

Déconstruction
Numérique
et Economie
Circulaire



2022, Julien Alexandre Porret

Ce document est mis à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution (CC BY <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).

Les contenus provenant de sources externes ne sont pas soumis à la licence CC BY et leur utilisation nécessite l'autorisation de leurs auteurs.

EPFL - Enoncé de travail de master 2021-2022

Par:

Julien Alexandre Porret

CH-2300 La Chaux-de-Fonds

julien.porret@ik.me

Déconstruction
Numérique
et Economie
Circulaire

Table des Matières

Préambule	9
REMERCIEMENTS	10
NOTES AUX LECTEURS	11
RÉSUMÉ	12
Introduction	15
ETAT DES LIEUX	16
L'ECONOMIE CIRCULAIRE	18
LES OUTILS NUMÉRIQUES ET L'ECONOMIE CIRCULAIRE	22
OBJECTIFS	26
Atlas de la Déconstruction Numérique	31
SCANNER LE BÂTIMENT	32
CONSTRUIRE UN DOUBLE NUMÉRIQUE	56
RÉUTILISER LES MATÉRIAUX	72
Les Défis de la Déconstruction	83
PERSPECTIVES HISTORIQUES	84
LE MONDE PROFESSIONNEL	85
Observations	93
INTRODUCTION	94
RÉUTILISER LES MATÉRIAUX	96
SCANNER LE BÂTIMENT	98
CONSTRUIRE UN DOUBLE NUMÉRIQUE	102
LES PLATEFORMES NUMÉRIQUES	106
LA BLOCKCHAIN	108

LE MONDE PROFESSIONNEL	110
CONCLUSION	114
OUVERTURES	116
Index des Termes, Entreprises, Logiciels, Institutions	119
Bibliographie	123

Préambule

Remerciements

J'aimerais remercier pour leur suivi dans mon travail :

Professeure associée Anja Fröhlich, Laboratoire d'architecture élémentaire et d'études typologiques- Commun, EPFL ENAC IA EAST-CO. CH-1015 Lausanne

Assistant-doctorant Tiago André Pratas Borges, Laboratoire d'architecture élémentaire et d'études typologiques- Commun, EPFL ENAC IA EAST-CO. CH-1015 Lausanne

Je remercie également pour ses conseils :

Assistant scientifique Georg-Christoph Holz, Laboratoire de design et media (IC/ENAC), EPFL IC IINFCOM LDM1. CH-1015 Lausanne

Je tiens également à remercier tout particulièrement pour leurs apports, les personnes interviewées des entreprises :

F. Baud & T. Früh Atelelier d'architecture SA, CH-1205 Genève

JCT Conseils SA, CH-1228 Plan-les-Ouates

Orlati (GE) SA, CH- 1219 Le Lignon

Scanways, CH-1227 Genève

3D Swiss View SàRL, CH- 1032 Romanel-sur-Lausanne

Enfin, je souhaite remercier mes parents et mon amie pour leur soutien.

Notes aux Lecteurs

Ce document est partiellement bilingue. Les chapitres « Introduction » et « Observations » ont été traduits en anglais. Les autres chapitres sont rédigés en français.

Les opinions exprimées lors des interviews n'engagent que leurs auteurs et ne sauraient refléter en aucun cas la position des entreprises.

This document is partially bilingual. The chapters “Introduction” and “Observations” have been translated into English. The other chapters are written in French.

The opinions expressed in the interviews are those of the authors and do not reflect the position of the companies.

Résumé

Le secteur de la construction est l'un des secteurs qui consomme le plus de matières premières et qui a le plus d'impacts sur l'environnement. En Suisse, les déchets de construction et de démolition représentent 17 millions de tonnes de matériaux, évacués chaque année. Cependant la transition du secteur de la construction d'une économie linéaire à une économie circulaire est encore à ces débuts. Le manque de connaissance sur la composition des bâtiments et des possibilités de les désassembler, ainsi que la faible quantité de données numériques disponibles dans le secteur de la construction sont les principaux facteurs responsables. La numérisation du processus de déconstruction utilisant des outils numériques pour scanner le bâtiment, construire son jumeau numérique et réutiliser ses éléments peut fortement contribuer au développement d'une économie circulaire. Ces procédés numériques utilisent des outils tels que les scanner laser 3D, les méthodes de scan-to-BIM, les technologies du BIM ou encore de la Blockchain. Ce document présente ces outils, explique leur fonctionnement ainsi que leur contribution possible dans le cadre de l'économie circulaire.

Abstract

The construction sector is one of the sectors that consumes the most of raw materials and has the greatest impact on the environment. In Switzerland, 17 million tonnes of construction and demolition waste are disposed of each year. However, the transition of the construction sector from a linear to a circular economy is still in its early stages. The lack of knowledge about the composition of buildings and the possibilities to disassemble them, as well as the low amount of digital data available in the construction sector are the main factors responsible. Digitisation of the deconstruction process using digital tools to scan the building, build its digital twin and reuse its components can strongly contribute to the development of a circular economy. These digital processes use tools such as 3D laser scanners, scan-to-BIM methods, BIM and Blockchain technologies. This paper introduces these tools, explains how they work and how they can contribute to the circular economy.

Introduction

Etat des Lieux

Le secteur de la construction joue un rôle considérable dans l'économie globale et est un important consommateur de matières premières. Ceci devrait continuer dans le futur, puisque la tendance de vivre dans les villes ne cesse d'augmenter et contribue au développement de nouvelles infrastructures. Le secteur de la construction est malheureusement responsable de la majorité de la production de déchets. A l'échelle mondiale, il génère environ un tiers des déchets destiné à la décharge. La construction de bâtiment, à elle seule, représente globalement 35% des ressources matérielles utilisées, 40% de l'énergie et 12% de l'eau potable. Elle est également responsable de la production de 40% des émissions de dioxyde de carbone.¹

En Suisse, le parc immobilier compte environ 2,5 millions de bâtiments, dont environ 1,7 million est utilisé pour l'habitation. La consommation énergétique et de matière première du parc immobilier a une influence sur le bilan écologique de l'espace bâti. Ce dernier génère un bon quart des émissions de gaz à effet de serre. Du côté de la consommation matérielle, c'est chaque année, 60 à 70 millions de tonnes de matériaux de construction qui sont utilisés pour la construction. Elle est également l'activité qui produit le plus de déchets avec 16,8 millions de tonnes de matériaux provenant de chantiers de démolition.² À la lumière de tous les problèmes environnementaux visibles actuellement, le secteur de la construction doit prendre des mesures et s'orienter rapidement vers une utilisation plus durable de ses ressources.

1 Bertino et al., « Fundamentals of Building Deconstruction as a Circular Economy Strategy for the Reuse of Construction Materials ».

2 OFEV, « Environnement Suisse 2018 - Rapport du Conseil fédéral ».

Current situation

The construction sector plays a considerable role in the global economy and is a major consumer of raw materials. This is likely to continue in the future, as the trend towards urban living increases and contributes to the development of new infrastructure. The construction sector is unfortunately responsible for most of the waste generation. On a global scale, it generates about one third of the waste going to landfill. Building construction alone accounts for 35% of material resources used, 40% of energy and 12% of drinking water. It is also responsible to produce 40% of carbon dioxide emissions.³

3 Bertino et al., « Fundamentals of Building Deconstruction as a Circular Economy Strategy for the Reuse of Construction Materials ».

In Switzerland, there are about 2.5 million buildings, of which about 1.7 million are used for residential purposes. The energy and raw material consumption of the building stock has an influence on the ecological balance of the built environment. The latter generates a good quarter of the greenhouse gas emissions. In terms of material consumption, 60 to 70 million tonnes of building materials are used in construction every year. It is also the activity that produces the most waste, with 16.8 million tonnes of materials from demolition sites.⁴ Considering all the environmental problems currently visible, the construction sector must act and move quickly towards a more sustainable use of its resources.

4 OFEV, « Environnement Suisse 2018 - Rapport du Conseil fédéral ».

L'Economie Circulaire

Depuis la révolution industrielle, notre système économique est basé sur la caractéristique fondamentale d'un modèle linéaire de consommation de matériaux bruts. Les compagnies produisent des biens de consommation en utilisant des matériaux récoltés ou extraits. Elles les vendent aux consommateurs, qui une fois cassé, vieux ou démodés, jettent les produits en gaspillant toute la matière brute et l'énergie nécessaire à leur fabrication. Les deux seules issues de ce système linéaire semblent être soit un effondrement économique, soit la résolution de cette surconsommation par un changement d'approche ; passer d'une économie linéaire, à une économie circulaire. Dans une économie circulaire, les ressources matérielles sont utilisées de manière continue sans jamais devenir des déchets.⁵

Le principe d'économie circulaire s'oppose à la vision traditionnelle de l'utilisation des matériaux dans le domaine de la construction. Actuellement les bâtiments sont perçus et construits avec les perspectives d'un cycle de vie linéaire. La clé de l'économie circulaire est de ne plus concevoir le bâtiment comme une structure statique avec comme seule fin de vie envisageable la démolition, mais au contraire comme une structure dynamique, capable de s'adapter avec de multiples options de réutilisation.⁶ Les bénéfices de l'utilisation circulaire des matériaux sont multiples. L'utilisation de ressources secondaires réduit non seulement l'apport nécessaire en ressources primaires, mais également l'espace requis pour la décharge des matériaux en fin de cycle de vie. Elle contribue également à atténuer les émissions de dioxyde de carbone et donc à la protection de l'environnement. Finalement, même si les impacts du processus de recyclage d'un matériau sont égaux à ceux de sa production primaire, la production de déchets diminuera, ce qui entraînera une réduction des émissions polluantes causées par l'élimination.⁷

« L'urban mining » (« mine urbaine » en français) est une des approches circulaires de l'économie. Elle est centrée sur l'exploitation des ressources et pourrait remplacer les pratiques traditionnelles dans le secteur de la construction. L'urban mining comprend les activités et les procédés de récupération des matériaux et d'éléments de bâtiments, d'infrastructures ou de déchets, en percevant les bâtiments comme une ressource. Il considère les déchets comme un état intermédiaire desquels une nouvelle construction peut émerger.⁸ Le concept d'urban mining propose de compa-

5 Heisel, « ECONOMICS FOR A CIRCULAR ENVIRONMENT ».

6 Durmisevic et al., « Development of a Conceptual Digital Deconstruction Platform with Integrated Reversible BIM to Aid Decision Making and Facilitate a Circular Economy ».

7 Bertino et al., « Fundamentals of Building Deconstruction as a Circular Economy Strategy for the Reuse of Construction Materials ».

8 Kakkos et al., « Towards Urban Mining—Estimating the Potential Environmental Benefits by Applying an Alternative Construction Practice. A Case Study from Switzerland ».

The Circular Economy

Since the industrial revolution, our economic system has been based on the fundamental characteristic of a linear model of raw material consumption. Companies produce consumer goods using harvested or extracted materials. They sell them to consumers, who once broken, old or out of fashion, throw the products away, wasting all the raw materials and energy needed to make them. The only two outcomes of this linear system seem to be either an economic collapse or the resolution of this over-consumption by a change of approach: moving from a linear economy to a circular economy. In a circular economy, material resources are used continuously without ever becoming waste.¹¹

The circular economy principle is opposed to the traditional view of material use in the construction sector. Currently buildings are perceived and constructed with a linear life cycle perspective. The key to the circular economy is to no longer conceive of the building as a static structure with demolition as the only conceivable end of life, but rather as a dynamic structure, capable of adapting with multiple reuse options.¹² The benefits of the circular use of materials are multiple. The use of secondary resources not only reduces the required input of primary resources, but also the space required for the disposal of materials at the end of their life cycle. It also contributes to the reduction of carbon dioxide emissions and thus to the protection of the environment. Finally, even if the impacts of the recycling process of a material are equal to those of its primary production, the production of waste will decrease, resulting in a reduction of polluting emissions caused by disposal.¹³

Urban mining is one of the circular approaches to the economy. It focuses on the exploitation of resources and could replace traditional practices in the construction sector. Urban mining includes the activities and processes of reclaiming materials and elements of buildings, infrastructure, or waste, seeing buildings as a resource. It considers waste as an intermediate state from which new construction can emerge.¹⁴ The concept of urban mining proposes to compare the materials accumulated in buildings with existing natural reserves. Cities become the mines of the future, acting as both consumers and suppliers of resources. Such a circular approach represents a radical shift from the current linear economic model which does not identify or consider existing buildings as a potential resource, often resulting in inefficient use of material resources.

11 Heisel, « ECONOMICS FOR A CIRCULAR ENVIRONMENT ».

12 Durmisevic et al., « Development of a Conceptual Digital Deconstruction Platform with Integrated Reversible BIM to Aid Decision Making and Facilitate a Circular Economy ».

13 Bertino et al., « Fundamentals of Building Deconstruction as a Circular Economy Strategy for the Reuse of Construction Materials ».

14 Kakkos et al., « Towards Urban Mining—Estimating the Potential Environmental Benefits by Applying an Alternative Construction Practice. A Case Study from Switzerland ».

rer les matériaux accumulés dans les bâtiments aux réserves naturelles existantes. Les villes s'assimilent aux mines du futur, en jouant à la fois le rôle de consommateur et de fournisseur de ressources. Une telle approche circulaire représente un changement radical par rapport au modèle économique linéaire actuellement en vigueur qui n'identifie ni ne considère les bâtiments existants comme une ressource potentielle, ce qui entraîne souvent une utilisation inefficace des ressources matérielles.

En Suisse près de 70% des matériaux de déconstruction produits chaque année sont recyclés et réinsérés dans le circuit économique en tant que matières premières secondaires.⁹ Il est cependant important de rappeler que la majorité du recyclage est actuellement du downcycling. Ceci signifie que le processus de recyclage a été effectué de sorte que le produit obtenu a moins de valeur que celui d'origine. Le recyclage des éléments de construction repousse ou du moins prévient l'entrée des matériaux dans les décharges et allège la consommation en matériaux brut. La clé reste probablement d'en utiliser moins ou de réutiliser ce qui est déjà utilisé et de se rappeler que le recyclage doit rester la dernière alternative.¹⁰

9 OFEV, « Environnement Suisse 2018 - Rapport du Conseil fédéral ».

10 Pranger, O'Donnell, et Heisel, « NEW DE-CONSTRUCTION - The Rebirth of a Circular Architecture ».

15 OFEV, « Environnement Suisse 2018 - Rapport du Conseil fédéral ».

16 Pranger, O'Donnell, et Heisel, « NEW DE-CONSTRUCTION - The Rebirth of a Circular Architecture ».

In Switzerland, around 70% of the deconstruction materials produced each year are recycled and put back into the economic cycle as secondary raw materials.¹⁵ However, it is important to remember that most of the recycling is currently downcycling. This means that the recycling process has been carried out in such a way that the resulting product has less value than the original one. Recycling of building components pushes back or at least prevents materials from going to landfill and reduces the consumption of raw materials. The key is probably to use less or reuse what is already used and to remember that recycling should be the last alternative.¹⁶

Les Outils Numériques et l'Economie Circulaire

Dans le secteur du bâtiment, le processus de déconstruction et la planification d'une stratégie de réutilisation des matériaux exige l'intervention de nombreux acteurs et de différentes expertises. Avant même de commencer le processus de déconstruction, plusieurs conditions préalables doivent être remplies. Il est premièrement nécessaire de convaincre le propriétaire des avantages possibles de la déconstruction de son bien. Les entreprises de démolition doivent savoir quels sont les matériaux à récupérer, leur valeur et les possibilités de les démonter sans les abîmer. Quant aux architectes, ils doivent être en mesure de connaître le potentiel de réutilisation, ainsi que les caractéristiques des matériaux, afin de pouvoir les intégrer dans de nouvelles constructions.

La mise en place de cette stratégie de réutilisation de matériaux de construction implique plusieurs étapes. Il est nécessaire de réaliser :

1. L'inventaire des matériaux,
2. L'inventaire de l'assemblage technique des éléments,
3. L'analyse de possibilités de déconstruction et de réutilisation comprenant les coûts carbone de l'opération,
4. L'analyse de la valeur sur le marché des matériaux à un moment donné,
5. L'analyse de l'énergie emmagasinée dans les matériaux,
6. L'analyse de la stratégie de déconstruction ainsi que des étapes et des coûts,
7. Le calcul du coût de la remise en état des éléments de construction.
8. La vente de l'élément de construction.

C'est uniquement en passant par toutes ces étapes qu'un élément de construction pourra poursuivre son cycle de vie.

La production et la gestion de données nécessaires pour mettre en place une économie circulaire des matériaux dans le domaine de la construction est colossale. La seule possibilité pour produire

Digital Tools and the Circular Economy

In the sector of construction, the deconstruction process and the planning of a material reuse strategy requires the intervention of many actors. Even before starting the deconstruction process, several preconditions must be met. Firstly, it is necessary to convince the owner of the possible benefits of deconstructing his property. The demolition companies must know what materials are to be recovered, their value and the possibilities of dismantling them without damaging them. Finally, architects need to know the potential for reuse, as well as the characteristics of the materials, so that they can be integrated into new constructions.

The implementation of this strategy for the reuse of building materials involves several steps. It is necessary to carry out:

1. Inventory of materials,
2. Inventory of the technical assembly of the elements,
3. Analysis of deconstruction and reuse possibilities including the carbon costs of the operation,
4. Analysis of the market value of the materials at a given time,
5. Analysis of the energy stored in the materials,
6. Analysis of the deconstruction strategy and the steps and costs,
7. Calculation of the cost of restoration of the building components
8. The sale of the building component.

Only by going through all these steps can a building component continue its life cycle.

The data generation and management required to implement a circular economy of materials in construction is enormous. The only way to produce and manage all this data is to use the possibilities offered by digital tools. The first step is to scan the building to collect the necessary information. The second step is to build a digital duplicate of the building to organise the data. The final step is to reintroduce the building element into the economy and to offer the possibility to reuse it by sharing its information on a digital sales platform.¹⁸

et gérer l'ensemble de ces données est d'utiliser les possibilités offertes par les outils numériques. Il est question dans un premier temps de scanner le bâtiment afin d'y collecter les informations nécessaires. Dans un second temps il s'agit de construire un double numérique du bâtiment afin d'y organiser les données. Finalement, il s'agit de réintroduire l'élément de construction dans l'économie et d'offrir la possibilité de le réutiliser, en partageant ses informations sur une plateforme de vente digitale.¹⁷

17 Durmisevic et al., « Development of a Conceptual Digital Deconstruction Platform with Integrated Reversible BIM to Aid Decision Making and Facilitate a Circular Economy ».

Objectifs

L'objectif de ce document est d'apporter au lecteur une vue d'ensemble des outils numériques connus, capables de concrétiser une stratégie d'urban mining fonctionnelle. Les méthodes et les outils présentés sont sciemment sélectionnés dans le cadre de la déconstruction de bâtiments existants qui ne possèdent pas de jumeau numérique. Cependant le nombre de stratégies d'économie circulaire ainsi que la variété d'outils numériques disponibles sont conséquents. Malgré une volonté d'expliquer un maximum de solutions possibles, toutes ne sont pas présentées, par choix ou par ignorance.

Le travail est structuré en trois chapitres.

L'« Atlas de la Déconstruction Numérique » fait l'état des lieux des outils numériques disponibles et des propositions théoriques pour la mise en place d'une économie circulaire. Il tire ses sources d'articles de recherches universitaires, de fiches techniques et de propositions de différentes organisations. Le chapitre propose également des tableaux comparatifs contenant une liste non exhaustive de solutions existantes. Ces solutions sont fournies au lecteur afin qu'il puisse satisfaire sa curiosité et pour lui faciliter le développement de recherches personnelles. Les sujets abordés, dans ce chapitre, suivent le schéma de la déconstruction proposé précédemment : scanner le bâtiment – construire le double digitale – réutiliser les éléments.

Le second chapitre, « Les Défis de la Déconstruction », fait état des lieux de la pratique en Suisse romande, plus précisément dans la région lémanique. C'est un recueil de témoignages et de propositions provenant d'interviews menés auprès de professionnels dans le domaine de la construction.

Le troisième chapitre, « Observations », compile différentes conclusions, propositions et remarques qui se sont développées tout au long des recherches, des interviews et de la rédaction de ce document.

Finalement, un index non exhaustif regroupe les termes, les logiciels, les outils, les sociétés et les institutions importantes permettant au lecteur de développer une lecture selon ses intérêts.

Objectives

The aim of this document is to introduce the reader to an overview of known digital tools that can be used to implement a functional urban mining strategy. The presented methods and tools are consciously selected in the context of deconstruction of existing buildings which do not have a digital twin. However, the number of circular economy strategies as well as the variety of digital tools available are substantial. Despite a desire to explain as many possible solutions as possible, not all are presented, either by choice or by ignorance.

The work is structured in three chapters:

“Atlas de la Déconstruction Numérique” (“Atlas of Digital Deconstruction”), presents an overview of digital tools available and theoretical proposals for the implementation of a circular economy. It is based on academic research articles, technical sheets, and proposals from different organisations. The chapter also provides comparative tables with a non-exhaustive list of existing solutions. These solutions are provided for the reader to satisfy his or her curiosity and to facilitate the development of personal research. The topics covered in this chapter follow the deconstruction scheme proposed earlier: scan the building - construct the digital duplicate - reuse the elements.

The second chapter, “Les Défis de la Déconstruction” (“The Challenges of Deconstruction”), takes stock of the practice in French-speaking Switzerland, more precisely in the Lake Geneva region. It is a collection of testimonies and proposals from interviews conducted with professionals in the construction field.

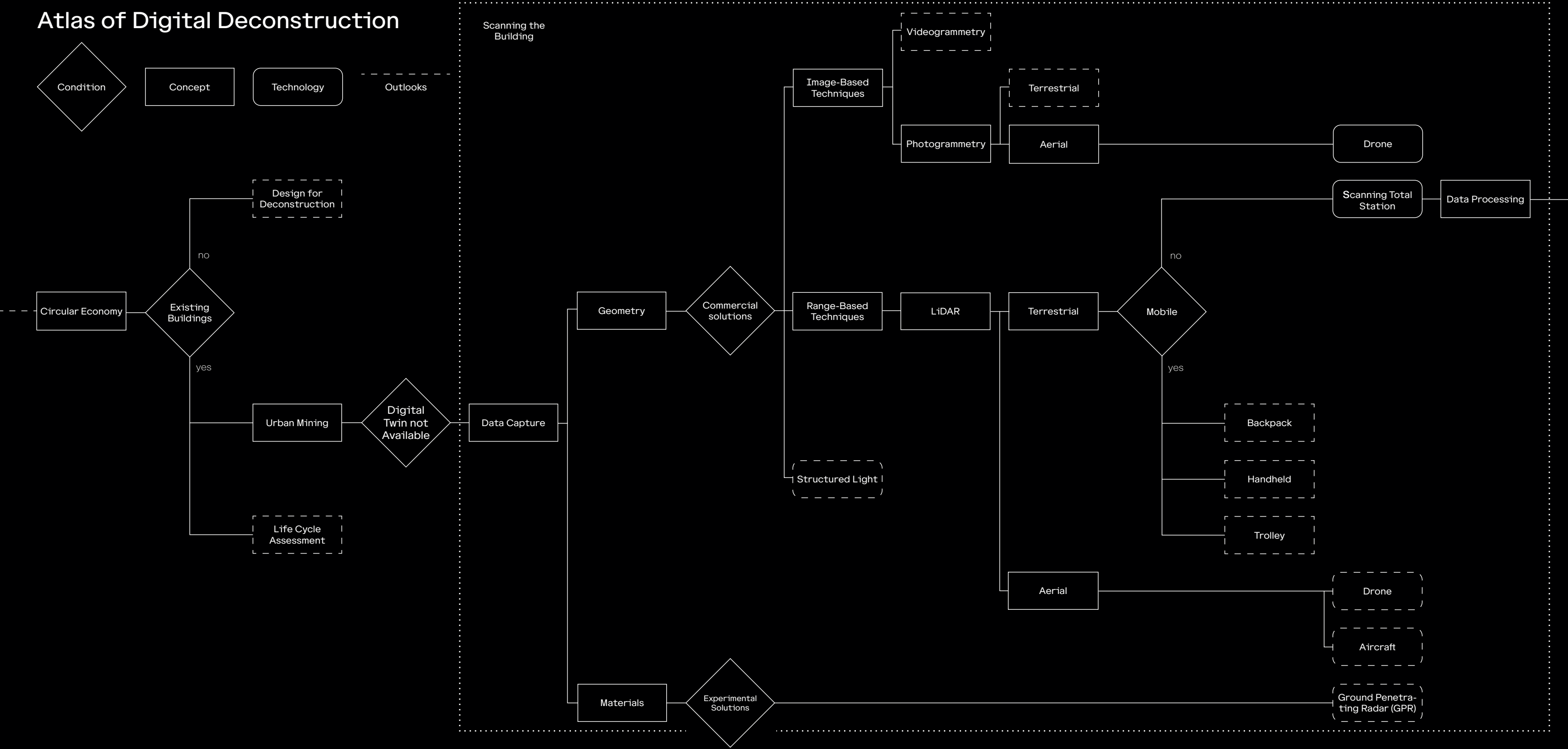
The third chapter, “Observations”, compiles various conclusions, proposals and remarks that were developed throughout the research, interviews and writing of this document.

