

# Outils numériques et architecture en matériaux de réemploi

Intégration des outils numériques dans le processus de conception d'architecture de réemploi, une approche innovante pour une conception durable.

Quels sont les potentiels des outils numériques et de l'intelligence artificielle dans le développement et l'optimisation de la conception d'architecture en matériaux de réemploi ?

## Résumé :

En 1769 l'ingénieur écossais James Watt met au point une machine à vapeur qui sonnera le glas d'une société principalement agraire et artisanale au profit d'un système industriel et commerciale. Ce bouleversement sociétal sans précédent qu'est la révolution industrielle provoquera son lot de désagréments. La consommation et la production à outrance entraînant la pollution par les déchets liés à la surconsommation et la pollution émise par ces industries sont aujourd'hui des enjeux auxquels nous devons répondre. La mise en place d'une économie circulaire par le recours au réemploi des déchets de construction semble être une des nombreuses solutions à ce problème. Toutefois le réemploi fait face à des limites d'organisation des filières, c'est dans un souci de développement et d'optimisation de cette branche de la construction que l'intelligence artificielle, par son recours au Big Data et sa capacité à analyser et apprendre en permanence, pourrait s'avérer être une réponse à ces problématiques.

## Abstract :

In 1769 the Scottish engineer James Watt developed a steam engine that would spell the end of a mainly agrarian and artisanal society in favour of an industrial and commercial system. This unprecedented societal upheaval that is the industrial revolution will cause its share of inconvenience. Excessive consumption and production resulting in waste pollution from overconsumption and pollution emitted by these industries are now issues that we must address. The establishment of a circular economy through the reuse of construction waste seems to be one of the many solutions to this problem. However, the reuse faces limits of organization of the sectors, it is with a concern of development and optimization of this branch of the construction that artificial intelligence, by its use of Big Data and its ability to analyse and learn continuously, could prove to be an answer to these problems.

**Mots clés :** IA ; architecture ; réemploi ; conception ; écologie

## Table des matières

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introduction .....                                                                                            | 3  |
| Partie 1 - Etat de l'art.....                                                                                 | 3  |
| 1. Le réemploi en architecture.....                                                                           | 3  |
| a. Historique du réemploi en construction .....                                                               | 3  |
| b. Les acteurs du réemploi .....                                                                              | 4  |
| c. Terminologie relative au réemploi .....                                                                    | 6  |
| d. Chiffres clés du réemploi dans le secteur du bâtiment .....                                                | 7  |
| e. Obstacles à l'essor du réemploi.....                                                                       | 8  |
| 2. Les outils numériques et leur utilisation dans le réemploi .....                                           | 9  |
| a. Les outils de modélisation numérique .....                                                                 | 9  |
| b. L'intelligence artificielle .....                                                                          | 9  |
| c. Le numériques au service du réemploi.....                                                                  | 11 |
| Partie 2 - Expérimentations .....                                                                             | 11 |
| 1. Méthodologies expérimentales .....                                                                         | 11 |
| a. Hypothèses et problématique .....                                                                          | 11 |
| b. Identification des variables.....                                                                          | 12 |
| c. Sélection des outils numériques.....                                                                       | 13 |
| 2. Référencements .....                                                                                       | 13 |
| Partie 3 - Analyse.....                                                                                       | 14 |
| 1. Interprétation des résultats .....                                                                         | 14 |
| a. Matérialité .....                                                                                          | 14 |
| b. Assemblage.....                                                                                            | 19 |
| c. Optimisation et économie .....                                                                             | 23 |
| d. Quantité et dimension.....                                                                                 | 23 |
| e. Modèles et références.....                                                                                 | 25 |
| 2. Discussion sur l'intégration des outils numériques et de l'IA pour l'architecture de<br>réemploi.....      | 27 |
| a. Limites des outils numériques et des IA dans le processus de conception<br>d'architecture en réemploi..... | 27 |
| b. Perspectives d'usages.....                                                                                 | 27 |
| Conclusion .....                                                                                              | 28 |
| Bibliographie.....                                                                                            | 28 |
| Annexes.....                                                                                                  | 32 |

# Introduction

Depuis les années 1970 une prise de conscience écologique s'est développée. La consommation de masse a induit une surproduction de matière et de déchets dont les conséquences climatiques s'intensifient au fil du temps. Certains gisements de matériaux se raréfient c'est pourquoi il peut sembler judicieux d'adopter une économie circulaire à l'impact minime. Le réemploi des matériaux de construction peut être présenté comme une réponse à cette problématique.

A ce jour, le recours au réemploi en architecture se fait rare. Cette rareté se justifie par de nombreux facteurs tels que le manque de main d'œuvre de déconstruction qualifiée, peu de diagnostics ressources rendant l'identification des gisements plus complexes, une faible quantité d'espaces de stockage de ces matériaux, peu si ce n'est pas d'intérêt économique, des problèmes liés à la certification et aux assurances ainsi qu'une limitation de l'échelle des projets et une difficulté à respecter leur homogénéité. De plus concevoir à partir d'un inventaire de matériaux complexifie la tâche dès la phase d'esquisse c'est pourquoi faire appel à l'intelligence artificielle peut être une solution parmi d'autre.

Fort de ce constat une problématique s'impose, quels sont les potentiels des outils numériques et de l'intelligence artificielle dans le développement et l'optimisation de la conception d'architecture en matériaux de réemploi ?

Afin de répondre à ces problématiques nous ferons, dans un premier temps, un état de l'art du réemploi et de l'usage des outils numériques au service de celui-ci, dans un second temps nous expérimenterons à l'aide des IA génératives et enfin nous analyserons les résultats obtenus afin d'établir les potentiels des IA dans la conception d'architecture à partir de matériaux de réemploi.

## Partie 1 - Etat de l'art

### 1. Le réemploi en architecture

#### a. Historique du réemploi en construction

Le recours au réemploi, du fait de l'économie matérielle que cela représente, a persisté à travers les siècles. Dès l'antiquité, les constructeurs récupéraient les pièces métalliques, principalement en acier, d'anciennes constructions et les mettaient en œuvre dans de nouveaux édifices. Souvent, les romains, les Égyptiens ou les Grecs bâtissaient sur les ruines de bâtiments délabrés par les guerres et les catastrophes naturelles, à partir des matériaux présents sur le site.

Cette logique a perduré au moyen âge lors de la construction massive d'édifices religieux et de châteaux forts, les pierres des ruines étaient utilisées dans la construction des sous-sols et des fondations. La présence de pierres ornementées réemployées constituant les corniches, les colonnes ou les chapiteaux, témoignait du passé culturel du lieu. Parfois les éléments ont été dérobés et acheminés de régions lointaines, ils sont présentés comme des trophées et symbolisent le triomphe du peuple victorieux.(Peroni 1999)

Peu à peu la filière du réemploi s'est organisée. Jusqu'à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle, lorsqu'un bâtiment devait être déconstruit, les citoyens alentours étaient avertis de la vente publique des matériaux récupérés. Ces matériaux étaient ensuite réutilisés sur des chantiers proches. Au XIX<sup>ème</sup> siècle, les pouvoirs publics s'emparent de la question du réemploi en organisant des appels d'offres à destination des démolisseurs. Une fois le chantier obtenu, ils revendaient les matériaux aux magasins environnants.

C'est à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle que la révolution industrielle engendre une abondance de matériaux standardisés et abordables dont la mise en œuvre est simplifiée. Couplée au développement des transports, le recours aux circuits courts est moins spontané et se fait plus rare. Dans une stratégie d'économie, seuls les métaux sont encore réemployés à l'échelle industrielle. La question du réemploi reste en suspend, la demande croissante de logements à la suite des grandes guerres nécessite une mise en œuvre rapide que seul le modèle industriel peut satisfaire. De plus, l'augmentation de la valeur foncière rend la réutilisation de matériaux peu attractive en raison de son aspect chronophage et complexe.(Chiron, s. d.)

