300 m²). De plus, l'exécutant est également le client, c'est-à-dire le bureau d'architecture Door. Comme il s'agissait de leur propre bureau, ils connaissaient très bien les lieux et les matériaux mis en œuvre. Ils ont eux-mêmes supervisé et contrôlé les travaux de construction. Terry Pater nous précise qu'ils ont procédé ainsi, car il s'agissait de leur propre bureau, le processus aurait été différent s'il s'agissait d'un client lambda.

Les architectes n'ont pas non plus utilisé de passeports matériaux. Pour eux, les passeports matériaux concernent surtout les nouveaux matériaux. Or, dans ce bâtiment, le taux de matériaux de récupération est de 75 %. Le projet a en effet été conçu en fonction des matériaux disponibles : « *A un moment donné, nous avons en notre possession un certain nombre de châssis en PVC d'une certaine dimension. Nous les*

³⁶ Verbatim original: « *Hoe zorgen we ervoor dat het over tien jaar gemakkelijk weg kan?* »

avons ensuite placés dans le projet. C'est sur cette base que nous avons déterminé notre grille de façade avec les poutres en bois. En fin de compte, les châssis de fenêtre ont été utilisés pour déterminer la disposition de la grille. Au départ, nous savions que nous voulions une grille en poutres en bois sur la façade, mais avant d'avoir les châssis, nous ne savions pas si l'écart allait être de 34 ou 64 cm. Au moment où nous étions en possession des châssis, nous le savions. »³⁷

Dans dix ans, le bâtiment sera entièrement démantelé. Deux options de fin de vie sont envisagées. La première est l'assemblage du bâtiment à l'identique à un autre endroit. La seconde considère le bâtiment comme une banque de matériaux où chaque élément sera apprécié de manière individuelle. Les architectes ne se sont pas encore prononcés sur cette question.

5.5.4 Intérêt de la démarche

Le bureau d'architecture Door accorde plus d'importance à l'économie circulaire que l'utilisation de la maquette numérique BIM. « *Un modèle BIM ne rend pas le monde plus écologique, ce qui est le cas de démonter les éléments* ». ³⁸ L'économie circulaire est en effet une des priorités du bureau. Même si le client n'est pas spécifiquement demandeur, les architectes de Door vont tout de même suggérer l'idée en motivant l'intérêt de ce concept. En règle générale, les clients sont rapidement convaincus.

Pour Terry Pater la combinaison du BIM et du DfD est intéressant à partir du moment où le client sait ce qu'il compte faire de sa maquette numérique BIM. En tant qu'architecte, il peut insister sur l'intérêt de cette démarche, mais le client n'en perçoit pas toujours les bénéfices vu le temps qui s'écoule entre la construction et la déconstruction.

Pour lui, la combinaison des deux pratiques se justifie si le projet est d'une certaine envergure. Ce qui n'était pas le cas du PIT lab, par exemple. Pour lui, la combinaison du BIM et du DfD demande beaucoup d'efforts et il est difficilement justifiable d'investir autant de temps et d'argent dans des projets de petite envergure.

Terry Pater aimerait pouvoir générer automatiquement des vidéos et visualisations du processus de déconstruction. Ce type de support existe déjà pour la construction, mais pas encore pour la déconstruction : « *Dans un détail, on peut voir dans quel ordre les éléments doivent être assemblés, mais il serait bien d'avoir également ce type de dessins concernant le démontage.* » ³⁹

³⁷ Verbatim original : « *We hadden op een gegeven moment een aantal kunststofkozijnen in ons bezit gekregen, met bepaalde afmetingen. Die hebben we dan in het ontwerp geplaatst. Aan de hand daarvan hebben we dan ons gevelgrid bepaald met de houten balken. Uiteindelijk zijn de kozijnen dus leidend geweest voor de indeling van het grid. We wisten wel dat we een grid wilden op de gevel van de houten balken, maar of dat er nu 34cm of 64, dat wisten we van tevoren nog niet. Op het moment dat we de kozijnen hadden, wisten we dat wel.* »

³⁸ Verbatim original : « *Een BIM-model, daar wordt de wereld niet direct milieuvriendelijker van, als je de materialen losmaakbaar maakt wel* »

³⁹ Verbatim original : « *In een detail kun je zien in welke volgorde lezen van hoe iets aangebracht zou kunnen worden maar het mooie zou zijn als je ook een demontagetekening hebt.* »

5.6 Complexe de soixante logements

5.6.1 Présentation de l'architecte et du bureau

Casper Østergaard Christensen est un architecte danois. Il travaille dans le bureau GXN situé à Copenhague depuis août 2014. Il est passionné par l'architecture qui influence positivement le monde et s'intéresse plus particulièrement à toutes les pensées et connaissances qui se cachent derrière l'architecture elle-même.

GXN a été créé en 2007 en tant que département de recherche interne du bureau d'architecture danois 3XN. Depuis sa création, GXN est sensible aux matériaux écologiques et aux technologies du bâtiment. Le « G » signifie « Green ». Il souligne le dévouement de GXN dans la recherche en design écologique par le biais de processus numériques et de solutions innovantes. Les compétences de GXN couvrent les projets d'architecture et de design, la recherche, l'innovation et le conseil externe.

5.6.2 Usage général du BIM et de l'économie circulaire

L'usage du BIM est largement répandu au sein du bureau, surtout auprès des architectes chargés de la conception des projets. Pour 3XN, il est plus important d'obtenir une maquette numérique BIM que d'introduire les principes de DfD dans leurs projets. Les outils de modélisation BIM ne sont pas utilisés en phase de concours. Le passage au BIM se fait une fois le concours remporté. Le bureau d'architecture 3XN utilise surtout le BIM en phase de construction alors que GXN s'intéresse à son intérêt en fin de vie.

Le DfD est donc uniquement connu et appliqué dans la section de recherche GXN, et pas encore dans les projets de 3XN. *« Du fait que nous [GXN] fassions partie de 3XN, ce concept commence également à s'intégrer chez eux. Les pensées se répandent donc ils sont au courant. Certains projets commencent à intégrer les principes de DfD. Les employés qui ont travaillé sur ce type de projets, sont entièrement convaincus. Mais il s'agit encore d'une pratique peu courante ».*⁴⁰ Suite au travail de recherche de GXN, l'ambition est d'intégrer les principes de DfD dans les projets d'envergure de 3XN afin de ne pas se limiter au stade de recherche. Selon Casper Østergaard Christensen, le marché n'est actuellement pas prêt à accueillir ces pensées et ces pratiques.

Ni 3XN, ni GXN n'ont déjà combiné le BIM et le DfD dans un projet concret. Ensemble, ils ont néanmoins décrit comment ils comptaient s'y prendre dans leur livre intitulé « Building a Circular Future »⁴¹, paru en 2016. La volonté de combiner le DfD avec le BIM est donc présente depuis le début de cette recherche en 2015.

Casper Østergaard Christensen est convaincu que le BIM et le DfD se complètent très bien. *« Le DfD permet beaucoup de choses, mais on a besoin du BIM et des passeports matériaux pour en optimiser la valeur et l'utilisation. C'est une façon d'ajouter de la valeur, mais aussi de rendre plus de choses*

⁴⁰ Verbatim original: *« But because we are part of 3XN, it is getting more and more integrated. The thoughts are seeping out, so they kind of know it. There are some projects which are integrating it. So of course, the employees that have been part of these projects are well into it. But I would say, it is still something of a niche. »*

⁴¹ Building a Circular Future : <http://www.buildingacircularfuture.com/book>

possibles ».⁴² D'une part, le DfD apporte de la flexibilité dans le bâtiment et facilite le réemploi. D'autre part, le BIM, associé à des passeports matériaux, permet de stocker les informations concernant les éléments. La combinaison du BIM et du DfD résulte en une transparence au niveau de la construction du bâtiment, tout en ayant beaucoup d'information sur les composants.

Selon Casper Østergaard Christensen, le BIM intégrant le DfD est un atout pour les acteurs futurs. « *Il est indispensable de stocker les connaissances sur les matériaux, car le problème majeur que nous rencontrons actuellement dans le secteur du réemploi, est que nous n'avons pas de documentation sur les matériaux que nous réutilisons. Il est donc très difficile d'obtenir une certification et la permission de les utiliser dans un projet. Si vous voulez réutiliser du béton dans le bâtiment et que vous ne savez pas ce qu'il contient, il est très difficile d'obtenir la permission de l'utiliser. Il serait donc très utile d'avoir un détail précis qui indique exactement ce qu'il contient.* »⁴³

5.6.3 Le projet analysé

Après avoir écrit le livre « Building a Circular Future », GXN a eu la volonté de mettre cette recherche théorique en pratique. Ils ont donc cherché un client partant de les rejoindre dans l'aventure. De là est né le projet « Circle House », un complexe de logements sociaux dans le secteur dans la banlieue d'Aarhus, au Danemark (Figure 57). Le début des travaux est prévu dans le cours de l'année 2019 et le chantier devrait se terminer en 2020. Casper Østergaard Christensen nous précise que le projet doit être construit suivant le budget initial du client et que GXN a obtenu une bourse de 10 % afin de financer la recherche.

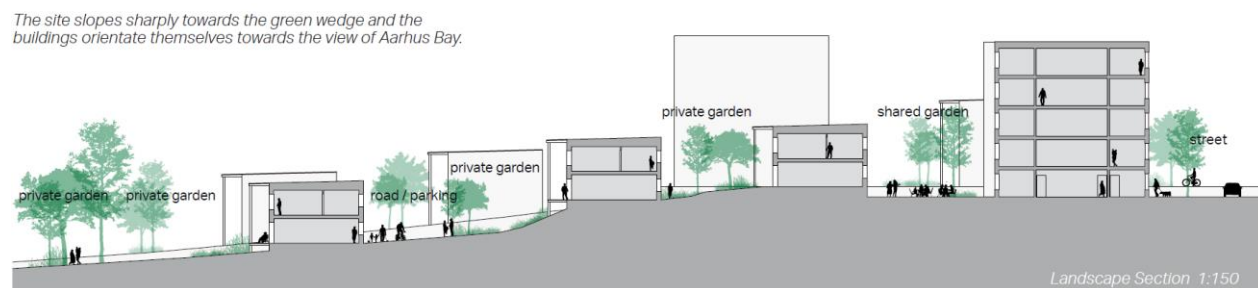


Figure 57 : Coupe du complexe de logements (Source : Circle House)

Le but est de construire le premier projet de logements circulaires du Danemark où 90 % des matériaux utilisés dans les bâtiments pourront être réutilisés en fin de vie du bâtiment sans perte de valeur significative. Par conséquent, le bâtiment est conçu pour être démontable de façon à en récupérer les composants (DfD). Dans leur livre « Circle House », un chapitre est d'ailleurs consacré à une analyse de différents scénarios de seconde vie. L'objectif du projet est de diffuser la connaissance et le savoir-faire sur les principes de circularité en architecture.

⁴² Verbatim original: «DfD enables a lot of things but you need the BIM and the material passports to optimize the value and the uses of these materials. It is a way to add value but also to make more things possible. »

⁴³ Verbatim original: «We need to store knowledge about the materials because a lot of the problems we have now with reusing materials is that we don't have any documentation on what's in the material that we are reusing. So it's very difficult to get certified and actually get permission to use it in the building. If you want to reuse concrete in the building and you don't know what your concrete contains, then it is very difficult to get the permission to actually use it. So it would help a lot if you could just have a specific that says what's exactly in the material. »

Le complexe de logement n'est pas encore construit, mais un mock-up à l'échelle 1 : 1 a été réalisé (Figure 58). L'intérieur de cette maquette à taille réelle est un espace d'exposition où toutes les couches, matériaux et produits du bâtiment sont exposés et décrits. L'objectif est de démontrer à l'échelle 1 : 1 qu'il est possible de réaliser un bâtiment circulaire.



Figure 58 : Mock-up (Source : Circle House, images de Tom Jersø)

Le projet « Circle House » implique plus de 30 entreprises danoises dans l'ensemble du secteur de la construction : « *Nous concevons un bâtiment circulaire, nous avons donc besoin de rassembler tous les acteurs de la chaîne et du cycle de vie du bâtiment* ». ⁴⁴ L'interaction entre toutes ces entreprises a permis de trouver des solutions innovantes.

Afin d'arriver à cette collaboration, différents workshops ont été organisés : « *Nous avons divisé le bâtiment en différentes couches, puis nous les avons redessinées une par une* ». ⁴⁵ Chaque session concernait un aspect de la construction : structure, enveloppe, installations techniques, etc.