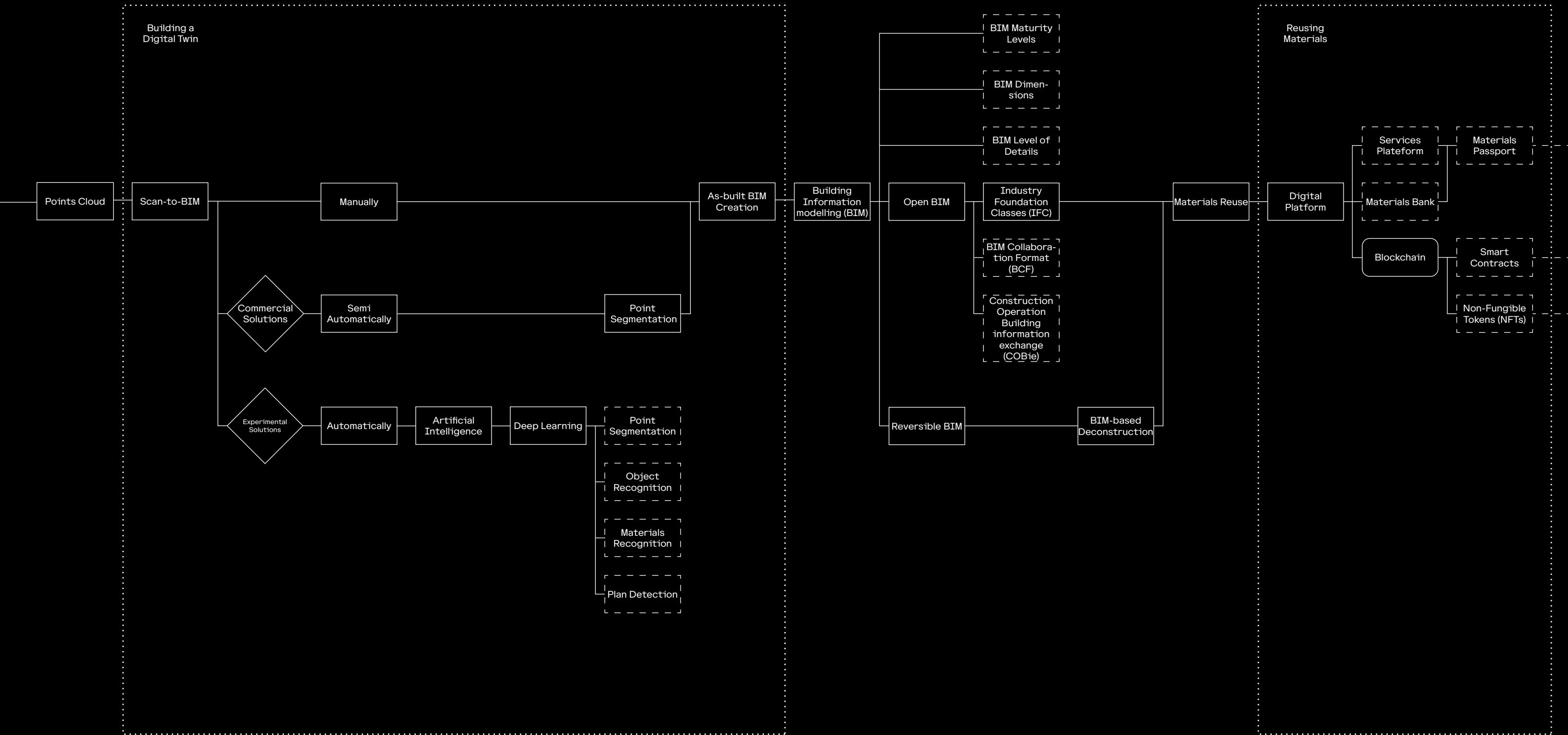
Finally, a non-exhaustive index of important terms, software, tools, companies, and institutions allows the reader to develop a reading according to his interests.

Préambule

Le nom « Atlas de la Déconstruction Numérique » provient de la phase de recherche. Afin de déterminer les sujets de ce chapitre, une grande arborescence a été construite. Elle contient les concepts, les outils, les méthodes, les technologies, les propositions et les entreprises traitant de la déconstruction numérique. Ceux-ci sont structurées en fonction de leurs liens et de la place hiérarchique qu'ils occupent dans l'économie circulaire. Le mot « atlas » a été choisi pour illustrer métaphoriquement la phase de recherche, mais également la forme de ce chapitre. C'est un ensemble de cartes qui explorent les chemins possibles pour réaliser la déconstruction et la réutilisation de matériaux de construction.

Atlas of Digital Deconstruction





Foreword

The name “Atlas of Digital Deconstruction” comes from the research phase. To determine the topics of this chapter, a large tree structure was built. It contains concepts, tools, methods, technologies, proposals, and companies dealing with digital deconstruction. These are structured according to their links and hierarchical position in the circular economy. The word “atlas” was chosen to metaphorically illustrate the research phase, but also the form of this chapter. It is a set of maps that explore possible paths to achieve deconstruction and reuse of building materials.

Atlas de la Déconstruction Numérique

Scanner le bâtiment

INTRODUCTION

Pour pouvoir analyser le potentiel déconstructif d'un bâtiment, il est tout d'abord nécessaire de connaître le fonctionnement de l'ensemble de son cycle de vie, en partant de son origine. Grâce à une analyse approfondie du bâtiment et de la variété des systèmes de construction et de ses composants, il sera possible d'évaluer la faisabilité de la déconstruction. L'acquisition traditionnelle d'informations relatives au bâtiment (dimensions, matériaux, joints), utilisées généralement, consiste à prendre des photos au téléphone portable et des mesures au double mètre et à les reporter sur des plans existants ou des schémas. Cette technique est généralement utilisée aujourd'hui dans le cadre de la démolition pour avoir par exemple une estimation du volume de déchets.

Pour un processus de déconstruction numérique, virtualiser un espace ou un bâtiment en le numérisant va permettre l'analyse par traitement informatique et l'échange rapide des données entre les différents intervenants. L'objectif du relevé va donc être de produire une copie numérique du bâtiment, plus communément appelé « Jumeau Numérique » ou « Digital Twin » en anglais. Les architectes, mais plus généralement des sociétés spécialisées dans les relevés de bâtiment utilisent différents outils numériques, majoritairement des scanners lasers. Les scanners lasers, produisent un nuage de points qui une fois traités, devient la base pour la construction d'un modèle 3D conforme à l'existant. Ces informations sont nécessaires par la suite pour par exemple appliquer les principes de la méthodologie BIM réversible expliqué plus loin.¹⁹

¹⁹ Durmisevic et al.

Il existe de nombreuses méthodes et technologies de capture des infrastructures existantes, celles-ci se concentrent principalement sur la collecte de la géométrie. Afin d'obtenir les dimensions d'un bâtiment existant, on utilise actuellement principalement la technologie du balayage laser mais également la photogrammétrie. La collecte numérique et automatisée de la composition des matériaux n'est actuellement pas utilisée professionnellement. Certaines recherches se limitent à la reconnaissance des matériaux par l'image, qui s'appuie sur les caractéristiques visuelles distinguables des différents matériaux, mais l'inconvénient est que seuls les matériaux de surface sont identifiables.²⁰ D'autres méthodes sont plus prometteuses telles que l'utilisation de « Ground Penetrating Radar » qui est traitée plus loin.

²⁰ Kovacic et Honic, « Scanning and Data Capturing for BIM-Supported Resources Assessment ».



Nuage de points d'une structure
©ClearEdge3D
<https://www.clearedge3d.com/>
[reproduit avec l'aimable autorisation de
l'auteur]

LES NUAGES DE POINTS 3D

La notion de « nuage de points » ou « point cloud » est importante car elle caractérise les données que l'on obtient lorsque l'on effectue un scan laser ou lorsque l'on procède à une reconstitution 3D par photogrammétrie.

Dans un jeu de données de points, chaque point du nuage de points est défini par ses coordonnées géométriques X, Y et Z et contribue à définir visuellement la surface échantillonnée sous-jacente. Les nuages de points peuvent être colorisés en ajoutant l'information de la couleur. Quand cette information est présente on dit que le nuage de points est 4D.

SCANNER – LASERGRAMMÉTRIE

TECHNOLOGIE

La lasergrammétrie est la technique qui utilise un rayonnement laser à partir d'une station laser pour balayer l'espace à numériser et générer un nuage de points. La lasergrammétrie exploite la technologie LiDAR pour construire le nuage de points qui comprend généralement en plus de l'information de la position 3D (X, Y, Z), une information sur la réflectance des matériaux.

La technologie principale le LiDAR (Light Detection And Ranging), détection et estimation de la distance par la lumière en français, est une technique de mesure à distance qui utilise de la lumière du spectre visible infrarouge ou ultraviolet. Le LiDAR fonctionne en émettant une série d'impulsions lumineuses à très haute fréquence. La distance est donnée par la mesure du délai entre l'émission d'une impulsion et la détection d'une impulsion réfléchie, connaissant la vitesse de la lumière.

Un scanner laser 3D est un outil de télémétrie dont le fonctionnement est basé sur la technologie LiDAR. Le scanner laser 3D fonctionne en mesurant une multitude de points différents afin de reconstruire un nuage de points. Un scanner laser 3D est composé d'une tête laser chargée d'émettre l'onde lumineuse, d'un récepteur qui détermine le temps de vol de l'onde et d'un système de traitement qui quantifie le signal reçu.²¹

SCANNER LASER 3D EN STATION FIXE

FONCTIONNEMENT

Le fonctionnement d'un scanner laser en station fixe est simple. Le scanner tourne sur lui-même pendant qu'un système de miroirs

²¹ Valente, « Scanners Laser 3D ou LiDAR - Numérisation 3D & Construction ».

rotatifs projette point par point sur l'environnement un faisceau laser. Cette double rotation change sa direction de vue à chaque mesure et permet de scanner la totalité du champ de vision du laser. Le faisceau laser est ainsi projeté dans toutes les directions, le scanner se trouvant au centre d'une sphère de points mesurés. Une fois l'environnement scanné à 360°, la station est terminée et le laser peut être déplacé. La majorité des scanners laser 3D possèdent un appareil photo interne qui enregistre des photos depuis la même origine que le nuage de points. Les photos sont automatiquement assemblées et créent une bulle 360° qui peut être utilisée tel quelle, mais peut également servir à coloriser le nuage de points.

MISE EN ŒUVRE

Les scanners laser 3D en station fixe doivent rester immobiles le temps de la capture et sont couramment montés sur un trépied. Certaines configurations peuvent amener à utiliser d'autres types de supports, notamment lorsqu'une visibilité plus longue est attendue, des perches de grande hauteur. Pour mener une campagne de scan, un opérateur muni de son scanner et d'un trépied suffit. A chaque station de scan, l'opérateur doit analyser l'espace à scanner afin de placer le scanner de la manière la plus stratégique possible. Placer correctement le scanner permet de réduire le nombre de stations nécessaires tout en gardant un niveau de recouvrement suffisant entre chaque station. Un recouvrement de bonne qualité entre les stations est nécessaire pour assembler les différents nuages de points lors de la phase d'assemblage en post-traitement.

L'opérateur est également responsable de déterminer les réglages nécessaires à chaque station. Les réglages varient en fonction des dimensions de l'espace à scanner, mais également des surfaces réfléchissantes. Pour un espace ouvert, la résolution de capture doit être élevée. Cela signifie que la cadence de numérisation (la vitesse de rotation de l'appareil) est réduite pour démultiplier le nombre de mesures et le temps de numérisation par station augmente significativement. Certains scanners proposent également de régler la qualité. Ceci correspond à une démultiplication du nombre de fois qu'un même point va être mesuré. La moyenne des mesures du point est ensuite calculée permettant ainsi de réduire le bruit. Selon les paramètres définis par l'utilisateur, le temps d'une station de scan peut varier entre 1 minute et environs 30 minutes. Une fois les réglages effectués, l'opérateur n'a plus qu'à déplacer le scanner et régler la hauteur du trépied en le plaçant approximativement à l'horizontale, le scanner corrigeant automati-



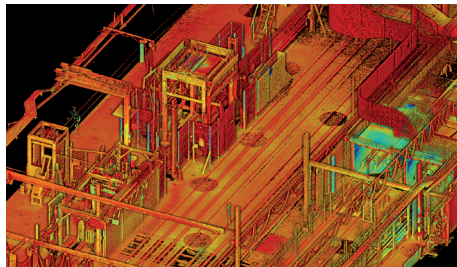
Scanner Laser 3D fixe
©FARO
<https://media.faro.com/>

AVANTAGES - INCONVÉNIENTS

Avec un scanner laser fixe, les mesures peuvent être effectuées par n'importe quel temps, contrairement à la photogrammétrie décrite plus loin. Cependant, la pluie, la neige ou le brouillard peuvent tout de même impacter la qualité du nuage de points. Ils sont susceptibles de dévier les impulsions lumineuses et de provoquer trois types de pertes de données. Premièrement certaines informations peuvent manquer, ensuite le nuage de points peut être pollué par des points parasites et finalement le bruit sur les surfaces peut augmenter.

Sur les surfaces brillantes, les fenêtres, les surfaces métalliques ou l'eau, le faisceau laser va subir des déviations qui vont fausser l'interprétation du signal et polluer le nuage de points. Toutefois les résultats obtenus avec la technologie LiDAR restent de meilleure qualité que ceux obtenus dans les mêmes conditions avec de la photogrammétrie, chaque mesure correspondant à un point unique. Pour parer à ces inconvénients, les surfaces réfléchissantes peuvent être recouvertes à l'aide d'un matériau non-réfléchissant et ainsi résoudre ce problème en opacifiant la surface.²³

Actuellement les scanners laser 3D fixes sont l'outil principal utilisé pour numériser l'environnement dans le domaine de la construction. Ils permettent de numériser les espaces avec fiabilité et simplement. Cependant le temps de captation et l'assemblage restent des tâches relativement lourdes.



Nuage de points capturé au scanner laser 3D fixe
©Scanways
Scanways
[reproduit avec l'aimable autorisation de l'auteur]

Scanners Laser 3D

Marque	Produit	Champ de vision	Portée standard (10% de réflectivité)	Fréquence de mesure maximum	Bruit (à 50 m)	Précision angulaire horizontale et verticale
Faro ²⁴	Focus 350 Plus	360° x 300°	0.6 – 150 m	2'000'000 pts/s	<1mm	19 secondes d'arc
Leica ²⁵	ScanStation P50	360° x 290°	0.4 – 120 m	1'000'000 pts/s	<1mm	8 secondes d'arc
Trimble Geospatial ²⁶	Trimble TX8	360° x 317°	0.6 - 120 m	1'000'000 pts/s	<2mm	17 secondes d'arc

24 Faro, « FARO® Focus Laser Scanner - La gamme de scanners laser la plus légère, compacte et intuitive ».

25 Leica Geosystems AG, « Leica ScanStation P50 ».

26 Trimble, « Fiche Technique - Trimble TX8 - Scanner Laser ».

MÉTHODES DE CAPTURE MOBILE

Les scanners laser mobiles sont généralement utilisés pour scanner les projets linéaires, les projets difficilement accessibles ainsi que les projets de grande étendue. Les scanners laser mobiles permettent de mener une campagne de captation tout en étant en mouvement.



Leica Pegasus - solution backpack mobile
©M&P Survey Equipment Ltd
<https://www.mpsurvey.co.uk/>

Un scanner mobile nécessite l'embarquement de plusieurs technologies. Le système LiDAR embarque non plus un seul mais plusieurs faisceaux lumineux, disposés sur une tête rotative, qui balayent l'espace simultanément. Le nombre de points ainsi mesurés dans le même laps de temps est plus important, généralement entre 16 et 128. Le scanner laser est équipé d'une centrale inertielle qui permet de déterminer la trajectoire dans l'espace de l'appareil. En effet lorsque le scanner est en mouvement, les points mesurés doivent pouvoir être replacés selon un référentiel commun. Chaque point mesuré est ainsi ajouté au nuage de points selon la position relative à l'emplacement de départ de la prise de mesures. Une centrale à inertie fonctionne de manière totalement autonome et n'est pas contrainte par un signal extérieur lui indiquant sa position. Toutefois une centrale inertielle n'est pas fiable sur une longue période d'utilisation et ceci entraîne une déformation de l'environnement scanné. Pour remédier à ce problème et il est donc nécessaire d'introduire des points de correction. Ceci peut être réalisé en couplant la centrale inertielle à une vérification ponctuelle par GPS en injectant des « points de calage » ou en positionnant sur le terrain des cibles dont les coordonnées géodésiques exactes sont indépendamment déterminées. Les cibles permettent en post-traitement de corriger la déformation du nuage de points mesurés mais également de géopositionner ce dernier avec précision. Finalement certains appareils de type « backpack » imposent à l'utilisateur de faire une boucle lors de la numérisation, afin de faire corrélérer les mêmes points mesurés au départ et à la fin et ainsi corriger les dérives intermédiaires.²⁷

NUMÉRISATION MOBILE DE TYPE BACKPACK

Ces appareils sont destinés à être portés à dos d'homme et prennent donc la forme d'un sac à dos intégrant les composants nécessaires à la numérisation LiDAR en mouvement. Les appareils de type backpack sont idéals pour effectuer des scans qui nécessitent une grande vélocité de captation et peu de précision. Les principaux outils embarqués dans un backpack sont une tête rotative LiDAR pour effectuer les mesures, une centrale inertielle et une puce de géopositionnement pour définir la position de l'opé-

²⁷ Valente, Numérisation 3D & Construction.

rateur ainsi que des capteurs photos 360° permettant de coloriser le nuage de points ou de réaliser des photos immersives. Avant de commencer la numérisation, l'itinéraire de captation doit être défini afin d'optimiser le parcours. Lors de la phase de scan, l'opérateur doit adapter sa vitesse de marche à l'appareil.

AVANTAGES - INCONVÉNIENTS

Comme les mesures sont effectuées en mouvement, lors du post-traitement des données sur un pc, une phase d'affinage des points par un algorithme est nécessaire pour réduire le bruit. Le traitement du bruit peut améliorer la lisibilité des données collectées, mais déforme la réalité et peut conduire à de potentielles erreurs de mesure lors de l'utilisation du nuage de points. Sur les scènes nécessitant une numérisation de haute précision il n'est donc pas réalisable d'utiliser ce type de matériel.

Contrairement aux scanners laser 3D fixes, la numérisation mobile de type backpack est bien plus rapide. Elle est également plus avantageuse car elle nécessite moins de post-traitement. Effectivement, les systèmes de backpack semblent en temps réel le nuage de points lors de la captation.²⁸

NUMÉRISATION MOBILE PAR APPAREIL MANUPORTABLE

L'ambition des appareils manuyportables est de proposer des prestations semblables aux solutions de type backpack mais à un coût réduit. Un appareil manuyportable est généralement composé d'une tête LiDAR rotative, d'une centrale inertielle et d'un calculateur. Certains appareils sont également dotés d'une caméra frontale, permettant de documenter la scène ou de coloriser le nuage de points. Lors de la captation, l'appareil est tenu à bout de bras par l'opérateur qui se déplace à vitesse raisonnable en minimisant les à-coups et en ralentissant à chaque passage de porte pour éviter toute rupture du nuage de points.

AVANTAGES - INCONVÉNIENTS

Les appareils manuyportables ont une vitesse d'acquisition similaire à celle atteignable avec des appareils de type backpack. Ils ont également de multiples avantages rendu possible par le sacrifice d'un peu de précision. Ils sont simples, maniables et faciles à prendre en main. Le prix des appareils manuyportables est également plus abordable que celui des autres solutions mobiles.²⁹



Leica BLK2GO- solution manuyportable
©Leica Geosystems
<https://shop.leica-geosystems.com/>

28 Valente.

29 Valente.



Trimble TIMMS - solution de type trolley
©Trimble Geospatial
<https://www.trimble-italia.com/>

NUMÉRISATION MOBILE TYPE TROLLEY

Les solutions de mobile mapping par chariot, « trolley » en anglais se caractérisent par le fait que le scanner laser est monté sur un chariot doté de roues poussé par l'opérateur. Les trolleys embarquent en partie haute la tête LiDAR, ainsi que des caméras capables de prendre des photos à haute résolution pour coloriser le nuage de points et produire des bulles immersives 360°. Ces solutions contiennent également parfois un affichage en temps réel de la reconstitution du nuage de points. La partie inférieure du chariot contient le calculateur intégré ainsi que la centrale inertielle.

AVANTAGES - INCONVÉNIENTS

Les trolleys sont généralement assez encombrants et doivent être transportés dans plusieurs caisses volumineuses. L'inconvénient principal présenté par cette solution est la capacité limitée de l'appareil à franchir des obstacles. Les escaliers par exemple, doivent être anticipés et il est nécessaire dans ce cas de faire appel à d'autres solutions. La vitesse de capture est également faible et l'opérateur doit marquer un temps d'arrêt à intervalles réguliers. L'avantage principal de cette solution est sa grande stabilité, qui influence directement la qualité des données collectées. Les nuages de points captés par cette technologie sont denses, contiennent peu de bruit et la reproduction des couleurs est fidèle.³⁰

30 Valente.

MÉTHODES DE CAPTURES AÉRIENNES

Les scanners LiDAR sont également employés pour effectuer de la numérisation 3D aérienne. Récemment, la démocratisation du drone civil et notamment la diminution du poids des appareils embarqués a contribué à rendre les applications de LiDAR par drone totalement opérationnelles et massivement employées. Le système embarque une tête LiDAR rotative projetant un peigne de faisceaux laser, une centrale inertielle et potentiellement d'autres capteurs tels que des accéléromètres ou boussoles. Pour coloriser le nuage de points, certains modules sont capables de se synchroniser avec des capteurs photo.



UAV SLAM - solution LiDAR + drone
©GeoSLAM
<https://geoslam.com/>

Lors de la numérisation 3D avec LiDAR par drone, il est nécessaire de suivre une stratégie d'acquisition précise pour obtenir un résultat de bonne qualité. Il faut que la trajectoire du drone se recoupe afin de créer des « points durs » dans le modèle numérique. Ces points durs, correspondent à des objets scannés, à au moins deux reprises. Ils permettent un recalage automatique et ainsi évitent une déformation du nuage de points.

Les données collectées par les drones LiDAR ne se distinguent pas de celles des autres méthodes de capture mobile. Leur précision ne permet pas de produire des plans « tel que construit », mais de documenter l'existant de manière efficace. Si la campagne de numérisation nécessite peu de précision, ces solutions sont plus intéressantes car elles sont rapides à mettre en œuvre et globalement peu onéreuses.³¹

31 Valente.

Scanners Laser Mobiles

Type d'Appareil	Marque	Modèle	Technologie	Portée	Traitement des données	Spécificité
Manuportable	Leica	Leica BLK-2GO ³²	LiDAR	0,5 à 25 m	Leica Cyclone REGISTER 360	-
Manuportable	Faro	Freestyle 2 ³³	Lumière structurée	0,4 à 5 m	Logiciel SCENE de Faro	-
Manuportable	Faro	ScanPlan 2D ³⁴	Laser Scanner 2D	0 à 8 m	FARO Zone	Ce scanner permet de mesurer et de documenter en 2D des plans d'étages automatiquement. Il suffit de traverser le bâtiment en marchant et de pointer le Scanner vers les murs.
Manuportable	Apple	iPhone 13 Pro	LiDAR	Inconnue	Polycam, Scaniverse, SiteScape, Etc...	Les applications de traitement des données sont développées par des éditeurs externes à la marque Apple.
Robot Mobile	Faro x Boston Dynamic	Faro Focus x Boston Dynamics Spot Mobile Robot	LiDAR	0.6 – 150 m	3D FARO Trek	Il suffit au robot de parcourir le projet une fois pour enregistrer la mission de numérisation. Dans le futur il sera probablement complètement autonome.