Les limites du modèle industriel sont de plus en plus évidentes, son impacte social et environnemental éveille les consciences au cours des années 1970. En quête d'autosuffisance, les Drop Cities aux Etats-Unis, sont le symbole de se renouveler, les matériaux sont employés et mis en œuvre afin de créer des architectures singulières.

Aujourd'hui, certains acteurs de la construction se sont emparés de la problématique du réemploi, ils souhaitent l'institutionnaliser et y sensibiliser dans le but de rendre ses lettres de noblesse à cette pratique autrefois courante.

## b. Les acteurs du réemploi

Plusieurs organismes développent la question du réemploi. En France un partenariat s'est formé entre Bellastock, l'ADEME et le CSTB. Bellastock est une coopérative qui travaille sur la question du cycle de la matière et donc du réemploi en proposant des alternatives au modèle de conception habituel. L'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) est une agence qui œuvre à la transition écologique placée sous la tutelle des ministères de la transition écologique et de la cohésion des territoires, de la transition énergétique et de l'enseignement supérieur et de la recherche. Le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) est une entreprise publique qui a pour vocation de développer et d'innover en matière de construction. Pour cela, ses compétences pluridisciplinaires lui permettent d'exercer cinq activités : la recherche et l'expertise, la certification, l'évaluation, l'expérimentation et la médiation.(CSTB s. d.)

Le projet européen inter-régional FCRBE (Facilitating the Circulation of Reclaimed Building Elements), partenaire de Bellastock, a pour objectif d'augmenter de 50 % la quantité de matériaux de réemploi en circulation à l'horizon 2032 en Europe. Afin de guider les divers intervenants du bâtiment, le projet FCRBE a créé un guide du réemploi des matériaux de constructions, le « Reuse Toolkit ».(« Reuse Toolkit: Material Sheets » 2021)

| EXEMPLES DE MÉTHODE DE PROJET ET DE FILIÈRES EN ÉCONOMIE CIRCULAIRE             |                                                            |                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ROTOR</b>                                                                    | Projet Européen et Région de Bruxelles, livré en déc. 2017 | Vers un dépassement des freins réglementaires au réemploi des éléments de construction.<br>Un meilleur cadre pour le réemploi de produits, pas d'obligation de marquage CE et un système d'évaluation ad hoc. |
| <b>HISER Project</b>                                                            | Projet Européen H2020, en cours                            | Des solutions holistiques innovantes et rentables pour un recyclage et une récupération efficaces des matières provenant des déchets complexes de construction et de démolition                               |
| <b>BAMB</b>                                                                     | Projet Européen H2020, en cours                            | Construire les bâtiments de manière dynamique et flexible pour permettre la re-circulation des matériaux                                                                                                      |
| <b>OVALEC</b>                                                                   | Projet Ademe, en cours                                     | Développer un nouvel outil d'aide à la décision et à la conception pour les acteurs du bâtiment, qui favorise l'utilisation de ressources secondaires issues du recyclage et du réemploi.                     |
| <b>BAZED</b>                                                                    | Projet Ademe, livré 2015                                   | Méthodes de conception et construction Zéro Déchets pour les acteurs du bâtiment                                                                                                                              |
| <b>DEMOCLES</b>                                                                 | Projet Ademe, en cours                                     | Les clefs de la démolition durable et de nouvelles filières de recyclage                                                                                                                                      |
| EXEMPLES DE PLATEFORMES DEMATÉRIALISÉES DE RÉEMPLOI DE PRODUITS DE CONSTRUCTION |                                                            |                                                                                                                                                                                                               |
| <b>CYCLE UP</b>                                                                 | ICADE - EGIS                                               | Lancement 2017-2018                                                                                                                                                                                           |
| <b>CIRCOLAB</b>                                                                 | AEW, MOAs                                                  | Lancement 2017-2018                                                                                                                                                                                           |
| <b>MATABASE</b>                                                                 | START UP d'Architecte                                      | Lancement 2016-2017 (?)                                                                                                                                                                                       |
| <b>IMATERIO</b>                                                                 | SNED                                                       | Lancement 2015                                                                                                                                                                                                |
| EXEMPLES D'OUTILS IT DE PROJET                                                  |                                                            |                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Di-gest BTP</b>                                                              | VERTEEGO                                                   | Outil de reporting et monitoring pour la traçabilité des déchets de chantier                                                                                                                                  |
| <b>DIAGNOSTIC RESSOURCE</b>                                                     | ROTOR                                                      | Software                                                                                                                                                                                                      |
| EXEMPLES DE PLATEFORMES PHYSIQUES                                               |                                                            |                                                                                                                                                                                                               |
| <b>RECYCLOBAT</b>                                                               | Toulouse                                                   | Plateforme de réemploi ESS                                                                                                                                                                                    |
| <b>SOLDATING</b>                                                                | Tours                                                      | Plateforme de réemploi ESS                                                                                                                                                                                    |
| <b>NOE</b>                                                                      | Bordeaux                                                   | équipement de chantier mutualisant de nombreux services pour les chantiers contraints                                                                                                                         |
| <b>NEW LIFE</b>                                                                 | National (Bouygues)                                        | A l'état de projet                                                                                                                                                                                            |

Tableau 1 : Exemples de projets de recherche et de nouveaux outils et plateformes - Bellastock, Mars 2018

L'organisation UpCyclea en charge de la protection de l'environnement, a mis en place une plateforme inter-bailleurs du réemploi nommée Pirée en réponse à la loi AGECE du 1<sup>er</sup> juillet 2023. Cette loi impose aux bailleurs de réaliser un diagnostic PEMD (Produit Equipement Matériaux Déchet) dont l'objectif est d'identifier les matériaux réemployables sur de futurs projets de construction. (« Entrée en vigueur du « Diagnostic ressources » le 1er juillet 2023 » 2023)

Certains architectes conçoivent des projets à partir de matériaux de réemploi, parfois détournés de leur usage habituel. Le collectif américains Rural Studio fondé par l'architecte Samuel Mockbee invite les étudiants à créer des projets participatifs en Alabama. En ce qui concerne le projet Lucy Carpet House, 72 000 dalles de moquettes usagées sont récupérées et testées par des ingénieurs pour être utilisées comme murs porteurs.



Figure 1 : Lucy Carpet House, Mason's Bend, AL, 2002 - Rural Studio - Photos : Timothy Hursley

### c. Terminologie relative au réemploi

Afin de cadrer et de préciser l'objet de la recherche il est nécessaire de définir chacun des termes relatifs au réemploi et de les différencier.

**Réemploi** : toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui ne sont pas des déchets sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus

**Réutilisation** : toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui sont devenus des déchets sont utilisés de nouveau.

**Recyclage** : toute opération de valorisation par laquelle les déchets, y compris les déchets organiques, sont retraités en substances, matières ou produits aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins.

**Déchet** : toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se débarrasser.

**Déchet inerte** : déchet qui ne se décompose pas, ne brûle pas et ne produit aucune réaction physique ou chimique. Exemple : briques, bétons, tuiles, céramiques, verre, pierres de site non pollué.

**Déchet non inerte non dangereux** : déchet qui se décompose au fil du temps mais ne présente aucun risque sanitaire. Exemple : bois, plastique, métaux.

**Déchet dangereux** : déchet présentant un risque sanitaire, impropre au réemploi et à la réutilisation. Exemple : amiante, terres excavées polluées, solvants, etc.

