



HAL
open science

Conception des bâtiments assurant leur réversibilité, leur déconstruction et leur réemploi, méthodologie de suivi et évaluation environnementale sur les cycles de vie

Ingrid Bertin

► To cite this version:

Ingrid Bertin. Conception des bâtiments assurant leur réversibilité, leur déconstruction et leur réemploi, méthodologie de suivi et évaluation environnementale sur les cycles de vie. Matériaux. Université Paris-Est, 2020. Français. NNT : 2020PESC1041 . tel-03221179

HAL Id: tel-03221179

<https://pastel.hal.science/tel-03221179v1>

Submitted on 7 May 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE PARIS-EST
ECOLE DOCTORALE SCIENCES, INGENIERIE ET ENVIRONNEMENT

THESE DE DOCTORAT

Thèse présentée pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE PARIS-EST
Discipline : Structures et matériaux

Présentée par
Ingrid BERTIN

Sujet de la thèse

**Conception des bâtiments assurant leur réversibilité, leur déconstruction et leur réemploi,
méthodologie de suivi et évaluation environnementale sur les cycles de vie**

Laboratoire NAVIER – Équipe MSA
Soutenue le 8 décembre 2020

Composition de jury :

Rapporteurs	Pr.	Farid Benboudjema, Président du jury	ENS Paris-Saclay, LMT
Examineurs	Pr.	Guillaume Habert	ETH Zürich
	Pr.	Nadia Hoyet	ENSA de Versailles
	Chercheur	Myriam Saadé-Sbeih	Université Gustave Eiffel
	Dr.	Isabelle Moulin	LERM
Directeur de thèse	Pr.	Robert Le Roy	ENSA Paris-Malaquais, Laboratoire Navier
Co-directrice de thèse	IDTPE, Chercheur	Adélaïde Feraille	Laboratoire Navier
Responsable scientifique en entreprise		Jean-Marc Jaeger	Setec tpi

A mes grands-parents qui ne sont plus là

Mon grand-père qui, sans diplôme, a construit la maison où ma mère est née.

Ma grand-mère qui, issue de la DDASS, a bâti l'environnement permettant à mon père, le premier, de faire de longues études...

Ces destins familiaux m'ont permis d'aboutir à cette thèse de doctorat.

On ne peut pas détourner un avion sans monter dedans...

(Frédéric Beigbeder, *99 francs*, 2000)

Remerciements

Puisqu'une thèse diplômée une personne mais ne s'obtient jamais seul, par ordre alphabétique tous ceux qui sont intervenus pour la thèse, en m'écoutant, me conseillant, me facilitant la tâche, pour la plupart sur leur temps libre :

Ait Ali Karim, Ait Hadi Mohand, Alaime Serge, Alexan Cristina, Atout MéliSSa, Barlet Sandrine, Bernard Christophe, Bernarhdt Stefan, Bertin Daniel, Bertin Nicole, Bezzerra João, Blanchemanche Cécile, Boistel Romain, Bonnefoi Vincent, Boudet Clément, Borrits Charlotte, Braham Nedra, Bue Michel, Carême Camille, Cerin Louisiana, Cesmat Eric, Chansard Franck, Choho Anne-Marie, Chouleur Sylvie, Cimino Florian, Clostre Auriane, Cornudella Jordi, Cravero Julien, Datry Jean-Bernard, Deguy Marielle, Dias-Simoes Rafael, El Geldeh Issam, Erzan Sylvie, Fares Moktahri, Feraille Adélaïde, Foret Gilles, Galle Yoann, Gasquet Nathalie, Gérard Thomas, Griscelli Marianne, Heitz Jean-François, Hervoches Guillaume, Horsin Nicolas, Huré Rémi, Jaeger Jean-Marc, Kahan Michel, Kaspi Marie-Françoise, Kouyoumji Jean-Luc, Laratte Bertrand, Lassoued Mansour, Lenglet Patrick, Le Roy Robert, Lebrun François, Mam Koliann, Mehmedalieva Ayshe, Mesnil Romain, Millan Thomas, Moulin Isabelle, Nanourah Anis, O'Brien Antoinette, Phothirath Nirandone, Piercy Dehay Nathalie, Pigaux François, Quénée Bernard, Rousseau Delphine, Sauvage Didier, Tanant Julien, Vicedo Pierre, Viel Grégory, Ziade Catherine, Zonco Audrey.

Je souhaite remercier tout particulièrement mon directeur de thèse Robert Le Roy, ma co-directrice Adélaïde Feraille, ainsi que Jean-Marc Jaeger mon responsable scientifique en entreprise. Merci au groupe Setec qui a accepté avec enthousiasme de financer cette thèse, qui m'a soutenue et accompagnée ces dernières années.

Un grand merci à l'équipe qui a permis de réaliser les essais au laboratoire Navier, en premier lieu Gilles Foret, Christophe Bernard, Gilles Moreau et également Tien Hoang pour la prise de mesures.

Je tiens également à remercier chaleureusement M. Farid Benboudjema qui a présidé le jury de la thèse et qui était rapporteur ainsi que M. Guillaume Habert, et mes examinatrices Mme Nadia Hoyet, Mme Myriam Saadé-Sbeih, Mme Isabelle Moulin, pour avoir accepté de juger cette thèse et pour l'attention qu'ils ont portée à ce travail.

Résumé

Dans un contexte de pression environnementale intense où le secteur de la construction dans le monde a le plus grand impact sur plusieurs indicateurs, le réemploi des éléments porteurs est le plus prometteur pour éviter significativement la production de déchets, préserver les ressources naturelles et réduire les émissions de gaz à effet de serre par la diminution de l'énergie grise.

Cette thèse porte donc sur trois principaux axes de recherches :

1. L'amélioration de la conception structurale par des typologies favorables en définissant le DfReu (Design for Reuse) afin d'anticiper la mise en œuvre d'éléments porteurs (verticaux et horizontaux) démontables et réemployables en fin de vie, d'allonger leur durée de vie, *in fine* en augmentant le stock d'éléments disponibles au réemploi
2. le développement d'une méthodologie pour la mise en place d'une traçabilité renforcée et pérenne autour d'une banque de matériaux et du BIM afin de disposer de toutes les caractéristiques, notamment physico-mécaniques, des éléments porteurs et de faciliter les processus de réemploi et l'engagement d'une nouvelle responsabilité pour l'ingénieur réemployeur
3. L'identification des paramètres clés influençant les impacts environnementaux propres au réemploi et le développement d'analyses de sensibilité, permettant une meilleure compréhension des conséquences de ce processus et de sa prise en compte lors de la conception, appuyant l'aide à la décision.

Une expérimentation fondée sur des portiques démonstrateurs en béton armé a permis de corroborer ces trois axes en générant des données manquantes dans la littérature. Cette analyse pratique de l'assemblage poteau-poutre a produit des données techniques sur le comportement structural après réemploi, mais aussi des données environnementales de mise en œuvre et déconstruction.

Ce travail propose alors une méthodologie fondée sur une chaîne d'outils pour permettre aux ingénieurs de concevoir des assemblages réversibles au sein d'une structure réemployable, de pérenniser les informations nécessaires dans la maquette BIM doublées d'une traçabilité physique, de mettre en place une banque de matériaux et d'optimiser la conception à partir d'un stock d'éléments porteurs. L'étude distingue ainsi la "conception avec un stock" qui vise à intégrer le plus grand nombre possible d'éléments disponibles, de la "conception à partir d'un stock" qui conduit au réemploi de 100% des éléments et propose ainsi un nouveau paradigme pour le concepteur.

Parallèlement, les impacts environnementaux du processus de réemploi sont étudiés à partir d'une analyse du cycle de vie (ACV). Une analyse de sensibilité déclinant, entre autres, le nombre d'usages et la durée de vie, en comparaison de constructions neuves équivalentes, permet de mieux appréhender les domaines d'intérêt du DfReu. La prise en compte de critères spécifiques à l'économie circulaire dans le bâtiment complète la définition des critères de réemployabilité. L'étude environnementale montre finalement dans quelles conditions le réemploi diminue l'impact d'un bâtiment, et identifie les paramètres clés.

Les résultats obtenus s'adressent en premier lieu aux ingénieurs structure mais plus largement aux concepteurs membres de la maîtrise d'œuvre : architectes, ingénieurs et bureaux d'études spécialisés en environnement, afin de proposer et d'inciter l'étude de variantes anticipant la réemployabilité des bâtiments nouvellement conçus. Les résultats sont, par extension, également exploitables dans les projets intervenant sur l'existant.

Mots clés : réemploi des matériaux ; réversibilité ; déconstruction ; Analyse de cycle de vie (ACV) ; économie circulaire dans le bâtiment ; building information modeling (BIM) ; traçabilité ; design for reuse (DfReu) ; structure ; construction durable ; énergie grise ; gaz à effet de serre (GES) ; immeubles de grande hauteur (IGH).

Abstract

In a context of strong environmental pressure in which the construction sector has the greatest impact, the reuse of the load-bearing elements is the most promising as it significantly avoids waste production, preserves natural resources and reduces greenhouse gas emissions by cutting down on embodied energy.