32 Leica Geosystems AG, « Leica BLK2GO - CAPTURE DE LA RÉALITÉ. SCANNER PORTATIF ».

33 Faro, « FARO® Freestyle 2 Handheld Scanner ».

34 Faro, « FARO® ScanPlanTM 2D Handheld Mapper ».

SCANNER – PHOTOGRAMMÉTRIE

INTRODUCTION

En photogrammétrie, l'acquisition de données se fait à l'aide d'un simple capteur photo. La photogrammétrie désigne la méthode utilisée a posteriori pour assembler les prises de vue permettant la modélisation numérique 3D d'un objet ou d'un espace. L'assemblage est réalisé en post-traitement, par corrélation de points homologues entre différentes images d'une même scène, acquise sous différents points de vue. La technique se base sur un principe semblable à celui de la stéréoscopie. La stéréoscopie correspond aux techniques utilisées pour reproduire une perception du relief à partir de deux images planes. Ces méthodes se basent sur la capacité du cerveau à utiliser le point de vue légèrement différent de chaque œil pour reconstruire l'image mentale en relief.³⁵

Pour reconstruire une scène, le travail de corrélation nécessite une puissance de calcul informatique considérable. Les algorithmes d'analyse d'images associent pour chaque pixel donné d'une image A les pixels correspondant sur une image B. Les algorithmes procèdent ainsi à la reconstruction stéréoscopique de la scène. La multiplication des points de vue et un recouvrement suffisant entre les images permet d'augmenter la précision du scan et de garantir sa fiabilité.

Le nuage de points obtenu en photogrammétrie correspond à l'entièreté de la scène et ne nécessite pas d'assembler plusieurs stations. Cependant un appareil photographique ne capture généralement pas d'information de distances. La particularité d'un modèle reconstruit par photogrammétrie est donc qu'il ne possède pas d'échelle. Il respecte les rapports de proportionnalité entre les distances et les angles, mais il est nécessaire d'effectuer cette étape manuellement en injectant des informations spatiales réelles. Celles-ci peuvent correspondre aux coordonnées des photos, aux points de calage visibles sur le site ou finalement à une distance connue entre deux points.³⁶

MÉTHODES D'ACQUISITIONS

La photogrammétrie est une technique permettant de numériser en 3D la réalité sur la base de photographies. L'acquisition peut se faire au cours de campagnes « terrestres », les photos étant réalisées par un humain ou une machine munie de capteurs photographiques mais également depuis les airs par un avion ou un drone.

L'enjeu principal en photogrammétrie est de parvenir à photo-



Reconstruction d'un nuage de points par photogrammétrie
©Crédits : Clément Valente, Numérisation 3D et Construction, éditions BTP.digital : <https://btp.digital>
[reproduit avec l'aimable autorisation de l'auteur]

35 Universalis, « STÉRÉOSCOPIE ».

36 Valente, Numérisation 3D & Construction.

graphier depuis assez d'angles de vue pertinents l'objet à reconstituer. La qualité finale du travail, porte plus sur le procédé que sur les outils eux-mêmes. Il s'agit de former une sorte d'enveloppe de prise de vue autour de la scène en minimisant les zones d'ombre (les zones non-visibles). La numérisation par photogrammétrie d'une scène, comprend les étapes suivantes : 1. Analyse du terrain, 2. Prise de vue, 3. Reconstruction photogramétrique, 4. Ajout de points de calage, 5. Export des données.

Utiliser la photogrammétrie pour scanner une scène nécessite quelques connaissances de base en photographie. Lors d'une prise de vue, 5 paramètres sont réglables, 1. La résolution, 2. La distance focale, 3. L'ouverture, 4. La vitesse d'obturation, 5. La sensibilité du capteur.³⁷

37 Valente.

RÉSOLUTION

La résolution est le nombre de pixel constituant une image numérique. Ce qui importe lors d'une reconstruction 3D est de maîtriser la précision du modèle final. Il ne s'agit plus d'exprimer le nombre de pixels, mais la correspondance entre un pixel et les distances sur le site. La résolution s'exprime alors sous la forme d'un ratio exprimé en cm/px. Un modèle photogramétrique est reconstruit avec une multitude de points de vue de la scène et de ce fait une grande disparité des résolutions spatiales. Un appareil avec une forte résolution est donc recommandé.

LA LONGUEUR FOCALE

La longueur focale est exprimée en millimètres et correspond à la distance entre le capteur et le centre optique de l'objectif. La longueur focale influe sur le grossissement du sujet à photographier et sur l'angle de vision. Une petite longueur focale, 16 mm, équivaut à un objectif grand-angle alors qu'une longueur focale de 400 mm correspond à un téléobjectif.

Pour reconstruire une scène en 3D, l'utilisation de petites longueurs focales constitue souvent un gain de temps important. Plus l'angle de prise de vue est large, moins le nombre de prises de vue pour capturer l'ensemble d'une scène sont nécessaires. Cependant, l'utilisation d'un objectif grand-angle, réduit considérablement la résolution spatiale de la scène. Il est donc préférable si l'on souhaite obtenir un nuage de points en haute résolution, d'utiliser une longue focale.

L'OUVERTURE

L'ouverture du diaphragme influence la quantité de lumière pénétrant dans le capteur. L'ouverture a une incidence directe sur la « profondeur de champs », c'est-à-dire le nombre de plans dans la profondeur qui seront nets lors de la prise de vue. Une grande ouverture ($f/2.8$) provoque une faible profondeur de champ et donc un flou d'arrière-plan important.

En photogrammétrie il est nécessaire d'avoir un maximum d'information sur chaque photographie, il est donc préférable de privilégier une petite ouverture qui crée une grande profondeur de champs et garde tous les plans de l'image nets.

LA VITESSE D'OBTURATION

La vitesse d'obturation correspond au temps pendant lequel l'obturateur va laisser la lumière atteindre le capteur. Plus la vitesse d'obturation est rapide et moins le capteur reçoit de lumière. Le temps d'obturation est exprimé en fraction de seconde. En augmentant le temps d'ouverture, on offre la possibilité au capteur de recevoir plus de lumière, ce qui permet de compenser l'utilisation d'une faible ouverture. L'augmentation du temps de pose impacte également le risque d'aboutir à des photos floues induites par des mouvements lors de la prise de vue. En cas d'utilisation d'une vitesse d'obturation lente, il est préférable d'utiliser un trépied.

LA SENSIBILITÉ ISO

La sensibilité ISO correspond à la sensibilité du capteur à la lumière. Chaque capteur a une sensibilité de base qu'il est possible d'augmenter pour compenser un manque de lumière. Cette compensation est réalisée de manière électronique et peut faire apparaître sur les photographies du « grain » ou du « bruit ». Ces aberrations chromatiques constituent un véritable problème dans le cadre de la photogrammétrie qui utilise la cohérence visuelle des pixels pour procéder à la corrélation des images. Il est donc préférable d'utiliser la sensibilité ISO la plus faible pour obtenir le meilleur résultat possible.

MÉTHODES DE CAPTURES AÉRIENNES

La photogrammétrie terrestre devient limitée dès lors qu'il est nécessaire de prendre de la hauteur pour capturer la scène et dans de nombreux cas, la photogrammétrie aérienne s'impose. La photogrammétrie aérienne repose sur les mêmes principes et méthodes que la photogrammétrie terrestre. Dans le cadre de



Phantom 4 Pro V2.0 - solution de capture photogrammétrique par drone
© DJI
<https://www1.djicdn.com/>

l'architecture, les scènes sont d'envergure réduite, pour des questions de coûts et de mise en œuvre on va préférer l'utilisation de drones aux autres aéronefs. Un drone est un appareil capable de voler de manière autonome et/ou télépilotee. Il existe deux familles de drones, les « ailes volantes » dont la forme s'apparente à celle d'un avion, et les drones multirrotors qui s'apparentent plus à des hélicoptères. Les ailes volantes seront privilégiées pour cartographier de longues distances, alors que les drones multirrotors seront privilégiés, notamment pour leur capacité à voler sur place, pour des applications plus locales.

L'appareil photo peut être embarqué soit de manière intégrée au drone, soit de manière rapportée. Dans les deux cas, la taille des capteurs est généralement réduite afin d'alléger le poids. Les paramètres qui impactent la qualité de la captation pour ensuite faire de la photogrammétrie sont les mêmes que pour la captation terrestre. Le capteur doit pouvoir travailler à haute vitesse d'obturation tout en gardant une luminosité suffisante pour éviter le flou de mouvement. Le flou d'arrière-plan doit être réduit au minimum, tout comme la sensibilité ISO qui pourrait générer du bruit numérique sur les images. Pour assurer la netteté des images, plusieurs procédés de stabilisation sont cumulés. La nacelle de stabilisation active compense physiquement les mouvements parasites du drone. La stabilisation optique agit au niveau des composants internes de l'appareil photo et compense les vibrations. Finalement la stabilisation numérique agit directement sur le traitement de l'image en déformant cette dernière, pour effectuer les corrections. Elle est moins efficace que les deux autres procédés, mais est aussi à proscrire dans le cas de la photogrammétrie. En effectuant des déformations sur les images pour compenser les effets de mouvements, la stabilisation numérique transforme les distances entre les pixels ce qui fausse les données et impacte la fiabilité de la numérisation 3D.³⁸

38 Valente.

MÉTHODE D'ACQUISITION

La photogrammétrie aérienne par drone peut être réalisée soit en pilotage manuel, soit en pilotage automatique. Réaliser la capture en pilotage manuel signifie que l'opérateur va être à l'origine des déplacements du drone mais également des déclenchements du capteur. En pilotage automatique, le drone et le capteur suivront un plan de vol préétabli. Généralement ceci est fait depuis une application tierce dédiée à la création de séquences de vol, qui communique au drone une liste de points de passage. Les deux modes sont cumulables et utilisés de manière hybride dans la pratique.

La numérisation par photogrammétrie aérienne d'une scène, comprend les étapes suivantes : 1. Analyse du terrain et création d'éventuelles séquences automatiques, 2. Vol et acquisition d'images, 3. Reconstruction photogramétrique, 4. Ajout de points de calage, 5. Export des données.³⁹

39 Valente.

AVANTAGES - INCONVÉNIENTS

La photogrammétrie repose sur la détection de point identiques entre différents points de vue d'une même scène. Pendant la campagne de capture, il ne faut pas que des éléments en mouvement soient photographiés. Le cas échéant, il sera impossible d'effectuer la reconstitution de la scène puisque les pixels les représentant sur des photographies prises à des instants différents, ne correspondent à aucune réalité instantanée. De ce fait, reconstituer par exemple une rue animée en 3D en utilisant la photogrammétrie est une tâche difficile qui risque de produire un modèle de mauvaise qualité.

La photogrammétrie est également limitée par la nature des surfaces qu'elle capture. Puisque la technique repose sur l'image, l'apparence des objets exerce une influence déterminante sur la reconstruction en 3D. Les surfaces réfléchissantes sont donc une problématique majeure pour cette méthode. Les reflets engendrent une mauvaise interprétation des données et faussent le résultat de la reconstruction. Il en est de même pour les surfaces ayant une réflectance trop faible. Les vitres laissent paraître ce qu'il y a derrière, ainsi la photogrammétrie ne reconstruit pas la surface du vitrage, mais ce qui se trouve de l'autre côté. Une solution possible pour contourner ce problème est d'opacifier les surfaces transparentes.⁴⁰

40 Valente.



Photogrammétrie par drone - Le phénomène d'occlusion sous la toiture est important
© 3D Swiss View SàRL
3D Swiss View
[reproduit avec l'aimable autorisation de l'auteur]

Logiciels de Photogrammétrie

Entreprise	Logiciel	Licence	Support de traitement	Type(s) d'image	Formats de sortie	Commentaires
Autodesk	Autodesk ReCap Photo	Propriétaire	En ligne	Aérien et distance rapprochée	asc, cl3, clr, e57, fls, fws, isproj, las, pcg, ptg, pts, ptx, rds, txt, xyb, xyz, zfs, zfpri	-
Trimble Geospatial	Trimble Inpho	Propriétaire	Inconnu	Aérien et distance rapprochée	Inconnu	-
AliceVision	Meshroom	Open source	Local	Aérien et distance rapprochée	abc, obj	-
DroneDeploy	DroneDeploy	Propriétaire	En ligne	Aérien	dxs, Geo-TIFF, las, obj, xyz	DroneDeploy est un logiciel de photogrammétrie aérienne, qui couvre l'ensemble du processus, du vol au modèle 3D fini.

TRAITEMENT DES DONNÉES

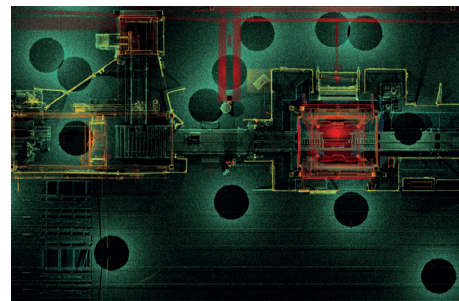
Avant de procéder à la reconstitution d'un double numérique exploitable pour la déconstruction, il est nécessaire d'effectuer certaines manipulations du nuage de points capturé. Il s'agit premièrement de géopositionner le nuage pour faire correspondre sa réalité virtuelle à la réalité physique du site. Ceci a pour avantage notamment dans le cadre de l'urban mining de pouvoir, par la suite, facilement géolocaliser les éléments de construction. Pour géopositionner le nuage de points, on le cale en fonction d'au minimum 3 cibles dont les coordonnées ont été, au préalable déterminées avec précision par un géomètre.

Lors d'une numérisation par scanner laser 3D en station fixe, il est nécessaire d'assembler les nuages de points de chaque station pour reconstruire l'ensemble de la scène capturée. La méthode de post-traitement généralement utilisée est appelée « cloud-to-cloud » (nuage à nuage en français). Celle-ci consiste à calculer l'assemblage le plus pertinent entre les différents nuages de points constituant la scène.

L'évaluation de la qualité d'un nuage de points est effectuée selon plusieurs critères. Voici les deux principaux. Premièrement le taux de recouvrement entre les nuages doit être suffisant. Il s'agit du nombre de points communs entre les nuages qui permettent l'assemblage grâce à la méthode de nuage à nuage. Deuxièmement, l'indicateur du risque de glissement doit être faible. Il s'agit des décalages pouvant se produire lorsque des éléments similaires sont répétés dans une même scène. Lors de la phase d'assemblage, le logiciel de calculs est incapable de différencier les éléments et donc d'assembler les nuages de points précisément, on dit alors que le glissement est important.

Après avoir géopositionné et dans les cas nécessaires assemblé le nuage de points, il est encore nécessaire d'effectuer un nettoyage des points aberrants. Différents facteurs sont responsables de ces données erronées. Les conditions météorologiques, les mouvements capturés ou encore la nature des matériaux produisent des données qui perturbent la visualisation et la compréhension de la scène. Certains algorithmes sont capables d'effectuer un nettoyage automatique des données, mais c'est une tâche qui est généralement effectuée manuellement dans le cadre des relevés architecturaux.

Finalement divers traitements du nuage de points peuvent être effectué afin de diminuer la taille des fichiers. Il s'agit d'effectuer un sous-échantillonnage des données, ce qui consiste à définir la



Assemblage des nuages de points capturés au scanner laser 3D fixe - l'emplacement des stations de scan est visible grâce aux «trous» laissés dans l'information
©Scanways
Scanways
[reproduit avec l'aimable autorisation de l'auteur]

suppression de certaines données du nuage de point. La méthode de sous-échantillonnage aléatoire permet de réduire la densité d'un nuage de point tout en gardant une répartition de la densité identique à la répartition initiale. La méthode de sous-échantillonnage par distance entre les points permet d'homogénéiser la densité d'information.⁴¹

Logiciels de Traitement de Nuage de Points

Entreprise	Logiciel	Nuages de points compatibles	Formats d'export	Suite Logiciel
Trimble Geospatial ⁴²	Trimble RealWorks	La plupart des formats de nuages de points standards	La plupart des formats existants	Inconnue
Faro ⁴³	Faro Scene	Faro Focus scanners et format E57	CPE, DXF, E57, IGES, POD, PTC, PTS, PTX, RCS, VRML, XYZ	Inconnue
Leica ⁴⁴	Leica Cyclone	Scanners Leica et Pegasus	XYZ, PTS, PTX, E57, DXF, PCI/CWF, DBX, Land XML	JetStream Entreprise, TruView Entreprise ou TruView Local, TruView Cloud
Matterport ⁴⁵	Matterport Capture	Matterport Pro2 et Leica BLK360	-	Les données sont uniquement utilisables sur Matterport Workshop et la suite de visualisation Matterport.

42 MEP innovation LAB, « 2021 MCAA 3D Scanning Technology Report ».

43 MEP innovation LAB.

44 Leica Geosystems AG, « Leica Cyclone BASIC - Comprehensive laser scan software for field & office ».

45 Matterport, « Des outils adaptés à tous les usages ».



Matterport Pro2 - solution de capture à lumière structurée
©Page Bertelsen Photography
Page Bertelsen

SCANNER - LUMIÈRE STRUCTURÉE

TECHNOLOGIE INTRODUCTION

Si les systèmes LiDAR et la photogrammétrie sont les systèmes de numérisation 3D les plus courants, il existe d'autres méthodes. La technique de scan 3D à lumière structurée est une des premières méthodes de numérisation 3D développée dans les années 80. C'est la technique utilisée dans les appareils grand public, comme la Kinect de Microsoft ou Face ID installé sur les appareils Apple, pour détecter des formes. Elle est également utilisée dans les appareils destinés à des applications professionnelles, notamment pour scanner des bâtiments en 3D.

Le fonctionnement de la technique à lumière structurée est relativement simple. Il s'agit à l'aide d'un projecteur de projeter des milliers de points infrarouges sur l'environnement à scanner. Une caméra infrarouge, légèrement déportée horizontalement par rapport au projecteur, détecte le motif et récupère les informations sur la profondeur en repérant les déformations.

Un scanner à lumière structurée est composé d'un ou plusieurs projecteur(s), couplé d'une ou plusieurs caméra(s) infrarouge(s) pour numériser l'espace. Un ordinateur enregistre les données qui peuvent être récupérées sur différents supports. Un dispositif de scanner 3D à lumière structurée est généralement couplé à un capteur photographique, le tout combiné dans une tête rotative adaptable sur trépied.⁴⁶

⁴⁶ Valente, Numérisation 3D & Construction.

MÉTHODE D'ACQUISITION

Les principes d'acquisition d'un scanner à lumière structurée sont similaires à un scanner 3D LiDAR fixe. L'opérateur est responsable de déterminer le meilleur emplacement pour le scanner afin de réduire les occlusions (les zones d'ombres projetées derrière un objet). Une fois le scan effectué, l'opérateur doit déplacer le scanner et répéter l'opération jusqu'à ce que l'ensemble de la scène soit scannée.

AVANTAGES - INCONVÉNIENTS

La grande force de ce type d'appareils réside dans la qualité des photographies et du temps d'acquisition. Avec un scanner à lumière structurée, seulement quelques minutes sont nécessaires pour numériser une pièce. Concernant la précision des mesures,

puisque le décalage entre le projecteur et la caméra infrarouge est uniquement horizontale, la qualité des données enregistrées se dégrade plus on s'éloigne verticalement de l'axe normal au capteur de la caméra. La précision des mesures est également incomparable à celles obtenues à l'aide d'un scanner laser en station fixe qui reste l'appareil le plus efficace dans ce domaine.⁴⁷

47 Valente.



Scan lumière structurée - Le niveau de détails est relativement faible
©3D Swiss View SàRL
3D Swiss View
[reproduit avec l'aimable autorisation de l'auteur]

Scanner 3D à Lumière Structurée

Entreprise	Produit	Technologie détection 3D	Portée	Résolution	Commentaire
Matterport ⁴⁸	Pro2 Caméra 3D	Capteur 3D à lumière structurée	0 à 4,5 m	4 millions de points par station	Fonctionne avec un abonnement sur la plateforme Matterport pour restituer les données.

48 Matterport, « Pro2 ».

SCANNER – GPR

LA TECHNOLOGIE RADAR

Le nom de la technologie radar est issu de l'acronyme anglais ; « Radio Detection And Ranging », qui peut être traduit en français par détection et estimation de la distance par onde radio. La technologie radar utilise des ondes électromagnétiques qui se propagent dans tous les milieux, y compris le vide. La rapidité de propagation des ondes est influencée par la densité du milieu de propagation, la température et la pression.

LE GPR

Le radar à pénétration de sol « Ground Penetrating Radar » en anglais, est une méthode de localisation géophysique qui utilise des ondes radios pour scanner le sous-sol de manière non destructive.

Le GPR utilise des ondes dont la fréquence varie de 1 à 1000 MHz et est composé de deux équipements principaux : un émetteur et une antenne de réception. L'émetteur envoie une impulsion électromagnétique dans le sol qui est réfléchiée par les différents constituants du sous-sol. L'antenne de réception détecte les ondes en retour et enregistre les variations. Le système GPR est doté d'un logiciel qui analyse les variations et traduit les ondes en images du sous-sol.⁴⁹

L'application ordinaire du GPR comme son nom l'indique concerne les analyses de sous-sols afin de cartographier les structures enfouies. Son application s'est aujourd'hui étendue dans de multiples domaines, le GPR est utilisé pour notamment évaluer des sites miniers, effectuer des fouilles archéologiques, rechercher des mines terrestres, mesurer l'épaisseur et la qualité de la neige pour prévoir les avalanches.⁵⁰

La résistance électrique du sol est le facteur limitant de cette technologie. A mesure que le signal pénètre en profondeur, il devient moins efficace. Dans les meilleures conditions, les signaux peuvent pénétrer le sol jusqu'à 30 mètres, cependant la profondeur maximale de pénétration dans le béton est d'environ 60 cm.

Dans le domaine de la construction, le GPR est principalement utilisé pour fournir des informations sur la structure interne du béton, notamment la position, la quantité et la profondeur de recouvrement des barres d'armature, les signes de corrosion et l'emplacement des éléments structurels. Le GPR est essentielle-



Scan GPR d'un mur intérieur
©Kovacic & Honic
Scanning and data capturing for BIM-supported Ressources assessment: a case study

49 Hoffer, « What Is GPR? »

50 Sensors & Software Inc., « What Is GPR? »

51 Sensors & Software Inc., « Concrete Scanning & Infrastructure Assessment ».

52 Kovacic et Honic, « Scanning and Data Capturing for BIM-Supported Resources Assessment ».

53 Kovacic et Honic.

ment utilisé pour confirmer la qualité des structures nouvellement construite et évaluer la sécurité et l'état des structures existantes.⁵¹

LE BPR (BUILDING PENETRATING RADAR?)

Comme expliqué précédemment, la rapidité de propagation des ondes électromagnétiques dans un élément est influencée par sa composition matérielle. Il est donc possible d'utiliser le GPR pour identifier les matériaux. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de caractériser de manière non destructive la composition matérielle des éléments de construction.⁵² L'application de cette technologie est pour l'instant uniquement expérimentale.

AVANTAGES - INCONVÉNIENTS

Pour numériser la géométrie des bâtiments existants, il existe plusieurs méthodes, la photogrammétrie et le scan laser. Il y a cependant une absence de solutions numériques pour identifier les matériaux qui composent les bâtiments. La méthode traditionnelle d'identification des matériaux consiste à mener des analyses manuellement et en effectuant des carottages.

En général, les informations recueillies lors de la déconstruction ne sont pas précises et très générale et ne sont complétées qu'avec des plans existants parfois dépassés. De plus, l'évaluation traditionnelle des bâtiments existants n'est possible qu'au stade de la fin de vie, lorsque les utilisateurs ont quitté le bâtiment.⁵³ Le GPR appliqué dans ces conditions peut donc devenir un outil indispensable afin de développer une économie circulaire.