#### d. Chiffres clés du réemploi dans le secteur du bâtiment

Il est nécessaire de s'emparer des statistiques relatives aux réemploi des matériaux de construction pour avoir un aperçu du statut qu'occupe ce secteur du bâtiment.

| Secteur                           | Tranche d'effectifs salariés |                     |                      | Total        |
|-----------------------------------|------------------------------|---------------------|----------------------|--------------|
|                                   | De 0 à 19 salariés           | De 20 à 99 salariés | 100 salariés et plus |              |
| <b>Bâtiment</b>                   | <b>21,9</b>                  | <b>14,7</b>         | <b>5,5</b>           | <b>42,2</b>  |
| - Gros œuvre                      | 12,1                         | 13,7                | 5,1                  | 31,0         |
| - Second œuvre                    | 9,8                          | 1,0                 | 0,4                  | 11,2         |
| <b>Travaux publics</b>            | <b>72,5</b>                  | <b>77,4</b>         | <b>35,4</b>          | <b>185,3</b> |
| <b>Ensemble du secteur du BTP</b> | <b>94,5</b>                  | <b>92,1</b>         | <b>40,9</b>          | <b>227,5</b> |

Tableau 2 : quantité (en millions de tonnes) de déchets du BTP - enquête « Déchets et déblais produits par l'activité de construction en 2014 », SOeS.

En 2014, le secteur du BTP produisait 277,5 millions de tonnes de déchet ce qui représente environs 70% de la production de déchets en France. Le secteur du bâtiment à produit 42,2 millions de tonnes de déchet dont la moitié provient de la démolition. (« Déchets du bâtiment » s. d.).

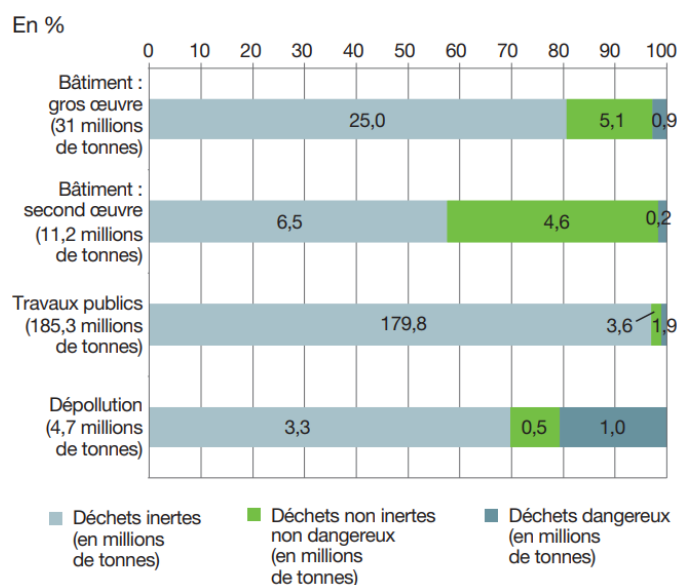


Figure 2 : répartition des différents types de déchets - enquête « Déchets et déblais produits par l'activité de construction en 2014 », SOeS.

Le secteur des travaux publics constitue le plus grand gisement de déchet inertes avec 179,8 millions de tonnes produites en 2014. Le secteur du bâtiment (gros œuvre et second œuvre confondus) représente la part de production de déchet non inerte non dangereux la plus grande avec un total de 9,7 millions de tonnes.

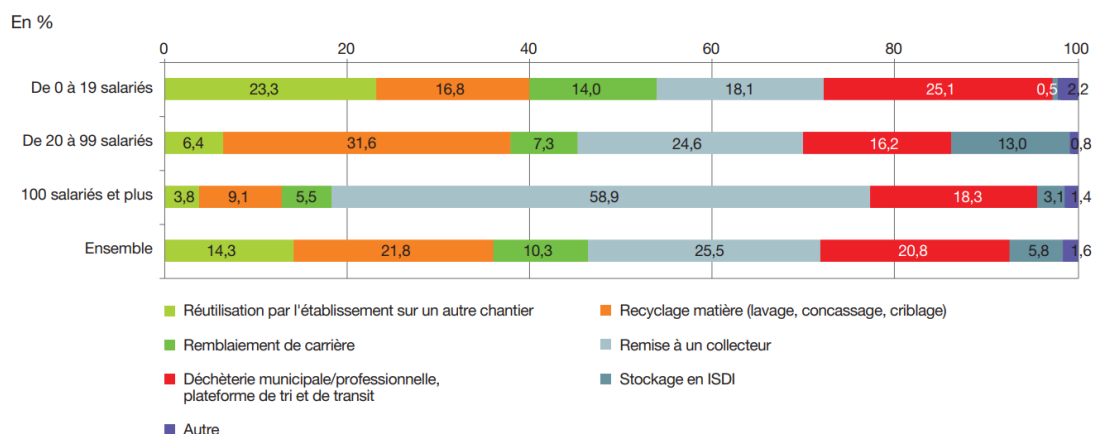


Figure 3 : répartition des déchets inertes selon leur destination première en sortie de chantier concernant le secteur du bâtiment - enquête « Déchets et déblais produits par l'activité de construction en 2014 », SOeS.

Seules les petites entreprises réutilisent en majorité leur déchets sur d'autre chantier, autrement ils sont dans la plupart des cas déposés en déchetterie publique ou professionnelle, recyclés ou encore remis à un collecteur (plateformes de regroupement, centre de collecte, déchetterie privée).

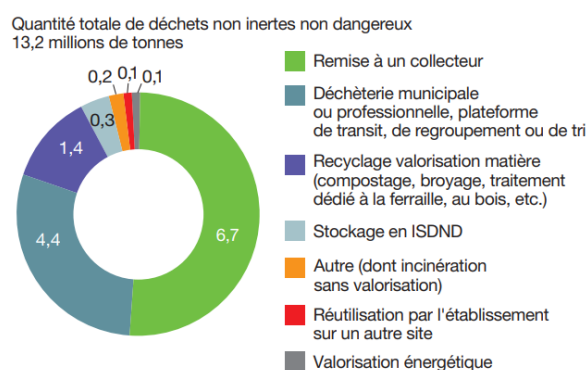


Figure 4 : répartition des déchets non inertes non dangereux selon leur destination première en sortie de chantier - enquête « Déchets et déblais produits par l'activité de construction en 2014 », SOeS.

La plupart des déchets non inertes non dangereux sont remis à un collecteur ou valoriser énergétiquement en valorisant l'énergie produite par la combustion ou la méthanisation de ces déchets. (« Économie circulaire, Déchets, Passer à l'action, Valorisation énergétique » s. d.)

## e. Obstacles à l'essor du réemploi

Bien que certains acteurs du bâtiment s'intéressent au réemploi, les filières sont encore peu organisées. L'accès aux matériaux est limité car peu de gisements sont identifiés et les diagnostics ressources sont rares. En découle une quasi-absence des lieux de stockages de ces matériaux. La main d'œuvre qualifiée de déconstruction est limitée. Ces problématiques rendent l'intérêt économique du réemploi discutable. « Faire des économies sur un projet avec le réemploi ne doit pas être, à l'heure actuelle, l'unique angle d'attaque » (Bellastock, ADEME, et CSTB 2018)

| Problèmes                                    | Peut-on y remédier avec l'IA ou les outils numériques ? | Comment ?                                                                     |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Peu de gisements                             | O                                                       | Identifier les gisements à l'aide d'une base de donnée                        |
| Peu de stockages                             | X                                                       |                                                                               |
| Diagnostiques ressource                      | X                                                       |                                                                               |
| Manque de main d'œuvre                       | X                                                       |                                                                               |
| Attractivité économique                      | O                                                       | Optimiser les étapes de conception afin d'économiser du temps et des moyens.  |
| Certification et assurance                   | O                                                       | Simplifier le processus de certification à l'aide de l'IA et du deep learning |
| Limitation des échelles et de l'homogénéité  | O                                                       | cf : "Peu de gisements"                                                       |
| Conception à partir d'un inventaire complexe | O                                                       | Faire appel à l'IA générative pour donner des pistes en phase d'esquisse      |

Tableau 3 : Potentiels usages de l'IA pour pallier les limites du réemploi.