This thesis consequently covers three main areas of research:

1. Improvement of structural design through expedient typologies by defining the DfReu (Design for Reuse) in order to anticipate the use of load-bearing elements (vertical and horizontal), that can be dismantled and reused at the end of their service life to extend their lifespan, ultimately increasing the stock of available elements for reuse.
2. Development of a methodology for the implementation of a reinforced and long-lasting traceability centered on a materials bank with the use of BIM in order to secure all the characteristics, in particular physico-mechanical, of the load-bearing elements and to facilitate the reuse processes as well as the commitment of a new responsibility for the reuse engineer.
3. Identification of the key parameters influencing the environmental impacts of reuse and development of sensitivity study, allowing a better comprehension of the consequences of this process and its consideration in design to support to decision making.

An experiment based on reinforced concrete demonstration portals frames has enabled corroboration of these three lines of research by generating missing data in literature. This practical analysis of column-beam assembly has generated technical data on the structural behavior after reuse, but also environmental data for implementation and deconstruction.

This research offers subsequently a methodology based on a chain of tools to enable engineers to design reversible construction assemblies within a reusable structure, to secure the necessary information in the BIM model coupled with physical traceability, to build a bank of materials and to enhance design through a stock of load-bearing elements. The study thus distinguishes "design with a stock" which aims to combine as many available elements as possible, from "design from a stock" which leads to the reuse of 100% of the elements and thus presents a new paradigm for the designer.

At the same time, the environmental impacts of the reuse process are studied using a life cycle assessment (LCA). A sensitivity study, based among other things on the number of uses and the lifespan, in comparison to equivalent new constructions, provides a better understanding of the areas of interest of the DfReu. Consideration of criteria specific to the circular economy in buildings completes the definition of reuse criteria. In the end, environmental studies establish under which conditions reuse reduces the impact of a building and identify the key parameters.

The results obtained are primarily intended for structural engineers but more broadly for designers part of the project management: architects, engineers and environmental design offices, in order to offer and encourage the study of variants anticipating the reusability of newly designed buildings. By extension, the results can also be used in projects involving existing buildings.

Keywords: reuse of materials; reversibility; deconstruction; life cycle assessment (LCA); building circular economy; building information modeling (BIM); traceability; design for reuse (DfReu); sustainable construction; embodied energy; greenhouse gases (GHGs); high-rise buildings (HRB).

Table des matières

<i>Glossaire</i>	XVII
<i>Liste des acronymes</i>	XXIII
<i>Liste des figures</i>	XXV
<i>Liste des tableaux</i>	XXXI
<i>Liste des annexes</i>	XXXIII
Introduction	1
1. Diminuer l'impact de la construction	4
2. Privilégier l'écoconception avec le réemploi	7
3. Changement de paradigme	10
0. Responsabilités liées au réemploi	13
0.1. Contexte législatif et réglementaire	14
0.1.1. Rappel de notions législatives	14
0.1.1.1. Généralités	14
0.1.1.2. Les textes législatifs et réglementaires applicables à tous	14
0.1.1.3. Les règles techniques non obligatoires, mais imposées dans certains cas	17
0.1.1.4. Les produits de construction réglementés	18
0.1.2. Définitions législatives des termes	18
0.1.2.1. Historique de l'apparition du terme réemploi	18
0.1.2.2. Code de l'environnement	19
0.1.2.3. Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte dite LTECV, 2015	19
0.1.2.4. Précisions sur le statut des matériaux : du déchet au produit	20
0.1.2.5. Quitter le statut de déchet	20
0.1.3. Objectifs relatifs au réemploi fixés par la loi	21
0.1.3.1. Le Code de l'environnement	21
0.1.3.2. LTECV : Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte	22
0.1.3.3. Le Permis d'expérimenter de la loi ESSOC : Etat au service d'une société de confiance, dite aussi loi confiance	22
0.1.3.4. Décret n° 2015-1491 du 18 novembre 2015 relatif aux budgets carbone nationaux et à la stratégie nationale bas-carbone	23
0.1.3.5. Loi ELAN n° 2018-1021 du 23 novembre 2018 portant évolution du logement, de l'aménagement et du numérique	24
0.1.3.6. Loi énergie-climat n° 2019-1147 du 8 novembre 2019	25
0.1.3.7. Loi n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire instaurant le diagnostic ressource	25
0.1.4. Autres incitations concernant le réemploi	26
0.1.4.1. Taxations à venir	26
0.1.4.2. L'économie circulaire et économie sociale et solidaire (ESS)	26
0.1.4.3. Ville de Paris : PLAN ECONOMIE CIRCULAIRE 2017-2020	27
0.1.4.4. Feuille de route du gouvernement en faveur d'une économie 100% circulaire	29
0.1.4.5. Contexte européen	29
0.2. Contexte normatif et assurantiel	29
0.2.1. Des normes rendues obligatoires par les usages établis	29
0.2.2. Assurances et responsabilités	30
0.2.2.1. Fonctionnement traditionnel des assurances	30
0.2.2.2. Cas assurables ou non assurables	31
0.2.3. Responsabilités et risques pour la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre	32
0.2.3.1. Critères pour les techniques courantes concernant les personnes MOA/MOE/entreprises	32
0.2.4. Perspectives d'évolutions	33
0.2.4.1. Le rôle des plateformes	34
0.2.4.2. Renforcer la traçabilité	34
0.3. Conclusion	35
Références bibliographiques	36
1. Etat de l'art et limites actuelles	41
1.1. Les pratiques de réemploi	42
1.1.1. Brève(s) histoire(s) du réemploi	42

1.1.1.1.	La déconstruction, pratique courante entre symbole historique et économie de matière, jusqu'au XX ^e siècle.....	42
1.1.1.2.	« L'ad hocisme » ou la persistance d'un réemploi marginalisé.....	43
1.1.1.3.	De la préhistoire à nos jours, les habitats nomades.....	45
1.1.2.	Renouveau du réemploi depuis 2005.....	46
1.1.2.1.	Obstacles actuels au réemploi.....	46
1.1.2.2.	Réemploi à partir de l'existant et du diagnostic ressource.....	47
1.1.2.3.	Projets contemporains de réemploi.....	48
1.2.	Les concepts de design	51
1.2.1.	De la possibilité de déconstruire... ..	51
1.2.1.1.	La Grand'Mare : 1968-1969, Marcel Lods, Paul Depondt, Henri Beauclair, Quartier de la Grand'Mare, Rouen, France.....	51
1.2.1.2.	Les Marelles : 1971-1975, Bernard Kohn et Georges Maurios, Boussy-Saint-Antoine, France.....	52
1.2.1.3.	Métro de Ryad, setec tpi.....	54
1.2.1.4.	Illwerke Zentrum Montafon: 2010-2013, Hermann Kaufmann, Vandans, Vallée du Montafon, Autriche.....	55
1.2.2.	...à la volonté de démonter.....	56
1.2.2.1.	Design for... (DfX).....	57
1.2.2.2.	Design for Deconstruction/Disassembly (DfD) vs Design for Reuse (DfReu).....	58
1.2.3.	Assemblages déconstructibles.....	59
1.2.3.1.	Théorie des assemblages non abrasifs.....	59
1.2.3.2.	Connexions démontables.....	60
1.2.3.3.	Classification en fonction des forces primaires fondamentales utilisées dans différents processus d'assemblage.....	61
1.2.3.4.	Classification en fonction du degré de flexibilité des connexions.....	62
1.2.3.5.	Classification appliquée aux éléments porteurs.....	62
1.2.3.6.	En France, le projet Demodolor.....	66
1.2.3.7.	Projet européen REDUCE pour les structures métalliques.....	67
1.3.	Potentiel de traçabilité : le BIM comme support	68
1.3.1.	Besoins de traçabilité : répertoire, stocker, garantir.....	68
1.3.2.	Le processus BIM aujourd'hui.....	69
1.3.2.1.	Les dimensions BIM.....	69
1.3.2.2.	Principe de paramètres BIM.....	70
1.3.2.3.	Nomenclature.....	70
1.3.2.4.	Transmission de la donnée BIM.....	71
1.3.2.5.	Les niveaux de détail et développement LOD et niveaux d'information LOI.....	71
1.3.2.6.	Norme PPBIM (Propriétés des Produits pour la maquette numérique BIM).....	72
1.3.2.7.	Lien avec le PTNB (Plan de Transition Numérique dans le Bâtiment).....	72
1.3.3.	Développements du BIM et potentiel pour le réemploi.....	73
1.3.3.1.	Outil BIM-DfD, méthode et quantitatif des matériaux.....	73
1.3.3.2.	Outil BIM-DfD pour évaluer le potentiel de démontabilité.....	74
1.3.3.3.	Développement Suez, BatiRIM.....	75
1.3.4.	Nécessaire traçabilité des matériaux.....	75
1.3.4.1.	Gestion numérique des données bâtiments.....	76
1.3.4.2.	La traçabilité passive, puces RFID et QR Code.....	76
1.3.4.3.	La traçabilité physique active : capteurs, IoT, monitoring prédictif.....	77
1.3.5.	Les banques de matériaux.....	78
1.4.	L'évaluation environnementale du réemploi	79
1.4.1.	Définitions et contexte ACV.....	79
1.4.1.1.	Du bilan carbone à l'ACV.....	79
1.4.1.2.	Outil BIM pour l'ACV.....	85
1.4.2.	Référentiels environnementaux.....	87
1.4.2.1.	Label E+C-.....	87
1.4.2.2.	BBCA.....	88
1.4.2.3.	HQE-GBC, certification HQE.....	90
1.4.2.4.	Certification BREEAM.....	92
1.4.2.5.	Certification Leed.....	93
1.4.3.	Les premières tendances de résultats.....	93
1.4.4.	Les particularités liées au réemploi face aux référentiels environnementaux et à l'ACV.....	96
1.4.4.1.	Désigner le périmètre d'étude.....	96
1.4.4.2.	Allocations et coproduits dans le cadre de réemploi.....	96
1.4.4.3.	Focus sur les modules de la norme NF EN 15804+A1/CN.....	97
1.4.4.4.	La problématique du module D.....	98