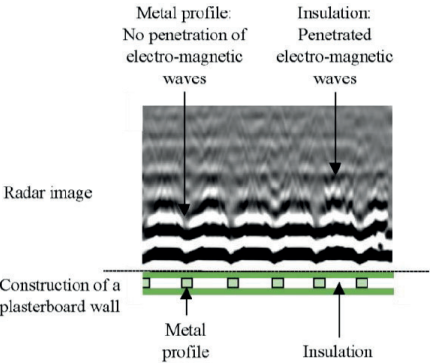


Image radar avec le mur en plaques de plâtre correspondant
©Honic, Meliha, Alois Hinterleitner, Ingrid Schlögel, Iva Kovacic, et Marijana Sreckovic
application of gpr-technology for identifying the material composition of building components

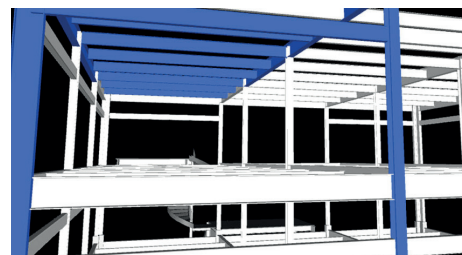
Construire un Double Numérique

INTRODUCTION

Un « jumeau numérique » ou « digital twin » est l'équivalent virtuel d'un bâtiment réel. Il dispose de nombreux détails concernant la composition des matériaux de chaque élément. Cet outil permet aujourd'hui de définir dans quelle mesure le bâtiment pourrait être déconstruit, dès le stade de la conception, pour éviter sa démolition à la fin de son cycle de vie. Pour un bâtiment existant, reconstruire un jumeau numérique permet d'obtenir une première indication sur les quantités de matériaux réutilisables et les options de recyclage.

Pour construire le jumeau numérique, il est nécessaire de numériser le nuage de point. Matérialiser numériquement le nuage de points permet de pouvoir le manipuler sur des logiciels de CAO. Traditionnellement l'architecte ou le modelleur va ouvrir le nuage de points dans son logiciel de conception et, en suivant le nuage de points, il va manuellement redessiner chaque objet jusqu'à la reconstitution complète de l'espace capturé. En utilisant Rhino par exemple, la 3D redessinée sera un modèle NURBS également appelé modélisation par spline. La modélisation par spline définit les géométries mathématiquement par des points de contrôle. Il est alors possible d'ajuster les surfaces en manipulant uniquement les points de contrôle. Cette méthode est idéale pour les programmes de CAO, car elle est précise et peu gourmande en espace de données et est également plus facile à traduire dans différents programmes.

Alternativement certains logiciels utilisent la modélisation polygonale. C'est ce format qu'utilisent les logiciels qui proposent le calcul automatique de la reconstitution 3D des objets. Le « mesh » en anglais ou la « surface maillée » est un objet polygonal non mathématique. La surface maillée est obtenue en reliant tous les points du nuage de point avec des polygones 2D, généralement des triangles ou des quadrilatères. Plus le nuage de points est détaillé, plus le maillage est précis et le nombre de polygones est important. Le désavantage des surfaces maillées est qu'un objet très détaillé augmente significativement la taille du fichier.⁵⁴ Il est possible de transformer un maillage en NURBS mais c'est un processus compliqué qui fait appel à des techniques de rétro-ingénierie.



Double numérique BIM d'une structure
©ClearEdge3D
<https://www.clearedge3d.com/>
[reproduit avec l'aimable autorisation de l'auteur]

54 « BIMObject® Academy - NURBS vs Polygon Mesh - Why Both Models Are Needed in BIMscript ».

Le « Building Information Modeling » (BIM) est une méthode d'op-

timisation de la planification, de la construction et de la gestion des bâtiments qui inclut toutes les informations relatives à leur cycle de vie et qui relie tous les acteurs du processus de construction tout au long des différentes étapes de leur cycle de vie (conception, approvisionnement, construction). C'est le jumeau numérique normalement utilisé dans le domaine de la construction.

BIM

DÉFINITION

BIM vient de l'anglais « Building Information Modelling » qui se traduit par Modélisation des Informations de la Construction. Le terme construction est ici générique et englobe les bâtiments et les infrastructures. Le BIM est un outil de gestion d'informations qui sont principalement transmises via une maquette numérique et/ou une base de données. Le BIM définit les échanges d'informations et leur utilisation tout au long de la durée de vie d'un ouvrage, de la conception jusqu'à la démolition, en passant par les phases de construction et d'exploitation. Le BIM définit quel intervenant fait quoi, comment et à quel moment. Il présente également de grandes capacités en matière d'automatisation des processus et de gestion des données. La maquette numérique quant à elle est une représentation digitale des caractéristiques physiques et fonctionnelles de l'ouvrage. L'objectif du BIM est d'assurer l'utilisation d'informations structurées et fiables, tout au long du cycle de vie du bâtiment, afin de garantir des échanges sans pertes et ressaisies d'informations.⁵⁵

55 Objectif BIM, « Le BIM: Signification, définition et explications ».

Pour de la déconstruction, le modèle BIM doit idéalement être très complet tant au niveau de la modélisation que de la sémantique. Il doit prendre en compte les méthodes de déconstruction des éléments afin qu'ils puissent être démontés et réutilisés à la hauteur de leur valeur. Généralement, le manque d'informations sur la composition des matériaux des bâtiments est le principal obstacle à l'urban mining.⁵⁶

56 Kovacic et Honic, « Scanning and Data Capturing for BIM-Supported Resources Assessment ».

Le BIM suscite beaucoup d'intérêt dans la recherche et dans la pratique de la construction en raison des avantages offerts par l'utilisation d'une maquette numérique complète, cohérente et fidèle au bâtiment. Bien qu'il soit une excellente plateforme, il n'est pratiquement jamais utilisé dans le domaine de la déconstruction et ce malgré qu'il soit considéré comme une méthodologie couvrant l'ensemble du cycle de vie des bâtiments.^{57, 58}

57 van den Berg, Voordijk, et Adriaanse, « BIM uses for deconstruction ».

58 Kovacic et Honic, « Scanning and Data Capturing for BIM-Supported Resources Assessment ».

LES NIVEAUX DE MATURITÉ

Le BIM est une méthode de travail collaborative basée sur la génération et l'échange de données et d'informations entre les parties prenantes du projet. Grâce à ces informations, il est possible de gérer l'ensemble du cycle de vie d'un bâtiment, depuis l'idée et la conception jusqu'à son achèvement. Il existe différents niveaux de collaboration dans un projet, que l'on appelle les niveaux de maturité BIM. Les niveaux de collaboration sont indexés sur une échelle de 0 à 3. Le stade de maturité 0 définit une mauvaise collaboration où chaque acteur produit et distribue les informations selon ses propres habitudes.

Le stade de maturité 2 est celui qui est aujourd'hui utilisé par la majorité lorsqu'on parle d'utilisation de BIM dans la construction. Chaque acteur produit sa propre maquette numérique qu'il partage avec un coordinateur chargé de rassembler les modèles. Les problèmes détectés sur le modèle de coordination sont ensuite communiqués aux différents acteurs qui doivent alors modifier en conséquence leur modèle avant de le soumettre à nouveau pour la coordination.

Dans le cadre de la déconstruction le niveau de maturité BIM idéal correspond au stade de maturité 3. Effectivement, c'est le seul qui permet de profiter de tous les avantages offerts par le BIM. L'objectif principal de ce niveau est d'obtenir une intégration complète des informations dans un environnement basé sur le cloud. Ceci est possible en utilisant un modèle commun partagé qui sera disponible pour toutes les parties prenantes du projet qui pourront ajouter ou modifier leurs propres informations. La technologie actuelle ne permet cependant pas encore l'accès au BIM de stade 3 par tous.⁵⁹

59 Objectif BIM, « Niveaux du BIM - Stades de Maturité BIM ».

LES DIMENSIONS DU BIM

Un modèle BIM peut être utilisé à des fins spécifiques prédéfinies, communément appelées cas d'utilisation. Selon les exigences de l'étape du projet et la complexité du projet, des paramètres spécifiques sont ajoutés aux informations existantes contenues dans le BIM. Ces ajouts de cas d'utilisation prédéfinis peuvent être décrits comme des dimensions BIM. Les dimensions du BIM sont indexées de 1D jusqu'à potentiellement XD, le X représentant ici toutes les données additionnelles imaginables qui pourraient encore venir s'ajouter aux autres dimensions. Le type d'informations pouvant être gérées par le BIM3D correspond à la modélisation tridimensionnelle. La 4D fait référence à la gestion du temps et au planning tandis que la 5D fait référence à la gestion du coût. Le

60 Objectif BIM, « BIM 2D-3D-4D-5D-6D-7D-xD ».

61 Dautremont, Dagnelie, et Jancart, « Le BIM6D comme levier pour une architecture circulaire ».

BIM6D comprend quant à lui tout ce qui est lié au développement durable mais sa définition exacte reste encore incomplète.⁶⁰

Le développement du BIM6D est une étape importante pour la déconstruction. Avec l'implantation de la 6D, le développement durable deviendra un incontournable du domaine de la construction. Il permettra les développements autour de l'économie circulaire et imposera de nouveaux standards pour toutes les étapes du développement du projet.⁶¹

LES NIVEAUX DE DÉTAIL

Le niveau de détail, plus généralement abrégé par l'acronyme anglais LOD (Level Of Detail), correspond à la précision géométrique d'une maquette numérique. Le LOD est caractérisé par le niveau de détail des objets qui constituent la maquette BIM. Ainsi selon le niveau d'information nécessaire pour un projet, un LOD plus ou moins important est utilisé. Le concept LOD vise également à standardiser un niveau de spécifications de référence afin de faciliter les échanges dans les projets BIM. Les LOD 100, 200, 300, 400 et 500 sont les cinq niveaux de détails qui ont été établis, allant du standard le moins détaillé au standard contenant le plus d'informations.

C'est à partir du LOD 300 que le niveau de détail commence à être suffisant pour la déconstruction. Il comporte l'ensemble des murs et cloisons définissant le bâtiment, mais également les types de matériaux utilisés et la distinction entre l'intérieur et l'extérieur de la paroi, tout en précisant s'ils sont porteurs. Les différents composants extérieurs des machines sont également modélisés. Les objets placés dans la maquette BIM sont détaillés et ont une orientation, des dimensions et un emplacement précis. L'ensemble devient donc un référentiel dont le niveau de détail est suffisamment élevé pour mettre en place le démontage et la récupération des éléments de valeur dans le cadre de la déconstruction.⁶²

62 My Digital Buildings, « Définir le niveau de détail (LOD) de sa maquette BIM ».

OPEN BIM

DÉFINITION

L'Open BIM est un processus de collaboration qui permet d'étendre les avantages du BIM en améliorant l'accessibilité, la facilité d'utilisation, la gestion et la durabilité des données numériques dans le domaine de la construction. L'Open BIM garantit l'interopérabilité des logiciels, favorisant une collaboration transparente en permettant à tous les acteurs du projet de travailler autour d'une même maquette numérique, quel que soit le logiciel qu'ils utilisent.

L'open BIM bénéficie ainsi également aux projets en facilitant leur maintenance tout au long de leur cycle de vie.⁶³

63 openbim.fr, « OpenBIM ».

L'Open BIM élimine le problème traditionnel des données BIM qui sont généralement limitées par les formats de données propriétaires des fournisseurs de logiciel. L'Open BIM, en adhérant aux normes nationales, contribue également à créer un langage commun qui étend l'utilisation du BIM.⁶⁴

64 buildingSMART International, « OpenBIM Definition ».

LES STANDARDS

Le processus de la déconstruction génère des données nécessitant un niveau d'interopérabilité des informations élevé. Il est donc raisonnable d'employer les normes de réutilisation et de classification des matériaux en matière de BIM existante. L'open BIM permet de travailler en utilisant des formats non-propriétaires tel que l'IFC, le BCF, le COBie et plusieurs autres. Ces standards suivent les objectifs de l'Open BIM cités précédemment.

Le format IFC (Industry Foundation Classes) est un format de fichier orienté objet destiné à assurer l'interopérabilité des données entre les différents logiciels. Il est indispensable pour assurer la bonne circulation des données entre les acteurs. Il permet de décrire des objets, les murs, les fenêtres, les espaces, les poteaux et tout autre élément du bâtiment, leurs caractéristiques et leurs relations. Le premier IFC, l'IFC 1.0 a été développé en 1997. Les formats IFC principalement utilisés aujourd'hui, sont l'IFC 2x3 sorti en 2007 et l'IFC4 disponible depuis 2013. Le format est profondément ancré dans les habitudes du secteur de la construction à l'échelle mondiale. Les éditeurs de logiciels permettent généralement d'importer l'IFC dans leur programme mais également d'exporter des projets vers ce format. Toutefois, l'IFC est malheureusement parfois boycotté, au profit des formats propriétaires, et des erreurs récurrentes dans sa gestion le rendent difficile à utiliser. Le format IFC est donc utilisé de manière marginale, en tant que format d'échange, dans le cadre d'un travail collaboratif. Il est utilisé généralement comme un format d'archivage.⁶⁵

65 buildingSMART International, « Industry Foundation Classes (IFC) ».

Le format BCF (BIM Collaboration Format) est le format des notes IFC. Il permet de communiquer des informations de coordination qui peuvent être complètement séparées de la maquette BIM. Les fichiers BCF permettent de commenter la modélisation, de soulever des problèmes, de fournir des réponses, le tout accompagné de vues ou de sélection d'élément de la maquette IFC. L'ensemble de ces fonctionnalités participe à la fluidification des échanges entre les différents acteurs. Les bénéfices, qu'offrent les

66 buildingSMART International, « BIM Collaboration Format (BCF) ».

BCF, en termes d'efficacité et de gains de temps, sont considérables. De plus les échanges sont conservés dans un historique et la totalité des informations est accessible en temps réel.⁶⁶

COBie (Construction Operation Building information exchange) est un format d'échange, basé sur les définitions des IFC. Il s'agit d'informations non-géométriques distribuées sous la forme de feuilles de calculs. Elles concernent notamment les données des équipements, des fiches techniques des produits, des garanties, des listes de pièces de rechange et des programmes de maintenance préventive. Ce sont des informations nécessaires à l'exploitation, la maintenance et la gestion du bâtiment une fois qu'il est entré en service.⁶⁷ La nature de ces informations soulage également le processus de déconstruction, car elle permet d'accélérer la phase d'évaluations des éléments de construction.

67 Eepaul, « COBie ».

LE BIM RÉVERSIBLE

INTRODUCTION

Le BIM réversible est une proposition de l'architecte Dr. Elma Durmisevic fondatrice du bureau 4D Architects basé à Amsterdam. Développé depuis 2006 jusqu'à aujourd'hui le BIM réversible permet d'évaluer la composition technique du bâtiment et les options de récupération des éléments de construction. Le calcul du module de réversibilité prend en compte de nombreux éléments indispensables à la réalisation de la déconstruction. Parmi ceux-ci on peut compter, la dépendance hiérarchique au sein de l'assemblage des éléments de construction, le modèle et le nombre de relations entre les éléments de construction, les séquences d'assemblage, l'élément de base de l'assemblage, le niveau de préfabrication, le type de connexions, ainsi que la durée de vie restante de l'élément de construction. Le BIM conventionnel ne prend pas en charge les indicateurs de réversibilité et le potentiel de réutilisation proposé ci-dessus. Les modèles BIM ne facilitent pas la compréhension des relations entre les objets et de leur type de connexions.⁶⁸

68 Durmisevic et al., « Development of a Conceptual Digital Deconstruction Platform with Integrated Reversible BIM to Aid Decision Making and Facilitate a Circular Economy ».

CARACTÉRISTIQUES

Les deux caractéristiques intrinsèques du BIM réversible sont la représentation paramétrique numérique du bâtiment et l'évaluation numérique de la réversibilité. Le BIM réversible traduit les fichiers de nuages de points 3D issus de la numérisation 3D en une géométrie et des propriétés standardisées qui permettent des analyses numériques de réversibilité du bâtiment et de ses matériaux. Ces standards concernent les informations sur la géométrie, la po-

sition, la fonction, les relations et les connexions entre les éléments de construction. L'évaluation numérique de la réversibilité fournit une évaluation du potentiel de réutilisation en évaluant la facilité avec laquelle les produits et matériaux de construction peuvent être récupérés sans endommager les parties environnantes. Le modèle relie également l'évaluation à de multiples options de réutilisation de l'élément. Il mesure l'effort et le temps nécessaires à la récupération de ce dernier ainsi que le niveau de dommage qui se produit pendant le processus de désassemblage.⁶⁹

LE MODULE RBIM

Le module Réversible BIM (RBIM) est une solution BIM qui se base sur un nuage de points et qui permet la reconstruction du modèle numérique d'un bâtiment existant en respectant les dimensions, les relations, la quantité et les propriétés de démontage d'un bâtiment et de ses composants.

Le module RBIM est capable d'analyser un nuage de point 3D et d'attribuer un score à chaque élément du bâtiment suivant son potentiel de réutilisation. Les éléments sont ensuite distribués en trois catégories. Premièrement les éléments irrécupérables, il s'agit de matériaux de construction ayant un faible potentiel de réutilisation. Deuxièmement, les éléments partiellement récupérables, il s'agit des matériaux pouvant être remanufacturés ou réutilisés après une réparation majeure. Et finalement les éléments récupérables, il s'agit là d'éléments dont les matériaux peuvent être directement réutilisés ou après une réparation mineure.⁷⁰

Le module RBIM a été utilisé pour assister la déconstruction d'un bâtiment à Heerlen aux Pays-Bas dans le cadre du projet EU H2020 BAMB – Buildings as Material Banks Project. Le bâtiment de 7698 m2 datait de 1982. La structure avait été réalisée en béton coulé sur place et les façades en béton préfabriqué. Dans le rapport final fourni par le module, la structure du bâtiment a obtenu un score correspondant à un faible potentiel de réutilisation. La façade a obtenu un score de réutilisation moyen reflétant les options de réutilisation après avoir été remanufacturé.⁷¹

69 Durmisevic et al.

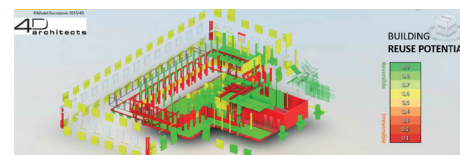


Figure 5. Color coded Reversible BIM module (Durmisevic, 2020)

Module BIM réversible avec le code couleur ©Durmisevic et al.

Development of a conceptual digital deconstruction platform with integrated Reversible BIM to aid decision making and facilitate a circular economy

70 Durmisevic et al.

71 Durmisevic et al.

Solutions BIM Réversible

Nom du Projet	Partenaire(s) Académique	Partenaire	Compatibilité	Durée
Deconstruction and Recovery Information Modelling (DRIM) ⁷²	Coventry University	Waste Plan Solutions (WPS), Sustainable Direction Limited (SDL)	Revit 2017	2016–2018
Disassembly and Deconstruction Analytics System D-DAS	University of the West of England, University of Derby, Obafemi Awolowo University	Engineering and Physical Sciences Research Council	Revit 2017	Inconnue
Reversible BIM (RBIM)	-	Interreg NWE	Revit	En cours

72 UWE Bristol, « Deconstruction and Recovery Information Modelling (DRIM) ».

SCAN TO BIM

INTRODUCTION

Le BIM a été largement adopté dans le secteur de la construction afin de monitorer les bâtiments tout au long de leur cycle de vie. Au cours du processus de génération BIM, les données du nuage de points sont d'abord enregistrées, fusionnées dans le même système de coordonnées et sont nettoyées. Le nuage de points capturé est ensuite utilisé pour reconnaître les composants du bâtiment et pour générer les éléments BIM. Lors de la modélisation du BIM, les problèmes suivants doivent être résolus : 1. La géométrie des composants doit être définie, 2. Des catégories et des matériaux doivent être attribués aux composants et 3. Des relations et des connexions entre les objets doivent être établies. L'état actuel de l'art en matière de génération de modèles BIM conformes à l'exécution à partir de nuages de points est encore un processus essentiellement manuel, long, coûteux et sujet aux erreurs.⁷³

73 Kovacic et Honic, « Scanning and Data Capturing for BIM-Supported Resources Assessment ».

AUTOMATISATION

L'automatisation du processus scan-to-BIM dans le domaine de la construction est une demande grandissante pour différentes applications, notamment les projets de rénovation, les simulations énergétiques ainsi que le processus de déconstruction. La détection tridimensionnelle de primitives et leurs attributions à une classe d'objets spécifiques dans un nuage de points, est une étape essentielle à la reconstruction d'un bâtiment en maquette BIM. Afin de reconstruire le modèle BIM, les approches conventionnelles proposent de premièrement extraire du nuage de points les informations géométriques et ensuite indépendamment de compléter la sémantique. La question de l'analyse complète des caractéristiques des nuages de points reste un défi majeur pour le scan-to-BIM.⁷⁴

74 Xu, Shen, et Lim, « CorDet »

Ces dernières années, les méthodes deep learning (« d'apprentissage profond »), ont connu un développement considérable dans les applications impliquant la compréhension de scènes 3D. Le deep learning est un type d'intelligence artificielle dérivé du machine learning. Le deep learning fonctionne comme un cerveau humain en utilisant des réseaux de neurones artificiels. Les neurones fonctionnent en couche en recevant et interprétant les informations produites par la couche précédente. Pour fonctionner, les algorithmes de deep learning sont entraînés à effectuer leur tâche en suivant une phase d'apprentissage.⁷⁵ Durant l'apprentissage, l'algorithme apprend à reconnaître les éléments de construction

75 Deluzarche, « Définition | Deep Learning - Apprentissage profond | Futura Tech ».

76 L., « Deep Learning ou apprentissage profond ».

en assignant dans le réseau neuronal un poids aux caractéristiques de ceux-ci. La couche finale de neurones rassemble les informations des différentes caractéristiques et peut, grâce à ça, déduire de quel type d'élément il s'agit. Durant la phase d'apprentissage, l'algorithme compare généralement la réponse qu'il obtient avec des réponses vérifiées fournies par les humains. Si la réponse est erronée, l'algorithme réorganise son réseau neuronal en assignant un nouveau poids à la caractéristique défaillante. Ce processus est répété des milliers de fois lors de la phase d'apprentissage.⁷⁶

La majorité des approches de modélisation scan-to-BIM automatisées sont basées sur la segmentation des nuages de points. Les méthodes de modélisation 3D basées sur la segmentation détectent et représentent un élément de construction comme un groupe de points. D'autres étapes sont nécessaires pour convertir ces nuages de points segmentés en modèles 3D. Ces opérations de post-traitement souffrent généralement de problèmes de sur-segmentation. Par exemple, au lieu de détecter un seul mur continu, l'algorithme va interpréter les informations comme étant deux murs. Parallèlement, les problèmes d'occlusion (les zones d'ombres projetées derrière un objet) constituent un autre défi. Les objets partiellement scannés ne sont pas interprétés de la bonne manière et par conséquent, l'algorithme ne reconstitue pas le modèle dans son entièreté.

SOLUTIONS COMMERCIALES

Les solutions commerciales de scan-to-BIM sont semi-automatiques. Si l'on compare ces solutions avec la reconstruction manuelle traditionnelle, on peut effectivement remarquer une amélioration significative de la rapidité de modélisation. Les géométries de base, tel que les points, les lignes et les surfaces sont automatiquement extraites. Les objets complexes nécessitent une assistance manuelle pour dépasser les problèmes de détection causés par l'occlusion ainsi que par les liens hiérarchiques complexes. Les fonctions automatisées des logiciels disponibles sur le marché se concentrent principalement sur l'extraction de l'aspect géométrique du nuage de point. Pour compléter automatiquement les maquettes BIM, il est encore nécessaire de mettre au point des processus capables de compléter la sémantique ainsi que de comprendre plus globalement la scène. Actuellement, les algorithmes génèrent plusieurs morceaux de surface différents pour reconstituer un objet fortement occulté dans les nuages de points.



Extraction des tuyaux, des conduits, de la structure et des murs depuis un nuage de points
©ClearEdge3D
<https://www.clearedge3d.com/>
[reproduit avec l'aimable autorisation de l'auteur]

Logiciels Scan-to-BIM

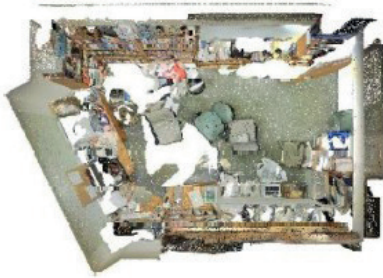
Entreprise	Logiciel	Format d'importation	Compatibilité d'export
ClearEdge3D ⁷⁷	EdgeWise	TZF, FLS, PTG, ZFS, ZFPRJ, DP, RGGP, RCP, PTX, E57, PTS, XYZ	Revit, Autocad, Plant3D, PDMS
Leica ⁷⁸	CloudWorx	LGS	AutoCAD, MicroStation, Revit, Naviswork, PDMS, BricsCAD, Solidworks,
Faro ⁷⁹	Faro As-Built	RCS, RCP, OBJ, STL	AutoCAD, Revit
PointCab ⁸⁰	Pointcab Origins Pro	La plupart des formats natifs de scanner laser	Un plugin Pointcab est disponible pour Revit, Archicad et Bricscad, mais l'export est également possible dans les formats CAD courant.