## 2. Les outils numériques et leur utilisation dans le réemploi

### a. Les outils de modélisation numérique

#### i. Introduction aux outils de modélisation numérique

Brève histoire de la CAO et des outils de modélisation numériques.

#### ii. Le BIM

Le Building Information Model (BIM)

#### iii. La conception paramétrique

### b. L'intelligence artificielle

#### i. Introduction à l'Intelligence Artificielle (IA).

L'intelligence artificielle correspond à l'« ensemble de théories et de techniques mises en œuvre en vue de réaliser des machines capables de simuler l'intelligence humaine. » (Larousse s. d.). Il s'agit donc d'un programme composé d'algorithmes dont l'objectif est de reproduire des comportements humains tels que le raisonnement, la planification et la créativité.

En 1950, Alan M. Turing, un mathématicien britannique reconnu, a introduit le concept d'intelligence artificielle en publiant un article célèbre sur le « jeu de l'imitation ». (Goutefangea 2017). Turing suppose qu'un humain peut interagir avec une IA comme il le fait avec un de ses semblables.

En 1955, les successeurs de Alan M. Turing, Allen Newell, John C. Shaw et Herbert A. Simon créent le premier programme d'IA, le *Logic Theorist*, dont l'objectif était de démontrer des théorèmes de logique. En 1958, le mathématicien américain John McCarthy met l'accent sur la logique symbolique, en inventant le Lisp (List processing), un langage de programmation interactif adopté pour la création d'IA.

ii. *Définitions des termes liés à l'IA.*

**Deep Learning :** L'apprentissage profond est un procédé d'apprentissage automatique utilisant des réseaux de neurones possédants plusieurs couches de neurones cachées. Ces algorithmes possédant de très nombreux paramètres, ils demandent un nombre très important de données afin d'être entraînés. (« Apprentissage profond (deep learning) » s. d.)

**Réseau de neurones artificiels :** Dans le domaine de l'intelligence artificielle, un réseau de neurones artificiels est un ensemble organisé de neurones interconnectés permettant la résolution de problèmes complexes tels que la vision par ordinateur ou le traitement du langage naturel. (« Réseau de neurones artificiels (artificial neural network) » s. d.)

**Machine learning :** L'apprentissage automatique (machine learning en anglais) est un champ d'étude de l'intelligence artificielle qui vise à donner aux machines la capacité d'« apprendre » à partir de données, via des modèles mathématiques. Plus précisément, il s'agit du procédé par lequel les informations pertinentes sont tirées d'un ensemble de données d'entraînement. (« Apprentissage automatique » s. d.)

**CNN :** Convolutional Neural Network, réseau neuronal convolutif en français. Il s'agit d'un réseau de neurones artificiels reproduisant le fonctionnement du cortex visuel des animaux. Il s'applique principalement à la reconnaissance d'image.

iii. *Du texte à l'image.*

Les IA génératives s'utilisent dans la création autonome de contenu comme des textes, des images et des vidéos par des systèmes informatiques. Elles utilisent des systèmes avancés de machine learning pour s'apparenter à ce qu'un humain serait à même de produire.

Il existe deux types d'IA générative, les GPT (Generative Pre-trained Transformer) et les GAN (Neurones Génératifs Antagonistes). Les GPT adoptent un modèle de *deep learning* formé par l'apprentissage de grandes données textuelles leur permettant de générer du texte pertinent à partir des données entrées. ChatGPT de OpenAI en est un exemple. Les GAN ont une architecture composée de deux parties de réseaux de neurones artificiels, l'une génératrice et l'autre discriminante. La partie génératrice produit des données tandis que la partie discriminante les compare à des données réelles pour rendre le résultat de plus en plus réaliste. Les GAN s'utilisent dans la production d'images, de vidéos et de sons. Les IA Midjourney, Stable Diffusion, Adobe Firefly et DALL-E sont des GAN.

Les IA génératives permettent d'alimenter la création artistique, de générer des mondes virtuels, d'écrire des articles ou bien de coder des programmes informatiques.

iv. *Limites des IA génératives visuelles.*

Les IA génératives présentent tout de même certains inconvénients. Le contenu qu'elles produisent a une qualité hétérogène, les résultats manquent parfois de pertinence et peuvent contenir de fausses informations. Cela

implique la divulgation d'informations fallacieuses et donc de la désinformation (*Deep fake* et *fake news*).

Des problèmes liés à la responsabilité peuvent survenir lors de la création de contenu inapproprié.

Parfois l'IA rencontre des difficultés à trier et hiérarchiser l'information, créant une surcharge de données.

Des questions éthiques se posent notamment concernant les droits d'auteur lors de la production d'image au style artistique emprunté à un artiste par exemple.

Les IA génératives peuvent également représenter une menace pour l'emploi en automatisant certains procédés, principalement dans les domaines de la création de contenus. (« Qu'est-ce que l'IA (Intelligence Artificielle) générative ? » 2023)

### c. Le numériques au service du réemploi

Le BIM permet, par l'intégration des informations relatives au modèle numérique, de référencer l'intégralité des composants d'un projet. Il est donc possible d'obtenir l'inventaire des matériaux d'un projet en voie de démolition et donc de s'affranchir du diagnostic ressource.

Néanmoins, à ce jour la majorité des bâtiments voués à être démolis ont été réalisés avant l'apparition et l'adoption du BIM par les maîtres d'œuvre ainsi que tous les intervenants participant à la conception d'un projet.

## Partie 2 - Expérimentations

### 1. Méthodologies expérimentales

#### a. Hypothèses et problématique

**Hypothèse 1 :** Les outils numériques et l'IA permettront de rendre la filière du réemploi plus rentable par l'optimisation du processus de conception.

**Hypothèse 2 :** Les IA génératives facilitent la création d'esquisse et la médiation du projet par l'image.

**Hypothèse 3 :** Les logiciels de conception paramétrique simplifient l'organisation et l'assemblage d'éléments nombreux et hétérogènes.

**Hypothèse 4 :** Les logiciels de conception numérique sont nécessaires à la création de pièces graphiques pour la réalisation du projet.

Pour tester ces hypothèses, l'expérimentation consistera en la génération d'images avec les IA génératives visuelles. Afin de générer des images pertinentes, la création de saisies de textes ou « prompt » mettra l'accent sur l'identification de variables claires mettant en évidence les critères relatifs à la construction en matériaux de

réemploi. Les « prompts » seront les plus claires possibles et en anglais afin d'éviter les éventuelles erreurs de traduction et les biais par le recours à des références susceptibles d'erronés les résultats escomptés.

Selon les résultats obtenus, de possibles hypothèses de mise en œuvre découleront de l'analyse des images générées.

En répondant à ces hypothèses par l'expérimentation nous seront à même d'identifier les potentiels qu'ont les IA génératives et les outils numériques dans la conception d'architecture en matériaux de réemploi.

## **b. Identification des variables**

L'objet de l'expérimentation est d'évaluer les capacités des outils de conception numériques et des IA génératives à optimiser le processus de conception d'architecture en matériaux de réemploi. Ainsi il est primordial d'identifier ces capacités selon les critères qui sont inhérents au réemploi et à la construction de manière générale. Lesquels sont : les matériaux, les échelles, les quantités, les dimensions, l'optimisation et l'économie, les assemblages et l'organisation ainsi que les modèles et références.

### c. Sélection des outils numériques

Afin d'évaluer les potentiels des IA génératives et des outils de modélisation numériques dans la conception d'architecture en matériaux de réemploi il est nécessaire de sélectionner les logiciels utiliser dans le cadre de cette expérimentation.