Un exemple de solution trouvée lors du workshop concernant la structure est l'utilisation d'un système d'assemblage mécanique basée sur les solutions déjà existantes de différents partenaires du projet : les éléments préfabriqués en béton de Spæncom, les joints mécaniques de Peikko et les raccords sont coulés avec du mortier de chaux de Kalk (Figure 59). « *La première étape consistait à vérifier la conception d'un système de bâtiment démontable et réutilisable. Il y a eu deux processus : la conception d'un projet et la conception d'un système de construction à un prix au mètre avec un budget très bas.* » ⁴⁶

⁴⁴ Verbatim original: « We are designing a circular building so we need to have all the different actors and stakeholders in the project to have the whole value chain of the project and the whole lifecycle of the building. »

⁴⁵ Verbatim original: « We divided the building in in different layers of the building and then we redesigned them. »

⁴⁶ Verbatim original: « The first step was checking to design a building system that could be disassembled and reused. There have been two processes: to design a project and then to design a building system to a very low budget. »

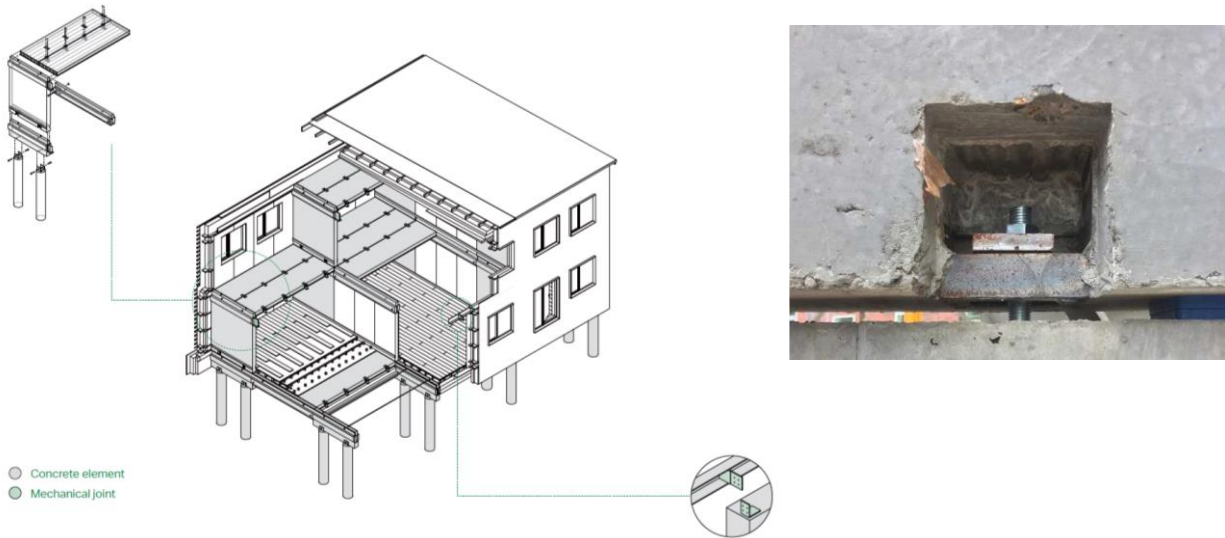


Figure 59 : Système constructif (Source : The Circle House)

Les architectes n'ont pas encore travaillé avec les outils de modélisation BIM, mais ils comptent le faire avant la construction du projet. « *Puisque nous savons que nous allons le faire, nous l'avons déjà en tête. Le DfD a toujours été présent dans nos pensées, mais nous devons le documenter dès à présent. A cet égard, nous avons préparé le projet pour qu'il soit prêt pour le BIM et sa documentation* ». ⁴⁷ GXN a l'intention d'introduire les informations concernant les matériaux sous forme de passeport matériaux mais les architectes ne se sont pas encore prononcés sur la forme que ceux-ci adopteraient. Ce qui est certain, c'est que ces passeports matériaux seront intégrés dans la maquette numérique BIM afin de former un tout. « *Lorsqu'on clique sur une colonne par exemple, une liste apparaîtra où figure ce que cet élément contient, quelle valeur il possède, qui le possède, etc.* » ⁴⁸

La maquette numérique BIM contiendra toutes les informations pour la maintenance du bâtiment, par exemple le type de peinture à utiliser ou comment démonter une cloison intérieure. Dans le mock-up, le fabricant de la structure en béton a intégré des capteurs sous forme de puces électroniques afin de pouvoir les scanner et obtenir directement les informations recherchées.

Après la construction du projet, la maquette numérique BIM sera remise au client mais la question se pose quant à l'actualisation du modèle : « *Notre challenge est de le mettre à jour au fur et à mesure du cycle de vie du bâtiment. Le modèle BIM doit représenter l'état actuel du bâtiment et non l'état du moment où il a été construit, car le bâtiment va évoluer au fil du temps. L'une de nos principales questions est de savoir comment et qui va le tenir à jour* ». ⁴⁹ Actuellement, Casper Østergaard Christensen suppose que ce sera le rôle du client, mais il n'exclut pas l'intervention d'une personne externe. « *Nous sommes au début*

⁴⁷ Verbatim original: « *Since we know we are going to do it, we have it always in the back of our head. DfD is all the way through the thoughts but we have to document them later. In that regard, we prepared it to be ready for BIM and its documentation.* »

⁴⁸ Verbatim original: « *When you click on a column, for example, there will be like a list where you can see what it contains and its value, who owns it, all of that.* »

⁴⁹ Verbatim original: « *We see a big challenge in keeping it up to date afterwards. It is representing the building how it is now and not how it was on the day it was built because it is going to change over the years. One of our key issues is how and who is going to keep it up to date.* »

d'une nouvelle ère avec l'arrivée de l'économie circulaire. Beaucoup de nouvelles entreprises vont voir le jour. Le rôle de 'gestionnaire de passeports' ou quelque chose comme cela en fait peut-être partie. Le client paierait alors un certain montant pour la mise à jour du modèle. »⁵⁰

Actuellement, GXN travaille sur un guide de construction circulaire qui décrit les étapes à suivre afin de construire un bâtiment circulaire. *« Nous avons dressé la liste de toutes les activités nécessaires à la planification et la construction d'un bâtiment, ainsi que les nouvelles choses à faire afin de le rendre circulaire et ce qu'il vaut mieux éviter. »⁵¹*

5.6.4 Intérêt de la démarche

Pour Casper Østergaard Christensen, aussi bien le BIM que le DfD ont quelque chose à apporter au projet, tant séparément que combiné. Pour lui, la combinaison des deux pratiques semble la plus porteuse dans des projets de grande envergure et qui nécessitent une certaine flexibilité dans le temps : *« Au plus un bâtiment est grand et sera amené à être modifié, au plus l'effet et la pertinence est grande ».*⁵²

« À long terme, nous devrions le faire pour tous les bâtiments, mais pour commencer, il est plus pertinent de le faire pour les projets qui vont beaucoup changer au fil du temps. Cela a beaucoup plus de sens, car on obtient assez vite un retour sur investissement contrairement à la planification de quelque chose qui aura lieu dans 50 ou 100 ans. »⁵³

Afin de rendre le processus plus simple et mieux intégré, Casper Østergaard Christensen aimerait disposer d'un outil qui permettrait d'intégrer le DfD le plus tôt possible dans le BIM. Il témoigne qu'actuellement, ce sont deux mondes entièrement différents.

De plus, il trouve que les logiciels de modélisation BIM ne sont pas très faciles à utiliser lorsqu'il s'agit de conception. Il aimerait pouvoir dessiner dans un logiciel et connecter son dessin à une base de données connectée aux matériaux réels.

⁵⁰ Verbatim original: *«We are at the beginning of a new era with circular economy. So there are going to be a lot of new businesses. Maybe "building passport manager", or something, will be a future business where the client pays a certain fee to keep the model updated. »*

⁵¹ Verbatim original: *«We have mapped out all the current activities you need to do to plan and build the building and what new stuff you need, to make it circular and what you need to take out. »*

⁵² Verbatim original: *«The more it is going to change and the bigger it is, the more effect and relevance. »*

⁵³ Verbatim original: *« In the long run we should do it on all the buildings, but just to get started it are projects where we know that they will change a lot over the years. Then it will make a lot of sense because you get the value quite early instead of planning for something that is 50 or 100 years old in the future. »*

5.7 Conclusion des entretiens

Les architectes que nous avons interrogés sont issus d'horizons et de pays différents : Belgique, France, Pays-Bas et Danemark. Or, tous les pays n'avancent pas au même rythme quant à l'adoption du BIM. En effet, au Pays-Bas et au Danemark, le BIM est majoritairement présent dans les agences depuis de nombreuses années. En revanche, ce n'est pas le cas ni en Belgique, ni en France. Malgré cela, les architectes belges et français que nous avons interrogés ont une grande expérience en BIM. Cette expérience découle de leur intérêt personnel envers le BIM, contrairement aux architectes issus des autres pays où cette pratique est très largement répandue.

Le point commun entre ces cinq architectes est l'intérêt personnel pour l'économie circulaire. En effet, aucun pays où exercent les architectes interviewés n'a mis en place une certaine forme de législation envers la pratique du réemploi. Tous ont l'impression d'aller à contre-courant des tendances actuelles du secteur de la construction. C'est donc également par intérêt personnel que ces architectes se sont lancés dans la combinaison des deux pratiques.

Parmi les projets analysés, nous observons trois temporalités de pratiques circulaires (Figure 60). La première est la déconstruction sélective de matériaux existants afin que ces matériaux puissent continuer leur cycle de vie dans le même bâtiment ou dans un autre. La deuxième est le réemploi de matériaux existants. Ces matériaux sont issus de la déconstruction sélective, soit du projet en question, soit d'un autre. La troisième est le Design for Deconstruction, où l'on réfléchit à la déconstruction future des matériaux mis en œuvre, que ce soit des matériaux neufs ou ayant eu une vie antérieure.

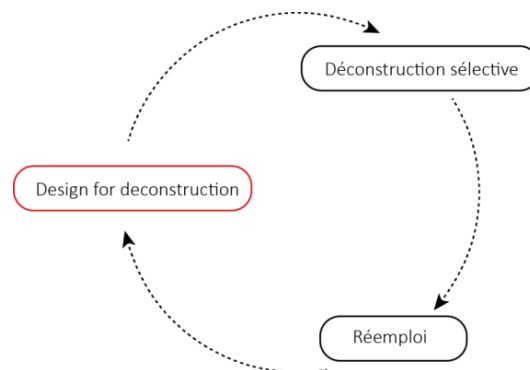


Figure 60 : Cycle Dfd-déconstruction sélective-réemploi (Source : Auteur, 2019)

Le Tableau 8 résume les temporalités appliquées dans les projets étudiés. Nous remarquons que la déconstruction sélective concerne uniquement les projets de rénovation. Ce qui est logique, car dans un projet neuf, il n'y a rien à déconstruire préalablement.

Dans les projets analysés, nous observons trois attitudes envers les matériaux de réemploi : réutilisation immédiate sous sa forme actuelle (châssis réutilisé tel quel dans le PIT lab), détournement de l'usage sans changement d'état de la matière (transformation d'anciennes portes en tant que cloisons et armoires dans l'hôtel de ville d'Eindhoven), recyclage (moquettes envoyées en recyclage chez Desso dans le projet Allera).

TABLEAU 8 : TEMPORALITES APPLIQUEES DANS LES PROJETS ETUDIES.

Projet	Type de projet	Déconstruction sélective	Réemploi	DfD
<i>Extension habitation</i>	Rénovation	*	*	Oui
<i>Alleray</i>	Rénovation	Oui	*	Oui
<i>Dethy</i>	Rénovation	Oui	Oui	Non
<i>Mairie d'Eindhoven</i>	Rénovation	Oui	Oui	Oui
<i>PIT lab</i>	Neuf	N.A.	Oui	Oui
<i>Circle House</i>	Neuf	N.A.	Oui	Oui

*question non abordée lors de l'entretien

Suite aux entretiens, nous identifions deux **avantages** majeurs de la maquette numérique BIM. Ces deux avantages comportent chacun des sous-avantages qui en découlent.

Lors d'une rénovation, le BIM aide à obtenir une meilleure connaissance du bâti. Grâce aux technologies actuelles, il est possible de relever très précisément tous les détails d'un bâtiment. Suite à ce relevé précis du bâti, il sera dès lors possible de pré-estimer les quantités à démonter. Autrement dit, une maquette numérique d'un bâtiment existant permet de réaliser un inventaire de pré-démolition de manière fidèle à l'existant. Cet inventaire pourra ensuite servir à anticiper et à organiser le transport, le stockage et la vente des matériaux qui seront déconstruits.

Nous avons vu dans le point 2.2 ainsi que dans les Résultats de l'enquête en ligne, que le manque d'information concernant les matériaux de réemploi est un des principaux freins. Disposer des informations techniques, de maintenance, de démontage et de recyclage, augmente le potentiel de circularité des matériaux, aussi bien dans des projets neufs que des projets de rénovation. Or, la maquette numérique BIM permet d'intégrer toutes les caractéristiques des matériaux dans la maquette numérique. Enfin, cette base de données va pouvoir être exploitée afin d'établir l'inventaire de pré-démolition et le processus de déconstruction. Les architectes que nous avons interrogés sont d'avis qu'un bâtiment possédant une maquette numérique contenant des informations de démontage, aura plus de valeur lors de la vente qu'un bâtiment qui n'en a pas.