77 ClearEdge3D, « ClearEdge3D ».

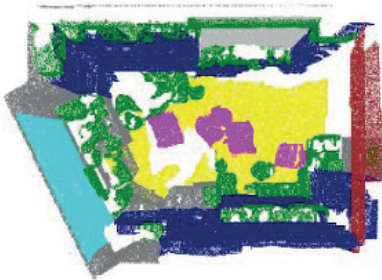
78 Leica Geosystems AG, « Leica Cloud-Worx Technical Specifications ».

79 Faro, « As-Built - Avec le logiciel FARO® As-BuiltTM, la modélisation CAO et BIM n'a jamais été aussi simple ».

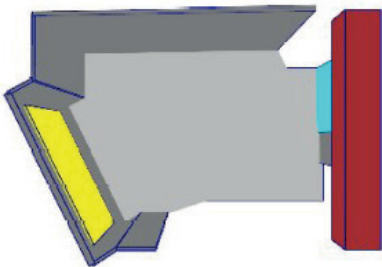
80 Pointcab, « Applications ».



(a)



(b)



(c)

Processus de scan-to-BIM : (a) nuages de points bruts ; (b) segmentation ; (c) reconstruction selon la segmentation
©Xu, Shen, et Lim
CorDet

Les solutions existantes pour automatiser le processus de scan-to-BIM peuvent être groupées en trois catégories, selon la technologie sur laquelle elles sont basées. Premièrement, il existe les solutions qui utilisent la « détection de plans ». Pour reconstruire un modèle 3D, elles fonctionnent en extrayant, classifiant et fusionnant les surfaces du nuage de points. Elles sont ainsi capables de reconstruire les murs, les sols et les plafonds. Le principal inconvénient de ces solutions est le manque de compréhension globale de l'objet.

Deuxièmement, il y a les solutions basées sur « la segmentation » du nuage de points. Ces solutions comprennent trois étapes principales : La segmentation des objets 3D, la modélisation géométrique et la modélisation des relations entre les objets. Segmenter le nuage de points signifie créer des groupes de points avec tous les points appartenant à un même objet et cela pour tous les objets de la scène. Ensuite la reconstitution en 3D est réalisée pour chaque groupe de points. Comparées aux solutions de détection de plans, les solutions basées sur la segmentation peuvent extraire efficacement des caractéristiques au niveau de l'objet. Cependant, comme ces solutions représentent un objet comme un groupe de points, certaines étapes de post-traitement sont nécessaires pour générer des modèles 3D. Ces solutions souffrent également d'une sur-segmentation, en particulier dans les environnements avec une forte occlusion.

Finalement, grâce aux développements rapides des technologies de détection d'objets 3D au cours des dernières années, de nombreuses études ont commencé à explorer des solutions directes pour la modélisation 3D de bâtiments en utilisant des approches de « détection d'objets ». Les éléments structuraux et les murs sont détectables mais des progrès pour renforcer la cohérence contextuelle entre les objets ont été également effectués. Cependant ces méthodes souffrent encore de certains défauts et il est courant que les primitives structurales soient détectées de la même manière que les objets de mobilier. Ces solutions fonctionnent également généralement uniquement avec des bâtiments de type Manhattan. L'hypothèse de Manhattan suppose que toutes les surfaces des objets sont alignées selon deux axes perpendiculaires, ce qui simplifie grandement les problèmes de reconstruction.

Les deux premières solutions nécessitent un processus par étapes. Seules les techniques de détection d'objets peuvent générer des modèles 3D de bout en bout. Cependant, les solutions

existantes ne tiennent pas compte des problèmes spécifiques à la détection d'objets de construction, notamment l'orientation, la symétrie, la faible épaisseur et la richesse des caractéristiques locales.⁸¹

81 Xu, Shen, et Lim, « CorDet ».

Algorithmes Scan-to-BIM

Algorithme Type	Nom	Caractéristiques de Détection	Spécialité	Etablis- sement de recherche	Année de paru- tion
Deep learning	CorDet ⁸²	Reconnaissance d'ob- jets	Architecture	UNSW Sydney	2021
Deep learning	RespointNet++ ⁸³	Segmentation	Installations in- dustrielles	Hong Kong University of Science and Tech- nology	2021
Combinaison de deep learning et de méthodes géo- métriques	CLOI ⁸⁴	Segmentation	Installations in- dustrielles	PTC Inc.	2021

82 Xu, Shen, et Lim.

83 Yin et al., « Automated Semantic Segmentation of Industrial Point Clouds Using ResPointNet++ ».

84 Agapaki et Brilakis, « CLOI ».

En plus de labéliser les composants structuraux, il est nécessaire de reconnaître leurs matériaux et ainsi déterminer leur composition. La reconnaissance par l'image est une méthode qui fonctionne en utilisant les caractéristiques visuelles distinguables des différents matériaux des composants du bâtiment. Les algorithmes fonctionnent en détectant des caractéristiques combinant l'intensité, l'histogramme de couleur et divers motifs de texture. Différents types de matériaux de construction peuvent apparaître dans des couleurs similaires mais avec des textures différentes, par exemple le béton ou l'asphalte. Alors que les briques et les tuiles partagent une texture similaire mais dans des couleurs différentes. Il est donc nécessaire de combiner la couleur et la texture dans les algorithmes de reconnaissance d'image. La majorité des recherches se concentrent uniquement sur la reconnaissance de matériaux sur des images 2D.

Analyser les textures dans un nuage de points 3D est une opération difficile, voire impossible. La stratégie est d'appliquer les méthodes basées sur la reconnaissance d'image en 2D en 3D. Il s'agit de récupérer pour chaque point du nuage de points 3D, le ou les pixels correspondant sur une image 2D. Pour rappel, si le nuage de points a été reconstruit par un processus de photogrammétrie, chaque point correspond à au moins 2 pixels sur au moins 2 images différentes. Si le nuage de points a été reconstruit en lasergrammétrie, il est colorisé grâce à des images 2D capturées par le laser. Les algorithmes, analyse donc pour chaque point un échantillon de pixels autour du pixel de référence de l'image 2D correspondante. Grâce à cette méthode, il est possible de déduire le type de matériau à n'importe quel emplacement du nuage de point 3D.

De plus, l'avantage de reconnaissance des matériaux basé sur la 3D est non négligeable. Puisque pour chaque point 3D, il existe plusieurs images de références prise depuis plusieurs points de vue différents et qui donc couvrent plus de couleurs et de textures, les probabilités de se tromper sur le type de matériau est drastiquement réduit.⁸⁵

Certaines approches méthodologiques proposent le couplage du balayage laser et de la technologie GPR afin de reconstituer le modèle BIM. La méthode IDAM couple la technologie GPR pour capturer la composition matérielle du bâtiment avec la technologie de balayage laser pour l'acquisition de la géométrie. Elle permet ainsi la génération de modèles BIM, à partir de nuages de points et de données non géométriques. L'avantage de cette méthode c'est qu'il est possible de déterminer et de reconstituer dans le modèle

85 Yang, Shi, et Wu, « Towards Automatic Generation of As-Built BIM ».

BIM, la composition des matériaux en profondeur, par exemple, l'épaisseur et le volume de chaque couche de matériau. Cette méthode va plus loin et propose également la génération automatisée de passeports matériels (la notion de passeport matériel est expliquée dans le chapitre correspondant). Par rapport à ce qui est réalisé actuellement avec le BIM, la méthode IDAM comprend la capture de la composition matérielle des bâtiments existants et l'intégration des données recueillies dans le modèle BIM via des identifiants d'éléments uniques. En conséquence, une source d'information unique est générée, permettant la compilation des passeports matériels et la planification de la phase de fin de vie des bâtiments avec un minimum d'effort.⁸⁶

86 Kovacic et Honic, « Scanning and Data Capturing for BIM-Supported Resources Assessment ».

AUTRES

D'autres solutions prometteuses pourraient également automatiser le processus de reconstruction de maquette 3D BIM. Il s'agit notamment des méthodes de reconnaissance d'éléments structuraux sur plans d'étage. Dans ce cas, il ne s'agirait pas de scanner les bâtiments afin de reconstituer une maquette BIM depuis un nuage de points, mais d'utiliser les documents 2D existants du bâtiment. Pour reconstruire le modèle BIM, l'algorithme passe en revue les plans d'étage du bâtiment et reconnaît les différents types d'éléments structuraux. Ces solutions sont mises au point de manière à pouvoir fonctionner avec n'importe quel style graphique.⁸⁷

87 Evangelou, Savelonas, et Papaioannou, « PU Learning-Based Recognition of Structural Elements in Architectural Floor Plans ».

Réutiliser les Matériaux

INTRODUCTION

Une fois les objets identifiés dans le model BIM, il est nécessaire d'effectuer une évaluation de leur valeur, en analysant leur bilan carbone et leur toxicité. Sur la base de cette évaluation, les produits présentant un potentiel de réutilisation élevée peuvent être mis en vente, en ligne, sur des places de marchés numériques pour matériaux de construction. Différents types de plateformes numériques existent actuellement. On retrouve notamment de nombreuses plateformes de services qui proposent autant de services variés.

Les plateformes de vente sont communément appelées banques de matériaux. Afin de réaliser l'identification des matériaux de construction, les passeports semblent la solution la plus prometteuse. Couplés à la technologie de la blockchain, les passeports pour matériaux suivent les matériaux au fur et à mesure qu'ils changent de propriétaires. Cette technologie permet ainsi d'accroître la transparence et la responsabilité entre les intervenants concernant la qualité et l'exactitude des informations publiées à propos des matériaux.⁸⁸ Ces outils permettent également d'améliorer la correspondance entre l'offre et la demande, que ce soit au niveau de la qualité ou de la quantité des matériaux récupérés.

88 Durmisevic et al., « Development of a Conceptual Digital Deconstruction Platform with Integrated Reversible BIM to Aid Decision Making and Facilitate a Circular Economy ».

LES PLATEFORMES NUMÉRIQUES

BANQUES DE MATÉRIAUX

L'objectif du concept de banques de composants et de matériaux de construction est de permettre le déploiement de l'économie circulaire. Elles favorisent la vente et l'échange de matériaux démontés et réutilisables. Les banques de matériaux permettent ainsi de garder les éléments de construction le plus longtemps possible, dans l'économie, sans générer de déchets inutiles. Pour être proposé à la vente, les éléments doivent passer avec succès des tests d'évaluation structurelles, environnementaux et chimiques. Sinon, ils seront envoyés au recyclage. La banque est le lien entre la phase de fin de vie d'un bâtiment et la phase de construction d'un nouveau bâtiment. Bien que les banques de matériaux puissent être prévues à des fins de test ou de stockage, il est préférable d'anticiper la déconstruction du bâtiment et de stocker dans la banque les informations de son double digital. La banque de matériaux numérique est ainsi connectée au modèle BIM pour

89 Akbarieh et al., « Extended Producer Responsibility in the Construction Sector through Blockchain, BIM and Smart Contract Technologies ».

échanger les informations relatives au cycle de vie du bâtiment et donc à son passeport des matériaux. ⁸⁹

Plateformes de Vente

Entreprises	Pays	Concept
Rotor Deconstruction ⁹⁰	Belgique	Rotor DC est une coopérative qui organise la réutilisation de matériaux de construction. Elle organise le démantèlement, transforme et vend les matériaux de construction qui sont disponibles sur la plateforme de vente en ligne : rotordc.com
Cycle Up ⁹¹	France	Cycle Up propose sur sa plateforme des outils et des services. Elle propose une Marketplace pour vendre des matériaux de construction ainsi qu'un outil capable d'analyser les maquette BIM (format IFC) et de visualiser rapidement l'ensemble des matériaux de réemploi disponibles sur Cycle Up correspondants au projet.
Globechain ⁹²	Royaume-Unis	Globchain est une plateforme de mise en relation entre l'offre et la demande. Elle met en contact des acheteurs potentiels avec des vendeurs de matériaux réutilisables.
Salza ⁹³	Suisse	Salza propose des éléments de construction, à la vente, sur sa plateforme en ligne. Les offres sont publiées avant la déconstruction. Salza propose également un service d'assistance au réemploi en prenant la direction des opérations.

90 Rotor Deconstruction, « Rotor Deconstruction ».

91 Cycle Up, « Le concept Cycle Up ».

92 Globechain, « Globechain | How it works ».

93 Salza, « Salza - Prestations ».

PASSEPORT DE MATÉRIAUX

Les passeports de matériaux (Material Passport en anglais), abrégé MP, documentent les éléments de construction. C'est un ensemble de données électroniques qui fournissent les informations nécessaires sur les matériaux, les produits et les composants d'un ouvrage pour une utilisation circulaire. Les données décrivent les caractéristiques des éléments, (fenêtres, portes, escaliers, et autres), mais également les composants structuraux, (poutres en fer, panneaux de verre, et autres) et les matières premières (bois, acier, et autres) d'un bâtiment. Le but est de fournir des informations utiles pour la récupération, le recyclage et la réutilisation des parties mentionnées après la déconstruction.⁹⁴ Les MP sont donc également intéressants pour organiser les démolitions car ils permettent d'optimiser la gestion des déchets et la planification de la logistique.⁹⁵ Les MP sont actuellement développés par plusieurs organisations, principalement en Europe.

94 Bertino et al., « Fundamentals of Building Deconstruction as a Circular Economy Strategy for the Reuse of Construction Materials ».

95 Kovacic et Honic, « Scanning and Data Capturing for BIM-Supported Resources Assessment ».

PLATEFORMES DE SERVICES

Les plateformes numériques offrent divers services en lignes. L'utilisateur peut avoir accès à différents outils afin d'estimer par exemple la valeur de son bien ou accéder à différentes informations relatives à ses composants. D'autres permettent également de mettre en contact des compagnies afin de permettre le recyclage et la réutilisation des matériaux.

Madaster est l'une de ces plateformes numériques qui se définit comme une bibliothèque numérique de matériaux. Elle permet d'enregistrer et de documenter les produits et les éléments utilisés dans les constructions. L'objectif de la plateforme est de proposer une solution de stockage sécurisée, enrichie intelligemment, facilement partagée et gérée. Elle permet aux acteurs concernés de biens immobiliers et d'infrastructures de disposer d'informations actualisées sur la valeur financière et circulaire, la toxicité, les possibilités de démontage et le potentiel de réutilisation des matériaux et produits utilisés dans leurs biens. L'objectif global de Madaster est de réduire les déchets en dotant les matériaux d'une identité.

96 « Platform ».

97 Kovacic et Honic, « Scanning and Data Capturing for BIM-Supported Resources Assessment ».

96,97

La plateforme génère un passeport des matériaux pour les bâtiments et les éléments de construction. Les informations appartiennent aux propriétaires qui peuvent en partager l'accès. Il est également possible de partager les informations avec des services tiers, tels que des évaluateurs, des services de vente en ligne pour matériaux de construction et des gestionnaires de biens.⁹⁸

98 « Platform ».

Les informations, des MP stockés sur la plateforme Madaster, sont entièrement fournies par l'utilisateur. Le MP représente l'enregistrement des matériaux et produits d'un ou plusieurs bâtiments, ou d'une partie d'un bâtiment. Cet enregistrement est basé sur un ou plusieurs fichiers sources provenant et importé par l'utilisateur. Ce dernier est responsable des données qu'il fournit. Les données importées comprennent des données sur les quantités, la classification des matériaux en familles de matériaux, ainsi que le codage de la classification. Pour construire le MP Madaster utilise les données fournies par l'utilisateur au format IFC (2x3). Les différentes représentations des matériaux dans le Passeport des Matériaux sont basées sur ces données. Par conséquent, la qualité du Passeport des Matériaux dépend entièrement de l'exactitude et de l'exhaustivité des données fournies par l'utilisateur.⁹⁹

99 Madaster, « Material Passport - Training the Arc ».

Plateformes de Services

Entreprises	Pays	Concept de la plateforme
Loopfront ¹⁰⁰	Norvège	Loopfront offre un service qui couvre tout le processus de récupération des matériaux. Elle fournit les outils et la plateforme pour réaliser l'analyse, la documentation ainsi que la redistribution des éléments de construction.
Bimeo ¹⁰¹	France	Bimeo propose deux services. App.bimeo est une plateforme collaborative BIM qui permet de visualiser les projets, de les éditer ainsi que de les partager. ArtoBuild est une application qui couplée avec la plateforme DATAtoBuild permet depuis un iPad Pro de construire automatiquement les plans 2D et 3D en IFC2x3 et IFC4 d'un bâtiment.
Excess Material Exchange (EME) ¹⁰²	Pays-Bas	EME propose un service de mise en correspondance de l'offre et la demande de matériaux de construction. Il comprend la production d'un passeport digital, l'identification par codes QR, l'analyse de l'impact environnemental et la vente des matériaux.

100 Loopfront, « Loopfront - Recycling and Reuse Made Easy ».

101 bimeo, « De la conception à l'exploitation de la maquette numérique ».

102 Excess Materials Exchange, « Excess Materials Exchange ».

LA BLOCKCHAIN

INTRODUCTION

Le BIM est une méthodologie permettant de créer une représentation numérique en 3D d'un bâtiment dans laquelle toutes les informations relatives au bâtiment sont stockées, gérées et communiquées. Un modèle BIM peut accumuler les informations de construction et fournir des données structurées à toutes les parties prenantes. Bien que le BIM gère et stocke les données, il ne les authentifie pas. Cependant, vérifier l'authenticité et l'intégrité des données est possible en couplant le BIM et la technologie blockchain. Cette synergie offre un moyen sécurisé pour la propriété et le suivi des données.¹⁰³ La blockchain est, avec l'intelligence artificielle et la robotique, au cœur de ce que l'on nomme la quatrième révolution industrielle. Cependant, même si elle a donné dans ce contexte une abondance de recherches spéculatives, très peu de mise en œuvre réelles ont démontré le potentiel de la technologie.¹⁰⁴

L'utilisation d'une base de données BIM centralisée fonctionne uniquement si la confiance de tous les partis prenants est accordée au propriétaire et à l'infrastructure de la base de données. Toute défaillance se traduit par une perte de données et d'intégrité pour l'ensemble du système BIM. La question de la confiance et de la gouvernance est également liée à la transparence et à la propriété des fichiers BIM sur lesquels opère une équipe. Dans le cadre de la déconstruction et de développement de stratégie « d'urban mining » à grande échelle, le nombre d'intervenant dans un fichier BIM centralisé peut être conséquent. La technologie blockchain peut apporter une réponse à ces problèmes en améliorant de manière significative le système, en décentralisant le contrôle des informations.¹⁰⁵

FONCTIONNEMENT

La blockchain est la technologie utilisée par les crypto-monnaies numériques, la plus connue étant le Bitcoin. La blockchain est une technologie de registres distribués (Distributed Ledger Technologies en anglais), abrégé DLT, qui est simplement une base de données décentralisée gérée par plusieurs participants. Elle enregistre l'historique des transactions sur des nœuds de manière décentralisée. Un nœud est un ordinateur indépendant qui, en plus de stocker les informations, partage et synchronise les transactions dans leur registre respectif, formant une chaîne de blocs. Chaque nœud valide et enregistre les transactions simultanément. Une chaîne de

103 Akbarieh et al., « Extended Producer Responsibility in the Construction Sector through Blockchain, BIM and Smart Contract Technologies ».

104 Dounas, Lombardi, et Jabi, « Framework for Decentralised Architectural Design BIM and Blockchain Integration ».

105 Akbarieh et al., « Extended Producer Responsibility in the Construction Sector through Blockchain, BIM and Smart Contract Technologies ».

blocs, ou blockchain, est un type particulier de DLT. L'intérêt de la blockchain en tant que registre de transactions est que si un utilisateur modifie un seul bloc de la chaîne, la blockchain originale sera régénérée pour cet utilisateur uniquement. En conséquence, cet utilisateur serait « mis en évidence » pour indiquer qu'il a modifié la blockchain originale. Les DLT ont initialement été conçues pour procéder à des transactions au sein d'un environnement de confiance. Les blockchains permettent à une communauté d'acteurs ne se faisant pas confiance d'atteindre un consensus quant à l'intégrité et l'immuabilité d'un registre commun de transactions sans intervention de tiers.¹⁰⁶

106 Brandin et Abrishami, « Information traceability platforms for asset data lifecycle ».

Actuellement, la blockchain est utilisée pour enregistrer avec précision les modifications apportées à un modèle BIM, auquel un groupe d'utilisateurs a accès. Dans ce système, le groupe d'utilisateurs peut savoir qui a fait quelle modification à un moment donné. La blockchain peut être ainsi utilisée pour gérer et créer des registres de transactions fiables lors d'échanges. Elle peut par exemple contenir les informations numériques d'un passeport de matériaux et suivre l'emplacement de l'élément tout le long de son cycle de vie.¹⁰⁷

107 Copeland et Bilec, « Buildings as Material Banks Using RFID and Building Information Modeling in a Circular Economy ».

ARCHITECTURE DE LA BLOCKCHAIN

Une blockchain constitue une base de données qui contient l'historique de tous les échanges effectués entre ses utilisateurs depuis sa création. La structure des données d'une Blockchain consiste en une chaîne de blocs qui contient des transactions. Chaque bloc possède un identifiant, qui prend la forme d'un hash permettant de relier les blocs les uns aux autres. Le hash est le résultat du « hachage » du bloc précédent. Le « hachage » est une fonction qui permet de convertir un ensemble de données numériques en une chaîne alphanumérique, l'empreinte numérique. Le hash d'un ensemble de données peut ainsi être comparé à une empreinte digitale, bien moins complexe que l'individu entier, mais l'identifiant de manière précise et unique. Chaque bloc de la blockchain contient la valeur du hash du bloc précédent, qui a validé et confirmé la transaction sur la blockchain. Si un utilisateur malveillant tente de modifier le contenu d'un bloc, n'importe qui peut le détecter en calculant son hash et en le comparant au hash stocké dans le bloc suivant. Pour valider la modification des échanges, l'utilisateur devrait modifier l'ensemble du réseau en changeant tous les hash. Ceci est protégé par le fait que l'utilisateur a besoin du consensus de plus de la moitié des autres utilisateurs pour être validé.¹⁰⁸

108 Brandin et Abrishami, « Information traceability platforms for asset data lifecycle ».

Les contrats intelligents (« smart contracts » en anglais) sont des programmes déployés dans une blockchain. Ils permettent de convertir les contrats traditionnels en équivalents numériques. Concrètement, il s'agit d'un contrat qui s'exécute automatiquement si des conditions définies au préalable et inscrites dans la blockchain sont remplies. Par conséquent, grâce aux smart contracts, une grande variété d'applications décentralisées et de fonctionnalités innovantes peuvent être mises en œuvre sur la blockchain. Comme d'autres transactions dans un réseau blockchain, une fois le smart contracts exécuté, il est inscrit sur le réseau avant d'être validé par les utilisateurs par le biais d'un processus de consensus. L'élimination du biais humain dans l'emploi du contrat augmente la confiance et l'équité entre les participants.¹⁰⁹

L'adoption des smart contracts présente de multiples avantages, comme l'accélération des tâches bureaucratiques. Dans le cadre de l'application des principes d'urban mining à grande échelle, les smart contracts favoriseraient la réutilisation des éléments de construction en supprimant les besoins d'intermédiaires, en accélérant le traitement des contrats et en réhaussant notamment le niveau de confiance entre les divers intervenants.¹¹⁰

NFTs

Un NFT (Non-Fungible Token en anglais), est un jeton non fongible qui permet de prouver la propriété d'un objet unique. Un NFT est un jeton numérique stocké sur une blockchain possédant des caractéristiques qui lui sont propres. Cela signifie que l'objet n'est pas interchangeable. Les NFTs permettent de symboliser n'importe quels objets du monde réel ou du monde numérique. Actuellement c'est principalement le monde de l'art qui en bénéficie, mais le principe peut facilement être étendu à n'importe quel actif, même immobilier.

Un NFT peut appartenir qu'à un seul propriétaire à la fois. La propriété est vérifiée au travers d'un identifiant unique et de métadonnées qu'aucun autre jeton ne peut dupliquer. Les NFT sont frappés par des smart contracts qui attribuent la propriété et gèrent la transférabilité des NFT. Lorsqu'une personne crée un NFT, elle exécute un code stocké dans des smart contracts conformes à différentes normes.¹¹¹

La démocratisation des NFTs dans le domaine de la construction permettrait de résoudre certaines problématiques relatives au BIM et à l'échange de données dans le cadre de la déconstruction.