1.5. Conclusion	100
Références bibliographiques	103
2. Concevoir pour déconstruire.....	109
2.1. Nouveau processus de conception et changement de paradigme.....	111
2.1.1. La constitution d'un stock de matériaux.....	111
2.1.2. Les assemblages préfabriqués du DfD et leurs limites en vue d'un réemploi structural.....	111
2.1.3. Les assemblages coulés en place.....	113
2.1.4. Durabilité des matériaux pour le réemploi.....	113
2.1.4.1. Bois	113
2.1.4.2. Béton	114
2.1.4.3. Acier	115
2.1.5. Les enjeux d'une structure réemployable, problématique de conception des immeubles démontables.....	115
2.2. La structure archétypale de l'IGH, et son stock potentiel	117
2.2.1. Prédilection de l'IGH pour le réemploi.....	117
2.2.2. Conception d'un IGH et typologie structurale.....	118
2.2.2.1. Définition légale, Article R122-2 du Code de la Construction et de l'habitation.....	118
2.2.2.2. Critères dimensionnants des IGH.....	118
2.2.2.3. Typologies structurales d'IGH.....	119
2.2.2.4. Disparition du noyau dans les IGH et répercussion sur la réemployabilité.....	121
2.2.2.5. Analyse des retours d'expérience des immeubles en bois sans noyau et sans diagonale, d'après ADIVBois.....	123
2.2.2.6. Analyse des retours d'expérience - contribution des éléments dans un IGH.....	124
2.2.3. Influence de la typologie et des liaisons sur la quantité de matière réemployable pour les IGH – études de cas	125
2.2.3.1. Hypothèses pour la modélisation des études de cas.....	125
2.2.3.2. Résultats des études de cas.....	130
2.3. Influence de la géométrie et de la trame sur la qualité du stock	136
2.3.1. Le potentiel de la géométrie pour permettre une réversibilité des éléments porteurs.....	136
2.3.2. Recherche d'une trame universelle	137
2.3.3. Conséquence de la géométrie et de la trame sur le comportement global – études de cas.....	139
2.3.4. Gain de matière en fonction du nombre de cycles de réemploi – études de cas avec éléments porteurs réversibles.....	141
2.3.4.1. Dimensionnement obtenu pour une première durée de vie de 50 ans, appelée « cycle 1 »	143
2.3.4.2. Dimensionnement obtenu pour une deuxième durée de vie de 50 ans, appelée « cycle 2 » et successive au cycle 1.....	144
2.3.4.3. Résultats et synthèse de l'étude	145
2.4. Nécessité d'un encastrement démontable pour étendre le stock	148
2.4.1. Compatibilité entre hyperstaticité et démontabilité.....	149
2.4.2. Impacts du type de système sur la construction	149
2.4.3. Problématique de la raideur et nécessité d'essais.....	150
2.5. Conclusions - Définition du DfReu et son évaluation	151
Références bibliographiques	155
3. Traçabilité de la donnée et environnement BIM.....	157
3.1. Méthodologie d'échanges de la donnée entre les acteurs de la construction	158
3.1.1. Enquête auprès des professionnels.....	159
3.1.1.1. Relevés des manques dans la pratique actuelle.....	159
3.1.1.2. Identification des générateurs de données.....	160
3.1.2. Besoins de traçabilité et responsabilités.....	162
3.1.3. Echanges à créer et à renforcer pour le réemploi	164
3.1.3.1. Enjeux propres à la capitalisation de la donnée.....	164
3.1.3.2. Nouvelles étapes du processus d'échanges.....	166
3.1.3.3. Capitalisation de la donnée produite.....	167
3.2. Renforcement du cadre BIM	168
3.2.1. Le BIM, outil du réemploi.....	168
3.2.2. Développement des LOI/LOD spécifiques au réemploi.....	169
3.2.3. Nomenclature et création de paramètres BIM pour le réemploi.....	172
3.2.4. Phase de déconstruction : nouvelle phase 4D en BIM	180
3.3. Développement d'une banque de matériaux.....	181
3.3.1. Théorie pour la mise en place d'une banque de matériaux en flux tendu.....	181
3.3.2. Proposition de protocole d'échanges.....	184

3.3.2.1.	Nouveaux paramètres BIM et cadre LOD pour les éléments porteurs.....	184
3.3.2.2.	Exportation vers la banque de matériaux et flux tendu.....	185
3.3.2.3.	Maintenance de la base de données.....	186
3.4.	Données complémentaires pour assurer la reconception après déconstruction	187
3.4.1.	Diagnostic ressource structural	187
3.4.2.	Protocole de déconstruction.....	188
3.4.3.	Caractérisation par essais non destructifs.....	189
3.4.4.	Vers une réadaptation des règles de calculs et approche probabiliste.....	191
3.4.5.	Algorithme pour optimiser le stock et son taux de réemploi.....	193
3.4.5.1.	Fonctionnement de l'algorithme.....	194
3.4.5.2.	Application de l'algorithme selon deux scénarios : "conception à partir d'un stock" et "conception avec un stock"	195
3.5.	Conclusion	198
	Références bibliographiques	200
4.	Comportement structural d'éléments réemployés, partie expérimentale	203
4.1.	Enjeux structuraux des essais	204
4.1.1.	Choix de l'assemblage en béton armé, une solution applicable à court terme.....	204
4.1.2.	L'assemblage réversible	205
4.1.3.	Le choix des matériaux.....	206
4.1.4.	Choix des zones d'assemblages.....	206
4.1.5.	Difficulté de modélisation théorique.....	207
4.2.	Définition des paramètres expérimentaux	208
4.2.1.	Formulation des bétons	208
4.2.2.	Définition de l'essai de flexion.....	208
4.2.3.	Dimensions des corps d'épreuve	209
4.2.4.	Ferraillage et plans d'exécution.....	210
4.2.5.	Réalisation des corps d'épreuve	211
4.2.5.1.	Informations pour l'exécution.....	211
4.2.5.2.	Contrôle de l'exécution	213
4.2.5.3.	Traçabilité des éléments	214
4.2.5.4.	Conformité du béton mis en œuvre.....	217
4.2.5.5.	Processus de déconstruction	218
4.3.	Dispositifs des essais de flexions	219
4.3.1.	Dispositif de mise en charge	219
4.3.2.	Dispositif de mesures	222
4.3.3.	Procédure expérimentale des deux phases d'essais	228
4.3.3.1.	L'organisation des phases d'essais.....	228
4.3.3.2.	Protocole de l'essai	229
4.3.3.3.	Schéma synthèse de l'expérimentation.....	230
4.4.	Attendus théoriques des essais	232
4.4.1.	Schéma statique du portique	232
4.4.2.	Calcul des moments à mi-travée	234
4.4.2.1.	Moment isostatique	234
4.4.2.2.	Moment hyperstatique	234
4.4.3.	Calcul de la flèche	236
4.4.3.1.	Flèche isostatique	236
4.4.3.2.	Flèche hyperstatique	236
4.4.4.	Calcul de la fissuration, avec une contrainte normale de flexion pure.....	237
4.4.5.	Calcul de la flèche par intégration de courbure prenant en compte la fissuration	238
4.4.6.	Modélisation aux éléments finis	239
4.4.6.1.	Ajustement de loi de comportement du béton.....	239
4.4.6.2.	Simulation de la rupture des portiques.....	241
4.4.7.	Synthèse des déplacements théoriques attendus	242
4.5.	Résultats des essais	243
4.5.1.	1ère phase d'essais	243
4.5.2.	2ème phase d'essais	248
4.6.	Conclusion	252
	Références bibliographiques	254
5.	Analyse environnementale du réemploi	255
5.1.	Evaluer les impacts environnementaux du réemploi en utilisant la méthode ACV	256
5.1.1.	Les process	257