Le choix c'est donc porté sur les logiciels les plus utilisés à ce jour, à savoir :

**CAO** : Revit et Rhino

**Conception paramétrique** : Dynamo et Grasshopper

**Les IA génératives visuelles** : Copilot (DALL-E 3) et Midjourney

## 2. Références

Les résultats obtenus seront référencés selon un modèle de tableau type incluant les critères testés, les prompts correspondants ainsi que les images générées par Midjourney et Dall-E. Le modèle de références sera celui présenté ci-dessous.

| Critère   | Prompt   | IA génératives visuelles  |                           |
|-----------|----------|---------------------------|---------------------------|
|           |          | Midjourney                | Dall-E                    |
| "Critère" | "prompt" | "images générée par l'IA" | "images générée par l'IA" |
|           | "prompt" | "images générée par l'IA" | "images générée par l'IA" |

## Partie 3 - Analyse

### 1. Interprétation des résultats

#### a. Matérialité

**Hypothèse :** Les IA génératives sont capables d'apporter une représentation réaliste et cohérente selon l'emploi des matériaux.

Dans un premier temps, les images générées présentent le matériau utilisé dans une démarche innovante, économique et durable. La variable « réemploi » ou « reclaimed » en anglais est ensuite intégrée au « prompt » afin d'estimer la capacité des IA à repenser l'expression et la mise en œuvre du matériau.

| Critère     | Prompt                                                                                                 | IA génératives visuelles                                                             |                                                                                       |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|             |                                                                                                        | Midjourney                                                                           | Dall-E                                                                                |
| Matérialité | a contemporary architecture made of wood with an innovative, sustainable and economic design           |   |   |
|             | a contemporary architecture made of reclaimed wood with an innovative, sustainable and economic design |  |  |

*“a contemporary architecture made of wood with an innovative, sustainable and economic design”*

**Constats :** Midjourney : L'IA a généré un bâtiment de trois étages en typologies de plot, composé de bois et de verre. Il présente des coursives périphériques et une structure composée de poteaux apparents en bois. Le bardage en bois verticale présente des dimensions courantes et la trame structurelle paraît régulière.

Dall-E : Les formes sont effectivement innovante cependant la mise en œuvre de telle géométrie serait certainement couteuse et chronophage.

*“a contemporary architecture made of reclaimed wood with an innovative, sustainable and economic design”*

**Constats** : Midjourney : La trame structurelle est régulière. Le bardage horizontal en bois dispose de dimensions variables. La mise en œuvre est claire.

Dall-E : La volumétrie est assez complexe. Le bardage bois est verticale et comme pour Midjourney les éléments sont de dimensions différentes.

**Conclusion** : Les matériaux semblent fidèlement représentés par leurs teintes, leurs dimensions et leurs mises en œuvre. Les géométries qui découlent du choix des matériaux et de leurs propriétés sont cohérentes dans le cas des images générées par Midjourney (orthogonalité et rigueur). La variable « réemploi » semble bien intégrée par les IA. Dall-E a une tendance a créer des projets monumentaux par leur volumétrie, s’affranchissant du critère économique.

|             |                                                                                                         |                                                                                      |                                                                                       |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Materialité | a contemporary architecture made of steel with an innovative, sustainable and economic design           |   |   |
|             | a contemporary architecture made of reclaimed steel with an innovative, sustainable and economic design |  |  |

*“a contemporary architecture made of steel with an innovative, sustainable and economic design”*

**Constats** : Midjourney : Apparence et structure en cohésion avec la matériau utilisé et les variables durables et économiques.

Dall-E : Propose à nouveaux des formes extravagantes.

*“a contemporary architecture made of reclaimed steel with an innovative, sustainable and economic design”*

**Constats** : Midjourney : La variable « réemploi » semble avoir fait varier le parement de façade en représentant des panneaux en acier patiné type Corten.

Dall-E : Projet tenu dont la trame est régulière. Emploi de poteaux HEA et poutre IPN, élément facilement réemployable grâce à leur pérennité dans le temps.

**Conclusion :** Les matériaux semblent fidèlement représentés par leurs teintes, leurs dimensions et leurs mises en œuvre. Les géométries qui découlent du choix du matériau et de ses propriétés sont cohérentes dans le cas des images générées par Midjourney (orthogonalité et rigueur). La variable « réemploi » semble bien intégrée par Midjourney. Dall-E a compris que le réemploi sous-entend un projet économique par sa mise en œuvre simplifiée (trame régulière).

|             |                                                                                                           |                                                                                     |                                                                                      |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Materialité | a contemporary architecture made of plastic with an innovative, sustainable and economic design           |   |   |
|             | a contemporary architecture made of reclaimed plastic with an innovative, sustainable and economic design |  |  |

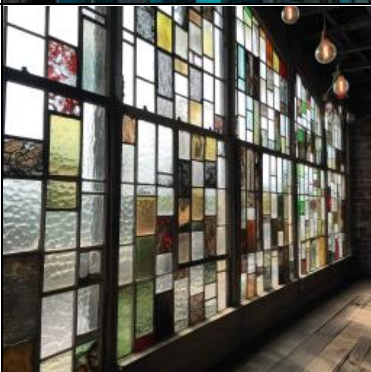
*“a contemporary architecture made of plastic with an innovative, sustainable and economic design”*

|             |                                                                                                            |                                                                                      |                                                                                       |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Materialité | a contemporary architecture made of glass with an innovative, sustainable and economic design              |    |    |
|             | a contemporary architecture made of reclaimed glass with an innovative, sustainable and economic design    |    |    |
| Materialité | a contemporary architecture made of concrete with an innovative, sustainable and economic design           |   |   |
|             | a contemporary architecture made of reclaimed concrete with an innovative, sustainable and economic design |  |  |

|             |                                                                                                                    |                                                                                    |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Materialité | <p>a contemporary architecture made of reclaimed materials with an innovative, sustainable and economic design</p> |  |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|

### c. Assemblage

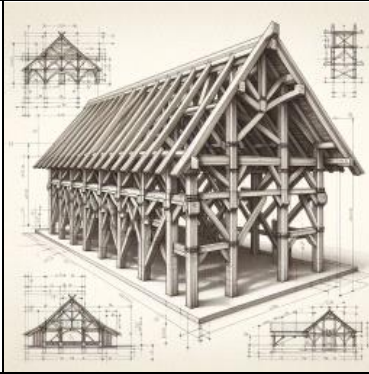
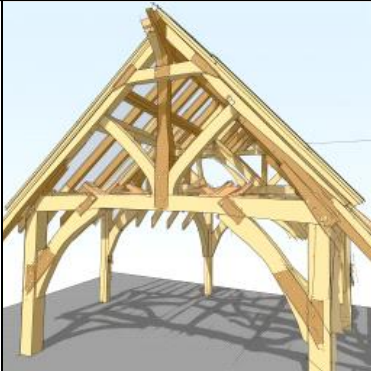
**Hypothèse :** Les IA génératives sont capables d'organiser des éléments hétérogènes et d'apporter des solutions d'assemblages innovantes et inédites.

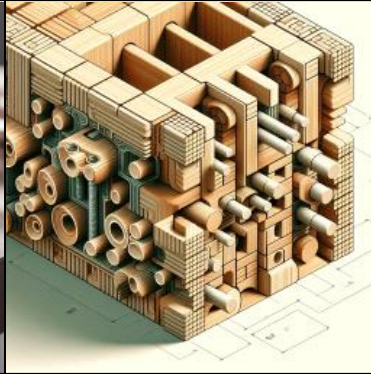
| Critère    | Prompt                                                                   | IA génératives visuelles                                                             |                                                                                       |
|------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|            |                                                                          | Midjourney                                                                           | Dall-E                                                                                |
| Assemblage | a facade made of windows of different sizes                              |    |    |
|            | a curtain wall made of windows of different sizes                        |   |   |
|            | a curtain wall made of reclaimed windows of different sizes              |  |  |
|            | a contemporary curtain wall made of reclaimed windows of different sizes |  |  |

*“a curtain wall made of reclaimed windows of different sizes”*

**Constats :** L'apparence des fenêtres est hétérogène. Leur assemblage suit une trame verticale ainsi leurs hauteurs sont variables mais leurs largeurs sont courantes. L'image proposée par Dall-E positionnent des volets perpendiculairement à la façades, une analogie peut être faites avec les raidisseurs en verres parfois utilisés dans la mise en œuvre de murs rideaux ou « curtain wall », terme utilisé dans le « prompt ».