109 Akbarieh et al., « Extended Producer Responsibility in the Construction Sector through Blockchain, BIM and Smart Contract Technologies ».

110 Brandín et Abrishami, « Information traceability platforms for asset data lifecycle ».

111 ethereum.org, « Non-fungible tokens (NFT) ».

Les NFTs permettraient de vérifier l'authenticité des objets ainsi que leur qualité. Ceci en partageant les informations uniques, des propriétés des objets physiques, comme la rareté, l'unicité et la preuve de propriété.

Blockchain

Outil	Projet	Protocole	Auteur	Commentaires
Protocole blockchain	Ethereum ¹¹²	Ethereum	Vitalik Buterin	Le protocole Ethereum est le leader dans la gestion de smart contracts.
Projet blockchain	Block Materials ¹¹³	Inconnu	Block Materials	Le projet Block Materials inscrit dans la blockchain le droit de propriété de matériaux, de biens existants.
Projet blockchain	BIMchain ¹¹⁴	Ethereum	Own Your Business LTD (OYB)	La solution intègre la technologie blockchain pour certifier l'origine, la propriété et l'intégrité des données dans le processus de transfert de production BIM.

112 ethereum.org, « What Is Ethereum? »

113 Block Materials, « Block Materials ».

114 BIMChain, « BIMChain ».

Les Défis de la Déconstruction

Perspectives Historiques

La valorisation des éléments de construction est notable jusqu'au XX^{ème} siècle qui marque un point de rupture soudain. C'est une série de facteurs qui fait perdre au réemploi du terrain.

Pendant le XIX^{ème} siècle, la déconstruction est une pratique courante en Europe. Des entreprises de déconstruction et de revente opèrent notamment en France. Achille Picart est une figure importante de cette époque. C'est lui qui en 1882 se charge du démantèlement du Palais des Tuileries et écoule les matières premières pour construire le château de Punta en Corse. A cette époque, les entreprises de déconstruction gagnent de l'argent en revendant les matériaux.

Après la Première Guerre Mondiale, l'augmentation de la pression foncière, le manque d'espace disponible ainsi qu'une situation de plus en plus congestionnée à l'intérieur des métropoles rend l'évacuation des matériaux plus difficile. C'est alors que les entreprises de démolitions commencent à vouloir se faire payer pour prester leurs services.

Jusqu'alors, les travaux de démolition et la revente de matériaux, étaient un poste qui rapportait de l'argent au chantier. C'est désormais un poste qui augmente les coûts de ce dernier. Une nouvelle politique de gestion de la déconstruction se développe également. Les retards, lors de la démolition, sont pénalisés alors que des bonus sont offerts pour un travail achevé avant le délai.

La mécanisation de la démolition, avec notamment l'invention de la boule du démolisseur, fait définitivement passer le réemploi d'une pratique courante à une forme de marginalité dans les années 1920. En plus de l'augmentation des salaires, l'apparition de certains mortiers au ciment compliquent encore les opérations de nettoyage.

Certains matériaux sont encore récupérés dans les années 1930. C'est finalement la Seconde Guerre Mondiale qui va achever définitivement la pratique de la récupération des matériaux de construction. Avec le développement de l'hydraulique qui rend les machines plus efficaces, se développent les décharges et l'abandon sur les terrains inutilisés.¹¹⁵



Château de la Punta
©Herve20000
<https://www.connaissancedesarts.com/>

Le Monde Professionnel

Ce chapitre interroge l'état de la pratique de la réutilisation des matériaux de construction en Suisse romande, plus précisément autour de l'Arc lémanique. Pour son écriture, cinq interviews ont été menées auprès de professionnels du domaine de la construction. Les questions concernent les outils et les méthodes utilisés, mais également les difficultés que pose la déconstruction.

La sélection des corps de métier et donc des entreprises a été, pour les trois premiers cas, effectuée en fonction des prestations offertes en lien avec les outils numériques. Il s'agit, dans l'ordre des réponses obtenues, de la société JCT conseils SA, société d'experts dans le domaine de la construction et du génie-civil, de la société Scanways, spécialiste du relevé numérique, et finalement de la société 3D Swiss View Sàrl, experte dans le domaine des visites virtuelles et de la numérisation 3D.

Le bureau d'architectes F. Baud & T. Früh Atelier d'architecture SA ainsi que le groupe Orlatti ont été contactées, dans un second temps, à la suite des recommandations de l'entreprise JCT conseils et de l'entreprise Scanways.

Les opinions exprimées lors de ces interviews n'engagent que leurs auteurs et ne sauraient refléter en aucun cas la position des entreprises.

LE CAS JCT CONSEILS SA

L'entreprise JCT Conseils SA est une entreprise relativement jeune, installée à Genève depuis janvier 2012. Elle est composée d'une équipe pluridisciplinaire d'architectes et d'ingénieurs. JCT Conseils SA travaille avec de grandes entreprises de construction en Suisse et à l'international, pour le compte d'institutions publiques ou de particuliers.¹¹⁶

116 JCT conseils, « JCT conseils ».

Les services proposés par l'entreprise JCT Conseils SA, en lien avec le processus de déconstruction, concerne le relevé de bâtiments. Elle propose d'effectuer ces derniers à l'aide de scanner laser 3D fixe. Dans le cadre de petits projets, par exemple le relevé d'un studio, l'entreprise favorise l'utilisation de techniques traditionnelles de relevé, le double mètre et le télémètre laser. C'est une méthode considérée plus rapide à mettre en œuvre que l'installation compliquée du scanner 3D fixe. Pour des relevés plus importants et selon la demande du client, l'entreprise propose une mo-

délisation 2D ou 3D du bâtiment. Ceux-ci sont effectués avec un scanner laser 3D fixe. C'est pour elle, l'outil le plus performant pour effectuer des relevés. Généralement, l'entreprise utilise le scanner 3D fixe à l'interne, afin d'optimiser l'efficacité de travail dans les projets d'agrandissement ou de rénovation. Ils utilisent également le scan comme moyen de contrôle et de suivi de chantier.

Les outils BIM sont utilisés uniquement pour réaliser des modélisation 3D. Dans le cadre des projets effectué par le bureau, les éléments de construction ne sont jamais détaillés car il est nécessaire de faire des sondages et de percer les murs.

DÉCONSTRUCTION

L'entreprise n'a jamais été confrontée à un processus de déconstruction dans le but de récupérer les matériaux. Dans le cas de la déconstruction, l'entreprise proposerait de faire une estimation avec des sondages pour connaître la structure et les volumes du bâtiment à déconstruire. L'objectif de ceci serait de réaliser un descriptif des volumes de démolition. Elle proposerait également de se servir d'une base existante de plans 2D. Dans le cas où aucun plan existant ne serait disponible, l'entreprise proposerait d'effectuer un relevé pour construire ces plans. Ils seraient utilisés comme base pour calculer le budget nécessaire à la démolition et l'analyse des polluants.

TÉMOIGNAGES

Pour les petites structures, il est difficile de suivre les évolutions technologiques. Il est non seulement nécessaire de former le personnel, ce qui est une opération coûteuse, mais il est également difficile de savoir quelle solution choisir parmi la multitude de développements et de nouvelles technologies proposées chaque année. Il est également nécessaire d'investir dans des outils puissants pour réaliser les tâches de numérisation et celles-ci sont chronophage, ce qui peut économiquement parfois être difficilement acceptable.

L'entreprise juge également la faisabilité de la déconstruction impossible pour l'instant car ceci implique un effort de l'ensemble des acteurs. Selon le fonctionnement actuel des entreprises de démolition, c'est un travail qui est économiquement irréalisable. Les entreprises de démolition ne sont également pas soigneuses et la qualité générale du travail en Suisse se dégrade. Finalement, la réutilisation de certains matériaux pose également des problèmes, car l'évolution des normes empêche le réemploi.

LE CAS SCANWAYS

L'entreprise Scanways est active depuis plus de 20 ans dans les domaines de la construction et de la gestion du territoire. Implantée à Genève, l'entreprise mise sur la qualité et la précision. L'entreprise souhaite s'imposer comme le leader du scan-to-bim multi techniques en Suisse et à l'étranger.

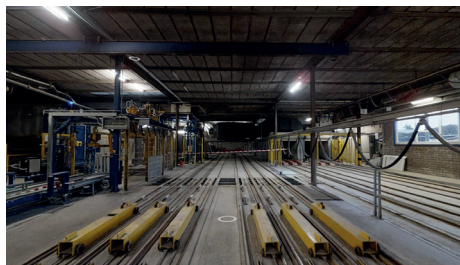
L'entreprise est spécialisée dans la capture et acquisition des données 3D géoréférencées du territoire, des bâtiments et des objets. Elle travaille avec du matériel de lasergrammétrie de haute précision ainsi qu'une palette de logiciels de traitement des données permettant de restituer un nuage de points de haute qualité. L'entreprise est également spécialisée dans l'utilisation de la photogrammétrie, en cas de nécessité de numériser de grandes surfaces ou des zones inaccessibles. Cette technologie permet à l'entreprise Scanways de capturer des données par drone, ce qui réduit les coûts tout en conservant la qualité et la précision requises. En cas de nécessité, l'entreprise loue le matériel adéquat, qu'il s'agisse de systèmes LiDAR aéroportés ou de solutions mobiles. L'entreprise fournit des mesures 3D et des données BIM pour tous les corps de métier afin de permettre l'identification avec précision de la position de tous les éléments constituant un bâtiment. Sa clientèle est principalement composée de bureaux d'architectes, de bureaux techniques et parfois directement de maîtres d'ouvrage.¹¹⁷

117 Scanways.io, « Scanways.io ».

Généralement Scanways fournit à ses clients une maquette BIM et il est très rare que la demande concerne une 3D purement géométrique. Pour la reconstruction des maquettes BIM, c'est l'entreprise sœur de Scanways, Idessin qui est responsable. La société Idessin est composée de deux pôles principaux, un pôle responsable du dessin architectural et un pôle responsable du dessin CVS et technique. Les modelleurs, des deux pôles Idessin, sont issus des métiers respectifs afin d'avoir l'expertise nécessaire pour produire de vraies maquettes BIM informationnelles. Ces maquettes sont principalement exploitées dans le cadre de projets de rénovations ou dans le cadre de la maintenance de bâtiment, pour de la maintenance prédictive par exemple.

RÉEMPLOI

L'entreprise Scanways est intervenue dans un projet de déconstruction et de relocalisation d'une chaîne de production industrielle. Située en Suisse allemande proche de Heimberg, une



Capture de visite virtuelle - ligne de production industrielle de plaques de plâtre.
©Scanways
Scanways
[reproduit avec l'aimable autorisation de l'auteur]

chaîne de production de carreau de plâtre a été démontée pour être vendue et remontée en Israël. Le bâtiment était composé de plusieurs fosses servant à effectuer la maintenance, et contenait tout un système de ponts-roulants sur rails. Il devait être remonté à l'identique afin de pouvoir accueillir la chaîne de production avec un niveau de précision relativement élevé.

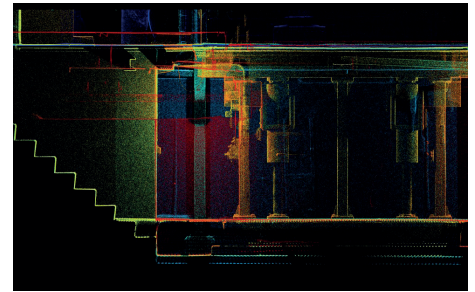
Les éléments de la chaîne de production étaient numérotés et les ouvriers disposaient de plans pour le remontage. Pour la reconstruction, l'entreprise Scanways a fourni deux documents. Un nuage de points pour vérifier chaque mesure afin de reconstruire à l'identique le bâtiment et une visite virtuelle permettant aux ouvriers de vérifier, en cas de doute, la position des éléments de la chaîne de production.

L'intervention de l'entreprise Scanways a été, sur ce chantier, effectuée dans l'urgence. Lors des travaux en Israël, les dimensions du bâtiment en construction n'étaient pas conformes à celles du bâtiment existant. L'équipe responsable du démontage et du remontage de la chaîne de production s'était aperçu qu'il y avait des incohérences et que des corrections avec des méthodes de mesures traditionnelles n'allaient pas être réalisables en un temps acceptable. Pour rectifier cela, l'entreprise Scanways est intervenue en urgence deux jours avant le démontage en Suisse de la chaîne de production afin de numériser le site et pouvoir fournir des mesures exactes aux ouvriers israéliens.

TÉMOIGNAGES

Pour l'instant la modélisation est un travail qui prend beaucoup de temps. Un jour de numérisation sur site équivaut à environ quatre jours de modélisation au bureau. Des logiciels d'automatisation sont en cours de développement. Le développement de reconnaissance d'objets est cependant un travail qui nécessite du temps car pour faire fonctionner les logiciels d'intelligence artificielle, il est nécessaire de constituer des bibliothèques d'apprentissage. Scanways effectue des petits développements à l'interne qui vont dans ce sens, mais c'est un processus long et gourmand en ressources. L'entreprise est une petite structure et qui peut uniquement agir dans la limite de ses moyens et pendant le peu de temps libre à sa disposition. La fiabilité de ces solutions est également encore limitée à 70-80% ce qui n'est pas suffisant. Pour l'instant l'entreprise n'utilise pas ce genre de solutions, car elles ne sont pas conformes à son gage de qualité.

Le réemploi va se démocratiser, mais c'est l'économie qui va décider et tant qu'il sera plus économique de produire du neuf on



Coupe dans le nuage de points - fosse de maintenance de la chaîne de production
©Scanways
Scanways
[reproduit avec l'aimable autorisation de l'auteur]

continuera sur cette voie. De plus l'impact du prix pour scanner et répertorier les éléments de construction est faible si on le compare au prix de la déconstruction. Même si le processus s'automatise et qu'il y a moins de mains d'œuvre à payer, l'impact sur le prix sera tellement infime sur le prix total que ce n'est pas ça qui sera déterminant.

LE CAS 3D SWISS VIEW SÀRL

L'entreprise 3D Swiss View Sàrl est implantée à Martigny et Romanel-sur-Lausanne. Elle est active principalement en Suisse romande et parfois en Suisse allemande. Les prestations de l'entreprise concernent la visite virtuelle et le scanning 3D. Elle est active dans les domaines du tourisme, du commerce, de l'immobilier, du transport et de la technique du bâtiment.

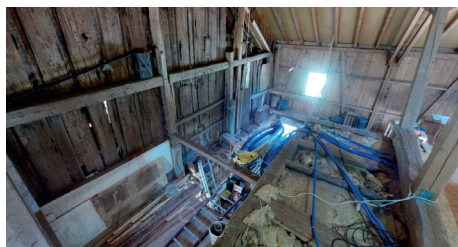
L'entreprise propose la numérisation en 3D de bâtiment par lasergrammétrie avec un laser scanner 3D fixe et la construction de visites virtuelles. Elle propose également l'utilisation de la photogrammétrie par drone pour capturer les endroits inaccessibles. Les prestations fournies par 3D Swiss view s'adressent principalement aux architectes et aux propriétaires privés. Elle propose de livrer soit le nuage de points soit des plans 2D ou une maquette BIM contenant uniquement des informations de géométrie 3D.¹¹⁸

118 3D SWISS VIEW, « Marketing Digital - 3D SWISS VIEW ».

DÉCONSTRUCTION

L'entreprise 3D Swiss View n'a pas d'expérience particulière dans la déconstruction. Elle propose cependant l'utilisation d'outils numériques d'une manière simple et probablement efficace dans le contexte économique actuel. Il s'agit d'effectuer un scan 3D en basse résolution du bâtiment à déconstruire et de le coupler avec une visite virtuelle. Le travail de capture sur le terrain est ainsi rapide et peu onéreux. Il s'agit ensuite d'uploader le scan et la visite virtuelle sur un serveur, grâce aux nombreuses solutions disponibles sur le marché actuellement, et de les partager avec les acteurs du processus de déconstruction. Finalement le responsable du chantier annote et communique, au travers de la visite virtuelle, les éléments à récupérer aux entreprises de démolition.

Cette solution n'intègre pas le processus complet du démantèlement du bâtiment en fin de vie jusqu'à la réutilisation des éléments de construction dans un bâtiment neuf, mais a le mérite d'être efficace et fonctionnelle aujourd'hui dans son domaine.



Les visites virtuelles permettent de facilement visualiser et annoter les éléments de construction
©3D Swiss View SàRL
3D Swiss View
[reproduit avec l'aimable autorisation de l'auteur]

LE CAS F. BAUD & T. FRÜH ATELIER D'ARCHITECTURE SA

L'entreprise F. Baud & T. Früh Atelier d'architecture SA est implanté à Genève depuis 1990. C'est un bureau d'architectes dont les préoccupations intègre et synthétise les contraintes environnementales, sociales et économiques de chaque projet.

L'expérience de l'entreprise a été acquise au travers d'une grande variété de projets, réalisés sous différentes formes de partenariat. Elle met un point d'honneur à intégrer le plus tôt possible la pluridisciplinarité au sein de la conception de ses projets. Ceci permet de répondre aux défis de notre époque, dans le cadre de la rénovation et de la planification de nouvelles constructions en élaborant des solutions énergiquement efficaces et respectueuses de l'environnement.¹¹⁹

RÉEMPLOI

Dans le cadre du chantier PAV pointe Nord à Genève, le bureau F. Baud & T. Früh Atelier d'architecture SA intègre la composante du réemploi. Il s'agit d'un projet de rénovation de bâtiments industriels en locaux administratifs pour des services de l'Etat de Genève.

Le mobilier et les petits éléments facilement démontables et remontables, non utiles pour le projet ont été confiés à l'association Materium. Le démontage de ceux-ci a été effectué par des membres de l'association qui a stocké le matériel dans les locaux annexes sur le chantier.

Les éléments de construction en bon état et réutilisables dans le projet ont été identifiés au départ sur plans et dans les appels d'offres. Lors d'une visite du site, une analyse précise sur la réelle possibilité de démontage/remontage par des gens qualifiés et un tri selon l'état des éléments a été effectué. Il s'agit de portes, de faux-planchers, de faux-plafonds, de luminaires, d'appareils sanitaires et d'armoires. Au démarrage du chantier, ils ont été identifiés par des pastilles de couleurs afin de vérifier leur état et remettre à jour les quantitatifs. Ils ont ensuite été démontés par chaque CFC concernés et stockés au chantier dans des locaux annexes pour être reposé au fil de l'avancement des travaux. Tous les éléments identifiés n'ont pas pu être réutilisés, les cadres de portes étaient trop difficiles à enlever et les panneaux avaient été dégradés lors du déménagement des propriétaires précédents. Ils étaient également incompatibles avec les besoins acoustiques et les normes feu.

119 François Baud & Thomas Früh · Architectes, « Projets | F. Baud & T. Früh ».



Chantier du PAV pointe Nord à Genève
©Julien Porret

Les matériaux de valeurs, des pierres de parement de façade en marbre noir, vert des Alpes et calcaire blanc ont été démontés par le démolisseur et stockés sur le chantier en attendant d'être transportés dans une gravière pour y être concassées en graviers. Ceux-ci seront réemployés dans les aménagement extérieurs comme revêtement de sol.

Les objets de réemploi « manquants » pour le projet sont complétés par des éléments neufs semblables. Ceci concerne par exemple les poignées de porte ou les vitrages verticaux identiques à l'existant dans les portes neuves.

OUTILS NUMÉRIQUES

L'utilisation des outils numériques dans le cadre de ce projet est très basique. Les plans originaux ont été redessinés sur Archicad et complétés par des relevés effectués sur place. Ils ont permis d'effectuer les métrés et le repérage des éléments à récupérer. Pour répertorier les éléments démontés, les entreprises ont utilisé leur propre fichier Excel. Dans la maquette BIM, les éléments étaient simplement classifiés en réemploi, ce qui permettait de les différencier pour les visualiser facilement en plan.

TÉMOIGNAGE

Trouver des entreprises qualifiées pour la déconstruction est une tâche difficile. C'est un métier nouveau et il est difficile de demander aux démolisseurs de devenir des démonteurs / déconstructeurs. Il existe une vraie marge de progression pour une entreprise qui voudrait développer cette activité mais qui nécessite toute une hiérarchie de personnel formé, soigneux et adapté aux différents CFC. Dans ce cas, ils ont choisi l'option de faire démonter les éléments réemployés par les CFC qui seront chargés de les remonter à la fin du chantier, afin de garantir la qualité des opérations dans les deux sens.

LE CAS ORLLATI (GE) SA

L'entreprise Orllati est l'un des acteurs majeurs de la construction en Suisse romande. L'entreprise possède une expérience importante dans le cadre de la démolition et de la déconstruction avec notamment une expertise dans le cadre des travaux de désamiantage, d'assainissement, de sciage et de forage du béton.¹²⁰

L'entreprise Orllati est engagée écologiquement, dans une volonté de préserver au maximum les ressources naturelles. À Bioley-Orjulaz, elle a créé un pôle d'écologie industrielle regroupant

120 Groupe Orllati SA, « Entreprise | Orllati ».

sur un même site des activités industrielles, une zone nature et des terrains agricoles. Elle a mis en place un circuit court de revalorisation des matériaux qui permet de traiter les matériaux de déconstruction, de traiter les terres polluées et de recycler les matières dans la production de béton recyclé.

RÉEMPLOI

L'entreprise Orllati a été soumissionnée par le bureau d'architecte responsable du chantier des halls, le long de la route des Jeunes à Genève pour effectuer la démolition. Pendant le chantier, les ouvriers ont remarqué la possibilité de récupérer les éléments de structure des toitures. Il s'agit de poutres en bois lamellé collé (BLC) ainsi que de pannes et de chevrons en bois. La déchetterie Ducret qui s'occupe de l'évacuation des déchets de chantier, s'est proposée pour récupérer les poutres en BLC afin de construire un couvert pour les bennes de la déchetterie. Par du bouche à oreilles, le reste des poutres a été fourni à des agriculteurs de la région. Finalement l'entreprise Orllati a récupéré les pannes et les chevrons de bois pour les utiliser comme matériel de coffrage sur de futurs chantiers.

En dehors des chantiers où les entreprises sont soumissionnées, la récupération de matériaux dans les chantiers de démolition est une opération fréquemment menée par les ouvriers. Tous les éléments en bon état et potentiellement réutilisables peuvent être récupérés, des fenêtres aux cuisinières. Les opérations de récupération sont effectuées par le propre chef des ouvriers et la distribution des matériaux est organisée par le bouche à oreille. Le chantier où les personnes qui récupèrent les éléments de construction doit être déterminé avant le démontage. S'il est nécessaire de ramener les éléments au dépôt de l'entreprise pour les stocker avant de les réutiliser, l'opération n'est financièrement par réalisable.

Observations

Introduction

Ce document décrit des outils, des technologies et des méthodes pour la déconstruction et la réutilisation d'éléments de construction dans le cadre de l'économie circulaire. Il couvre les techniques depuis la phase d'analyse du potentiel de déconstruction des éléments jusqu'à la vente de ceux-ci.

Il est évident que le concept d'économie circulaire ne se limite pas à l'urban mining et à la déconstruction. Les concepts de « Design for Deconstruction » (DfD) ; élaboration d'un nouveau bâtiment déconstructible et de « Life Cycle Assessment » (LCA) ; analyse de l'état physique et d'affectation d'un bâtiment, sont tous deux des exemples qu'il serait aussi nécessaire d'approfondir car ils font également usage d'outils numériques.

Dans ces deux cas, la plupart des outils restent valables. Effectivement, le développement du Machine Learning ou de la blockchain permettent le développement d'outils pour aider le processus de décision dans les projets de construction en utilisant des modèles BIM.

Les concepts du DfD sont notamment la condition nécessaire pour atteindre un taux de récupération maximal de matériaux dans le cadre de la déconstruction dans le bâtiment.

Ce chapitre compile différentes conclusions, propositions et remarques qui ont germées tout au long des recherches et des interviews qui ont permis l'élaboration de ce document. Toutes ces réflexions sont évidemment à contextualiser dans le cadre du réemploi et des outils numériques.

Introduction

This document describes tools, technologies and methods for deconstruction and reuse of building components in the circular economy. It covers techniques from the phase of analysing the deconstruction potential of the components to the sale of the components.

The circular economy concept is not limited to urban mining and deconstruction. The concepts of “Design for Deconstruction” (DfD); development of a new deconstructable building and “Life Cycle Assessment” (LCA); analysis of the physical condition and use of a building, are both examples that would also need to be explored further as they also make use of digital tools.