5.1.2.	Les durées de vie.....	260
5.1.3.	Choix des unités pour exprimer la fonction.....	262
5.2.	ACV du portique en béton armé réalisé dans le cadre de l'expérimentation.....	264
5.2.1.	Objectifs et système.....	264
5.2.1.1.	Unité fonctionnelle du portique.....	264
5.2.1.2.	Limites du système des portiques.....	265
5.2.2.	Inventaire, collecte des données.....	266
5.2.2.1.	Prise en compte de l'amortissement des installations matérielles pour la fabrication des portiques.....	266
5.2.2.2.	Recueil de données.....	266
5.2.2.3.	Première phase : construction du portique.....	270
5.2.2.4.	Deuxième phase : déconstruction puis reconstruction du portique.....	271
5.2.3.	Analyse de l'impact.....	272
5.2.3.1.	Catégories d'impacts de la NF EN 15804+A1/CN, les paramètres ressources et déchets.....	272
5.2.3.2.	Résultats pour chaque catégorie d'impacts environnementaux et paramètres selon la NF EN 15804+A1/CN.....	275
5.2.4.	Interprétation.....	277
5.2.4.1.	Détails des contributeurs.....	277
5.2.4.2.	Impacts du réemploi cumulés pour les deux phases.....	284
5.2.5.	Analyses de sensibilité.....	288
5.2.5.1.	Nombre de cycles de réemploi.....	288
5.2.5.2.	Nombre d'années des cycles.....	291
5.2.5.3.	Déclassement fonctionnel du portique.....	292
5.3.	Extrapolation à l'échelle du bâtiment.....	293
5.3.1.	Multiplication du portique à l'échelle du bâtiment.....	293
5.3.2.	Allocations possibles du réemploi.....	297
5.4.	Outil pour évaluer le potentiel de réemployabilité.....	302
5.4.1.	Nécessité de critères techniques, sociaux et territoriaux.....	303
5.4.2.	Modes de calcul.....	303
5.4.3.	Critère de démontabilité.....	305
5.4.4.	Critère de performances résiduelles.....	308
5.4.5.	Synthèse.....	308
5.5.	Conclusion.....	312
	Références bibliographiques.....	313
	Conclusion générale.....	317
	Annexes.....	321
A.1	Chapitre 2.....	322
A.1.1.	Partie 2.3.2.....	322
A.1.2.	Partie 2.3.4.....	323
A.1.2.1.	DEFINITION DES SECTIONS.....	323
A.1.2.2.	HYPOTHESES.....	323
A.1.2.3.	CRITERES DE PREDIMENSIONNEMENT.....	324
A.2.	Chapitre 3.....	325
A.2.1.	Partie 3.1.1.2.....	325
A.2.2.	Partie 3.2.3.....	326
A.3.	Chapitre 4.....	326
A.3.1.	Partie 1.2.3. et 1.2.4.....	326
A.3.3.	Partie 1.3.3.1.....	341
A.3.3.1.	Résultats du modèle Pythagore.....	341
A.3.3.2.	Vérifications ELS et ELU.....	342
A.3.4.	Partie 1.5.....	346
A.4.	Chapitre 5.....	354
A.4.1.	Partie 5.2.2.....	354
A.4.1.1.	Questionnaire Données ACV :.....	354
A.4.1.2.	Procédés utilisés dans OpenLCA :.....	354
A.4.2.	Partie 5.4.5.....	358
A.4.2.1.	Calcul de l'efficacité matière $Eff_{matière}$:.....	358
A.4.2.2.	Calcul du facteur de déconstructibilité F_{Dec} :.....	359
A.4.2.3.	Calcul des performances résiduelles P_{Res} :.....	360
A.4.2.4.	Calcul de l'indice de réemployabilité :.....	360
A.5.	Articles et communications.....	361

Glossaire

- 4D : La quatrième dimension du BIM est la dimension du temps, utilisée pour visualiser un calendrier de construction dans un modèle BIM.
- 5D : La cinquième dimension du BIM est celle qui intègre des données de coûts, utilisée pour automatiser les calculs de quantité lors de l'estimation des coûts. Associé au 4D, ce modèle peut servir à prédire le budget de trésorerie dans un modèle BIM.
- 6D : Cette dimension BIM traite de tout ce qui concerne le développement durable d'un bâtiment, par exemple les analyses énergétiques, mais pourrait également inclure les données relatives à l'économie circulaire.
- ACV, Analyse du cycle de vie : Compilation et évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie. (ISO 14040:2006)
- AMO : L'Assistance à Maîtrise d'Ouvrage (AMO) peut être entendue au sens du code de la commande publique Le maître d'ouvrage peut alors passer des marchés publics d'assistance à maîtrise d'ouvrage portant sur un ou plusieurs objets spécialisés, notamment en ce qui concerne tout ou partie de l'élaboration du programme, la fixation de l'enveloppe financière prévisionnelle de l'opération ou le conseil spécialisé dans un domaine technique, financier, juridique ou administratif. Plus globalement, un maître d'ouvrage privé peut également s'entourer d'un assistant à la maîtrise d'ouvrage pour un sujet spécifique.
- API, Application Programming Interface : Interface de programmation qui permettra à un tiers de fournir des outils complémentaires. Un éditeur peut rendre publique une partie de ces API.
- Assemblages réversibles : Assemblages pouvant être défaits et/ou désassemblés pour faciliter les modifications et les ajouts aux structures. (ISO/DIS 20887:2019 en préparation)
- BET : Bureaux d'études techniques
- BFUP : Les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP) sont des matériaux à matrice cimentaire, renforcés par des fibres et offrant des résistances en compression comprises entre 150 et 250 MPA.
- BHP : Les bétons à hautes performances (BHP), grâce à leur formulation, sont particulièrement compacts, donc de faible porosité, et présentent une résistance mécanique de 60 à 120 MPa et une durabilité très supérieures à celles des bétons courants.
- Big Data : Masse de données issues de multiples bases non corrélées, non structurées entre elles nécessitant un travail statistique et le développement d'applications à visée analytique, pour traiter la masse d'information et lui donner un sens.
- BIM Management : Le Building Information Management vise à l'organisation des méthodes et processus permettant notamment l'établissement et le suivi de la maquette numérique par la maîtrise d'œuvre et les entreprises. Ce cadre organisationnel est décrit dans un document appelé "Convention BIM". Celle-ci est élaborée, rédigée et mise à jour par la maîtrise d'œuvre en coordination et accord avec l'ensemble des parties intervenantes concernées. (cf. convention BIM)
- BIM manager : Le BIM manager est le pilote intra ou inter-entreprise de la maquette numérique. Les missions et profils des BIM managers dépendent des phases d'intervention. Trois types de BIM managers se dégagent : en conception, en construction et en exploitation.
- BIM, Building Information Modeling : Le BIM est un ensemble structuré d'informations sur un bâtiment, existant ou en projet. Il contient les objets composant le bâtiment, leurs caractéristiques et les relations entre ces objets. Ainsi, la composition détaillée d'un mur, la localisation d'un équipement ou d'un élément de mobilier dans une pièce, font partie du BIM. Ces informations complètent la description purement géométrique de la forme du bâtiment produite par certains

logiciels. Selon BuildingSmart-Mediaconstruct, le BIM est une méthode de travail basée sur la collaboration autour d'une maquette numérique (Building Information Model). Dans un processus BIM, chaque acteur de la construction crée, renseigne et utilise cette maquette, et en tire les informations dont il a besoin pour son métier. En retour, il alimente la maquette de nouvelles informations pour aboutir au final à un ensemble d'objets virtuels, représentatifs de la construction, renseignés de leurs caractéristiques géométriques et de leurs propriétés de comportement.

- BIM-IFC : L'expression BIM-IFC désigne un modèle BIM normalisé au format IFC. (cf. IFC)
- Cahier des charges BIM : Document précisant pour le projet les exigences et objectifs des intervenants successifs du projet, incluant ceux de la charte BIM du maître d'ouvrage. Il constitue le volet BIM du programme.
- Capacité à être réemployé : Aptitude d'un matériau, d'un produit, d'un composant ou d'un système à être utilisé dans sa forme d'origine plus d'une fois et en conservant sa valeur et ses qualités fonctionnelles pendant sa valorisation pour permettre une nouvelle application pour le même usage ou tout autre usage. (ISO/DIS 20887:2019 en préparation)
- Charte BIM : Document générique élaboré par le maître d'ouvrage traduisant sa politique en termes de qualité et de performances attendues du BIM pour l'ensemble de ses projets, et recensant notamment les exigences et les objectifs à satisfaire pour que le processus BIM des opérations puisse alimenter la maquette d'entretien/exploitation/maintenance de son patrimoine.
- Composant : Produit fabriqué comme unité distincte pour remplir une ou plusieurs fonctions spécifiques. Par ex. : Clous, ancrages de revêtement, barres d'armature et membranes (unités de base) ou dalles en béton armé, fenêtres et portes (unités complexes). (ISO/DIS 20887:2019 en préparation)
- Conception pour le démontage (ou DfD, Design for deconstruct) : Démarche de conception d'un produit ou d'un bien immobilier construit qui facilite le démontage à la fin de sa durée de vie utile, de telle façon que des composants et des pièces puissent être réutilisés, recyclés, récupérés en vue d'une valorisation énergétique ou, de manière générale, détournés du flux des déchets. (source : ISO/DIS 20887:2019)
- Convention BIM : Document décrivant les méthodes organisationnelles, de représentation graphique, la gestion et le transfert des données du projet, ainsi que les processus, les modèles, les utilisations, le rôle de chaque intervenant, et l'environnement collaboratif du BIM. À chaque étape du cycle de vie du projet la convention doit évoluer, être mise à jour afin de s'adapter aux nouveaux acteurs, à des usages nouveaux ou à des nécessités du projet. La convention BIM est établie par la maîtrise d'œuvre. Le rôle du maître d'ouvrage doit néanmoins être défini car faisant partie intégrante du processus BIM.
- Déclassement : Ce terme définit l'aptitude pour un produit à un nouvel emploi pour un usage moindre que celui pour lequel il avait été conçu, donc selon des performances plus ou moins diminuées.
- Déconstruction : Fait de déconstruire, démonter sélectivement certains éléments d'une construction, afin de les valoriser.
- DEM, Dossier d'Exploitation Maintenance : Dossier dédié à la maintenance avec réalisation d'une maquette susceptible d'être exploitée en phase de maintenance postérieurement à la réception. (cf maquette numérique exploitation)
- Démontabilité : La démontabilité en architecture concerne la capacité d'un bâtiment, d'un système constructif, d'un assemblage à être démontable, adapté à la déconstruction. Un bâtiment démontable dans l'idéal se caractérise par la possibilité d'être mis en pièces et réassemblé ou réutilisé à l'infini.
- Démontage : Déconstruction non destructive d'un ouvrage de construction ou d'un bien immobilier construit en matériaux ou composants constitutifs. (ISO/DIS 20887:2019 en préparation)

- Détournement : On remarque que parmi ces notions de la catégorie « Valorisation matière » dans le Code de l'Environnement, est absente celle du détournement de substances, matières ou produits qui sont utilisés de nouveau, sans être devenus des déchets et non nécessairement pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus.