Les architectes interrogés voient surtout un **intérêt** dans la combinaison des deux pratiques pour les projets d'une certaine envergure. Lionel Bousquet aimerait pourtant démontrer le contraire avec le projet Rénovation d'une maison individuelle sur base d'un scan 3D qui est un projet de rénovation d'habitation. Les architectes y voient également un grand intérêt pour des projets qui demandent beaucoup de flexibilité au cours du cycle de vie du bâtiment. A terme, ils aimeraient voir ces pratiques appliquées à tous les projets.

Aucun architecte que nous avons rencontré n'est satisfait des **logiciels de modélisation BIM** actuels. Ils aimeraient disposer d'un logiciel ultime afin de ne plus avoir de problèmes de compatibilité entre logiciels. De plus, peu de choses sont actuellement mises en place dans les logiciels concernant l'économie circulaire, surtout envers la déconstruction. Ils aimeraient pouvoir introduire le DfD le plus tôt possible dans le projet. Ils déplorent également le fait de ne pas avoir d'outil qui leur permette de planifier et visualiser facilement la déconstruction d'un bâtiment.

Une autre demande concerne l'association du dessin à la main avec une base de données contenant tous les matériaux disponibles.

Discussion

La distinction entre un projet de rénovation ou un projet neuf, la taille, l'affectation, le besoin de flexibilité, l'implantation en milieu urbain ou non, sont autant de facteurs à prendre en considération lors de la fin de vie du bâtiment. Par conséquent, les **objectifs de déconstruction** varient en fonction de chaque projet. Ils peuvent être la récupération et la valorisation d'un maximum de matériaux, la minimisation des coûts de démolition/déconstruction, la comparaison de différents scénarios de déconstruction, l'optimisation du transport et du stockage des matériaux extraits, etc. (Figure 61).

Actuellement, la déconstruction sélective est au moins aussi complexe que le processus de construction. Cette difficulté est due à un **manque de documentation et aux types d'assemblages** du bâtiment, ce qui entraîne de nombreuses incertitudes au cours de la déconstruction. Sans une automatisation de certains processus de déconstruction, les coûts de déconstruction sélective resteront trop élevés pour la plupart des projets.

Afin d'atteindre les objectifs de déconstruction variés, il faut planifier les activités de déconstruction avant leur exécution, ce qui nécessite un inventaire de pré-démolition. Le **processus BIM** associé à une maquette numérique **BIM « as-built »** contenant les passeports matériaux serait une aide précieuse afin de documenter la déconstruction future d'un bâtiment et donc de privilégier le réemploi de ses composants. Pour ce faire, il est nécessaire que le BIM « as-built » contienne ou propose les fonctions détaillées ci-dessous.

Le BIM « as-built » doit pouvoir **évaluer le potentiel de circularité des éléments**. Cependant, à l'heure actuelle, la manière d'évaluer le potentiel de circularité des éléments reste méconnue. Pour calculer le BCI (« Building Circularity Index » - chapitre 2.3.3), il faudrait évaluer le potentiel de circularité selon deux aspects : le pourcentage de matières premières vierges et/ou secondaires utilisées et le potentiel de démontabilité du matériau. En effet, un bâtiment entièrement circulaire serait composé de 100 % de matériaux réutilisés et d'un potentiel de réutilisation de 100 % en fin de vie.

Afin de mesurer le potentiel de circularité des éléments, il est essentiel de disposer des informations les concernant. Ces informations peuvent être contenues dans un **passeport matériau** regroupant toutes les informations utiles telles que la composition, les propriétés hygrothermiques, l'impact environnemental, la mise à jour, le renouvellement, le changement d'affectation, le potentiel de réemploi, le recyclage, l'incinération ou la mise en décharge. Il est primordial que ce passeport soit mis à jour tout au long du cycle de vie de l'élément en question. Le passeport matériau fait actuellement face à de nombreux défis comme la collecte, la vérification, l'encodage, le traitement et le maintien à jour des informations.

Suite à l'évaluation du potentiel de circularité des matériaux, le BIM « as-built » permettra ensuite d'établir automatiquement **l'inventaire de pré-démolition** qui sera utilisé pour **pré-estimer les quantités**. L'inventaire séparera les matériaux non-récupérables et/ou dangereux des matériaux adaptés au réemploi et/ou au recyclage.

L'estimation des quantités permet de **maximiser la récupération et la valorisation des matériaux** ainsi que de **calculer et optimiser les coûts** de déconstruction, de recyclage et éventuellement de mise en décharge. L'estimation des quantités permet également de **comparer différents scénarios de déconstruction**. Cette comparaison permet de se rendre compte si l'impact environnemental et le prix de la déconstruction sélective est supérieur ou non à l'impact d'un processus de démolition classique, et ainsi permet de guider la décision entre déconstruction ou démolition. De plus, le BIM « as-built », accompagné des passeports matériaux, servira à **simuler et optimiser le planning de déconstruction** ainsi que de gérer le **transport** et le **stockage** des matériaux démontés.

En dehors des solutions techniques qui peuvent être prises en charge par la maquette numérique BIM, le secteur de la construction a actuellement besoin de nouveaux modèles de collaboration qui prônent le partage, l'échange et la confiance entre les acteurs. Le processus BIM peut subvenir à ce besoin en servant de **support de communication et de collaboration commune** à tous les acteurs qui interviendront lors de la déconstruction et les autres phases de la filière du réemploi.

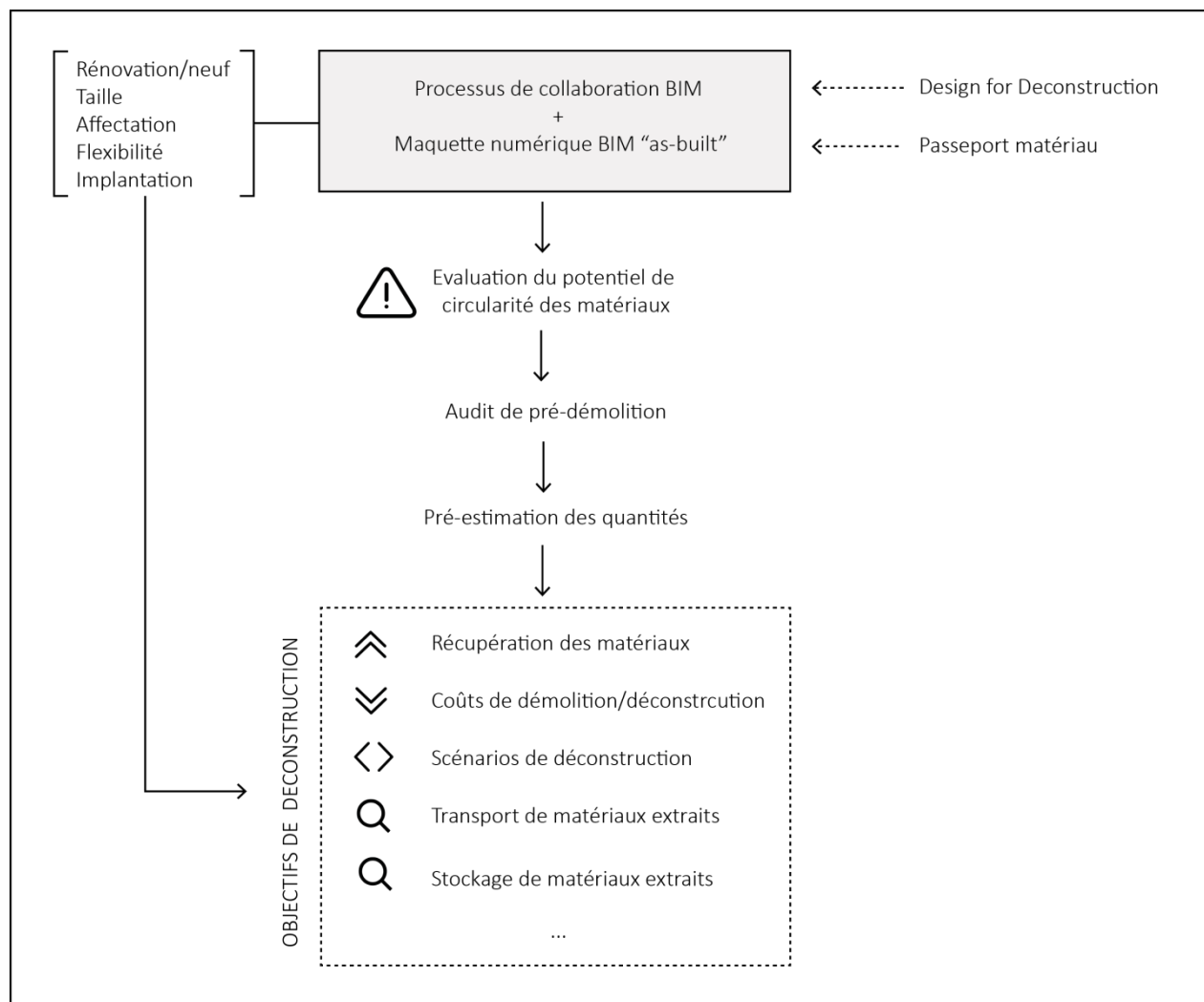


Figure 61: Le BIM comme outil d'aide à la décision entre démolition ou déconstruction (Source : Auteur, 2019)

D'après notre sondage, nous remarquons que peu de bureaux combinent le BIM et l'économie circulaire. Nous remarquons deux attitudes de la part des architectes envers la combinaison des deux pratiques. Une partie d'entre eux est convaincue de la nécessité de combiner le BIM et l'économie circulaire. Pour eux, il n'est plus envisageable d'exercer autrement. Or, tous les architectes n'ont pas cette motivation personnelle. La plupart des architectes attendent soit que des outils soient mis sur le marché, soit que ces pratiques deviennent obligatoires.

Nous observons que le BIM et l'économie circulaire sont **deux bouleversements** infligés aux architectes. Les architectes avec lesquels nous nous sommes entretenus qui combinent les deux pratiques avaient tous des connaissances BIM bien ancrées avant de s'intéresser au réemploi. Ils ont par conséquent intégré les pratiques de l'économie circulaire dans leur processus de travail habituel. Ils disent être à un stade expérimental où ils procèdent par méthode d'essai-erreur, car il n'existe pas encore de règles de bonnes pratiques ou réglementations.

En revanche, les bureaux intéressés par l'économie circulaire et qui n'ont pas de connaissances en BIM ne se montrent pas très ouverts à un changement de méthodologie. En effet, la combinaison du BIM et de l'économie circulaire est surtout freinée par un manque de connaissances et d'outils disponibles sur le marché. De plus, tous les bureaux ne sont pas intéressés par cette démarche ou ne savent pas comment s'y prendre.

Comme nous l'avons décrit au début de ce travail, nous distinguons deux types de réemploi : le réemploi de matériaux actuels et le réemploi futur des matériaux.

Aujourd'hui, les architectes qui tentent d'introduire des **matériaux de réemploi actuels** dans le BIM rencontrent des problèmes d'introduction des données. Les pistes trouvées actuellement sont la modélisation et l'introduction manuelle des données concernant les matériaux de réemploi dans le modèle BIM et/ou dans des fichiers connexes synchronisés. Les problèmes évoqués concernent surtout la perte de temps afin d'introduire toutes les informations et le temps passé à paramétrer les nomenclatures permettant d'extraire et trier les informations.

Les architectes voulant anticiper la **réutilisation future des matériaux** (Design for Deconstruction) évoquent surtout un manque d'outils afin de prévoir la déconstruction. Ces architectes estiment que le BIM et la déconstruction sont actuellement deux mondes différents et entièrement séparés. Ils aimeraient voir apparaître des outils simples et plus intuitifs qui puissent lier la conception et la déconstruction, et ce dès les premières phases du projet. Ils aimeraient disposer d'un outil dynamique qui évite de devoir encoder plusieurs fois la même information.

Nous remarquons que les bâtiments subissent généralement plusieurs **modifications** durant la phase d'exploitation, par exemple un changement d'affectation ou une mise aux normes environnementales ou légales. Bien que le BIM permette de recueillir toutes ces informations, l'actualisation du modèle établi lors de la construction semble **rarement mis-à-jour** durant le cycle de vie du bâtiment. Par conséquent, si les acteurs du projet ont la chance de disposer d'un modèle BIM lors de la déconstruction, il y a peu de chance que celui-ci reflète la situation au moment de la déconstruction.

La façon de **stocker les informations** des passeports matériaux dans le modèle « *as-built* » reste floue. Pour l'instant, aucun standard n'existe et aucun outil n'a été imaginé à ces fins. Les architectes ayant la volonté

d'intégrer les passeports matériaux dans un modèle « *as-built* » sont donc contraints de trouver des pistes alternatives : introduction des propriétés dans la GTB (Gestion Technique de Bâtiment), paramétrage IFC, etc. Ces solutions, trouvées par les architectes, sont longues et fastidieuses sans être rémunérées à leur juste valeur.