In both cases, most of the tools remain valid. Indeed, the development of Machine Learning or blockchain allow the development of tools to support the decision process in construction projects using BIM models.

In particular, the concepts of DfD are a prerequisite for achieving maximum material recovery in deconstruction in the building industry.

This chapter compiles various conclusions, proposals and remarks that have arisen during the research and interviews for this document. All these reflections are obviously to be contextualised within the framework of re-use and digital tools.

Réutiliser les Matériaux

La mise en place d'une stratégie d'urban mining et l'évaluation de son potentiel à grande échelle nécessite de recourir à de nombreuses stratégies. Il est nécessaire d'étudier rétrospectivement l'utilisation des matériaux de construction d'une ville au cours du temps. Il s'agit d'identifier les différentes typologies de bâtiments qui la composent, et d'estimer leur représentativité. Il faut ensuite déterminer la composition matérielle de bâtiments représentatifs pour chaque typologie et finalement identifier quel type de matériaux vont être évacués de manière récurrente à l'occasion de travaux de démolition.

Les matériaux réutilisables sont généralement implantés en ville. Il est difficile de mettre en place leur évacuation dans ces conditions. Le réemploi des éléments de construction peut également avoir besoin de volume de stockage importants pour les opérations de manutention et de remise en état. Ces entrepôts ont tout intérêt à être bien intégrés dans la ville, pour faciliter et raccourcir les déplacements entre les sites de déconstruction, les dépôts et les chantiers de nouvelles constructions. Les réserves de matériaux réutilisables disponibles sont dispersées et appartiennent à des propriétaires distincts et souvent privés. Pour faciliter le processus de réemploi, il est nécessaire d'établir des accords-cadres avec des maîtres d'ouvrages et des propriétaires immobiliers qui possèdent un important patrimoine bâti. Inversement, ces acteurs peuvent jouer un rôle clé dans la promotion du réemploi en systématisant le recours à cette pratique pour tous biens dont ils assurent la gestion ou l'évacuation.

Un paramètre déterminant dans la réutilisation d'éléments de construction est de déterminer si un matériau est réutilisable. Le caractère réutilisable d'un matériau dépend de l'existence d'une demande. On constate que la valeur en matière de réemploi se concentre aujourd'hui principalement dans les éléments de finition.¹²¹

121 Ghyyoot, Déconstruction et réemploi.

Les avantages environnementaux potentiels du concept d'urban mining peuvent être uniquement réalisés s'il est intégré dans une économie circulaire permettant la réutilisation systématique, ou le recyclage des éléments provenant d'un bâtiment en fin de cycle de vie. Les outils numériques présentés dans ce document offrent de nombreuses possibilités pour mettre en œuvre ce concept, mais sont également parfois limités par certains facteurs.

Reusing Materials

Implementing an urban mining strategy and assessing its potential on a large scale requires the use of many strategies. It is necessary to study retrospectively the use of building materials in a city over time. It is necessary to identify the different typologies of buildings that make up the city, and to estimate their representativeness. It is then necessary to determine the material composition of representative buildings for each typology and finally to identify which type of materials will be recurrently evacuated on demolition works.

Reusable materials are generally located in the city. It is difficult to implement their evacuation in these conditions. The reuse of building components may also require large storage volumes for handling and refurbishment operations, but also for presenting the products to potential buyers. These warehouses should be well integrated into the city, to facilitate and shorten travel between deconstruction sites, depots, and new construction sites. The available stocks of reusable materials are scattered and owned by separate and often private owners. To facilitate the reuse process, framework agreements need to be established with building owners and landlords who have a large building stock. These actors can play a key role in promoting reuse by systematising the use of this practice for any goods they manage or dispose of.

A key parameter in the reuse of building components is to determine whether a material is reusable. Whether a material is reusable depends on whether there is a demand for it. The value of reuse is nowadays mainly concentrated in the finishing elements.¹²²

The potential environmental benefits of the urban mining concept can only be realised if the concept is integrated into a circular economy allowing for the systematic reuse, recovery, or recycling of elements from a building at the end of its life cycle. The digital tools presented in this document offer many possibilities to implement this concept but are also sometimes limited by certain factors.

Scanner le Bâtiment

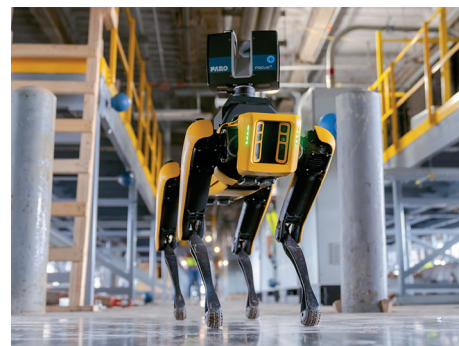
Les méthodes de capture de la géométrie du bâtiment sont considérablement développées. Le scanner laser 3D fixe reste l'outil le plus performant en termes de précisions de données capturées. Dans le cas de l'utilisation du nuage de points pour une reconstruction BIM selon l'existant, il reste actuellement l'outil incontournable.

Les solutions de captures LiDAR mobiles sont en plein développement. Elles se démocratisent, même dans l'utilisation grand publique, avec l'iPhone par exemple. Le prix des solutions de captures mobiles est environ équivalent à celui des scanners lasers 3D fixes d'entrée de gamme, qui sont bien plus précis. Pour les petites et moyennes entreprises qui ne peuvent pas se permettre d'acquérir les deux solutions, il est probablement préférable de se rabattre sur la solution fixe lorsque la précision est un critère déterminant dans l'application. Les solutions de captures mobiles permettent l'automatisation du processus de capture grâce à l'apparition des robots terrestres. Parmi les solutions de captures qui évoluent vers l'automatisation, on peut aussi noter la capture par drone qui est semi-automatisée grâce aux applications qui permettent de générer des plans de vols.

Dans le cas où les processus de réutilisation des matériaux ne passent pas par la reconstruction d'une maquette BIM, les solutions de captures mobiles de la géométrie en 3D sont matures. Plusieurs types d'outils et de solutions sont proposées. Il est désormais nécessaire de démocratiser leur utilisation dans la pratique si l'on souhaite faciliter et ainsi développer la réutilisation de matériaux. Ils permettent, notamment aux architectes, d'évaluer facilement des options de réutilisation en minimisant la nécessité de se rendre sur le site. Il en résulte un gain de temps qui peut être investi dans le travail nécessaire à la mise en place de la réutilisation.

Dans la pratique du relevé de bâtiments, l'utilisation de la photogrammétrie est généralement limitée au drone afin de capturer les endroits inaccessibles. C'est une solution relativement peu coûteuse et efficace.

Les technologies numériques utilisées pour scanner le bâtiment, afin de générer un jumeau numérique conforme à l'existant, ont un grand potentiel. Il est cependant encore nécessaire de développer la détection et l'intégration des matériaux contenus dans les élé-



Boston Dynamics Spot Mobile Robot X
FARO
©FARO
<https://media.faro.com/>

Scanning the Building

The methods for capturing building geometry are considerably developed. The 3D laser scanner remains the most efficient tool in terms of accuracy of captured data. In the case of the use of the point cloud for a BIM reconstruction according to the existing, it remains currently the essential tool.

Mobile LiDAR capture solutions are in a state of development. They are becoming more and more popular, even for the public, with the iPhone for example. The price of mobile capture solutions is about the same as that of entry-level 3D laser scanners, which are much more accurate. For small and medium sized businesses that cannot afford both solutions, it is probably best to go with the standard solution when accuracy is a key consideration in the application. Mobile capture solutions allow the automation of the capture process with the emergence of ground robots. Among the capture solutions that are moving towards automation, we can also note drone capture, which is semi-automated thanks to applications that generate flight plans.

In the case where material reuse processes do not involve the reconstruction of a BIM model, mobile 3D geometry capture solutions are mature. Several types of tools and solutions are proposed. It is now necessary to democratise their use in practice if we wish to facilitate and thus develop the reuse of materials. They allow for example the architects to easily evaluate reuse options by minimising the need to visit the site. This saves time that can be invested in the work required to implement reuse.

In building surveying practice, the use of photogrammetry is generally limited to the use of a drone to capture inaccessible areas. This is a relatively inexpensive and effective solution.

Digital technologies used to scan the building to generate a digital twin of the existing building have great potential. However, there is still a need to develop the detection and integration of the materials contained in the building elements.

Among the developments analysed, GPR technology seems to be the most promising for determining the composition of building components on site. It allows the deconstruction process to be anticipated and the building to be analysed without impacting its integrity, thus enabling inhabited construction analyses to be carried out. It also allows for an in-depth analysis of the composition of

ments de construction.

Parmi les développements analysés, la technologie GPR semble la plus prometteuse pour déterminer la composition des éléments de construction sur site. Elle permet d'anticiper le processus de déconstruction et d'analyser le bâtiment sans impacter son intégrité, ce qui permet d'effectuer les analyses de construction habitée. Elle permet également d'effectuer une analyse en profondeur de la composition des bâtiments, ce que les autres méthodes d'analyse ne prennent pas en compte.

buildings, which other analysis methods do not consider.

Construire un Double Numérique

Il y a encore beaucoup de développement à réaliser afin d'avoir des outils capables d'automatiser le processus scan-to-BIM. La modélisation manuelle, qui est le standard actuel, prend trop de temps et est sujette aux erreurs. Le manque d'automatisation dans le processus de transfert des données entre les différentes étapes, ainsi que le manque de structures, qui permettrait un transfert fluide des données, entrave l'exploitation complète du potentiel du BIM dans la déconstruction.

Le développement des algorithmes d'intelligence artificielle pour automatiser ce processus est en cours. Ce n'est qu'une question de temps avant que des outils complètement automatisés apparaissent sur le marché. Les solutions commerciales semi-automatiques sont déjà partiellement utilisées. Pour l'instant, l'obstacle principal à l'automatisation complète est le manque de données pour entraîner les algorithmes. Il est difficile de construire de grandes bibliothèques d'apprentissage et la puissance de calculs nécessaire est très importante.

Concernant les méthodes d'évaluation de la composition des matériaux du bâtiment, l'effort à effectuer dans la recherche est encore important. L'utilisation du GPR est relativement nouvelle dans le secteur du bâtiment et les bibliothèques de données GPR pour automatiser l'identification des matériaux sont quasi inexistantes.

L'application de la technologie GPR est cependant prometteuse. Elle devrait permettre la détection automatique des éléments de construction multicouches de manière non destructive. Elle pourrait contribuer à la connaissance de la composition des bâtiments existants et ainsi développer le concept d'urban mining à grande échelle. Il serait ainsi possible de connaître précisément la composition du flux de matériaux et ainsi d'optimiser le potentiel de recyclage du parc immobilier.

Implémenter le processus BIM dans les projets est également une tâche difficile. Cela nécessite de nombreux changements et adaptations dans la pratique. Bien que le BIM promette une amélioration de la productivité et la collaboration dans le secteur de la construction, celle-ci est longue et coûteuse. Généralement, la mise à jour des informations sur les bâtiments s'achève dès la phase de construction car leur maintien n'est généralement pas effectué. Les entreprises de démolition utilisent également rarement

Building a Digital Duplicate

There is still a lot of development to be done to have tools that can automate the scan-to-BIM process. Manual modelling, which is the current standard, is too time consuming and error prone. The lack of automation in the process of transferring data between the different stages, as well as the lack of structures, which would allow a smooth transfer of data, prevents the full exploitation of the potential of BIM in deconstruction.

The development of artificial intelligence algorithms to automate this process is underway. It is only a matter of time before fully automated tools appear on the market. Commercial semi-automated solutions are already partially used. For now, the main obstacle to full automation is the lack of data to train the algorithms. It is difficult to build large learning libraries and the computational power required is very high.

Concerning the methods for assessing the composition of building materials, the research effort is still important. The use of GPR is relatively new in the building sector and GPR data libraries for automated material identification are almost non-existent.

However, the application of GPR technology is promising. It should allow the automatic detection of multi-layered building components in a non-destructive way. It could contribute to the knowledge of the composition of existing buildings and thus develop the concept of large-scale urban mining. It would be possible to precisely know the composition of the material flow and thus to optimise the recycling potential of the building stock.

Implementing the BIM process in projects is also a difficult task. It requires many changes and adaptations in practice. Although BIM promises to improve productivity and collaboration in the construction sector, it is time-consuming and costly. Generally, the updating of building information is completed during the construction phase, as it is not usually maintained. Demolition companies also rarely use BIM because current practice does not involve such technological complexity. Deconstruction activities are therefore rarely organised using BIM.¹²⁴

The case of F. Baud & T. Früh Atelier d'architecture SA illustrates the above phenomenon very well. No digital tools are used in the deconstruction process, except for calculation sheets. This is only possible because the reused materials do not change their

124 van den Berg, Voordijk, et Adriaanse.

le BIM car la pratique actuelle ne s'encombre pas d'une telle complexité technologique. Les activités de déconstruction sont donc rarement organisées en utilisant le BIM.¹²³

123 van den Berg, Voordijk, et Adriaanse,
« BIM uses for deconstruction ».

Le cas F. Baud & T. Früh Atelier d'architecture SA illustre très bien le phénomène ci-dessus. Aucun outil numérique ne rentre en considération dans le processus de déconstruction, si ce n'est des fiches de calculs. Procéder de la sorte est uniquement possible parce que les matériaux réutilisés ne changent pratiquement pas d'adresse. L'atelier confirme d'ailleurs qu'il est nécessaire d'employer les mêmes équipes pour le démontage et le remontage afin de ne pas perdre les informations de conceptions (qui dans le cadre d'une déconstruction numérique seraient contenues dans le modèle BIM).

La technologie BIM atteindra son plein potentiel dans la déconstruction lorsqu'elle permettra son utilisation de manière totalement réversible. Le BIM peut actuellement être utilisé pour analyser la composition des bâtiments de manière relativement précise. Mais en l'état il n'incorpore pas suffisamment d'informations pour la déconstruction des éléments. Il est nécessaire de développer les outils BIM qui facilitent la représentation numérique des caractéristiques physiques et fonctionnelles d'une infrastructure, en intégrant également les dépendances techniques, les quantités, les propriétés et les connexions des éléments de construction.

address. The studio also confirms that it is necessary to use the same teams for dismantling and reassembling in order not to lose the design information (which in digital deconstruction would be contained in the BIM model).

BIM technology will reach its full potential in deconstruction when it allows it to be used in a fully reversible manner. BIM can currently be used to analyse the composition of buildings relatively accurately. But it does not currently incorporate sufficient information for deconstruction of elements. There is a need to develop BIM tools that facilitate the digital representation of the physical and functional characteristics of an infrastructure, also incorporating the technical dependencies, quantities, properties, and connections of the building elements.

Les Plateformes Numériques

Il existe une multitude de plateformes numériques qui recoupent des principes d'économie circulaire. Les plateformes de vente et d'échange de matériaux concernent plusieurs types de marchés distincts.

Les plateformes pour les particuliers hébergent généralement des offres ponctuelles. Cela signifie qu'il s'agit de lots de matériaux uniques, difficilement utilisables dans un processus de nouvelles constructions, mais facilement intégrables dans le cadre du bricolage par exemple.

Le secteur des antiquités architecturales est un marché de niches qui est probablement l'un des marchés les plus actifs aujourd'hui. Ces plateformes recèlent des pierres anciennes, des éléments ornementaux, des gargouilles, des colonnes en fonte, des ferronneries et pleins d'autres matériaux qui ne sont plus produits.

125

125 Ghyyoot, Déconstruction et réemploi.

Beaucoup de revendeurs remettent sur le marché également des matériaux moins exclusifs, souvent spécialisés autour d'un matériau spécifique. Ils proposent de répondre à des demandes plus pointues du domaine de la construction. Parmi les matériaux concernés, on retrouve les briques, les pavés, les carrelages, les planchers, les radiateurs ou les profils structuraux en acier.

Dans le futur les plateformes numériques seront suffisamment développées pour assister le processus de déconstruction en aidant les parties concernées à prendre des décisions au sujet des stratégies de déconstruction et de réutilisation des bâtiments existants. Elles seront couplées aux solutions numériques et permettront d'effectuer des choix plus éclairés concernant les décisions relatives à la déconstruction. Elles faciliteront la récupération des matériaux de valeur, leur réutilisation et favoriseront la mise en relation de l'offre et la demande.

Digital Platforms

There are a multitude of digital platforms that intersect with circular economy principles. Platforms for the sale and exchange of materials address several distinct types of market.

Platforms for private individuals generally host one-off offers. This means that they are one-off batches of materials that are difficult to use in a new construction process but can be easily integrated into DIY for example.

The architectural antiques sector is a niche market that is probably one of the most active markets today. These platforms contain old stones, ornamental elements, gargoyles, cast iron columns, ironwork and many other materials that are no longer produced.¹²⁶

Many dealers also bring less exclusive materials back to the market, often specialising in a specific material. They offer to meet the more specific demands of the construction industry. These materials include bricks, paving stones, tiles, floors, radiators, or structural steel profiles.

In the future, digital platforms will be sufficiently developed to assist the deconstruction process by helping the parties involved to make decisions about deconstruction and reuse strategies for existing buildings. They will be coupled with digital solutions and will enable more informed choices to be made about deconstruction decisions. They will facilitate the recovery of valuable materials, their reuse and help match supply and demand.

La Blockchain

Actuellement, la technologie blockchain est en développement constant et est présente dans différents secteurs, comme l'économie, la logistique et l'art. Il s'agit d'une technologie relativement nouvelle et son développement dépend fortement de son implémentation avec d'autres technologies. Si le secteur de la construction arrive à intégrer la blockchain, elle aura un impact conséquent dans la réutilisation des matériaux de construction.

La Blockchain permettra théoriquement de réduire la distance entre les phases de conception et de réalisation. Le maître d'ouvrage pourra obtenir en amont du projet des éléments disponibles, à partir desquels l'architecte pourra élaborer son projet. Les revendeurs pourront facilement afficher les stocks disponibles et faire correspondre l'offre à la demande. Le stockage dans la blockchain des caractéristiques des éléments de construction permettra d'assurer entre les acteurs une transmission fluide et continue des données. Elle responsabilisera également chaque acteur du processus quant aux données qu'ils transmettent. En cas de problèmes dans la nouvelle construction, ces données objectives, reposant sur les propriétés techniques des éléments de construction, permettront facilement de déterminer l'acteur responsable.

La mise en œuvre de la technologie blockchain dans le secteur de la construction présente cependant pour l'instant certaines limites. Le secteur ne se développe pas aussi rapidement que la technologie et ne dispose pas des bases numériques nécessaires pour son intégration. Le secteur de la construction est encore en phase de transition vers le BIM. C'est un effort qui demande du temps et qui est financièrement important en raison des coûts de formations et des achats de logiciels.¹²⁷

127 Akbarieh et al., « Extended Producer Responsibility in the Construction Sector through Blockchain, BIM and Smart Contract Technologies ».

Blockchain

Currently, blockchain technology is in constant development and is present in various sectors, such as economics, logistics and art. It is a relatively new technology, and its development depends heavily on its implementation with other technologies. If the construction sector manages to integrate blockchain, it will have a significant impact on the reuse of construction materials.

Blockchain will theoretically reduce the distance between the design and construction phases. The client will be able to obtain available elements upstream of the project, from which the architect will be able to develop his project. Dealers will be able to easily display available stocks and match supply to demand. The storage of the characteristics of the construction elements in the blockchain will ensure a fluid and continuous transmission of data between the players. It will also make each actor in the process accountable for the data they transmit. In the event of problems in the new construction, this objective data, based on the technical properties of the construction elements, will make it easy to determine the responsible actor.

However, the implementation of blockchain technology in the construction sector has certain limitations now. The sector is not developing as fast as the technology and does not have the necessary digital basis for its integration. The construction sector is still in the transition phase to BIM. It is a time-consuming and financially significant effort due to training costs and software purchases.¹²⁸

Le Monde Professionnel

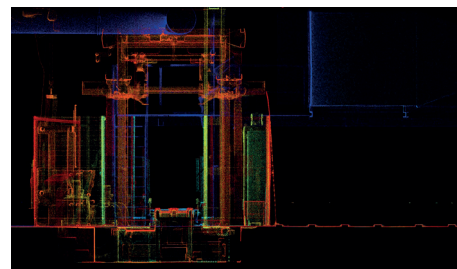
L'utilisation d'éléments de réemplois est marginale dans le secteur du bâtiment. Beaucoup de démolition sont effectuées sans que les éléments potentiellement réutilisables ne rejoignent la filière du réemploi. La majeure partie des constructions ne contiennent pas, ou très peu d'éléments de réemploi. Cette marginalité peut notamment s'expliquer au travers des caractéristiques propres à ces produits. Les éléments de construction de réemploi suscitent souvent des connotations négatives auprès des gens.

La réutilisation des matériaux est dans la pratique principalement effectuée de manière informelle. Comme l'illustre l'exemple de l'entreprise Orlati, le réemploi passe souvent par une procédure d'initiative personnelle. Dans les projets de « bricolage », la stratégie de réemploi est omniprésente. Les concepteurs entremêlent des logiques de conception et de construction capable de tirer le meilleur profit de ce qui est disponible.

Les éléments de la construction de réemploi devront relever plusieurs défis s'ils veulent percer dans le domaine de la construction. Le secteur professionnel repose sur une organisation du travail qui s'est principalement développée autour des produits neufs. Intégrer les produits de réemploi dans ce schéma suppose de répondre aux exigences principales d'une telle organisation. Si des efforts sont fait dans ce sens, les outils numériques faciliteront allègrement la professionnalisation de la récupération des éléments de réemploi.

Pour l'instant, pour des raisons économiques, les entreprises préfèrent éviter l'intégration de procédés numériques. Le problème est très bien illustré dans le cas Scanways. En premier lieu l'entreprise chargée de déplacer la chaîne de production a préféré utiliser des plans existants. Finalement c'est bien grâce aux outils numériques que l'opération de démontage et de remontages de la chaîne de production a été un succès.

Dans le monde professionnel, l'économie va presque toujours décider de la nécessité d'utiliser des matériaux récupérés. Le cas Scanways illustre également ce point. La chaîne de production est un élément de marché de niche. Cette opération de démontage en Suisse et de remontage en Israël, est réalisée ainsi uniquement pour une question de coût. La construction d'une nouvelle chaîne de construction est économiquement moins intéressante que la



Coupe dans le nuage de points - la qualité des informations capturées et générées grâce aux technologies sont incomparables aux autres méthodes.

©Scanways

Scanways

[reproduit avec l'aimable autorisation de l'auteur]

The Professional Sector

The use of reused elements is marginal in the building sector. Many demolitions are carried out without the potentially reusable elements entering the reuse sector. Most constructions do not contain or contain very few reuse elements. This marginality can be explained by the specific characteristics of these products. Reused building elements often have negative connotations for people.

The reuse of materials is in practice mainly carried out informally. As the example of the Orllati company illustrates, reuse is often a self-help process. In 'do-it-yourself' projects, the strategy of re-use is omnipresent. Designers intertwine design and construction logics capable of making the most of what is available.

The elements of reuse construction will face several challenges if they are to break into the construction field. The professional sector is based on an organisation of work that has developed mainly around new products. Integrating reused products into this scheme means meeting the main requirements of such an organisation. If efforts are made in this direction, digital tools will facilitate the professionalisation of the recovery of reused items.

For the time being, for economic reasons, companies prefer to avoid the integration of digital processes. The problem is well illustrated in the Scanways case. In the first place, the company responsible for moving the production line preferred to use existing plans. In the end, it was thanks to digital tools that the dismantling and reassembling of the production line was a success.

In the business world, economics will almost always dictate the need to use reclaimed materials. The Scanways case also illustrates this point. The production line is a niche market element. This operation of dismantling in Switzerland and reassembling in Israel is done so only because of cost. The construction of a new production line is economically less interesting than the complicated procedure of moving.

At present, deconstruction is only carried out in the context of very specific contracts. Of course, the ecological dimension is considered to a certain extent. The case of F. Baud & T. Früh Atelier d'architecture SA illustrates this point perfectly. The reuse process takes place within the specific framework of an initiative for the State of Geneva. The project has an obvious political aspect. However, it is undeniable that this type of initiative can only be be-

procédure compliquée d'un déménagement.

Actuellement, c'est uniquement dans le cadre de marchés très spécifiques, que la déconstruction est mise en œuvre. Il y a évidemment, dans une certaine proportion, la dimension écologique qui rentre en compte. Le cas F. Baud & T. Früh Atelier d'architecture SA illustre parfaitement ce point. Le processus de réutilisation à lieu dans le cadre spécifique d'une démarche pour l'Etat de Genève. Le projet a un aspect politique indéniable. Cependant il est incontestable que ce type d'initiatives ne peut qu'être bénéfique pour la réutilisation de matériaux de construction dans le futur.

neficial for the reuse of building materials in the future.