**Conclusion :** Les IA sont capables d'organiser des éléments hétérogènes bien qu'une logique d'assemblage et une trame sont identifiables. La mise en œuvre proposée par l'IA pose des questions qui induisent des réponses innovantes.

|            |                                                                                             |                                                                                     |                                                                                      |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Assemblage | a timber truss                                                                              |   |   |
|            | a timber truss made of reclaimed wood                                                       |   |   |
|            | a timber roof truss with the king post, the truss webs, the bottom chors and the top chords |  |  |

|            |                                            |                                                                                    |                                                                                     |
|------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Assemblage | a tenon-mortise assembly                   |  |  |
|            | an innovative wood assembly without screws |  |  |

## d. Optimisation et économie

**Hypothèse :** Les IA génératives ont la capacité de prendre en compte l'optimisation des ressources et l'économie du projet en générant des images dans lesquelles les matériaux sont aux bons endroits et en bonne quantité.

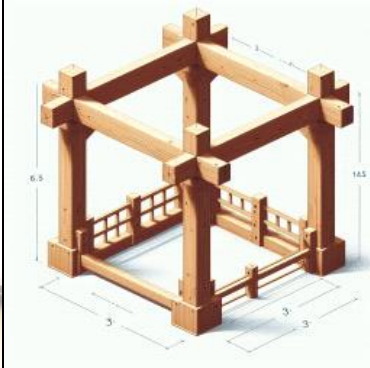
| Critère                  | Prompt                                                     | IA génératives visuelles                                                             |                                                                                       |
|--------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                          |                                                            | Midjourney                                                                           | Dall-E                                                                                |
| Optimisation et économie | architecture with an innovative use of wood                |    |    |
|                          | architecture with economical use of wood                   |   |   |
|                          | architecture with an economical and innovative use of wood |  |  |

**Constats :**

**Conclusion :**

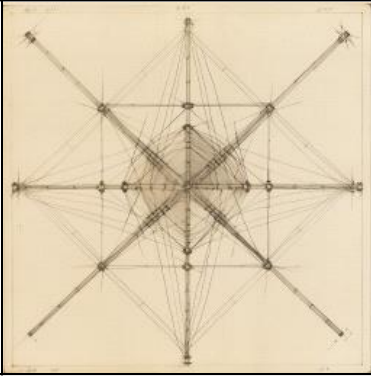
## e. Quantité et dimension

**Hypothèse :** Les IA génératives sont capables de produire des images à partir d'une quantité d'éléments et de leurs dimensions tout en apportant une échelle pertinente au projet.

| Critère               | Prompt                                                                                                                                                                                                                                                   | IA génératives visuelles                                                           |                                                                                     |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                       |                                                                                                                                                                                                                                                          | Midjourney                                                                         | Dall-E                                                                              |
| Quantité et dimension | a wooden post and beam structure measuring 3 meters by 3 meters and 3 meters high. There are four posts and four beams. The posts have a section of 15 centimeters by 15 centimeters and the beams have a section of 7.5 centimeters by 17.5 centimeters |  |  |

**Constats :**

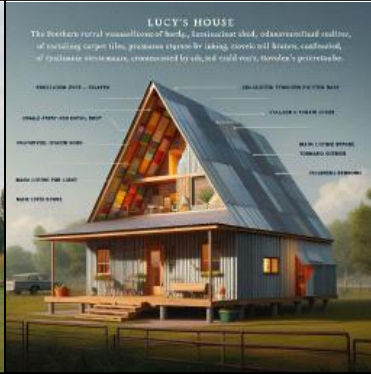
**Conclusion :**

|                       |                                                                                                                   |                                                                                      |                                                                                       |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Quantité et dimension | a facade with six windows                                                                                         |   |   |
| Quantité et dimension | an architecture plan of a structure made of 9 poles                                                               |  |  |
| Quantité et dimension | a house with walls made of 72 000 individual stacked carpet tiles held in compression by a heavy wooden ring-beam |  |  |

## f. Modèles et références

**Hypothèse :** Les IA génératives peuvent créer des projets à partir de contraintes fonctionnelles en se référant à une base de données conséquente.

| Critère               | Prompt                              | IA génératives visuelles                                                             |                                                                                       |
|-----------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                       |                                     | Midjourney                                                                           | Dall-E                                                                                |
| Modèles et références | architecture adapted to fires       |    |    |
|                       | architecture adapted to floodings   |    |    |
|                       | architecture adapted to earthquakes |   |   |
|                       | architecture adapted to heatwaves   |  |  |
|                       | architecture adapted to drought     |  |  |

|                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Modèles et références | <p>Lucy's House from Rural Studio with Southern rural vernacular forms of sheds, barns, and trailers, enlightened modern sensibility, walls made of salvaged carpet tiles compressed by steel rods, polychromatic striations on wall planes, exaggerated Tyrolean pitched roof, single-</p>       |  |  |
|                       | <p>The new headquarters for the EU Council in Brussels, Belgium, featuring a large, egg-shaped structure hidden behind a wall of countless windows with wooden frames of various sizes, repurposed from buildings in the EU's member states, symbolizing the unity of the states and the EU's</p> |  |  |

## 2. Discussion sur l'intégration des outils numériques et de l'IA pour l'architecture de réemploi

### a. Limites des outils numériques et des IA dans le processus de conception d'architecture en réemploi

### b. Perspectives d'usages

Les IA génératives sont adaptées dans la recherche d'idées pour développer le projet. Communication et projection facilitée par la génération d'image rapide avec échelle et matérialité pertinente. Nécessite le recours à d'autres logiciels.

Le BIM pour un jumeau numérique du projet, idéal pour l'exécution par la création des pièces graphiques nécessaires. Interopérabilité entre différents corps de métier. Communication du projet facilitée par la 3D.

La conception paramétrique idéale dans la création de formes complexes dont la conception est chronophage. La mise en place des paramètres nécessite une certaine expertise en la matière.

## Conclusion

L'IA générative peut être une réponse à la conception d'architecture en matériaux de réemploi, seulement l'architecte doit interpréter les résultats obtenus afin d'en faire un projet réalisable. Ainsi l'IA générative semble efficace en phase d'esquisse, elle peut soutenir l'architecte dans la projection d'une architecture à partir d'un inventaire préétabli et potentiellement variable. Les matériaux ne sont pas toujours clairement identifiables et leurs assemblages sont parfois imprécis. Néanmoins ces imprécisions soulèvent des questions quant à la mise en œuvre qui peuvent faire l'objet d'innovations qui tendent à répondre à la nécessité d'économiser et d'optimiser l'emploi de la matière.

Les systèmes de reconnaissances d'image utilisant l'apprentissage profond peuvent présenter un outil servant à la certification et à la classification des matériaux selon leur degré d'usure et leur performance mécanique supposé en analysant ces matériaux et en identifiant leurs faiblesses.