De plus, les architectes n'ont pas une formation d'informaticien et n'ont donc bien souvent pas les connaissances nécessaires afin de programmer les fonctions dont ils ont réellement besoin. Il y a donc une nécessité de créer un **nouveau métier** afin de répondre à cette demande.

Un autre nouveau métier pourrait voir le jour par le besoin de gestion du modèle « *as-built* » afin de le maintenir à jour tout au long du cycle de vie du bâtiment, jusqu'à la déconstruction. Suite à nos entretiens, la question concernant la responsabilité des informations après la livraison du bâtiment reste en effet bien souvent sans réponse. Certains affirment que ce sera le maître d'ouvrage qui s'occupera de la maquette numérique, d'autres proposent l'intervention d'une personne extérieure. Cette tâche nécessite des connaissances particulières. L'intervention d'un tiers pourrait donc être envisageable afin de soulager le client profane de cette tâche.

La combinaison du BIM et de la déconstruction aura donc une influence sur la création de nouveaux métiers. Tout comme l'émergence de l'économie circulaire (étudiée dans le point 2.4) et le BIM (étudiée dans le point 3.1.5).

Conclusion

De notre point de vue, Le BIM associé à l'économie circulaire sert à avoir une vision globale sur la totalité du cycle de vie d'un bâtiment. Pour nous, le BIM « as-built » est un moyen de documenter le bâtiment, d'en évaluer son potentiel de déconstruction et de planifier la déconstruction afin de favoriser le réemploi des matériaux en fin de vie. Il doit cependant rester à sa place d'outil et ne remplacera pas l'intelligence et la créativité humaine.

De plus, nous avons observé qu'il ne suffit pas de disposer de la maquette numérique pour de faire circuler les matériaux. En effet, même si nous disposons de toutes les informations nécessaires à la déconstruction et au réemploi des matériaux, le travail de documentation aura été futile s'il n'est pas possible de démonter le composant ou le matériau sans l'endommager. C'est pourquoi, il est essentiel d'agir à la source, c'est-à-dire concevoir des bâtiments pouvant être déconstruits en fin de vie afin d'éviter la production de déchets. Pour nous, concevoir un bâtiment afin qu'il puisse être démonté (Design for Deconstruction), est donc encore plus important que de disposer d'un modèle BIM « as-built » en fin de vie du bâtiment.

Nous pouvons en conclure qu'il y a encore un long chemin à parcourir avant que le BIM « as-built » puisse devenir une réelle aide à la décision entre démolition ou déconstruction. Beaucoup de recherches ont été faites sur le sujet mais il est maintenant temps de mettre cette théorie en pratique. Nous sommes convaincus de la pertinence de la démarche car elle permet de prendre en considération le monde que nous cèderons aux générations futures.

Lexique

BIM

Terme	Définition
APD	Avant-Projet Détaillé « Phase de projet (première étape de la phase de conception) au cours de laquelle l'équipe de conception établit, en collaboration avec les autres membres de l'équipe de projet, une proposition concernant la conception de l'ouvrage. Après approbation du maître d'ouvrage, cette dernière est ensuite parachevée lors de la phase de projet définitif. » (Euben et Boeykens, 2018, p19)
Attribut	« Un attribut ou propriété d'un objet est un aspect spécifique de l'état de cet objet. Cela peut concerner l'information géométrique mais aussi des sources plus abstraites d'information. Des exemples sont : longueur, largeur, hauteur, niveau, isolation acoustique, finition, réservations, équipements, qualité, surface brute, masse volumique, poids, code produit, fabricant, date de livraison, cycle d'entretien, etc. » (Rasking & Decroos, 2017, p92)
BCF	« Le <i>BIM Collaboration Format</i> ou BCF est une norme ouverte qui favorise la communication et la collaboration lors du processus de construction. Le BCF supporte le texte et les images pouvant être annexés à un modèle. Cela sert surtout à communiquer sur certains problèmes sans devoir pour cela charger ou examiner tout le modèle. » (Rasking & Decroos, 2017, p92)
BIM	« Le 'Building Information Modeling' ou BIM est le terme générique pour désigner l'utilisation de modèles tridimensionnels informés durant les phases de conception, d'exécution et d'exploitation du bâtiment. » (Rasking & Decroos, 2017, 94)
BIM Manager	« Les BIM managers sont les leaders du BIM dans une entreprise ou sur un projet particulier. Ce rôle requière une très grande expérience et la parfaite maîtrise des processus de construction virtuelle et de documentation. » (Source : http://www.objectif-bim.com/index.php/emploi-bim/le-bim-manager)
BREEAM	« BREEAM est la première méthode mondiale d'évaluation de la durabilité pour la planification de projets, d'infrastructures et de bâtiments. Elle reconnaît et reflète la valeur des actifs les plus performants tout au long du cycle de vie de l'environnement bâti, de la construction neuve à la rénovation, en passant par la mise en service. » (Source : https://www.breeam.com/)

BsDD	buildingSMART Data Dictionary
bSI – buildingSMART	« Organisation mondiale qui se consacre à l'amélioration du partage d'informations dans le secteur de la construction, par le développement de standards ouverts (tels que IFC, BCF, IDM, IFD et MVD). » (Euben et Boeykens, 2018, p14)
CAO	Computer Aided Design
CET	Corps d'Etat Technique
Closed BIM	« On parle aujourd'hui de moins en moins du <i>Closed BIM</i> et c'est principalement l' <i>Open BIM</i> qui est utilisé dans la pratique. Dans le <i>Closed BIM</i> , on collabore au sein d'un logiciel, ce qui fait que l'échange ne doit pas se faire par une conversion en IFC mais tout peut rester dans le même type de fichier. » (Rasking & Decroos, 2017, 94)
Cloud	« Le cloud computing permet d'utiliser une application depuis plusieurs ordinateurs connectés, partout dans le monde. Le serveur fournit la puissance nécessaire pour faire tourner le programme et votre ordinateur ou laptop ne sert plus que comme interface avec les applications. Vous n'avez plus besoin alors de puissance sur votre ordinateur, le serveur se charge de vous la fournir. » (Source : http://www.objectif-bim.com/index.php/technologie-bim/bim-in-the-cloud)
Cobie	« Le <i>Construction Operations Building Information Exchange</i> est un moyen de transmettre l'information dont les facility managers ont besoin durant le cycle de vie du bâtiment. L'information contenue dans un fichier COBie peut également être trouvée dans un modèle IFC. Un modèle IFC contient néanmoins plus d'information ; un fichier COBie est un filtre sur l'IFC. Techniquement, le COBie est généralement enregistré comme classeur Excel en annexe du modèle IFC correspondant. Il peut toutefois prendre d'autres formes. » (Rasking & Decroos, 2017, p94)
Composant	« Un composant contient l'une des parties constituantes d'un objet ou d'un élément. Si un objet est par exemple un mur, alors les différentes couches qui composent ce mur sont des composants. » (Rasking & Decroos, 2017,94)
DCE	Dossier de Consultation des Entreprises
Détection des clashes	« Une détection ou contrôle de clashes est effectuée pour comparer entre eux différents modèles ou modèles d'aspect. Par pression sur une touche, les différents problèmes potentiels sont répertoriés. Une détection de clashes entre deux modèles peut rapidement révéler des millions de problèmes. La manière dont le modèle est contrôlé doit donc être correctement programmée et interprétée. »

	(Rasking & Decroos, 2017, 94)
Digital twin	« Le digital twin est une représentation numérique complète d'un produit individuel. Il comprend les propriétés, l'état et les caractéristiques de comportement de l'objet réel à travers des modèles et des données. Le digital twin est un ensemble de modèles réalistes qui peuvent simuler son comportement réel dans l'environnement déployé. Le Digital Twin est développé parallèlement à son jumeau physique et reste son homologue virtuel tout au long du cycle de vie du produit. » (Haag et Anderl, 2018, p64)
DOE	Dossier des ouvrages exécutés
DPC	Dépôt du Permis de Construire
EXE	Phase d'exécution « Phase de projet qui succède à la phase de conception et au cours de laquelle l'équipe d'exécution assure l'exécution de l'ouvrage, en collaboration avec les autres membres de l'équipe de projet. Elle comprend la phase de préparation des travaux et la phase de construction. » (Euben et Boeykens, 2018, p19)
Format Natif	« Par opposition à un standard ouvert, il se peut que seul le format natif (et souvent la version) dans lequel le fichier a été créé puisse être lu par le logiciel. Actuellement, on choisit toujours plus fréquemment d'échanger l'information via des standards ouverts, en raison de leur flexibilité et de l'uniformité. » (Rasking & Decroos, 2017, p95)
Format ouvert	« Format de fichier basé sur un standard ouvert, dont les spécifications sont publiées et documentées, de sorte que tout fournisseur ou développeur peut en assurer la compatibilité avec son logiciel. Les formats IFC et BCF sont des exemples de formats ouverts pour le BIM. » (Euben et Boeykens, 2018, p16)
HQE	« HQE, c'est la certification Haute Qualité Environnementale d'origine française pour la construction ou l'exploitation des bâtiments et pour l'aménagement des territoires. HQE valorise les bonnes pratiques et la qualité durable des réalisations et propose un accompagnement expert tout au long du projet. » (Source : https://www.behqe.com/fr/landing)
IFC	« L'<i>Industry Foundation Classes</i> ou IFC est le standard ouvert ISO (l'ISO 16739) couramment employé pour l'échange de modèles entre les applications logiciels. L'IFC est pour l'essentiel un modèle de données qui peut être enregistré depuis différents formats et qui est donc un modèle intermédiaire entre deux logiciels. Il faut apporter beaucoup de soin à l'exportation et l'importation de celui-ci pour perdre aussi peu

	d'information que possible. L'IFC est géré par BuildingSMART. » (Rasking & Decroos, 201, p95)
Informations	« Données traitées qui sont placées dans un contexte, ce qui leur confère un sens et une structure, et les rend, de ce fait, exploitables. » (Euben et Boeykens, 2018, p17)
Interférence	« Collision physique d'éléments du projet. Par exemple, constitue une interférence une gaine de ventilation qui traverse un mur sans que la réservation nécessaire à son passage ait été prévue. » (Le-Moniteur, 2014)
LEED	« LEED, ou Leadership in Energy and Environmental Design, est le système d'évaluation des bâtiments écologiques le plus utilisé dans le monde. Disponible pour pratiquement tous les types de projets de construction, de projets communautaires et de projets domiciliaires, LEED fournit un cadre de travail pour créer des bâtiments écologiques sains, très efficaces et économiques. La certification LEED est un symbole mondialement reconnu de l'atteinte du développement durable. » (Source : https://new.usgbc.org/leed)
LoD	« Les <i>Levels of Development</i> sont utilisés pour indiquer la mesure dans laquelle le développement d'un modèle 3D inclut déjà de l'information définitive et fiable. Généralement, un objet dans un modèle peut avoir un LOD 100, 200, 300, 400 ou 500. Parfois, des niveaux complémentaires comme le LOD 350 sont ajoutés. Plus le LOD est haut, plus le modèle contient d'information et plus celle-ci est fiable. » (Rasking & Decroos, 2017, p95-96)
LOI	« Les <i>Levels of Information</i> indiquent la quantité d'information non-graphique déjà présente dans le modèle. En combinaison avec les <i>Levels of Detail</i> , on parle de <i>Levels of Definition</i> . » (Rasking & Decroos, 2017, p96)
Maquette numérique	« La maquette numérique est une représentation géométrique d'un objet ou ensemble d'objets (véhicule, bâtiment...), généralement en 3D, réalisée sur ordinateur de façon à l'analyser, le contrôler et en simuler certains comportements. » (Source : https://openbim.fr/openbim/#toggle-id-15)
Modèle « as-built »	« Modèle BIM qui reflète l'état de l'ouvrage tel que construit et qui offre dès lors une représentation complète et précise de la situation réelle. Les informations temporaires sont éliminées et tous les éléments comportent des informations vérifiées. Le niveau de détail souhaité pour le modèle as-built varie d'un projet à l'autre. Les plans as-built peuvent être extraits à partir de ce modèle. » (Euben et Boeykens, 2018, p13)
Niveau de Définition	« Le Niveau de Définition est la combinaison entre le Niveau de Détail et le