Conclusion

Les outils numériques utilisés pour effectuer le relevé du bâtiment ont atteint un niveau de maturité suffisant pour être complètement fonctionnel dans le cadre de la déconstruction. Le développement de la précision des appareils mobiles ainsi que l'automatisation et la robotisation complète du processus est la prochaine évolution.

Concernant le processus de scan-to-BIM, il reste actuellement un travail long et laborieux. Les logiciels semi-automatisés disponibles sur le marché sont encourageant. L'automatisation complète du procédé sera permise par les développements qui sont en cours dans le domaine de la recherche, notamment celui des méthodes de deep learning.

L'adoption massive du BIM semble pouvoir rendre le processus de déconstruction et le développement d'une économie circulaire possible sous peu. Il est nécessaire que les développeurs de logiciels concilient leurs outils avec l'OpenBIM. Le développement de ce dernier rend possible la pérennisation des maquettes numériques dans le temps et facilite leur réutilisation au moment de la déconstruction. Le développement du BIM réversible facilitera la récupération des éléments de construction en indiquant aux personnes responsables du leur démantèlement les subtilités de leur assemblage et les possibilités de récupération.

Les plateformes en ligne d'aide à la gestion des bâtiments dans le cadre d'une économie circulaire et de la déconstruction sont des solutions prometteuses. Elles restent cependant marginalement utilisées et il est primordial de les intégrer rapidement dans le cycle de vie des bâtiments.

La technologie de la Blockchain est en plein développement. Elle promet d'être révolutionnaire dans l'organisation du travail. L'évolution des pratiques dans le secteur de la construction ainsi que l'adoption des principes de l'industrie 4.0 est cependant encore incertain. Le secteur est plutôt lent en termes d'adoption de nouvelles technologies.

Finalement un processus de déconstruction à grande échelle n'est pas une solution qui est visualisable par les entreprises confrontées à la réalité du terrain. Pour la plupart, la question économique est un frein impossible à débloquer. La diminution des ressources brutes et l'augmentation du prix des matériaux feront peut-être évoluer cette position arrêtée.

Conclusion

The digital tools used to carry out the building survey have reached a sufficient level of maturity to be fully functional in the deconstruction process. The development of the accuracy of mobile devices and the full automation and robotisation of the process is the next evolution.

As far as the scan-to-BIM process is concerned, it is currently still a long and laborious process. The semi-automated software available on the market are encouraging. The full automation of the process will be enabled by the developments that are taking place in the field of research, especially in deep learning methods.

The widespread adoption of BIM looks likely to make the deconstruction process and the development of a circular economy possible soon. There is a need for software developers to align their tools with OpenBIM. The development of the latter makes it possible to perpetuate digital models over time and facilitate their reuse at the time of deconstruction. The development of reversible BIM will facilitate the recovery of construction elements by indicating to those responsible for their dismantling the subtleties of their assembly and the possibilities of recovery.

Online platforms to help manage buildings in the context of the circular economy and deconstruction are promising solutions. However, they remain marginally used and it is crucial to integrate them quickly into the building life cycle.

Blockchain technology is in full development. It promises to be revolutionary in the organisation of work. However, the evolution of practices in the construction sector and the adoption of Industry 4.0 principles is still uncertain. The sector is rather slow in terms of adoption of new technologies.

Finally, a large-scale deconstruction process is not a solution that can be visualised by companies faced with the reality of the field. For most of them, the economic issue is an impossible brake to overcome. The decrease in raw resources and the increase in the price of materials will perhaps change this fixed position.

Ouvertures

Ce document explore plusieurs pistes mais n'est pas exhaustif. Afin de faire le tour du potentiel des outils numériques dans le cadre de l'économie circulaire, il est encore nécessaire d'effectuer des recherches sur les autres stratégies. Il s'agit notamment d'approfondir les solutions pour le « life cycle assessment » ainsi que pour le « Design for Deconstruction ».

Ce document fournit néanmoins une base relativement complète sur laquelle se reposer pour approfondir chaque sujet individuellement. Il s'agirait de se concentrer sur l'automatisation des divers processus ainsi que de préciser l'application de la technologie de la blockchain. Ce document peut également aider à mettre en place des principes d'économie circulaire dans le cadre de cas d'études pratiques.

Outlooks

This paper explores several possibilities but is not exhaustive. To fully explore the potential of digital tools in the circular economy, there is still a need to research other strategies. This includes further research into solutions for life cycle assessment and Design for Deconstruction.

Nevertheless, this document provides a relatively complete basis on which to develop each topic individually. The focus should be on the automation of the various processes as well as on the application of blockchain technology. This document can also help to implement circular economy principles in practical case studies.

**Index des Termes,
Entreprises,
Logiciels,
Institutions**

Symboles

3D Swiss View Sàrl 85, 89

4D Architects 61

A

algorithmes 38, 64, 65, 71

AliceVision 47

Apple 41, 51

Autodesk 47

B

backpack 37, 38

BAMB 62

banques de matériaux 72

BCF 60, 61, 124

BIM 12, 13, 18, 19, 24, 32, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 77, 78, 79, 80, 82, 86, 87, 89, 91, 94, 95, 98, 99, 102, 103, 104, 105, 108, 109, 114, 115, 124, 125, 126, 128

BIM6D 59, 124

BIMchain 82

Bimeo 77

BIM réversible 32, 61, 62, 114

blockchain 72, 78, 79, 80, 82, 94, 95, 108, 109, 116, 117, 124

Block Materials 82, 124

Building Penetrating Radar 55

Buildings as Material Banks
Project 62

C

CLOI 69, 124

CloudWorx 66, 125

COBie 60, 61, 124

CorDet 64, 67, 68, 69, 126

Cycle Up 74, 124

D

D-DAS 63

Deep learning 69

Design for Deconstruction
94, 95, 116, 117

détection de plans 67

détection d'objets 67, 68

Digital Twin 32

Distributed Ledger Technologies 78

double numérique 24, 48, 102

DRIM 63, 126

drone 39, 42, 44, 45, 87, 89, 98, 99

DroneDeploy 47

E

économie circulaire 12, 18, 22, 26, 27, 55, 59, 72, 94, 96, 106, 114, 116, 128

EdgeWise 66

Ethereum 82, 124

Excess Material Exchange 77

F

Faro 36, 41, 50, 66, 124

Faro As-Built 66

F. Baud & T. Früh Atelier d'architecture SA 85, 90, 103, 104, 111, 112

G

Globechain 74, 125

GPR 54, 55, 70, 99, 100, 102, 103, 125, 126

Ground Penetrating Radar 32

H

hash 79

I

IDAM 70, 71

IFC 60, 61, 74, 76, 124

Industry Foundation Classes 60, 124

intelligence artificielle 64, 78, 88, 102

Interreg NWE 63

J

JCT Conseils SA 10, 85

Jumeau Numérique 32

L

Leica 36, 37, 41, 50, 66, 125

Level Of Detail 59

LiDAR 33, 35, 37, 38, 39, 40, 41, 51, 87, 98, 99, 126

Life Cycle Assessment 94, 95

LOD 59, 125

longueur focale 43

Loopfront 77, 125

lumière structurée 51, 52, 53

M

Madaster 75, 76, 125

manuportables 38

maquette numérique 57, 58, 59, 77, 124

Matterport 50, 51, 53, 125

mesh 56, 124

Meshroom 47

modélisation polygonale 56

N

NFT 80, 124

niveaux de maturité 58

nuage de points 32, 33, 34, 35, 37, 38, 39, 42, 43, 48, 56, 62, 64, 65, 67, 70, 71, 87, 88, 89, 98

numérisation 3D 39, 45, 51, 61, 85

NURBS 56, 124

O

Open BIM 59, 60

Open source 47

Orlatti 85, 91

ouverture 43, 44

P

passeports de matériaux 75

photogrammétrie 32, 33, 35, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 51, 55, 70, 87, 89, 98

plateformes de vente 72, 106

plateformes numériques 72, 75, 106

Pointcab 66, 125

R

RBIM 62, 63

résolution 18, 34, 39, 43, 89

RespointNet++ 69

Revit 63, 66

Rotor Deconstruction 74, 125

S

Salza 74, 125

scanner laser 3D 12, 33, 48, 85, 86, 98, 128

scanners laser mobiles 37

scan-to-BIM 12, 13, 64, 65, 67, 102, 103, 114, 115, 128

Scanways 10, 85, 87, 88, 110, 111, 126

segmentation 65, 67

sensibilité ISO 44, 45

smart contracts 80, 82

T

Trimble Geospatial 36, 47, 50

Trimble Inpho 47

Trimble RealWorks 50

U

urban mining 18, 19, 26, 27, 48, 57, 78, 80, 94, 95, 96, 97, 102, 103

V

vitesse d'obturation 43, 44, 45

Bibliographie

- 3D SWISS VIEW. « Marketing Digital - 3D SWISS VIEW ». 3D SWISS VIEW. Consulté le 10 janvier 2022. <https://www.3dswissview.ch/accueil-2.html>.
- Agapaki, Eva, et Ioannis Brilakis. « CLOI: An Automated Benchmark Framework for Generating Geometric Digital Twins of Industrial Facilities ». *Journal of Construction Engineering and Management* 147, no 11 (novembre 2021): 04021145. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002171](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002171).
- Akbarieh, Arghavan, William Carbone, Markus Schäfer, Daniele Waldmann, et Felix Norman Teferle. « Extended Producer Responsibility in the Construction Sector through Blockchain, BIM and Smart Contract Technologies », 9 décembre 2020. <https://orbilu.uni.lu/handle/10993/46699>.
- Berg, Marc van den, Hans Voordijk, et Arjen Adriaanse. « BIM uses for deconstruction: an activity-theoretical perspective on reorganising end-of-life practices ». *Construction Management and Economics* 39, no 4 (3 avril 2021): 323-39. <https://doi.org/10.1080/01446193.2021.1876894>.
- Bertino, Gaetano, Johannes Kisser, Julia Zeilinger, Guenter Langergraber, Tatjana Fischer, et Doris Österreicher. « Fundamentals of Building Deconstruction as a Circular Economy Strategy for the Reuse of Construction Materials ». *Applied Sciences* 11, no 3 (janvier 2021): 939. <https://doi.org/10.3390/app11030939>.
- BIMChain. « BIMChain ». OwnYourBusiness. Consulté le 15 janvier 2022. <https://ownyourbusiness.tech/en/bimchain/>.
- bimeo. « De la conception à l'exploitation de la maquette numérique ». Consulté le 15 janvier 2022. <https://www.bimeo.fr/>.
- BIMobject® Academy. « BIMobject® Academy - NURBS vs Polygon Mesh - Why Both Models Are Needed in BIMscript ». Consulté le 22 décembre 2021. <https://academy.bimobject.com/en/bimscript/nurbs-vs-polygon-mesh-why-both-models-are-needed-in-bimscript>.
- Block Materials. « Block Materials ». Consulté le 15 janvier 2022. <https://www.blockmaterials.com/>.
- Brandín, Roberto, et Sepehr Abrishami. « Information traceability platforms for asset data lifecycle: blockchain-based technologies ». *Smart and Sustainable Built Environment ahead-of-print, no ahead-of-print* (1 janvier 2021). <https://doi.org/10.1108/SASBE-03-2021-0042>.
- buildingSMART International. « BIM Collaboration Format (BCF) ». buildingSMART International. Consulté le 12 janvier 2022. <https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/bim-collaboration-format-bcf/>.
- . « Industry Foundation Classes (IFC) ». buildingSMART International. Consulté le 12 janvier 2022. <https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/industry-foundation-classes/>.
- . « OpenBIM Definition ». buildingSMART International. Consulté le 6 janvier 2022. <https://www.buildingsmart.org/about/openbim/open-bim-definition/>.
- ClearEdge3D. « ClearEdge3D ». Consulté le 12 janvier 2022. <https://www.clearedge3d.com/support/>.
- Copeland, Samuel, et Melissa Bilec. « Buildings as Material Banks Using RFID and Building Information Modeling in a Circular Economy ». *Procedia CIRP* 90 (2020): 143-47. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.122>.
- Cycle Up. « Le concept Cycle Up : une gestion globale de vos ressources circulaires ». Cycle Up. Consulté le 14 janvier 2022. <https://site.cycle-up.fr/new-cycle-up-le-concept/>.
- Dautremont, Charlotte, Charlélle Dagnelie, et Sylvie Jancart. « Le BIM6D comme levier pour une architecture circulaire ». Édité par T. Leduc et F. Miguët. *SHS Web of Conferences* 47 (2018): 01005. <https://doi.org/10.1051/shsconf/20184701005>.
- Deluzarche, Céline. « Définition | Deep Learning - Apprentissage profond | Futura Tech ». Futura. Consulté le 4 janvier 2022. <https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/intelligence-artificielle-deep-learning-17262/>.
- Dounas, Theodoros, Davide Lombardi, et Wassim Jabi. « Framework for Decentralised Architectural Design BIM and Blockchain Integration ». *International Journal of Architectural Computing* 19, no 2 (1 juin 2021): 157-73. <https://doi.org/10.1177/1478077120963376>.
- Durmisevic, Elma, Annie Guerriero, Calin Boje, Bruno Domange, et Guido Bosch. « Development of a Conceptual Digital Deconstruction Platform with Integrated Reversible BIM to Aid Decision Making and Facilitate a Circular Economy », 2021, 10.
- Eepaul. « COBie ». Definition; Guidance; Standard. <https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/COBie>. Consulté le 12 janvier 2022. <https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/COBie>.
- ethereum.org. « Non-fungible tokens (NFT) ». ethereum.org. Consulté le 8 janvier 2022. <https://ethereum.org>.
- . « What Is Ethereum? » ethereum.org. Consulté le 15 janvier 2022. <https://ethereum.org>.
- Evangelou, Iordanis, Michalis Savelonas, et Georgios Papaioannou. « PU Learning-Based Recognition of Structural Elements in Architectural Floor Plans ». *Multimedia Tools and Applications* 80, no 9 (avril 2021): 13235-52. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-10295-9>.
- Excess Materials Exchange. « Excess Materials Exchange ». Consulté le 15 janvier 2022. https://excessmaterialsexchange.com/en_us/.
- Faro. « As-Built - Avec le logiciel FARO® As-BuiltTM, la modélisation CAO et BIM n'a jamais été aussi simple ». Consulté le 12 janvier 2022. https://media.faro.com/-/media/Project/FARO/FARO/FARO/Resourses/2021/06/17/19/30/Brochure_AsBuilt_AEC_FRA_A4.pdf?rev=62af3d20a5f247319674bd0296ea5fc8.
- . « FARO® Focus Laser Scanner - La gamme de scanners laser la plus légère, compacte et intuitive ». Consulté le 22 novembre 2021. https://media.faro.com/-/media/Project/FARO/FARO/FARO/Resourses/TechSheet_Focus_Laser_Scanner/TechSheet_Focus_La

- ser_Scanner_FR.pdf?rev=cdf6a708e5d24c18a6c2d0e32dfefb2a.
- . « FARO® Freestyle 2 Handheld Scanner ». Consulté le 22 novembre 2021. https://media.faro.com/-/media/Project/FARO/FARO/FARO/Resources/2021/04/19/01/19/TechSheet_Freestyle2_A4_FR.pdf?rev=62f88f23f9f84e54ad05d7dc66c99d01.
- . « FARO® ScanPlanTM 2D Handheld Mapper ». Consulté le 22 novembre 2021. https://media.faro.com/-/media/Project/FARO/FARO/FARO/Resources/Techsheet_ScanPlan/TechSheet_ScanPlan_FR.pdf?rev=a2b8d1c4feb446ccacdb27a278c6d8ba.
- François Baud & Thomas Früh · Architectes. « Projets | F. Baud & T. Früh ». François Baud & Thomas Früh · Architectes. Consulté le 10 janvier 2022. <https://www.archi.ch/>.
- Ghyoot, Michaël. Déconstruction et réemploi: comment faire circuler les éléments de construction. Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2018.
- Globechain. « Globechain | How it works », 2022. <https://globechain.com/how-it-works>.
- Groupe Orlati SA. « Entreprise | Orlati ». Consulté le 10 janvier 2022. <https://www.orlati.ch/fr/entreprise>.
- Heisel, Felix. « ECONOMICS FOR A CIRCULAR ENVIRONMENT ». In The Architecture of Waste: Design for a Circular Economy, édité par Caroline O'Donnell et Dillon Pranger, 205-12. New York, New York ; Routledge, 2021.
- Hoffer, Tim. « What Is GPR? Why Ground Penetrating Radar Is Important | SoftDig ». Text. <https://www.softdig.com/>. SoftDig, 31 janvier 2020. <https://www.softdig.com/blog/gpr-ground-penetrating-radar-work/>.
- JCT conseils. « JCT conseils ». Consulté le 10 janvier 2022. <https://www.jct-conseils.ch/>.
- Kakkos, Efsthathios, Felix Heisel, Dirk E. Hebel, et Roland Hischier. « Towards Urban Mining—Estimating the Potential Environmental Benefits by Applying an Alternative Construction Practice. A Case Study from Switzerland ». Sustainability 12, no 12 (janvier 2020): 5041. <https://doi.org/10.3390/su12125041>.
- Kovacic, Iva, et Meliha Honic. « Scanning and Data Capturing for BIM-Supported Resources Assessment: A Case Study ». Journal of Information Technology in Construction 26 (2 août 2021): 624-38. <https://doi.org/10.36680/jitcon.2021.032>.
- L., Bastien. « Deep Learning ou apprentissage profond : définition, concept ». LeBigData.fr (blog), 16 juillet 2018. <https://www.lebigdata.fr/deep-learning-definition>.
- Leica Geosystems AG. « Leica BLK2GO - CAPTURE DE LA RÉALITÉ. SCANNER PORTATIF », s. d.
- . « Leica CloudWorx Technical Specifications », s. d.
- . « Leica Cyclone BASIC - Comprehensive laser scan software for field & office », s. d.
- . « Leica ScanStation P50 », s. d.
- Loopfront. « Loopfront - Recycling and Reuse Made Easy ». Consulté le 15 janvier 2022. <https://www.loopfront.com/en/>.
- Madaster. « Material Passport - Training the Arc ». Consulté le 7 janvier 2022. <https://madaster.com/wp-content/uploads/2020/12/Material-Passport-The-Arc-EN.pdf>.
- Matterport. « Des outils adaptés à tous les usages ». Matterport. Consulté le 15 janvier 2022. <https://matterport.com/fr/applications>.
- . « Pro2 ». Matterport. Consulté le 12 janvier 2022. <https://matterport.com/fr/cameras/pro2>.
- MEP innovation LAB. « 2021 MCAA 3D Scanning Technology Report », 2021. <https://www.mcaa.org/news/resource-highlight-2021-mcaa-3d-scanning-technology-research-report-2/>.
- My Digital Buildings. « Définir le niveau de détail (LOD) de sa maquette BIM », 2020. https://mydigitalbuildings.com/blog/categories/year/tit-le:output_ext.
- Objectif BIM. « BIM 2D-3D-4D-5D-6D-7D-xD ». Consulté le 6 janvier 2022. <https://www.objectif-bim.com/index.php/bim-maquette-numerique/le-bim-en-bref/les-dimensions-du-bim-2d-3d-4d-5d-6d-7d-xd>.
- . « Le BIM: Signification, définition et explications ». Consulté le 5 janvier 2022. <https://www.objectif-bim.com/index.php/bim-maquette-numerique/le-bim-en-bref/la-definition-du-bim>.
- . « Niveaux du BIM - Stades de Maturité BIM ». Consulté le 6 janvier 2022. <https://www.objectif-bim.com/index.php/bim-maquette-numerique/le-bim-en-bref/stades-de-maturite-bim>.
- OFEV. « Environnement Suisse 2018 - Rapport du Conseil fédéral ». Conseil fédéral suisse, 2018. https://environnement-suisse.ch/_Resources/Persistent/74a1536a38976540f8852ac3363dcd3e3a675d3f/OFEV-Rapport_Environnement_Suisse_2018_F.pdf.
- openbim.fr. « OpenBIM ». openbim.fr. Consulté le 6 janvier 2022. <https://openbim.fr/openbim/>.
- Madaster. « Platform ». Consulté le 7 janvier 2022. <https://madaster.com/platform/>.
- Pointcab. « Applications ». Pointcab. Consulté le 12 janvier 2022. <https://pointcab-software.com/en/applications/>.
- Pranger, Dillon, Caroline O'Donnell, et Felix Heisel. « NEW DECONSTRUCTION - The Rebirth of a Circular Architecture ». In The Architecture of Waste: Design for a Circular Economy, édité par Dillon Pranger et Caroline O'Donnell, 191-203. New York, New York ; Routledge, 2021.
- Rotor Deconstruction. « Rotor Deconstruction ». Consulté le 12 janvier 2022. <https://rotordc.com/store/>.
- Salza. « Salza - Prestations ». Consulté le 15 janvier 2022. <https://www.salza.ch/fr/leistungen>.

- Scanways.io. « Scanways.io ». Scanways. Consulté le 10 janvier 2022. <https://scanways.io/fr/>.
- Sensors & Software Inc. « Concrete Scanning & Infrastructure Assessment », 2020. <https://www.sensoft.ca/georadar/concrete-scanning-assessment/>.
- . « What Is GPR? Ground Penetrating Radar ». Consulté le 31 décembre 2021. <https://www.sensoft.ca/blog/what-is-gpr/>.
- Trimble. « Fiche Technique - Trimble TX8 - Scanner Laser ». Consulté le 22 décembre 2021. <https://fr.geospatial.trimble.com/sites/geospatial.trimble.com/files/2019-03/Datasheet%20-%20Trimble%20TX8%20Laser%20Scanner%20-%20French%20-%20Screen.pdf>.
- Universalis, Encyclopædia. « STÉRÉOSCOPIE ». Encyclopædia Universalis. Consulté le 3 janvier 2022. <https://www.universalis.fr/encyclopedie/stereoscopie/>.
- UWE Bristol. « Deconstruction and Recovery Information Modelling (DRIM) ». Consulté le 14 janvier 2022. <https://www.uwe.ac.uk/research/centres-and-groups/big-deal/past-projects/drim>.
- Valente, Clément. Numérisation 3D & Construction. Édité par BTPdigital, 2019.
- . « Scanners Laser 3D ou LiDAR - Numérisation 3D & Construction ». Consulté le 22 décembre 2021. <https://numerisation3d.construction/lidar-et-scanner-laser-3d/>.
- Xu, Yongzhi, Xuesong Shen, et Samsung Lim. « CorDet: Corner-Aware 3D Object Detection Networks for Automated Scan-to-BIM ». *Journal of Computing in Civil Engineering* 35, no 3 (mai 2021): 04021002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP:1943-5487.0000962](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP:1943-5487.0000962).
- Yang, Jun, Zhong-Ke Shi, et Zi-Yan Wu. « Towards Automatic Generation of As-Built BIM: 3D Building Facade Modeling and Material Recognition from Images ». *International Journal of Automation and Computing* 13, no 4 (août 2016): 338-49. <https://doi.org/10.1007/s11633-016-0965-7>.
- Yin, Chao, Boyu Wang, Vincent J.L. Gan, Mingzhu Wang, et Jack C.P. Cheng. « Automated Semantic Segmentation of Industrial Point Clouds Using ResPointNet++ ». *Automation in Construction* 130 (octobre 2021): 103874. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103874>.

Le secteur de la construction est l'un des secteurs qui consomme le plus de matières premières et qui a le plus d'impact sur l'environnement. En Suisse, les déchets de construction et de démolition représentent 17 millions de tonnes de matériaux, évacués chaque année. Cependant la transition du secteur de la construction d'une économie linéaire à une économie circulaire est encore à ces débuts. Le manque de connaissance sur la composition des bâtiments et des possibilités de les désassembler, ainsi que la faible quantité de données numériques disponibles dans le secteur de la construction sont les principaux facteurs responsables. La numérisation du processus de déconstruction utilisant des outils numériques pour scanner le bâtiment, construire son jumeau numérique et réutiliser ses éléments peut fortement contribuer au développement d'une économie circulaire. Ces procédés numériques utilisent des outils tels que les scanner laser 3D, les méthodes de scan-to-BIM, les technologies du BIM ou encore de la Blockchain. Ce document présente ces outils, explique leur fonctionnement ainsi que leur contribution possible dans le cadre de l'économie circulaire.