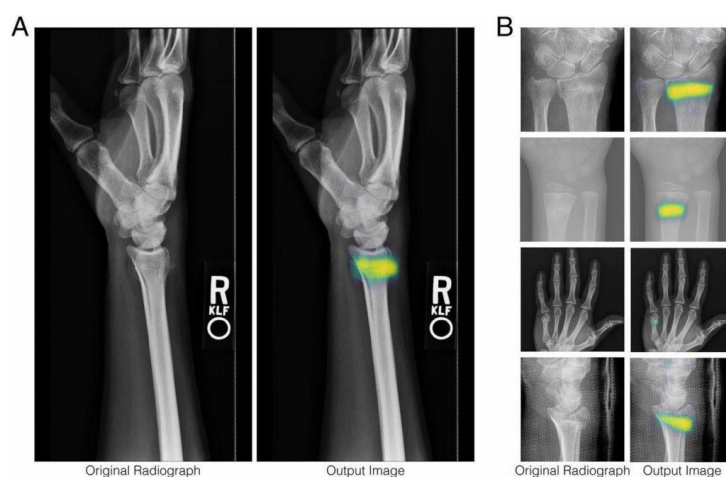


Figure 5 : Détection automatique d'une fracture à l'aide du Deep Learning, [datascientest.com](https://datascientest.com)

L'usage de l'IA dans la recherche de gisements de matériaux de réemploi permettant d'établir un inventaire se verrait grandement simplifié. L'IA serait à même de coupler toutes les informations relatives au projet et aux gisements par la consultation d'une base de données complète.

Composer à partir d'un inventaire de matériaux préexistant bouleverse l'ordre de conception d'un projet, de nos jours les architectes conçoivent la plupart du temps à partir d'éléments dont la provenance n'est identifiée qu'à partir de la phase de DCE. Concevoir avec un inventaire impose une frugalité des projets qui est indispensable dans le futur.

## Bibliographie

Bellastock, ADEME, et CSTB. « REPAR#2, Le réemploi passerelle entre architecture et industrie », 4 avril 2018, 161.

Chiron, Félix. « Le réemploi dans la construction: une perspective pour une architecture soucieuse des enjeux environnementaux », s. d.

Drapeau, Lambert. « Réemploi: comment le réemploi se développe-t-il au delà des architectures manifestes? », s. d.

Peroni, Adriano. « I draghi antropofagi nella facciata del duomo di Pisa ». *Civilisation Médiévale* 7, n° 1 (1999): 175-82.

Lebossé, Maxence. « Réemploi et numérique, quels enjeux pour l'architect(ur)e ? Entrée en matière par le matériau bois. » In *11e Forum International Bois Construction 2022*. Epinal, France, 2022. <https://hal.science/hal-03729534>.

Lebossé, Maxence, Franck Besançon, Gilles Halin, et Alain Fuchs. « Values of reclaimed timber ». In *World Conference on Timber Engineering 2023 (WCTE2023)*, 3608-17. Oslo, Norway: World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023), 2023. <https://doi.org/10.52202/069179-0470>.

Goutefangea, Patrick. « Alan Turing, le “ jeu de l'imitation ” et la première personne », juin 2017. <https://hal.science/hal-01306327>.

Agkathidis, Asterios. *Generative Design: Form-finding Techniques in Architecture*. 1er édition. London: Laurence King Publishing, 2016.

Boissieu, Aurélie de. *BIM computationnel, des données vers l'IA: Ingénierie & architecture, enseignement & recherche*. Editions Eyrolles, 2024.

Bolmont, David, et Michel Fouchard. *Le guide du bois et ses dérivés: le bois et la neutralité carbone, l'arbre et la forêt, les propriétés du bois, les dérivés du bois, les domaines d'emploi*. 2e éd. La Plaine-Saint-Denis: Afnor éditions, 2023.

Herzog, Thomas. *Timber Construction Manual*. Birkhäuser, 2004.

Jodidio, Philip. *Wood Architecture Now !* Cologne [Paris]: Taschen, 2011.

*Réemploi, architecture et construction: méthodes, ressources, conception, mise en oeuvre*. Antony: Éditions « Le Moniteur », 2022.

Rotor, éd. *Déconstruction et réemploi: comment faire circuler les éléments de construction*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, 2018.

Solomon, Alan, Klaas Armster, et Michel Arnaud. *Reclaimed Wood: A Field Guide*. New York: Abrams, 2019.

Tedeschi, Arturo, Roy Williams, et Arturo Tedeschi. *Parametric Architecture with Grasshopper: Primer*. Brienza: Edizioni Le Pensier, 2011.

Uffelen, Chris van, éd. *Wood Works: Sustainability, Versatility, Stability*. 1st edition. Salenstein: Braun, 2020.

Agence de la transition écologique. « Économie circulaire, Déchets, Passer à l'action, Valorisation énergétique ». Consulté le 4 décembre 2023. <https://expertises.ademe.fr/economie-circulaire/dechets/passer-a-laction/valorisation-energetique>.

« Apprentissage automatique ». Consulté le 4 décembre 2023. <https://www.cnil.fr/fr/definition/apprentissage-automatique>.

« Apprentissage profond (deep learning) ». Consulté le 4 décembre 2023. <https://www.cnil.fr/fr/definition/apprentissage-profond-deep-learning>.

CSTB. « Missions et activités ». CSTB. Consulté le 3 décembre 2023. <http://www.cstb.fr/fr/cstb/missions-activites/>.

La Grande Ecole du Numérique. « Qu'est-ce que l'IA (Intelligence Artificielle) générative ? », 30 octobre 2023. <https://www.grandeecolenumérique.fr/les-metiers-porteurs/qu-est-ce-ia-intelligence-artificielle-generative>.

Larousse, Éditions. « intelligence artificielle - LAROUSSE ». Consulté le 4 décembre 2023. [https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/intelligence\\_artificielle/187257](https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/intelligence_artificielle/187257).

Ministères Écologie Énergie Territoires. « Déchets du bâtiment ». Consulté le 3 décembre 2023. <https://www.ecologie.gouv.fr/dechets-du-batiment>.

Ordre des architectes. « Entrée en vigueur du « Diagnostic ressources » le 1er juillet 2023 », 7 juin 2023. <https://www.architectes.org/actualites/entree-en-vigueur-du-diagnostic-ressources-le-1er-juillet-2023>.

Ordre des architectes. « Réemploi et réutilisation des matériaux issus de la déconstruction : étapes clés », 14 janvier 2020. <https://www.architectes.org/reemploi-et-reutilisation-des-materiaux-issus-de-la-deconstruction-etapes-cles>.

« Réseau de neurones artificiels (artificial neural network) ». Consulté le 4 décembre 2023. <https://www.cnil.fr/fr/definition/reseau-de-neurones-artificiels-artificial-neural-network>.

« Reuse Toolkit: Material Sheets », 9 novembre 2021. <https://vb.nweurope.eu/projects/project-search/fcrbe-facilitating-the-circulation-of-reclaimed-building-elements-in-northwestern-europe/news/reuse-toolkit-material-sheets/>.

ArchDaily. « Reduce, Reuse and Recycle: The Three R's Rule Applied to Architecture », 6 août 2020. <https://www.archdaily.com/945040/reduce-reuse-and-recycle-the-three-rs-rule-applied-to-architecture>.

ArchDaily. « Sustainable Policy: How Deconstruction Plans Are Revolutionizing Construction Waste Management in the United States », 18 mars 2024. <https://www.archdaily.com/1014642/sustainable-policy-how-deconstruction-policies-are-revolutionizing-construction-waste-management-in-the-united-states>.

« Architectural Salvage, Reclamation Yards, UK, USA and more | SalvoWEB ». Consulté le 4 avril 2024. <https://www.salvoweb.com/salvonews/29459-salvo-strongly-supports-the-salvage-and-reuse-of-reclaimed-timbers>.