(LOD)	Niveau d'Information d'un modèle. Il indique grossièrement la quantité d'information graphique et non graphique qui est présente dans le modèle » (Rasking & Decroos, 2017, p96)
Niveau de Maturité	« Le niveau BIM ou niveau de maturité auquel un projet est réalisé indique la mesure dans laquelle on a utilisé le BIM sur tout le processus et dans toute la chaîne de production. Au niveau 0, le BIM n'est pas du tout utilisé, au niveau 3, on parle de iBIM. » (Rasking & Decroos, 2017, p96)
Nuage de Points	« Un nuage de points est une collection finie de coordonnées cartésiennes en 3D. Celles-ci sont introduites dans un contexte BIM en faisant numériser un espace par scanner laser à partir de plusieurs endroits. Le résultat est un modèle 3D complet de l'espace scanné avec lequel on peut immédiatement commencer à travailler. Un nuage de points peut aussi être utilisé en dehors du contexte BIM. » (Rasking & Decroos, 2017, p96)
Objet	« Les objets ou éléments d'un modèle BIM sont des blocs de construction virtuels avec lesquels on conçoit et modélise. Presque tout dans un modèle peut être appelé objet : un mur, une colonne, une chaise, une lampe, une brique, ... » (Rasking & Decroos, 2017, p96)
Open BIM	« Aujourd'hui, c'est le principal 'type' de BIM et parle encore à peine de <i>Closed BIM</i> . Avec l' <i>Open BIM</i> , les différents partenaires collaborent avec des modèles de référence qui sont échangés via un standard ouvert comme l'IFC. Chaque organisation travaille dans son propre logiciel mais convertit toujours ses modèles dans un standard ouvert pour échanger avec les autres organisations, quel que soit le logiciel utilisé. » (Rasking & Decroos, 2017, p97)
OPR	Opérations Préalables à la Réception
Plan d'exécution BIM	« Un plan d'action ou d'exécution BIM est une liste de conventions et d'accords concernant des choses pratiques entre différentes parties du processus de construction. Dans un plan d'action BIM, on trouve entre autres quel logiciel est utilisé, quand les modèles sont échangés, quel niveau de détail doit être atteint, etc. » (Rasking & Decroos, 2017, p97)
Processus BIM	« Ensemble d'activités liées à l'organisation de la collaboration au sein d'un projet par l'échange d'informations (numériques), mais aussi par le développement, la gestion et la livraison des modèles BIM. Il s'agit, en d'autres termes, de la partie du projet consacrée au BIM. » (Euben et Boeykens, 2018, p20)
Propriété	« Caractéristique d'un élément de construction. Les modèles BIM sont

	constitués d'éléments comprenant des propriétés représentées sous la forme d'attributs. ISO 6707-1 [11], 9.1.3 (ISO/DIS 1087, 3.1.12) : "Caractéristique ou qualité d'un objet." » (Euben et Boeykens, 2018, p21)
Protocole BIM	« Un protocole BIM est un document administratif où les moyens de communication, les droits de propriété et d'utilisation, les exigences du processus, les responsabilités et les besoins en information sont décrits. Cela concerne seulement l'essence pure de la collaboration. Les implications pratiques et techniques seront plutôt décrites dans le plan d'action BIM. » (Rasking & Decroos, 2017, p97)
Viewer	Outil utilisé pour visualiser et analyser une maquette numérique en dehors du logiciel d'origine. Il permet d'afficher la maquette globale ou d'isoler certains objets ou propriétés. (Source : https://www.autodesk.fr/campaigns/interoperability-glossary)

Economie circulaire

Terme	Définition
Cycle de vie	« Le cycle de vie d'un produit est composé des activités qui entrent en jeu dans la fabrication, l'utilisation, le transport et l'élimination de ce produit. Le cycle de vie est généralement illustré comme une série d'étapes, depuis la production (extraction et récolte des matières premières) jusqu'à l'évacuation finale (élimination ou valorisation), en passant par la fabrication, l'emballage, le transport, la consommation par les ménages et les industries et le recyclage ou élimination. » (Dictionnaire Environnement, 2019)
Déchet	« Du point de vue économique, un déchet est un bien qui n'a, à priori, aucune valeur marchande. » (Dictionnaire Environnement, 2019)
Déchet de démolition	« Les déchets de démolition sont l'ensemble des déchets banals, inertes et dangereux générés lors des phases de démolition d'ouvrages existants.» (Dictionnaire Environnement, 2019)
Déconstruction sélective	« Démontage sélectif d'installations techniques et de certains éléments d'ouvrage afin d'en augmenter le taux de valorisation. Les techniques de déconstruction des bâtiments peuvent en effet s'avérer plus performantes, plus simples et globalement moins coûteuses que la réalisation d'un tri complet après démolition traditionnelle dans un centre de tri adapté. Elles peuvent cependant n'être que partielles et compléter un tri hors chantier. » (Dictionnaire Environnement, 2019)

Design for Adaptability	« Un bâtiment est adaptable s'il peut être transformé de façon effective pour faire face à des changements de besoins et d'exigences. » (Galle & Hertoghs, 2015, p11)
Design for Change	« Le Design for Change est une stratégie de conception et de construction qui reconnaît le caractère sans cesse changeant de nos exigences et aspirations pour l'environnement bâti. Le but du design for change est de créer des bâtiments qui supportent le changement de façon plus effective. » (Galle & Hertoghs, 2015, p10)
Design for Deconstruction (DfD)	« La Design for Deconstruction (DfD) désigne la conception d'un bâtiment dans le but de gérer plus efficacement sa fin de vie utile. Le processus vise à faciliter le démontage des bâtiments afin de réduire la production de déchets et de maximiser la récupération des éléments et matériaux de construction secondaires de grande valeur en vue de leur réutilisation et de leur recyclage. » (Macozoma, 2001, p23)
Design for Disassembly	« Le design for disassembly est utilisé pour créer des éléments de construction qui peuvent être désassemblés et dont les composants peuvent être retirés aisément et sans dommage, en vue d'un réemploi, d'une réparation, d'un entretien, d'un remplacement ou d'une récupération de ces composants. » (Galle & Hertoghs, 2015, p16)(Voir aussi Elma Durmisevic, 2006)
Développement durable	« Le développement durable, est une notion récente qui désigne des actions visant à concilier trois mondes différents, celui de l'économie, celui de l'écologie et celui du social. » (Dictionnaire Environnement, 2019)
Energie renouvelable	« L'énergie renouvelable désigne les énergies les plus anciennement utilisées par l'humanité. Les énergies renouvelables sont essentiellement tirées des éléments (terre, eau, air et feu) et du soleil. On désigne aujourd'hui par énergies renouvelables un ensemble de filières diversifiées dont la mise en œuvre n'entraîne en aucune façon l'extinction de la ressource initiale » (Dictionnaire Environnement, 2019)
EPD	« Une Environmental Product Declaration (EPD) est un document vérifié et enregistré de manière indépendante qui communique des informations transparentes et comparables sur l'impact environnemental du cycle de vie des produits. En tant que déclaration volontaire de l'impact environnemental du cycle de vie, le fait d'avoir un EPD pour un produit n'implique pas que le produit déclaré est supérieur du point de vue environnemental aux autres produits.» (Source : https://www.environdec.com/What-is-an-EPD/)

LCA	« L'Analyse du Cycle de Vie (ACV), qui se dit Life Cycle Analysis (LCA) en anglais, est une évaluation des effets directs ou indirects d'un produit sur l'environnement, depuis l'extraction des matières premières qui entrent dans sa composition jusqu'à son élimination. » (Dictionnaire Environnement, 2019)
LCC	« La notion de Coût en Cycle de Vie (LCC) est apparue dans la lignée de l'Analyse en Cycle de Vie (ACV). En effet, tout comme l'ACV permet de comptabiliser l'ensemble des impacts environnementaux d'un produit ou d'un service sur l'intégralité de son cycle de vie, le coût en cycle de vie permet de comptabiliser l'ensemble des coûts d'un produit ou d'un service sur ce même cycle de vie, coûts qui sont souvent liés aux enjeux environnementaux. » (Source : http://ecoconception.oree.org/coutencycledevie.html)
Matière première secondaire	« Matière Première Secondaire (MPS) désigne un matériau issu du recyclage de déchets et pouvant être utilisés en substitution totale ou partielle de matière première vierge. Une Matière Première Secondaire (MPS) désigne une notion intermédiaire entre le déchet et le produit. En pratique, la matière première secondaire est un déchet, qui a été transformé et/ou combiné, en vue d'obtenir un produit utilisable dans les procédés de fabrication en remplacement de la matière première initiale. » (Dictionnaire Environnement, 2019)
Matière première vierge	« Ensemble des matériaux, directement extraits du milieu naturel, qui permettront par une succession de transformations et de combinaisons d'obtenir des produits finis et consommables. Exemples : sable pour la fabrication du verre, bois pour le chauffage, etc. » (Dictionnaire Environnement, 2019)
Recyclage	« Le recyclage implique une transformation profonde de la matière. Les opérations de recyclage reposent généralement sur une opération de broyage qui ramène les composants à l'état de matière première : le bois massif est transformé en copeaux, le béton en granulats, les plastiques en granulés, la plaque de plâtre en poudre, le verre en silice, ... Ces matières premières peuvent ensuite servir à la production de nouveaux éléments. » (Ghyoot et al., 2018, p8)
Réemploi	« Le réemploi désigne le fait de récupérer des éléments constructifs lors de travaux de transformation d'un bâtiment, et à plus forte raison, sa démolition, libèrent les constituants qui composaient l'ensemble. Dans bien des cas, on y retrouve des éléments de matériaux qui sont toujours en bon état et qui peuvent servir à d'autres applications. Le réemploi se distingue du recyclage. [...] Le réemploi tend à conserver l'intégralité formelle et fonctionnelle des composants qu'il manipule, même si une bonne quantité d'opérations restent souvent nécessaires pour assurer une réutilisation

	effective : nettoyage, découpe, décapage, mise à dimensions, etc.» (Ghyoot et al., 2018, p8)
Upcycling	« Le détournement, parfois appelé upcycling, implique d’imaginer de nouveaux usages et de nouveaux champs d’application. » (Ghyoot et al., 2018, p8)
Valorisation	« Valorisation est un terme générique qui recouvre le recyclage matière et organique, la valorisation énergétique des déchets, ainsi que le réemploi, la réutilisation et la régénération. » (Dictionnaire Environnement, 2019)

Table des illustrations

Figure 1: De l'économie linéaire à circulaire (source : Vlaanderen Circulair).....	11
Figure 2: Evolution du processus de construction vers le BIM (Source: Biblus).....	13
Figure 3: Illustration du besoin de main d'œuvre supplémentaire que nécessite la déconstruction sélective	17
Figure 4: Economie circulaire et ses sous-section (Basé sur la catégorisation de Romnée & Vrijders, 2017)	18
Figure 5: La réutilisation sous toutes ses formes (Source: inspiré du guide pratique et réemploi, 2013) ...	20
Figure 6: Bardage en palplanches de bois dur scié (Source: Mecanoo Architecten)	22
Figure 7: Du « 3R » au « 4R » (Source : traduit de l'original de Xu & Gu, 2015)	24
Figure 8: Changement de paradigme eco-efficacité vs. eco-efficience (Source: Braungart & Mc Donough, 2013, p48).....	24
Figure 9 : Modèle Turntoo (Source : traduction de l'original de Thomas Rau)	25
Figure 10 : Comparaison du coût financier et environnemental d'un plancher traditionnel.....	27
Figure 11: Frank Duffy – Shearing layers (Source : Brand, 1994)	29
Figure 12 : Diagramme de Stewart Brand (Source : Brand, 1994)	29
Figure 13 : Différents principes de conception circulaire (Selon l'original de Aguiar, Vonk, & Kamp, 2019)	30
Figure 14 : Coût d'une habitation après 50 ans (Source : traduit de Durmisevic, 2006).....	31
Figure 15 : Building Circularity Index (Source : inspiré de l'original d'Alba Concepts)	32
Figure 16: Tila housing (Source: Talli Architecture & Design)	33
Figure 17 : The circular economy (Source : 3XN selon l'original de la fondation Ellen MacArthur)	34
Figure 18: Reconfigurations des métiers (Source : Auteur, 2019)	39
Figure 19 : Niveaux de maturité BIM (Source : BEW et Richards, 2008)	42
Figure 20 : Les LOD illustrés à l'aide d'une chaise (Source : practicalBIM, Anthony McPhee).....	43
Figure 21 : Relation entre la modélisation paramétrique et le processus BIM	49
Figure 22 : Courbe Mac Leamy (Source : traduit du dessin original de HOK, 2008)	50
Figure 23 : Adoption CAD par rapport BIM (Source : Leeuwis et al., 2012)	56
Figure 24 : Evolution du BIM (haut) versus l'évolution du développement durable (bas) (Source : Dautremont et al., 2019)	57
Figure 25: Goal tree (Source : Auteur, 2019)	59
Figure 26 : Développement des maquettes de la conception à la réalisation (Source : Aguiar et al., 2019)	60
Figure 27: Phases du LCA (Source : basé sur l'original de l'ISO 14040).....	65
Figure 28 : Catégorisation des bureaux ayant participé au sondage	70
Figure 29 : Localisation des bureaux sondés.....	70
Figure 30: Taille des bureaux sondés.....	Error! Bookmark not defined.
Figure 31 : Taille et localisation des bureaux	71
Figure 32 : Donneurs d'ordre des projets en fonction de la taille du bureau	71
Figure 33 : Grandeur des projets en fonction de la taille du bureau	71
Figure 34 : Connaissance et application des principes de l'économie circulaire en fonction de la taille du bureau	72