- Dimensions du BIM : Outre les 3 dimensions, la maquette numérique intègre aussi la dimension temps (4D), les données financières (5D), environnementales (6D), patrimoniales (7D), ... C'est donc avant tout une base de données techniques, constituée d'objets définis par leurs caractéristiques et leurs relations entre eux.

- DOE : Le contenu du dossier des ouvrages exécutés (DOE) est fixé dans les documents particuliers du marché ; il comporte, au moins, les plans d'exécution conformes aux ouvrages exécutés établis par le titulaire, les notices de fonctionnement et les prescriptions de maintenance. Outre l'ensemble des plans et descriptifs concernant les réseaux, les revêtements, les plantations, le mobilier et les détails d'exécution du chantier, il comprend également les notes de calculs et tous les manuels d'utilisateurs, de maintenance et les fiches techniques, fournis par les fabricants des matériaux et matériels lors de la réalisation de l'ouvrage afin de permettre l'exploitation et l'entretien ultérieurs de l'équipement. C'est un document clé pour la capitalisation de la donnée.

- Domaine d'emploi : Ensemble des informations relatives à l'emploi d'un produit/procédé/equipement comprenant notamment : 1. La localisation géographique de l'ouvrage dans lequel le produit/procédé/equipement est employé (vis-à-vis des régions de vent, des régions de neige, des zones sismiques, des atmosphères extérieures, ...) ; 2. La typologie du bâtiment (bâtiment d'habitation, Etablissement Recevant du Public, ...) ; 3. La description des ouvrages ou parties d'ouvrage réalisés avec le produit/procédé/equipement ou dans lequel le produit est utilisé ; 4. La configuration d'emploi, c'est-à-dire les conditions dans lesquelles le produit/procédé/equipement a été employé (type de support, type de mise en œuvre, expositions spécifiques auxquelles le produit est soumis, ...). En cas de réemploi il peut être judicieux de préconiser un domaine d'emploi futur moindre par rapport au domaine d'emploi initial pour lequel le produit avait été conçu.

- Economie circulaire : Economie qui a l'ambition de se concevoir dans le cadre d'un processus métabolique qui engloberait une unité de production industrielle au sein d'un contexte élargi et maîtrisé, formant une synergie vertueuse. Elle est opposée à l'économie linéaire. (BIGNIER, Grégoire. Architecture & écologie, Comment partager le monde habité?. Paris : Editions Eyrolles, Septembre 2015, 218p.). L'économie circulaire peut se définir comme un système économique d'échange et de production qui, à tous les stades du cycle de vie des produits (biens et services), vise à augmenter l'efficacité de l'utilisation des ressources et à diminuer l'impact sur l'environnement tout en développant le bien être des individus. L'économie circulaire doit viser globalement à diminuer drastiquement le gaspillage des ressources afin de découpler la consommation des ressources de la croissance du PIB tout en assurant la réduction des impacts environnementaux et l'augmentation du bien-être. Il s'agit de faire plus et mieux avec moins. (Ademe, Notions Version modifiée Octobre 2014). Son objectif ultime est de parvenir à découpler la croissance économique de l'épuisement des ressources naturelles par la création de produits, services, modèles d'affaire et politiques publiques innovants. Il s'agit par exemple de rallonger les flux de matière (réemploi, recyclage) et de produits (éco conception sans toxique ni obsolescence programmée, réparation, réutilisation puis recyclage) tout au long de la vie du produit ou service. Ce modèle repose sur la création de boucles de valeur positives à chaque utilisation ou réutilisation de la matière ou du produit avant destruction finale. Il met notamment l'accent sur de nouveaux modes de conception, production et de consommation, le prolongement de la durée d'usage des produits, l'usage plutôt que la possession de bien, la réutilisation et le recyclage des composants. La gestion des déchets ne peut plus se réduire à une conséquence du modèle de production actuel. L'optimisation de l'utilisation des ressources par une écoconception pensée en amont transforme la gestion des déchets en une simple étape de la boucle matière. (Site officiel de l'Institut de l'économie circulaire)

- Economie linéaire : Economie qui se développe sans se soucier ni de ses conditions d’approvisionnement ni du devenir de ses déchets. (BIGNIER, Grégoire. Architecture & écologie, Comment partager le monde habité?. Paris : Editions Eyrolles, Septembre 2015, 218p.).
- Élément porteur : Ce sont les éléments dits structuraux, c’est-à-dire qui participent à la descente au sol des charges mécaniques. On distingue les éléments porteurs verticaux (poteaux, voiles) des éléments porteurs horizontaux (poutres, dalles, planchers).
- Emploi futur : usage et domaine d’emploi que l’on cible à l’issue de la dépose (pour le réemploi).
- Emploi initial : usage et domaine d’emploi initiaux du produit/procédé/équipement que l’on souhaite déposer et réemployer.
- Gisement : n. m. XIIIe siècle, au sens de « action de se coucher ». Dérivé de gésir. 1. MARINE. Se dit de l’angle formé par l’axe du navire et une direction donnée, le relevé d’un amer ou d’un autre navire. 2. GEOLOGIE. Disposition, situation dans le sous-sol des masses de minéraux, des composés organiques fossiles, etc. Le gisement d’un minerai. Gisement disséminé, gisement sous forme de couches, de filons. Gisement à ciel ouvert. Par méton. Accumulation importante et exploitable de minerais, de composés organiques fossiles, etc. Des gisements de charbon. Un gisement cuprifère, pétrolifère. Par ext. Lieu, terrain où l’on trouve quelque chose en grande quantité. Gisement de coquillages. Gisement de fossiles. Gisement archéologique. (La 9e édition du Dictionnaire de l’Académie française) Précision personnelle : La notion de gisement est largement employée pour désigner un ensemble de matériaux récupérables. Il peut s’agir d’un chantier de démolition en cours, d’un bâtiment voué à la destruction ou déconstruction, ou même d’un stock de matériau inutilisé. Le gisement est la source de matériaux du réemploi.
- IFC, Industry Foundation Classes, est un format de fichier non-propriétaire, ouvert, orienté objet avec un modèle de données élaboré par l’Alliance Internationale pour l’Interopérabilité (IAI) afin de faciliter l’interopérabilité pour les fournisseurs et les acteurs de l’immobilier. Il fait partie de ces formats dit ouverts, comme le XML, gbXML, TXT... Remarques : Les échanges en IFC ne sont pas matures (Inflation progressive de la taille des fichiers [x 2]; données non transmises ou mal attribuées de façon aléatoire 15 à 20 %; Perte totale de la documentation de détail 2D). L’IFC est le format (.ifc ; .ifcxml ; .ifczip) open source d’échange de maquette numérique dans le domaine de la construction. Il permet d’assurer l’interopérabilité des données produites entre les logiciels d’éditeurs différents. Le format IFC est porteur d’un modèle de données orienté objet (selon la norme ISO 10303) qui se présente donc sous la forme d’un ensemble de classes d’objets. Depuis mars 2013, la version 4 Addendum 2 (IFC 4) du modèle de données est normée ISO 16 739.
- INIES : Base nationale française de référence sur les impacts environnementaux et sanitaires des produits, équipements et services pour l’évaluation de la performance des ouvrages. La base INIES regroupe les déclarations environnementales (FDES, DEP, PEP) nécessaires au calcul pour le label E+C-.
- Interopérabilité : Capacité d’échanger par la présence d’un standard neutre et ouvert des données entre les différents “modèles” sans dépendre d’un acteur ou d’un outil en particulier.
- LOD, Level of Development or Level of Detail, Niveau de développement : Description des granularités de la propriété géométrique des maquettes numériques qui seront attendues aux différents stades du projet de construction. Le LOD est maintenant remplacé par le LOIN. (cf. LOIN)
- LOI, Level of Information, Niveau d’information : Niveau nécessaire d’informations liées aux objets en matière de détails, de coordination et d’information incluses dans le modèle 3D qui seront attendues aux différents stades du projet de construction. Le LOI est maintenant remplacé par le LOIN. (cf. LOIN)
- LOIN, Level of Information Need, Niveaux de développement : Les LOIN regroupent, sous une même définition, deux précédentes notions : les LOD et les LOI. Il existe plusieurs niveaux de développement, de plus en plus précis en fonction des besoins de l’avancement du projet. (cf. LOD et LOI)

- Maquette numérique DOE (Maquette DOE) : La maquette numérique livrée correspondant *in fine* au modèle du bâtiment tel que construit. Elle est livrée à la maîtrise d'ouvrage avec l'ensemble de la documentation technique. (cf. DOE)

- Maquette numérique : L'expression Maquette numérique est entrée dans le langage courant pour désigner le Building Information Model (BIM). Il s'agit d'une représentation numérique tridimensionnelle des caractéristiques fonctionnelles et/ou physiques de l'ouvrage. Elle est constituée d'objets et d'espaces identifiés et renseignés (nature, composition, propriétés physiques, mécaniques, comportement, performances...). Elle décrit l'ouvrage pendant tout ou partie de son cycle de vie : programmation, conception, réalisation, réception, livraison, exploitation, maintenance, rénovation, déconstruction. La maquette numérique décrivant un ouvrage peut être unique ou résultante de l'assemblage de maquettes et/ou modèles métiers complémentaires. La maquette numérique est la représentation géométrique paramétrable de conception, d'exécution ou d'exploitation permettant la visualisation, le contrôle et la simulation de comportements physiques (thermique, acoustique, aéraulique), et livrant descriptif et quantitatif. La production d'une maquette numérique représentative du projet immobilier nécessite le groupement de compétences en conception (architecte, BET Structure, BET Fluide, etc.) puis en exécution.