« Deconstruct, Do Not Demolish: The Practice of Reuse of Materials in Architecture | ArchDaily ». Consulté le 4 avril 2024. <https://www.archdaily.com/974056/deconstruct-do-not-demolish-the>

[practice-of-reuse-of-materials-in-architecture?ad\\_medium=mobile-widget&ad\\_name=related-tags-article-show.](#)

KBOB, Conférence de coordination des services de la construction et des immeubles des maîtres d’ouvrage publics. « Données écobilans dans la construction ». Consulté le 4 avril 2024.  
[https://www.kbob.admin.ch/kbob/fr/home/themen-leistungen/nachhaltiges-bauen/oekobilanzdaten\\_baubereich.html.](https://www.kbob.admin.ch/kbob/fr/home/themen-leistungen/nachhaltiges-bauen/oekobilanzdaten_baubereich.html)

# Annexes

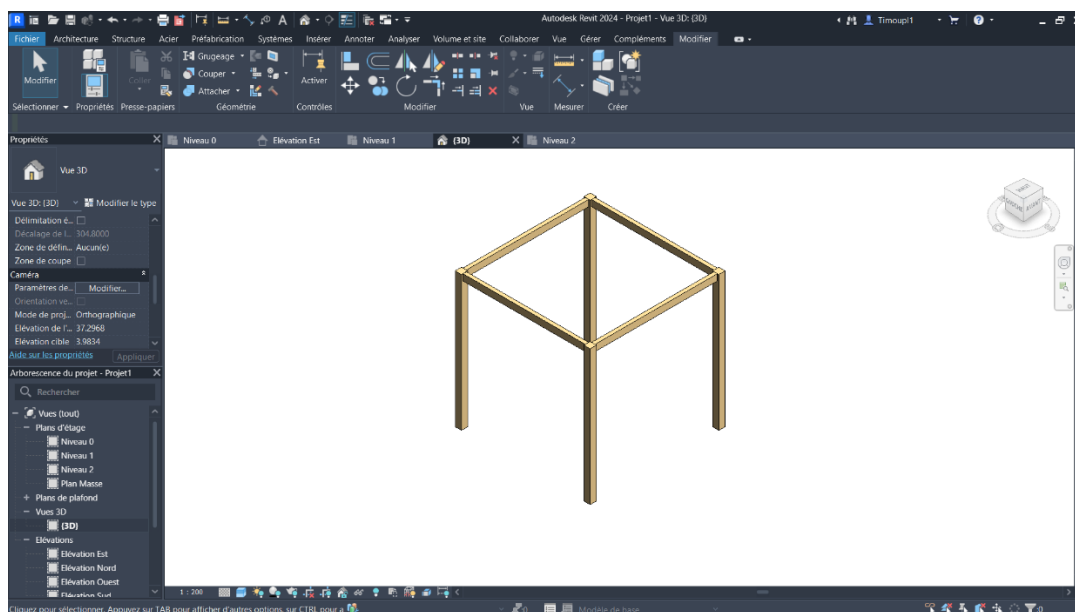


Figure 6 - Critère : Structure en bois de 3m par 3m composée de 4 poteaux de 140mm x 140mm par 3m de haut et 4 poutres de 76mm par 140mm par 3m de long.

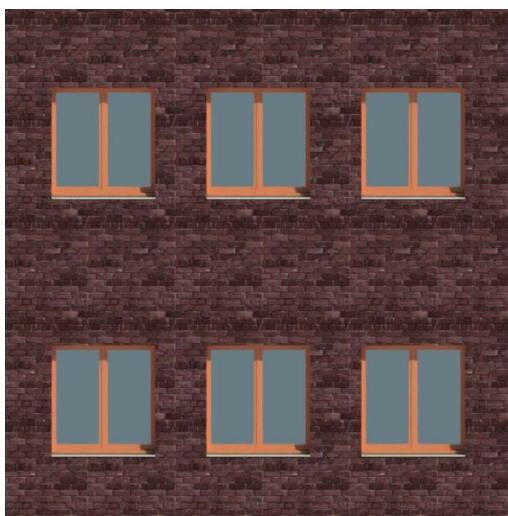
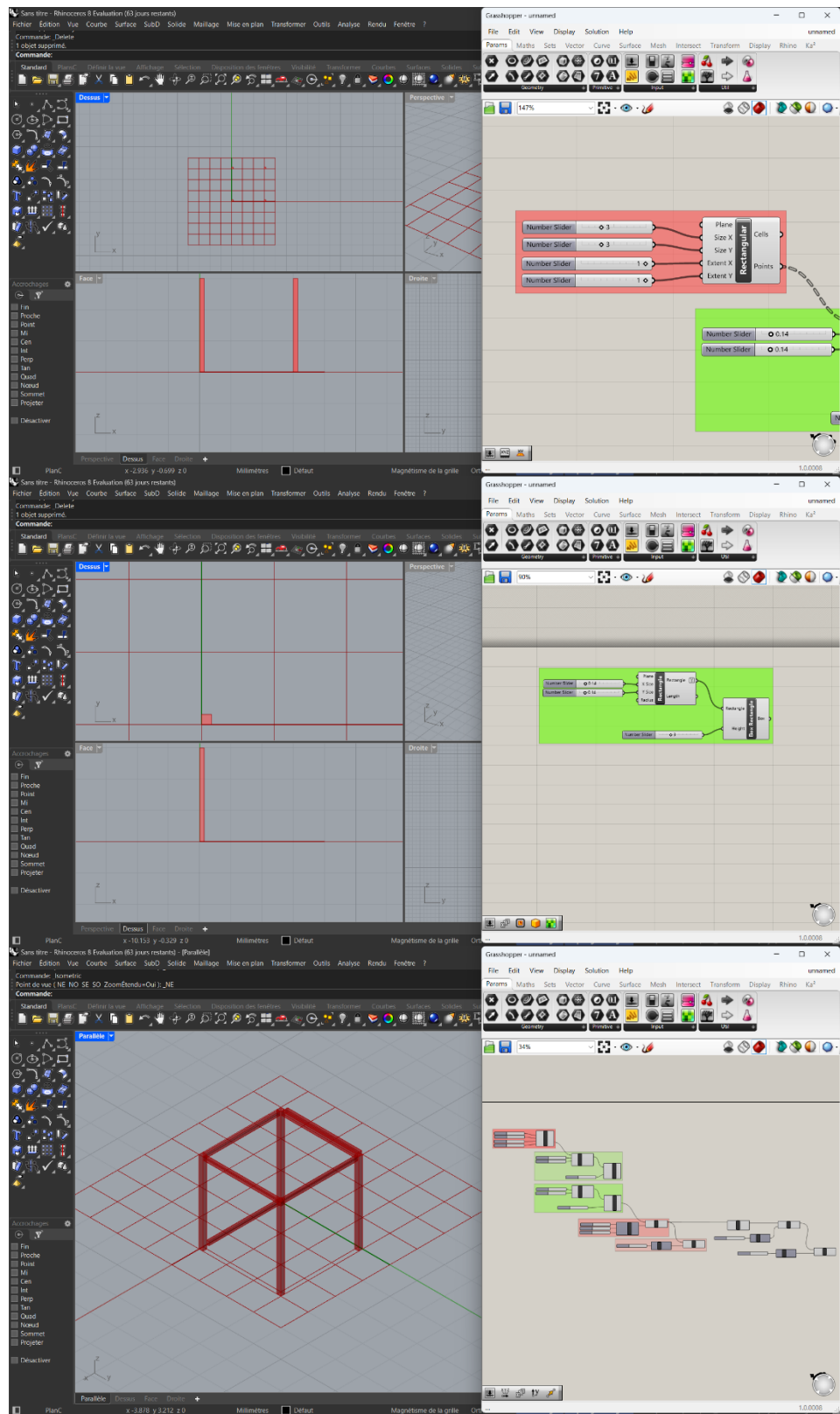


Figure 7 - Un mur en brique avec 6 fenêtres



*Critère : Structure en bois de 3m par 3m composée de 4 poteaux de 140mm x 140mm par 3m de haut et 4 poutres de 76mm par 140mm par 3m de long.*