Figure 35 : importance de la flexibilité des strates de construction	72
Figure 36 : Nombre de projets dans lesquels les bureaux d'architecture ont appliqué les principes de DfD	73
Figure 37 : Raisons pour laquelle les bureaux n'utilisent pas de matériaux de réemploi	73
Figure 38 : Probabilité d'utilisation de matériaux de réemploi s'il y avait plus d'incitations ou d'outils mis en place	74
Figure 39 : Provenance des matériaux de réemploi en lien avec la taille des projets.....	74
Figure 40 : Connaissances BIM en fonction de la taille du bureau d'architecture	78
Figure 41 : Connaissances BIM en fonction de la localisation des bureaux	78
Figure 42 : Nécessité d'utiliser le BIM par rapport à la taille du bureau d'architecture	79
Figure 43 : Acquisition des connaissances BIM par les collaborateurs	79
Figure 44 : Moment/étape du processus que les architectes trouvent le plus opportun pour l'utilisation du BIM	80
Figure 45 : Moyens financiers dédié au matériel informatique en fonction de la taille du bureau	80
Figure 46 : Avantages et inconvénients du BIM.....	81
Figure 47 : Gain ou perte de grâce/à cause au BIM temps par rapport à un processus	81
Figure 48 : Réduction du coût global du projet grâce au BIM par rapport à un processus.....	82
Figure 49 : Disposition au partage d'informations sur les projets avec des partenaires de projet	82
Figure 50 : Sauvegarde de la maquette numérique une fois le chantier finalisé	83
Figure 51: Calpinage de la façade (Source: Charlotte Dautremont)	90
Figure 52 : Axonométrie du projet Alleray (Source : Studios Architecture)	94
Figure 53: RDC pour le stockage des matériaux démontés (Source: BxIMrs)	98
Figure 54 : Scan 3D de la situation existante du projet DETHY (Source : BxIMrs)	99
Figure 55 : Environnement de travail adaptable (Source : Door Architecten)	102
Figure 56 : Intérieur du « PIT lab » (Source : Door Architecten)	104
Figure 57 : Coupe du complexe de logements (Source : Circle House).....	107
Figure 58 : Mock-up (Source : Circle House, images de Tom Jersø)	108
Figure 59 : Système constructif (Source : The Circle House)	109
Figure 60 : Cycle Dfd-déconstruction sélective-réemploi (Source : Auteur, 2019)	111
Figure 61: Le BIM comme outil d'aide à la décision entre démolition ou déconstruction (Source : Auteur, 2019).....	114

Liste des tableaux

Tableau 1: Comparaison des plateformes de revente de matériaux en ligne (Source : Auteur, 2019).....	21
Tableau 2: Potentiel de recyclage des matériaux de construction (source : Romnée & Vrijders, 2017)	23
Tableau 3 : Les niveaux de développement (LOD) selon la convention américaine (aia g202-2013) (Source : De Maestri, 2017, p47-48).....	44
Tableau 4 : Modélisation par catégorie sous forme de tableaux croisés (Source : LEEUWIS, KOUTAMANIS, & PRINS, 2012).....	55
Tableau 5 : Approche proposée pour le paramétrage de l'information environnementale sur les objets BIM. (Source : traduit de Durão et al., 2019)	66
Tableau 6 : La capacité des softwares BIM à soutenir la prévision et la gestion des déchets de construction (Source : Bilal et al., 2016)	67
Tableau 7: Description de l'échantillon.....	87
Tableau 8 : Temporalités appliquées dans les projets étudiés.	112

Bibliographie

Livres

- (Brand, 1994) BRAND, STEWART, *How buildings Learn. What Happens After They're Built*. New York: Viking Press, 1994, 256 pages.
- (Braungart & Mc Donough, 2002) BRAUNGART, MICHAEL, MC DONOUGH, WILLIAM, *Cradle to Cradle. Remaking the Way We Make Things –en langue originale-, (2002)*, New York: North Point Press, *Cradle to Cradle. Créer et recycler à l'infini – en langue française-*, Paris : Editions Alternatives, 2011, 240 pages.
- (Braungart & Mc Donough, 2013) BRAUNGART, MICHAEL, MC DONOUGH, WILLIAM, *The Upcycle. Beyond sustainability – Designing for abundance –en langue originale-, (2013)*, New York: North Point Press, *L'Upcycle. Au-delà de la durabilité – Concevoir pour l'abondance – en langue française-*, Paris : Editions Alternatives, 2016, 256 pages.
- (De Maestri, 2017) DE MAESTRI, ANNALISA, *Premiers pas en BIM. L'essentiel en 100 pages*, Paris : Eyrolles, 2017, 95 pages.
- (Durmisevic, 2006) DURMISEVIC, ELMA, *Transformable Building Structures. Design for disassembly as a way to introduce sustainable engineering to building design & construction*. Delft: TU Delft, 2006, 305 pages.
- (Gorgolewski, 2017) GORGOLEWSKI, MARK, *Resource Salvation: The Architecture of Reuse*, Hoboken: Wiley- Blackwell, 2017, 296 pages.
- (Guhyoot et al, 2018) GHYOOT, MICHAEL, DEVLIEGER, LIONEL, BILLIET, LIONEL, WARNIER, ANDRE, *Déconstruction et réemploi. Comment faire circuler les éléments de construction*. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 2018, 232 pages.
- (Guldager Jensen & Sommer, 2016) GULDAGER JENSEN, KASPER, SOMMER, JOHN, *Building a Circular Future*, Copenhagen: The Danish Architectural Press, 2016, 284 pages.
- (GXN, 2018) GXN, *Circle House. Denmark's first circular housing project*, KLS PurePrint, 2018, 126 pages.
- (Hansen et al., 2012) HANSEN, KATJA, BRAUNGART, MICHAEL, MULHALL, DOUGLAS, *Resource Re-Pletion. Role of Buildings. Introducing Nutrient Certificates A.K.A Materials Passports As A Counterpart To Emissions Trading Schemes*, in: MEYERS, ROBER, A., *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, New York: Springer, 2012, 12555 pages.
- (Lallemant & Gronier, 2015) LALLEMAND, CARINE, GRONIER, GUILLAUME, *Méthodes de design UX. 30 méthodes fondamentales pour concevoir et évaluer les systèmes interactifs*, Paris : Eyrolles, 2015, 488 pages.
- (Pramod Reddy, 2012) PARAMOD REDDY K., *BIM for Building Owners and Developers. Making a Business Case for Using BIM on Projects*, Hoboken: John Wiley & Sons, 2012, 242 pages.

- (Rasking & Decroos, 2017) RASKING, LENNERT, DECROOS, BART, *BIMtonic : Une introduction au BIM*, Hasselt : Palindroom, 2017, 208 pages.
- (Rau & Oberuber, 2016) RAU, THOMAS, OBERHUBER, SABINE, *Material Matters. Het alternatief voor onze roofofbouwmaatschappij*, Haarlem : Bertram + de Leeuw , 2016, 224 pages.
- (Servigne & Stevens, 2015) SERVIGNE, P., STEVENS, R., *Comment tout peut s'effondrer. Petit manuel de collapsologie à l'usage des générations présentes*, Paris : Seuil Collection Anthropocène, 2015, 296 pages.

Articles

- (Aguiar et al., 2019) AGUIAR, A., VONK, R., KAMP, F., « BIM and Circular Design », *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2019, 9 pages,[en ligne], consulté le 8 avril 2019, Disponible sur : <doi :10.1088/1755-1315/225/1/012068>
- (Akinade et al., 2017) AKINADE, OLUGBENGA O., « BIM-based deconstruction tool: Towards essential functionalities », in *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2017, Vol. 6, pp260–271.
- (Ayres, 1995) AYRES, ROBERT U., « Life cycle analysis : A critique », In : *Resources, Conservation and Recycling*, 1995, vol. 14, n°3-4, pp. 199-223.
- (Beaud, 1996) BEAUD, STEPHANE, *L'usage de l'entretien en sciences sociales. Plaidoyer pour l'entretien ethnographique*. In : *Politix. Revue des sciences sociales du politique*. Presses de Sciences Po, 1996, 35, pp. 226-257
- (Bilal et al., 2016) BILAL, MUHAMMAD et al., « Analysis of critical features and evaluation of BIM software: towards a plug-in for construction waste minimization using big data », In: *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 2016, 6:4, pp211-228.
- (Brinkmann, 2014) BRINKMANN, Svend, *Interview*. In: TEO, THOMAS, *Encyclopedia of Critical Psychology*. New York : Springer, 2014, pp. 1008-1010.
- (Curtis & Lehner, 2019) CURTIS, STEVEN KANE, LEHNER, MATTHIAS, «Defining the Sharing Economy for Sustainability », In: *The International Institute for Industrial Environmental Economics*, 22 janvier 2019.
- (Dautremont et al., 2018) DAUTREMONT, CHARLOTTE, DAGNELIE, CHARLELIE, JANCART, SYLVIE, *Le BIM 6D comme levier pour une architecture circulaire*. In : LEDUC, THOMAS, MIGUET, FRANCIS, *Scan'18*, 8^{ème} édition. Nantes : EDP Sciences, octobre 2018, pp1-9.
- (Dautremont et al., 2019) DAUTREMONT, CHARLOTTE, JANCART, SYLVIE, DAGNELIE, CHARLELIE, STALS, ADELINE, « Parametric design and BIM, systemic tools for circular architecture », In: *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2019, 9 pages
- (Delcourt et al., 2018) DELCOURT, E., ROMNEE, A., LAHAYE, J-P., « L'économie circulaire dans le

- secteur de la construction », In : *Revue Scientifique des Ingénieurs Industriels*, 2018, n°32, 15 pages.
- (Dorsthorst & Kowalczyk, 2002) DORSTHORST, BART, KOWALCZYK, T., 2002. *Design for recycling. Design for deconstruction and materials reuse*. In: CHINI, ABDOL R., SCHULTMANN, FRANK, *Design for Deconstruction and Material Reuse. CIB Publication 272, Proceedings of the CIB Task Group 39 –Deconstruction Meeting*, Karlsruhe. 9 avril 2002, 244 pages, pp. 70–80.
- (Durão et al., 2019) DURAO, V. Et al., «Integration of environmental life cycle information in BIM objects according with the level of development », In : *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2019, 9 pages
- (Durmisevic et al., 2017) DURMISEVIC, ELMA, BEURSKENS, PIETER, et al., « Systemic view on reuse potential of building elements, components and systems – comprehensive framework for assessing reuse potential of building elements » , *TU Delft*, 21 juin 2017, 6 pages, [en ligne], consulté le 3 janvier 2018, Disponible sur : <uuid :ae80ac73-b8de-4040-94b9-ca555d89e559>
- (Haag et Anderl, 2018) HAAG, SEBASTIAN, ANDERL, REINER, « Digital twin – Proof of concept », In: *Manufacturing Letters*, 2018, vol.15, pp. 64-66.
- (Hichri et al., 2013) HICHRI, N., STEFANI, C, DE LUCA, L., VERON, P., « Review Of The « As-Built BIM Approaches», In : *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-5/W1, février 2013.
- (Honic et al., 2019) HONIC, M., KOVACIC, I., RECHBERGER, H., « Concept for a BIM-based Material Passport for buildings», In: *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2019, 9 pages.
- (Krämer & Besenyoi, 2018) KRÄMER, MARKUS, BESENYOI, ZSUZSA, « Towards Digitalization of Building Operations with BIM », In: *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2018
- (Leeuwis et al., 2012) LEEUWIS, BERT, « BIM at small architectural firms », *Delft University of Technology*, 2012, 9 pages, [en ligne], Consulté le 8 avril 2019, Disponible sur : <uuid%3A1c2cae91-996f-4001-bc8e-13e16ad4340f>
- (Lu et al., 2014) LU, WEISHENG et al., « Demystifying the time-effort distribution curves in construction projects: a BIM and non-BIM comparison », In: *ASCE Construction Research Congress*, 2014, pp329-338.
- (Luscuere, 2016) LUSCUERE, LARS, « Materials Passports: Providing Insights in the Circularity of Materials, Products and Systems », *BAMB*, 2016, [en ligne], consulté le 4 janvier 2018, Disponible sur : <<http://www.bamb2020.eu/wp-content/uploads/2016/11/lars-sustainable-innovation-paper.pdf>>
- (Marin & Segura, 2014) MARIN, PHILIPPE, SEGURA, JOSE A. C., « Outils, méthodes et acteurs : analyse des limites à l'utilisation de la maquette numérique », *ENSA Lyon*, juin 2014, 10 pages, [en ligne], consulté le 8 avril 2019, Disponible sur : <https://www.researchgate.net/publication/261862319_Outils_methodes_et_acteurs_analyse_des_limites_a_l'utilisation_de_la_maquette_numerique>

- ique>
- (Martinez, 2013) MARTINEZ, E. NUNEZ. Y, SOBABERAS, E., «End of life of buildings: three alternatives, two scenarios, a case study », In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18, 5, 2013.
- (Nordby et al., 2008) NORDBY, ANNE SIGRID, BERGE, BJORN, HAKSONEN, FINN, HESTNES, ANNE GRETE, « Salvageability. Implications for architecture », in *Nordic Journal of Architectural Research*, 2008, Vol. 20, n°3, 14 pages.
- (Ruskin, 1849) RUSKIN, JOHN, *The Lamp of Memory*, in: RUSKIN, JOHN, *The Seven Lamps of Architecture*. London: Smith, Elder, and Co.,1849, pp. 162-182
- (Scaillerez & Tremblay, 2016) Scaillerez, ARNAUD, Tremblay, DIANE-GABRIELLE, « Les espaces de coworking: Les avantages du partage » in: *Gestion*. 2016, v. 41, n°2, pp90-92
- (Schultmann et Rentz, 2002) SCHULTMANN, FRANK, RENTZ, OTTO, «Resource-Constraint Project Scheduling For Deconstruction Projects », In: CHINI, ABDOL R., SCHULTMANN, FRANK, *Design for Deconstruction an Material Reuse. CIB Publication 272, Proceedings of the CIB Task Group 39 –Deconstruction Meeting*, Karlsruhe. 9 avril 2002, 244 pages, pp. 47-61.
- (Silva, 2011) SILVA, VICTOR, « BIM The summary of a long history », juillet 2011, [en ligne], consulté le 2 mars 2019, Disponible sur: <<https://www.scribd.com/doc/76835106/BIM-The-Summary-of-a-Long-History>>
- (Xu & Gu, 2015) XU, JIANG, GU, PING, « Five Principles of Waste Product Redesign under the Upcycling Concept », In: *International Forum on Energy, Environment Science and Materials*, 2015, 6 pages.