- Maquette numérique exploitation (Maquette DEM) : Maquette numérique obtenue de la maquette numérique DOE allégée, ne contenant que des éléments utiles à la gestion du patrimoine. (cf. DEM)

- MOA, le maître de l'ouvrage : Il est défini par la loi MOP. Il s'agit de la personne morale [...] pour laquelle l'ouvrage est construit. En matière de construction publique, il va généralement s'agir de l'État ou d'une collectivité territoriale. Cependant, le maître d'ouvrage peut aussi être une entité intervenant pour le compte de l'État dans le cadre d'une mission de service public

- MOE, le maître d'œuvre : Il est défini par la loi MOP. Le maître d'œuvre est la personne qui détient une compétence technique et qui est chargée, par le maître d'ouvrage, de concevoir, de coordonner et de contrôler la bonne exécution des travaux. Pour que la loi MOP s'applique, le maître d'œuvre doit être une entité privée. La mission de maîtrise d'œuvre que le MOA peut confier à une personne de droit privé ou à un groupement de personnes de droit privé doit permettre d'apporter une réponse architecturale, technique et économique au programme.

- OpenBIM : Désigne l'interopérabilité pour le BIM. C'est la possibilité de pouvoir échanger des données entre logiciels BIM d'éditeurs différents, grâce à un standard d'échange. La norme reconnue d'interopérabilité BIM est l'IFC, développée par l'association buildingSMART.

- Ouvrage de destination : ouvrage ou partie d'ouvrage dans lequel le produit va être réemployé.

- Préfabrication : n.f. Système de construction permettant de réaliser des ouvrages au moyen d'éléments standardisés, ou composants, fabriqués d'avance et que l'on assemble suivant un plan préétabli. (Larousse, dictionnaire 2020). subst. fém. Fabrication en série d'éléments de construction destinés à être assemblés sur un chantier ; mode de construction employant ces éléments (Centre national de ressources textuelles et lexicales).

- Préparation en vue de la réutilisation : toute opération de contrôle, de nettoyage ou de réparation en vue de la valorisation par laquelle des substances, matières ou produits qui sont devenus des déchets sont préparés de manière à être réutilisés sans autre opération de prétraitement. (Art. L 541-1-1 du Code de l'environnement)

- Prévention : toutes mesures prises avant qu'une substance, une matière ou un produit ne devienne un déchet. Ces mesures concourent à la réduction de la quantité de déchets générés, y compris par l'intermédiaire du réemploi ou de la prolongation de la durée d'usage. (Art. L 541-1-1)

- Produit : Terme générique désignant tout composant ou toute matière qui entre dans la composition des ouvrages.

- 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. Les opérations de valorisation énergétique des déchets, celles relatives à la conversion

des déchets en combustible et les opérations de remblaiement ne peuvent pas être qualifiées d'opérations de recyclage. (Art. L 541-1-1). Si le cycle détermine une période avec un début et une fin, recycler veut dire créer un nouveau cycle ; par un traitement particulier, on veut donner une nouvelle forme à la matière pour conduire à un nouvel usage, sans garder la trace de son ancien usage. En architecture, ce terme est plutôt utilisé dans la limite des matériaux seuls, mais on peut l'envisager dans le sens du recyclage d'un bâtiment ou d'un quartier, quoique rarement : le conserver en lui donnant un nouveau cycle de vie, un nouveau cycle d'usage. (HUYGEN, Jean-Marc. La poubelle et l'architecte, vers le réemploi des matériaux. Arles : Actes sud Beaux Arts, Juillet 2008, (L'Impensé) p.170). Le recyclage induit une dégradation de la matière et un cycle industriel de transformation de cette matière.

- Réemploi : Action de prévention particulière désignant « 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 » (Art. L 541-1-1). Employer une nouvelle fois signifie bien que l'on garde la matière et la forme (donc la trace de l'histoire) pour un nouvel usage.

- Réutilisation : Toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui sont devenus des déchets sont utilisés de nouveau. (Article L 541-1-1 du Code de l'Environnement)

- Traçabilité : L'aptitude à retrouver l'historique et l'utilisation ou la localisation d'un article ou d'une activité au moyen d'une identification enregistrée (norme ISO 8402). Elle fournit initialement les mécanismes de la création d'un flux continu d'information dans le domaine alimentaire. Elle a pour objectif de limiter la discontinuité de l'information tout au long de la chaîne alimentaire par la mise en place d'un système de documentation et d'enregistrement.

- Valorisation : Toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles en substitution à d'autres substances, matières ou produits qui auraient été utilisés à une fin particulière, ou que des déchets soient préparés pour être utilisés à cette fin, y compris par le producteur de déchets. (Article L 541-1-1 du Code de l'Environnement)

Liste des acronymes

ACV : Analyse de Cycle de Vie	CND : Contrôle Non Destructif
ADEME : Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie	COBie : Construction Operations Building Information Exchange
AEE : Attestation d'Effet Equivalent	COV : Composé Organique Volatil
AFGC : Association Française de Génie Civil	CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
AFNOR : Association Française de Normalisation	CTICM : Centre Technique Industriel de la Construction Métallique
AIMCC : Association des industriels des produits de construction	CTMNC : Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction
API : Application Programming Interface	DEP : Déclaration Environnementale de Produit
APM : Asset Performance Management	DEM : Dossier d'Exploitation Maintenance
AQC : Agence Qualité Construction	DES : Déclaration Environnementale de Service
ATEx : Appréciation Technique d'Expérimentation	DfA : design for adaptability
BBCA : Bâtiment Bas Carbone	DfD : Design for Deconstruction
BCT : Bureau Central de Tarification	DfE : design for efficiency
Bepos : Bâtiment à énergie positive	DfEn : design for energy
BFUP : Bétons Fibrés à Ultra hautes Performances	DfM : design for materials
BHP : Béton à Hautes Performances	DfMA : design for manufacture and assembly
BIM : Building Information Modeling	DfR : design for recycling
BIM-DAS : BIM-based Deconstructability Assessment Score	DfReu : design for reuse
BTP : Bâtiment et Travaux Publics	DIOGEN : Données d'Impact pour les Ouvrages de GENie civil
BREEAM : Building Research Establishment Environmental Assessment Method	DIUO : Dossier d'Intervention Ulérieur sur l'Ouvrage
BWPE : BIM-based Whole-life Performance estimator	DPC : Directive Produits Construction
C2P : Commission Prévention Produits	DTU : Document Technique Unifié
CC : Cour de Cassation	DVE : durée de vie estimée
CCAG : Cahier des Clauses Administratives Générales	DVP : durée de vie programmée
CCTP : Cahier des Clauses Techniques Particulières	DVR : Durée de Vie de Référence
CDW : Construction and demolition waste	DVT : Durée de Vie Typique
CE : Conformité Européenne	EC : Embodied Carbon
CERIB : Centre d'Etudes et de Recherches de l'Industrie du Béton	Eges : Emissions de gaz à effet de serre
	ELAN : loi portant Evolution du Logement, de l'Aménagement et du Numérique

END : Essai Non Destructif

EoL : End of Life

EPEA : Environmental Protection Encouragement Agency

ESS : Economie Sociale et Solidaire

FCBA : Forêt Cellulose Bois-Construction Ameublement

FDES : Fiche de déclaration environnementale et sanitaire (établie par le fabricant)

FE : Facteurs d'émission

FRP : Fibre Reinforced Polymer

GEAI : Groupement pour l'étude d'une architecture industrialisée

GES : Gaz à effet de serre

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

GPS : Global Positioning System

HQE-GBC : Haute Qualité Environnementale – Green Building Council

HQH : Haute Qualité Humaine

ICEB : Institut pour la Conception Eco-responsable du Bâti

ICV : Inventaire du cycle de vie

IFC : Industry Foundation Classes

IoT : Internet of Things

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change

LCA : Life Cycle Assessment

LCT : Life Cycle Tower

LEED : Leadership in Energy and Environmental Design

LERM : Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Matériaux

LOI : Level Of Information

LOIN : Level Of Information Need

LOD : Level Of Detail, Level Of Development

LTECV : Loi relative à la Transition Énergétique pour la Croissance Verte

MDEGD : Module de Donnée Environnementale Générique par Défaut

MECD : Matériaux et Equipements pour la Construction Durable

MOA : Maître d'ouvrage

MOE : Maître d'œuvre

MOOC : Massive Open Online Course

NFC : Near Field Communication

OC : Operational Carbon

PCE : Produits de Construction et Equipements

PEP : Profils Environnementaux Produits (conformes au programme PEP-ecopassport)