Conférences

- (De Smedt, 2018) DE SMEDT, RUDY, « BIM = Lean 2.0 », in : *Seminaire Bâtiment Durable, BIM : Impact sur le bâtiment durable*, Bruxelles : Bruxelles environnement, 15 juin 2018.
- (Haenen, 2018) HAENEN, JOHN, « Interface, There has to be a better way », in: *Masterclass circulair bouwen*. Anvers : Kamp C, 28 juin 2018.
- (Ilonen, 2017) ILONEN, PIA, « Cycles in Architecture”, in: Tada Week. *Architecture and cities in transition*, Tampere: Tampere Design and Architecture Week TADA, 31 août 2017.
- (Troost, 2018) TROOST, JEROEN, « Voorbeeldprojecten. Inspiratie ‘t Centrum », in: *Masterclass circulair bouwen*. Anvers : Kamp C, 28 juin 2018.
- (Zignale, 2018) ZIGNALE, DANIEL, « BIM et Facility Management », in : *Seminaire Bâtiment Durable, BIM : Impact sur le bâtiment durable*, Bruxelles : Bruxelles environnement, 15 juin 2018.

Webographie

Rapports et publications

- (Boutemadja, 2016) BOUTEMADJA, ABDELKADER, « Le BIM, un enjeu majeur pour les architectes », *l'Ordre des Architectes | Conseil francophone et germanophone*, juin 2016, 20 pages, [en ligne], Consulté le 8 avril 2019, Disponible sur : < https://www.ordredesarchitectes.be/files/4514/6710/4836/OA_B2B_Borchure_BIM_web.pdf>
- (Denis, 2015) DENIS, FRANCOIS, « Building Information Modelling. Belgian Guide for the construction Industry », *ADEB-VBA*, octobre 2015, 56 pages, [en ligne], Consulté le 8 avril 2019, Disponible sur : < <http://adeb-vba.be/the-guide-to-bim.pdf>>
- (Eastman et al., 1974) EASTMAN, CHARLES et al., « An Outline of the Building Description System. Research Report no. 50 », *Carnegie-Mellon Univ., Pittsburgh, Pa. Inst. of Physical Planning*, 1974, 23 pages, [en ligne], consulté le 2 mars 2019, Disponible sur: <<https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED113833.pdf>>
- (Ellen MacArthur Foundation & Granta Design, 2015) ELLEN MACARTHUR FOUNDATION & GRANTA DESIGN, « Circularity Indicators. An Approach To Measuring Circularity. Project Overview », mai 2015, 12 pages, [en ligne], Consulté le 8 avril 2019, Disponible sur: < https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/insight/Circularity-Indicators_Project-Overview_May2015.pdf>
- (Ellen MacArthur Foundation, 2013) ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, « Towards the Circular Economy. Economic and business rationale for an accelerated transition », 2013, [en ligne], Consulté le 11 janvier 2018, Disponible sur: < <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>>
- (Ellen MacArthur Foundation, 2016) ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, « Circularity in the Built Environment: Case Studies a Compilation of Case Studies from the Ce100 », 2016, 72 pages, [en ligne], Consulté le 16 avril 2019, Disponible sur: < <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Built-Env-Co.Project.pdf>>
- (Euben et Boeykens, 2018) EUBEN, C., BOEYKENS, S., « Protocole BIM belge. Protocole de référence national pour les bâtiments », *Document élaboré à la demande du Comité technique BIM & ICT, en collaboration avec le Cluster BIM (avec le soutien de VLAIO)*, 2018, 79 pages. [en ligne], Consulté le 17 avril 2019, Disponible sur: <https://www.bimportal.be/wp-content/uploads/PROTOCOLE_BIM_BELGE_FR_v1802.pdf>
- (Galle & Hertoghs, 2015) GALLE, WALDO, HERTOOGHS, PIETER, « Een gemeenschappelijke taal », glossaire établi dans le cadre du projet de recherche *Veranderingsgericht bouwen : ontwikkeling van een evaluatie- en transitiekader*. Malines: OVAM, 2015, 24 pages, [en ligne], Consulté le 17 avril 2019, Disponible sur:

- <https://www.ovam.be/sites/default/files/atoms/files/2015_Rapport-Bouw-Een-gemeenschappelijke%20taal_maart15.pdf>
- (Le-Moniteur, 2014) LE MONITEUR, « Cahier pratique des travaux publics du bâtiment. BIM », *BIM France*, 21 mars 2014, [en ligne], Consulté le 8 avril 2019, Disponible sur: < <http://www.bimfrance.net/wp-content/uploads/2014/05/LE-MONITEUR-CAHIER-PRATIQUE-BIM-140321.pdf>>
- (Macozoma, 2001) MARCOZOMA, DENNIS S., « Building Construction. Information Report », CIB/CSIR, décembre 2001, 79 pages, [en ligne], Consulté le 8 avril 2019, Disponible sur: < <http://site.cibworld.nl/dl/publications/Pub278/05Deconstruction.pdf>>
- (Policy Ordinance Markets & CCLBA, 2014) POLICY ORDINANCE MARKETS & CCLBA, «Cook County. Demolition Debris Diversion Ordinance », 30 janvier 2014, [en ligne], Consulté le 8 avril 2019, Disponible sur: < <http://www.cookcountylandbank.org/wp-content/uploads/2014/09/CCDDD-Presentation-for-CCLBA-January-30-2014.pdf>>
- (Romnée & Vrijders, 2017) ROMNEE, AMBROISE, VRIJERS, JEROEN, «Innovation Paper. Construire circulaire. Vers une économie circulaire dans la construction », *CSTC, Confédération Construction Bruxelles-Capitale, Innovaris*, février 2017, 125 pages, [en ligne], Consulté le 8 avril 2019, Disponible sur: < https://www.cstc.be/homepage/download.cfm?dtype=services&doc=BuildingCircular_fr.pdf&lang=fr>
- (Rosenberg & Guldager Jensen, 2012) ROSENBERG, JANNIE, GULDLAGER JENSEN, KASPER, « Material World. From materials to new architecture », Copenhagen: Danish Architecture Center, 2012, 223 pages. [en ligne], Consulté le 27 avril 2019, Disponible sur: <<https://issuu.com/3xnarchitects/docs/materialworld>>
- (Verberne, 2016) VERBERNE, JEROEN, « Building circularity indicators. An approach for measuring circularity of a building », *Eindhoven University of Technology*, 2016, 165 pages, [en ligne], Consulté le 8 avril 2019, Disponible sur: <<https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/46934924/846733-1.pdf>>
- Etudes
- (CERAA & ROTOR, 2012) CERAA, ROTOR, « Etude sur l'analyse du gisement, des flux et des pratiques de prévention et de gestion des déchets de construction et démolition en rbc », *Étude réalisée par le Ceraa asbl et Rotor asbl pour le compte de Bruxelles Environnement*, mai 2012, 207 pages, [en ligne], consulté le 16 mars 2019, Disponible sur: <https://environnement.brussels/sites/default/files/user_files/stud_2012_gisementdcd.pdf>
- (Commission Européenne, 2018) EUROPEAN COMMISSION. « Waste statistics », *Commission Européenne*, novembre 2018, [en ligne], consulté le 16 mars 2019, Disponible sur : < https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics#Total_waste_generation>

- (Cordis, 2017) EUROPEAN COMMISSION, « Towards a circular economy: Eliminate waste through an open platform that facilitates material passports », *CORDIS EU research result*, 4 septembre 2017, [en ligne], consulté le 2 avril 2019, Disponible sur: < <https://cordis.europa.eu/project/rcn/211978/factsheet/en> >
- (Debacker et al., 2015) DEBACKER, WIM, GALLE, WALDO, VANDENBROUCKE, MIEKE, et al., « Veranderingsgericht bouwen: ontwikkeling van een beleids- en transitiekader », *Étude réalisée par VITO, VUB et KU Leuven pour le compte de l'OVAM*, janvier 2015, 247 pages, [en ligne], consulté le 16 mars 2019, Disponible sur: <[https://www.ovam.be/sites/default/files/atoms/files/TWOL%20Dynamisch%20Bouwen%20EINDRAPPORT finale%20versie OVAM1 LR.pdf](https://www.ovam.be/sites/default/files/atoms/files/TWOL%20Dynamisch%20Bouwen%20EINDRAPPORT%20finale%20versie%20OVAM1%20LR.pdf)>
- (Kitamori, 2012) KITAMORI, KUMI, « Perspectives de l'environnement de l'OCDE à l'horizon 2050 : Conséquences de l'inaction », *Organisation de coopération et de développement économiques*, 2012, [en ligne], Consulté le 8 avril 2019, Disponible sur: < <http://www.oecd.org/fr/environnement/indicateurs-modelisation-perspectives/49884240.pdf> >
- (Stals, 2018) STALS, ADELINE, JANCART, SYLVIE, ELSEN CATHERINE, « Influence Of Parametric Tools On The Complexity Of Architectural Design In Everyday Work Of Sme's », *International Journal of Architectural Research: ArchNet-IJAR*, v. 12, n°3, 2018, pp 206-227, [en ligne], Consulté le 15 avril 2019, Disponible sur: <<http://dx.doi.org/10.26687/archnet-ijar.v12i3.1665>>
- (Worldwatch Institute, 2012) WORLDWATCH INSTITUTE, « Global Trends 2030 : Alternative Worlds », *National Intelligence Council*, 137 pages, [en ligne], Consulté le 19 avril 2019, Disponible sur: <<https://globaltrends2030.files.wordpress.com/2012/12/global-trends-2030-november2012.pdf> >

Sites

- Backacia BACKACIA, *La place de marché du réemploi des matériaux et équipements du BTP*, [en ligne], Paris, [ref. du 16 avril 2019], Disponible sur: <<https://www.backacia.com/>>
- BAMB BAMB, *The Materials Passport Platform*, [en ligne], Bruxelles, [réf. du avril 2019], Disponible sur: <<https://www.bamb2020.eu/passports/passports-platform/>>
- buildingSMART BUILDINGSMART INTERNATIONAL, *The Home of BIM*, [en ligne], [réf. du 31 mars 2019], Disponible sur : <<https://www.buildingsmart.org/> >
- Cycle-up CYCLE-UP, *La plateforme de réemploi des matériaux pour la construction et l'immobilier*, [en ligne], Nanterre, [ref. du 16 avril 2019], Disponible sur: < <https://www.cycle-up.fr/> >

Dictionnaire Environnement	REYCONSULT, Dictionnaire Environnement, [en ligne], Béziers, [ref. du 17 avril 2019], Disponible sur: < https://www.dictionnaire-environnement.com/ >
Harvestmap	SUPERUSE STUDIOS, <i>Oogstkaart. Marktplaats voor professionele upcyclers</i> , [en ligne], Rotterdam, [réf. du 11 janvier 2018], Disponible sur : < https://www.harvestmap.org/ >
Madaster	RAU, THOMAS, Madaster, [en ligne], Utrecht, [réf. du 11 janvier 2018], Disponible sur : < https://www.madaster.com/nl >
Materialenmarktplaats	MATERIALENMARKTPLAATS, [en ligne], Heerlen, [ref. du 16 avril 2019], Disponible sur: < http://materialenmarktplaats.nl/shop/ >
Opalis	OPALIS, <i>Annuaire des revendeurs des matériaux de réemploi</i> , [en ligne], Bruxelles, [réf. du 6 avril 2018], Disponible sur : < www.opalis.be >
PlanetReuse	PLANETREUSE, [en ligne], Kansas City, Missouri, [réf. du 3 janvier 2018], Disponible sur: < https://planetreuse.com/ >
Re.Source	RE.SOURCE, <i>Des surplus de chantiers pour vos travaux</i> , [en ligne], [ref. du 16 avril 2019], Disponible sur: < https://www.rs-resource.fr/ >
Readymader	READYMADER, <i>Marketplace dédiée à la construction de demain</i> [en ligne], Paris, [ref. du 16 avril 2019], Disponible sur: < https://readymader.com/ >
Rotor	ROTOR VZW-ASBL, [en ligne], Bruxelles, [réf. du 8 avril 2019], Disponible sur: < http://www.rotordb.org >
Rotor DC	ROTOR DECONSTRUCTION, <i>Reuse of building materials made easy</i> [en ligne], Anderlecht, [ref. du 16 avril 2019], Disponible sur: < https://rotordc.com/ >
R-place	R-PLACE, <i>Réemployer, Réutiliser, Recycler</i> , [en ligne], Montpellier, [ref. du 16 avril 2019], Disponible sur: < https://www.r-place.fr/ >
Salza	SALZA, <i>Pour le réemploi d'éléments de construction</i> , [en ligne], Zürich, [ref. du 16 avril 2019], Disponible sur: < https://www.salza.ch/fr >
The Materials Passports Platform	BAMB, <i>The Materials Passport Platform</i> , [en ligne], Bruxelles, [réf. du 3 janvier 2018], Disponible sur: < https://www.bamb2020.eu/passports/passports-platform/ >
Totem	TOTEM, <i>Create, evaluate, inovate</i> , [en ligne], [réf. du 9 avril 2019], Disponible sur : < https://www.totem-building.be/ >
Youbric	YOUBRICK, <i>Achetez, vendez, construisez</i> , [en ligne], Bruxelles, [ref. du 16 mars 2019], Disponible sur: < http://beta.youbric.be/fr/ >

Annexes

Questionnaire en ligne : liste des questions posées

Informations générales

- Quelle est la taille de votre bureau d'architecture?
- Dans quelle région exercez-vous ?
- Qui sont les donneurs d'ordre de vos projets ? (Plusieurs réponses possible)
- Quelle est la grandeur moyenne de vos projets de conception en 2018?
- Combien de projets avez-vous en cours dans les différentes phases de développement?

Economie circulaire

- Comment évalueriez-vous votre connaissance en matière d'économie circulaire ?
- Dans quelle mesure est-ce important pour vous que les différentes couches du bâtiment soient conçues afin de pouvoir les désassembler/déconstruire au lieu de les démolir (« Design for Deconstruction »)?
- Votre bureau d'architecture, a-t-il utilisé les principes de « Design for Deconstruction », évoqué dans la question précédente dans un (ou plusieurs) projet(s) ?
- Avez-vous ou votre bureau d'architecture déjà utilisé des matériaux de construction récupérés ou réutilisés dans de nouveaux projets de conception, de construction ou de rénovation ?
- Si votre bureau d'architecture **n'a pas** utilisé de matériaux de récupération dans un projet, y a-t-il une raison à cela?
- Parmi toutes les parties prenantes d'un tel projet, qui a initié l'idée ?
- Pour quelle(s) raison(s) avez-vous ou votre bureau d'architecture fait le choix d'utiliser des matériaux récupérés? Veuillez les classer par ordre d'importance, 1 étant le plus important et 5 le moins important.
- Dans combien de projet de réutilisation avez-vous ou votre bureau d'architecture été impliqué ?
- Comment qualifieriez-vous votre expérience globale par rapport à l'utilisation de matériaux récupérés ?
- Veuillez décrire votre expérience d'utilisation de matériaux de récupération. (Par ex. : Quels étaient les principaux problèmes / préoccupations? Quels étaient les avantages ?)
- D'où proviennent les matériaux de récupération dans vos projets?
- Avez-vous utilisé un outil afin de vous aider à sélectionner les matériaux de construction récupérés? Si oui, veuillez spécifier quel outil :
- « Le manque de connaissances et d'informations sur les matériaux de construction réutilisés, est la plus grande contrainte de réutilisation. »
- Parmi les initiatives proposées, laquelle vous paraît la plus pertinente/efficace afin de favoriser l'emploi de matériaux de récupération ?
- Veuillez expliquer pourquoi vous avez fait ce choix :

- S'il y avait plus d'incitations ou d'outils mis en place, tels que décrits précédemment, quelle serait la probabilité d'utiliser (plus souvent) des matériaux réutilisés?

BIM

- Comment évalueriez-vous votre connaissance en matière de BIM ?
- Votre bureau d'architecture est-il ouvert à l'utilisation du BIM ?
- Disposez-vous de moyens financiers pour le support et l'entretien de hardware et software en rapport avec le BIM ?
- Quelle est l'expérience de votre bureau d'architecture en matière de projets BIM ?
- L'utilisation du BIM ... (veuillez cocher la réponse la plus adéquate)
- Combien de personnes du bureau d'architecture interviennent en moyenne sur un projet BIM ?
- Comment évalueriez-vous l'expérience pratique moyenne des collaborateurs en matière de BIM? (nombre de projets)
- Comment les collaborateurs ont-ils acquis ses connaissances BIM ?
- Quel logiciel(s) BIM utilise votre bureau d'architecture? (Modélisation, Coordination, Viewers)
- A partir de quel moment/étape du processus votre bureau d'architecture utilise-t-il le BIM?
- Trouvez-vous que l'arrivée du BIM a facilité ou complexifié votre travail? Veuillez détailler comment ces outils ont facilité ou complexifié votre travail.
- Fournissez-vous la maquette numérique au maître d'ouvrage?
- Où conservez-vous la maquette numérique une fois le chantier finalisé?
- Disposez-vous d'une bibliothèque d'objets structurée ?
- Utilisez-vous des plateformes telles que BIM Object, RevitCity, 3D Warehouse, etc ?
- Etes-vous disposés au partage d'informations sur les projets avec des partenaires de projet (entrepreneurs, ingénieurs, sous-traitants, spécialistes, fabricants, ...) ?
- Avez-vous déjà collaboré avec des sous-traitants sur un modèle BIM ? Si oui, quel était leur apport ?

Combinaison BIM et économie circulaire

- Avez-vous déjà intégré des informations concernant des matériaux de récupération dans un modèle BIM ?
- Quels est/sont la/les raison(s) pour laquelle/lesquelles l'expérience n'a pas été tentée ?
- Où et comment stockez-vous les informations dans le modèle BIM ?
- Quels étaient les principaux problèmes lors de l'introduction des données dans le BIM?
- Si c'était à refaire, de quel(s) outil(s) aimeriez-vous disposer afin de vous faciliter le travail de numérisation?
- Quelles sont, selon vous, les nouvelles compétences et connaissances à acquérir, voir quels sont les nouveaux métiers créés par cette pratique ?
- Quel moment/étape du processus est selon vous le plus opportun pour l'incorporation des matériaux de récupération dans le BIM?

Entretien semi-directif : liste des questions posées

Informations sur l'agence

- Combien de collaborateurs êtes-vous dans l'agence ?
- Quels sont les logiciels les plus couramment utilisés
- Quelle est la sensibilité de vos collaborateurs au BIM?
- Quelle est la sensibilité de vos collaborateurs à la conception en vue de la déconstruction (DfD)?
- Quelle est la sensibilité de vos collaborateurs au DfD intégré dans le BIM?

Usage général du BIM/DfD

- Depuis combien de temps avez-vous recours au processus BIM/DfD?
- Comment vous êtes-vous formé?
- A quelle fréquence utilisez-vous la combinaison des deux pratiques ?
- Le processus de DfD, est-il une pratique courante ou occasionnelle au sein de votre bureau ?
(*L'usage ou non du DfD dépend-il de la volonté du client ou est-ce systématique ?*)
- Parmi les projets pour lesquels vous avez envisagé le DfD, avez-vous renoncé avant de commencer à modéliser dans un logiciel BIM à intégrer le DfD dans la maquette numérique?
- En regard des attentes du BIM en architecture aujourd'hui, quels sont selon vous, les avantages du processus appliqué à la conception en vue de la déconstruction d'une manière globale ?
(*Quels sont les avantages de la combinaison des deux pratiques*)
- En regard des attentes du BIM en architecture aujourd'hui, quels sont selon vous, les inconvénients du processus appliqué à la conception en vue de la déconstruction d'une manière globale ?
(*Quels sont les inconvénients de la combinaison des deux pratiques*)
- Considérez-vous que le BIM intégrant les principes de DfD soit un atout vis-à-vis des acteurs futurs du projet ? Pensez-vous que la maquette numérique soit indispensable pour une réutilisation future des matériaux?

Projet réalisé (série de question répétée si plusieurs projets)

- En quelle année le projet a-t-il été conçu ? Quel est le lieu du projet ?
- Quel en était le programme ?
- Quelles sont les raisons qui vous ont poussé à envisager l'utilisation du BIM/ DfD dans ce projet ?
- A quel niveau avez-vous appliqué les principes de DfD ?
- Sous quelle forme les matériaux mis en œuvre vont-ils pouvoir être réutilisés ultérieurement ?
- A quelle étape avez-vous commencé à intégrer les principes du DfD dans le modèle BIM?
- Avez-vous intégré des informations concernant les matériaux à récupérer dans le modèle BIM sous forme de passeport matériaux ? Si oui, comment ?
- Quels ont été les avantages et inconvénients de ce type de processus dans le cadre précis de ce projet ?
- Le processus BIM vous a-t-il permis une gestion plus flexible (*itérativité*) qu'avec une démarche traditionnelle?

- Quels outils avez-vous utilisé? Quel(s) problème(s) cela a-t-il permis de résoudre et comment précisément ?
- Pouvez-vous expliquer de la manière la plus fidèle, quel a été votre processus de conception ? Quels ont été les grandes étapes ? (*Traces graphiques ?*)
- Avez-vous utilisé le BIM dans une démarche purement numérique de modélisation ou dans un autre but ?
- Si cela était à refaire, changeriez-vous quelque chose ? Si oui, quoi ?
- Comment avez-vous collaboré dans ce projet ? Qui a participé à quelle tâche, étape ?
- Avez-vous mis en place des processus de travail particuliers liés à l’usage BIM/ DfD
- Toutes les modifications du projet ont-elles été retranscrites dans le modèle BIM à la livraison du projet (BIM as-built)? Si oui, par qui est-il tenu à jour ?
- Pouvez-vous décrire la relation avec le maître de l’ouvrage ? Etait-il informé du processus ? Etait-il demandeur ? Quel a été sa réaction par rapport au processus ?
- Modèle BIM a-t-il été livré au maître de l’ouvrage ? Si oui, sous quel format ?
- Où est sauvegardé le fichier final BIM du projet ?
- Est-ce prévu de mettre la maquette numérique à jour tout au long du cycle de vie du bâtiment suivant les transformations futures? Si oui, par qui ?

Questions globales

- Pouvez-vous énumérer les raisons dont vous tenez compte lorsque vous envisagez l’utilisation BIM/ DfD? Ou lorsque vous décidez de ne pas utiliser ce processus ?
- Observez-vous des récurrences dans votre manière de travailler BIM/ DfD ? Réutilisez-vous des parties/stratégies d’un projet à l’autre?
- Dans quel type de projets la démarche vous semble-t-elle plus porteuse, pertinente voire désormais indispensable ?
- Quel serait le logiciel BIM/ DfD de vos rêves ? Quelles fonctions permettrait-il?

Accord d'utilisation de production et de droit d'image

ACCORD D'UTILISATION DE PRODUCTION ET DE DROIT D'IMAGE

Je soussigné(e),

membre du bureau d'architecture,

autorise M^{elle} Halbach à utiliser librement, à des fins de recherche dans le cadre de son travail de fin d'études, les contenus précisés ci-dessous et produits dans le cadre des projets menés par le bureau.

(Cochez toutes les cases adéquates s.v.p.)

- ☐ J'autorise cette étude et désire y participer.
- ☐ J'autorise l'étudiante à recueillir les informations utiles à ses travaux de recherche (photographies, films, enregistrements audios, scans de documents qui lui auront été confiés, ...) sachant que mon anonymat sera préservé et que toute post-identification sera rendue impossible.
- ☐ J'autorise que les informations suivantes soient exploitées dans le cadre de ses recherches de travail de fin d'études :

(Cochez toutes les cases adéquates s.v.p.)

- ☐ Mon nom ;
- ☐ Le nom de l'agence d'architecture ;
- ☐ Des citations directes issues de l'observation ;
- ☐ Des photographies, des croquis, des documents du (des) projet(s) étudié(s).

Date

Signature du participant précédée de la mention « lu et approuvé » :