POBIM : Propriétés Objets BIM

PPBIM : Propriétés Produits BIM

PRG : Potentiel de Réchauffement Global

PTNB : Plan de Transition Numérique du Bâtiment

RCP : Règles de Catégorie de Produits

RFID : Radio Frequency IDentification

RIM : Ressource Information Modeling

RPC : Règlement Produits Construction

SEE : Solution d'Effet Equivalent

SETEC : Société d'Etudes Techniques et Economiques

SHM : Structural Health Monitoring

SIG : Système d'Information Géographique

SNCB : Stratégie Nationale Bas Carbone

TGAP : Taxe Générale sur les Activités Polluantes

UF : Unité Fonctionnelle

Liste des figures

Introduction

Figure 1 : Earth Overshoot Day 1970-2020 [3]	2
Figure 2 : Country Overshoot Days 2019 [3].....	3
Figure 3 : Cumulative emissions of CO ₂ and future non-CO ₂ radiative forcing determine the probability of limiting warming to 1,5°C [7].....	4
Figure 4 : Emissions de GES par secteur en France en millions de tonnes de CO ₂ e [16].....	5
Figure 5 : Production de ciment en milliards de tonnes et taux d'urbanisation [28].....	6
Figure 6 : Matériaux de construction dominants [29].....	6
Figure 7 : La production de déchets en France en 2015 [31]	7
Figure 8 : HQE Performance - Résultats de l'analyse statistique, Indicateur : changement climatique [kg éq. CO ₂ /m ² SHON/an] (médianes - DVP = 50 ans) pour 115 bâtiments de différentes typologies [34]	8
Figure 9 : Average breakdown in building elements of EE, Qarout, L. [36], Kaethner, S.C.e t al. [37].	9
Figure 10 : Part d'EC des éléments porteurs dans des projets de différents programmes selon l'étude de Post [6].....	9
Figure 11 : Part d'EC des éléments porteurs dans des projets de bureaux IGH, projets setec.....	9

Chapitre 0

Figure 0. 1 : Hiérarchie du droit français, adapté de Légifrance.	16
Figure 0. 2 : Détail : Règles européennes s'imposant à l'état français, adapté de Légifrance.	17
Figure 0. 3 : Budgets carbone 2019-2023, 2024-2028 et 2029-2033 par secteur.....	24
Figure 0. 4 : Emissions du secteur bâtiment, scénario de la SNBC.....	24
Figure 0. 5 : Action 2 du plan Economie circulaire de la Ville de Paris [52].	28
Figure 0. 6 : Action 3 du plan Economie circulaire de la mairie de Paris [52].	28
Figure 0. 7 : Objectifs du pôle prévention produits de l'AQC	30
Figure 0. 8 : Principe de respect des textes.....	32
Figure 0. 9 : Synthèse des obligations en termes de responsabilité civile de la chaîne d'acteurs pour un réemploi.....	33
Figure 0. 10 : Scénario pour le rôle des plateformes de réemploi.....	34

Chapitre I

Figure I. 1 : Déconstruction de la Bastille en 1789.....	43
Figure I. 2 : Rural Studio, Glass Chapel, 2000	43
Figure I. 3 : Rural Studio, Glass Chapel, 2000	43
Figure I. 4 : Rural Studio, Lucy Carpet House, 2002.....	44
Figure I. 5 : Rural Studio, Harris/Butterfly House, 1996	44
Figure I. 6 : "The Sugar House" de Richard Greaves, 2001	44
Figure I. 7 : Habitat nomade Vietnam	45
Figure I. 8 : Assemblages traditionnels des yourtes.....	45
Figure I. 9 : Processus de déconstruction sur le site d'Actlab, Bellastock	47
Figure I. 10 : Axonométrie et perspective de l'Académie Fratellini, St Denis, dessinées d'après la visite sur site.	49
Figure I. 11 : Wang Shu, Ningbo Museum Réutilisation de tuiles et briques dont la mise en œuvre a été étudiée pour mettre en valeur une technique d'assemblage du réemploi.....	49
Figure I. 12 : Encore Heureux + Construire, Réhabilitation d'une halle industrielle en tiers-lieu, Colombelles 2019, 3700 m ²	50
Figure I. 13 : Marcel Lods, procédé GEAI, Rouen La Grand' Mare, 1969-72	52
Figure I. 14 : Marcel Lods, procédé GEAI, Rouen La Grand' Mare, 1969-72	52
Figure I. 15 : Détails constructifs. Les Marelles : 1971-1975, Bernard Kohn et Georges Maurios.....	53
Figure I. 16 : Chantier. Les Marelles : 1971-1975, Bernard Kohn et Georges Maurios.....	53
Figure I. 17 : B. Kohn & G. Maurios, Yerres, Les Marelles, 1971-1975.....	53
Figure I. 18 : Détail de la platine du poteau préfabriqué Métro de Ryad	54
Figure I. 19 : Poteaux préfabriqués du Métro de Ryad.....	55
Figure I. 20 : Pose de la dalle préfabriquée du Métro de Ryad.....	55
Figure I. 21 : Axonométrie. IZM - Illwerke Zentrum Montafon, Vandans, Montage [9]	56

Figure I. 22 : Chantier. IZM - Illwerke Zentrum Montafon, Vandans, Montage [9].....	56
Figure I. 23 : Photo. IZM - Illwerke Zentrum Montafon, Vandans, Montage [9].....	56
Figure I. 24 : Montage de la Maison tropicale Niamey [30].....	60
Figure I. 25 : Maison tropicale reconstruite dans le jardin du Musée des Beaux-Arts de Nancy [31].....	60
Figure I. 26 : Bureaux, Wereldhave, Pays-Bas, XX Architecten, 1999 [39].....	66
Figure I. 27 : The Center for Building Performance and Diagnostics, Carnegie Mellon University, Etats-Unis, Bohlin Cywinski Jackson, 1997 [39].....	66
Figure I. 28 : Systèmes constructifs du projet Demodolor (Plancher mixte acier-béton et maçonnerie porteuse à sec).....	67
Figure I. 29 : Principe de connexion du système de plancher du projet.....	68
Figure I. 30 : Coupe transversale des poutres testées.....	68
Figure I. 31 : Les dimensions actuelles du BIM.....	70
Figure I. 32 : Les 4 étapes de l'ACV selon les normes ISO 14040 et 14044.....	82
Figure I. 33 : Etapes 2 et 3 de l'ACV, avec choix de la base utilisée et de la méthode d'évaluation.....	83
Figure I. 34 : Structure de l'analyse des impacts depuis les résultats d'inventaire du cycle de vie.....	83
Figure I. 35 : Synthèse des différentes stratégies de calcul ACV depuis un modèle BIM.....	86
Figure I. 36 : Niveaux de performance relatifs aux émissions de gaz à effet de serre pour le label E+C-, selon l'expérimentation « Bâtiment à énergie positive & réduction carbone ».....	88
Figure I. 37 : Commercial offices, Area in GIA LETI [87].....	94
Figure I. 38 : Medium and large scale housing, Area in GIA, LETI [87].....	94
Figure I. 39 : Diagram showing operational and embodied carbon and trajectories [87].....	95
Figure I. 40 : Les grandes étapes, ou modules du cycle de vie. Source : CSTB, [74].....	98
Figure I. 41 : Règle de calcul du module D, d'après Lebert et al. [74].....	99
Figure I. 42 : Hypothèse, pour la règle de calcul du module D, d'après Lebert et al. [74].....	99
Figure I. 43 : Synthèse des pratiques du réemploi dans la construction.....	101
 Chapitre II	
Figure II. 1 : Méthodologie de recherche pour la conception structurale en vue d'un réemploi.....	110
Figure II. 2 : Typologie structurale selon le nombre d'étages de l'IGH, d'après Banks et al. [20].....	119
Figure II. 3 : Système porteur pour le projet de la tour Entisar avec détail d'un niveau en 3D comportant les voiles pour constituer l'étage d'outriggers.....	120
Figure II. 4 : Schématisation de l'importance du déplacement en tête selon la typologie de contreventement choisi et indications économiques de réalisation correspondantes.....	121
Figure II. 5 : Cas de la reprise du vent par le noyau ou par la façade.....	122
Figure II. 6 : Premiers résultats des différents déplacements selon l'assemblage testé et avant redimensionnement des sections en bois pour respecter le critère H/500.....	124
Figure II. 7 : Tour EDF, © Pei-Cobb-Freed & Partners / Saubot Rouit Associates.....	125
Figure II. 8 : Tour Majunga, © Jean-Paul Viguiet/Photograph Takuji Sjhimmura.....	125
Figure II. 9 : Tour CBX, © Kohn Pedersen Fox Associates/Saubot Rouit & Associates.....	125
Figure II. 10 : Projet pour la Tour Montparnasse, © Nouvelle AOM/Photo RSI Studio/IDA+.....	125
Figure II. 11 : Projet pour la Tour Phare, © mOrphosis.....	126
Figure II. 12 : Projet pour la Tour Entisar, © AE7 Associates.....	126
Figure II. 13 : Tour D2, © Atelier d'Architecture Anthony BECHU/Tom Sheehan/Photograph Anne-Claude Barbier.....	126
Figure II. 14 : Récapitulatif des études de cas testées pour étudier l'influence de la variation de l'articulation des éléments porteurs.....	129
Figure II. 15 : Proportion d'éléments porteurs verticaux articulés selon le type de structure.....	130
Figure II. 16 : Principe de l'étude comparative de matière mise en oeuvre pour un bâtiment.....	132
Figure II. 17 : Comparaison de la matière mise en oeuvre selon les 14 modèles et leurs éléments réemployés sur plusieurs cycles d'usage.....	134
Figure II. 18 : Dimensions de l'IGH/IMH "réversible".....	138
Figure II. 19 : Nouvelle trame carrée et surface équivalente pour bureau ou logement.....	138
Figure II. 20 : Schémas statiques des hypothèses d'assemblages poteaux-poutres testées avec les poteaux continus sur deux étages. Les ressorts en spirale sont une modélisation d'une raideur d'assemblage non infinie.....	140
Figure II. 21 : schéma de principe de l'élément universel poteau-poutre.....	141
Figure II. 22 : Ensemble des scénarios envisagés pour l'étude de réemploi.....	142
Figure II. 23 : Schéma statique du bâtiment réemployable avec éléments poteaux et poutres réutilisables.....	143

Figure II. 24 : Rentabilité matière (béton et acier cumulés) du réemploi sur plusieurs bâtiments reconstruits par période de 50 ans, pour une période totale de 200 ans (soit quatre cycles de vie de 50 ans).....	146
Figure II. 25 : Rentabilité matière (béton) du réemploi sur plusieurs bâtiments reconstruits par période de 50 ans, pour une période totale de 200 ans (soit quatre cycles de vie de 50 ans).....	146
Figure II. 26 : Rentabilité matière (acier) du réemploi sur plusieurs bâtiments reconstruits par période de 50 ans, pour une période totale de 200 ans (soit quatre cycles de vie de 50 ans).....	147
Figure II. 27 : Déformations possibles pour un portique selon le type de liaison entre la poutre et les poteaux.....	150
Figure II. 28 : Synthèse des éléments de décision pour concevoir une structure démontable.....	152

Chapitre III

Figure III. 1 : Les acteurs de la donnée dans la construction.....	160
Figure III. 2 : Les acteurs de la donnée et la circularité des projets.....	164
Figure III. 3 : Des transmissions de données à établir.....	165
Figure III. 4 : Synthèse de la chaîne des acteurs et contributions à la traçabilité BIM.....	166
Figure III. 5 : Établissement des niveaux de détail ou de développement (LOD) et proposition d'un LOD 600 et d'un LOD 700 appliqués aux éléments structurels (phases applicables au RIBA plan of work [16]).....	170
Figure III. 6 : Fonctionnement de la classification des objets avec le logiciel BIM.....	172
Figure III. 7 : Paramètres partagés.....	173
Figure III. 8 : Exemple d'un tableau indiquant les paramètres partagés au sein d'une famille de poutres.....	174
Figure III. 9 : Paramètres issus des matériaux ne pouvant être exportés depuis Revit.....	175
Figure III. 10 : Extraits des données BIM concernant les matériaux après export IFC de la maquette.....	176
Figure III. 11 : Exemple de paramètres issus d'une famille de poteaux.....	177
Figure III. 12 : Paramètres partagés dans "Information sur le projet".....	178
Figure III. 13 : Aperçu des paramètres exportés qui apparaissent dans le fichier .IFC.....	178
Figure III. 14 : Paramètres d'occurrence / Paramètres de type.....	179
Figure III. 15 : Exemple d'un rapport Power BI sur la réemployabilité des éléments de structure.....	180
Figure III. 16 : Schéma méthodologique pour alimenter la banque de matériaux.....	181
Figure III. 17 : Chaîne d'outils utilisée pour mettre en oeuvre la banque de matériaux, à partir des modèles BIM, des plateformes de matériaux et des données environnementales.....	182
Figure III. 18 : Synthèse du processus de conception avec la base de données.....	184
Figure III. 19 : Synthèse des passerelles avec le modèle de calcul.....	186
Figure III. 20 : Coefficients partiels dans l'EN 1990, Figure C.3 – Relations entre les coefficients partiels individuels, NF EN 1990 Mars 2003 : Eurocodes structuraux. Bases de calcul des structures.....	192
Figure III. 21 : Stratégie sécuritaire selon la connaissance des éléments structuraux à réemployer.....	193
Figure III. 22 : Synthèse des opérations de l'algorithme et itérations induites.....	195
Figure III. 23 : Scénario « conception à partir d'un stock » avec reconstruction appliquée à partir d'un stock initial d'un IGH, pour lequel nous avons développé les flux d'échanges à l'aide de notre chaîne d'outils.....	196
Figure III. 24 : Scénario « conception avec un stock » avec reconstruction appliquée à partir d'un IGH initial vers un nouveau bâtiment de moyenne hauteur, pour lequel nous avons développé les flux d'échanges à l'aide de notre chaîne d'outils.....	196

Chapitre IV

Figure IV. 1 : Les différents types de recouvrement de ferrailage pour assurer la transmission des charges.....	205
Figure IV. 2 : Portique à deux montants rotulés sous chargement uniforme de la poutre : (a) diagramme du moment, (b) diagramme de l'effort tranchant, (c) diagramme de l'effort normal, d'après explorations architecturales.....	207
Figure IV. 3 : Principe du portique avec les zones de clavetage en gris.....	207
Figure IV. 4 : Encombrement du portique.....	209
Figure IV. 5 : 3D du portique assemblé et des éléments récupérés après déconstruction.....	210
Figure IV. 6 : Plans d'exécution du portique 1.....	211
Figure IV. 7 : Séquence d'assemblage proposée pour éviter les gênes entre les armatures (3D).....	212
Figure IV. 8 : Séquence d'assemblage proposée pour éviter les gênes entre les armatures (2D, coupe dans la section de l'assemblage).....	212
Figure IV. 9 : Façonnage des armatures à l'usine « ABPC préfa ».....	213
Figure IV. 10 : Contrôle du ferrailage et de l'arrêt du béton aux zones de clavetage.....	214
Figure IV. 11 : Puce RFID développée par "360 Smart Connect".....	215
Figure IV. 12 : Puce RFID préparée en fond de coffrage avant le coulage du béton.....	215
Figure IV. 13 : Extrait des données attachées à la puce contenue dans le poteau gauche du portique 1.....	216

Figure IV. 14 : Photos du processus d'hydrodémolition	219
Figure IV. 15 : Dispositif de chargement et boîtes à sable en pieds de portique.	219
Figure IV. 16 : Confinement du sable avec du silicone, après la mise en place du portique.	220
Figure IV. 17 : Schéma RDM des moments et des réactions pour un portique articulé en pied.....	220
Figure IV. 18 : Allure de la déformée en fonction de la liaison en pied, logiciel Pythagore	220
Figure IV. 19 : Dispositif de reprise de l'effort horizontal en pied de portique, sur la dalle d'essai	221
Figure IV. 20 : Détail d'appui du vérin.....	221
Figure IV. 21 : Poste de commande du vérin.....	222
Figure IV. 22 : Plan de repérage de l'installation et d'implantation des 13 capteurs sur le portique.	223
Figure IV. 23 : Détail d'un capteur permettant de mesurer le déplacement relatif.	224
Figure IV. 24 : Plan d'implantation des 8 jauges sur le portique.....	224
Figure IV. 25 : Détail des jauges.....	225
Figure IV. 26 : Repérage des fissures	225
Figure IV. 27 : Logiciel d'acquisition pour l'enregistrement des valeurs de l'essai.....	226
Figure IV. 28 : Portique mis en place et instrumenté au laboratoire Navier avant le démarrage du chargement.....	227
Figure IV. 29 : Portique mis en place et instrumenté au laboratoire Navier avant le démarrage du chargement.....	227
Figure IV. 30 : Fiche de suivi des déplacements pendant les essais.....	229
Figure IV. 31 : Cycles de chargement du vérin pour l'expérimentation	230
Figure IV. 32 : Synthèse du protocole expérimental des essais sur les 4 portiques.....	231
Figure IV. 33 : Les différents schémas statiques correspondants au possible comportement réel des portiques.....	232
Figure IV. 34 : Déformées obtenues avec le modèle Pythagore, à gauche pour une articulation, à droite pour un semi-encastrement, entre la poutre et le poteau.....	233
Figure IV. 35 : Schéma des moments pour un assemblage poutre-poteau encastéré.....	233
Figure IV. 36 : Schéma du moment pour un assemblage poutre-poteau articulé.....	233
Figure IV. 37 : Caractéristique du portique pour la modélisation.....	234
Figure IV. 38 : Formule du moment maximal en fonction du schéma statique (portique isostatique).....	234
Figure IV. 39 : Méthode de calcul pour obtenir le moment à mi-travée dans le portique hyperstatique.....	235
Figure IV. 40 : Décomposition du portique selon la méthode des travaux virtuels et allures des déformations.....	235
Figure IV. 41 : Méthode de calcul de la flèche hyperstatique	237
Figure IV. 42 : Extrait de la feuille de calcul de flèche par intégration des courbures de setec tpi.....	239
Figure IV. 43 : Modélisation du portique et de ses zones de clavetages sur le logiciel Pythagore.....	240
Figure IV. 44 : Phénomène de fissuration et conséquence sur la contribution du béton tendu pour résister en traction.....	240
Figure IV. 45 : Schématisation des sections prises en compte selon la méthode de calcul.....	241
Figure IV. 46 : Extrait du logiciel Pythagore avec déformée amplifiée d'un facteur 100 avec iso couleurs des contraintes.....	242
Figure IV. 47 : Position des jauges sur le portique (en noir) et limite entre le béton de la poutre et le béton de clavetage selon le portique (en marron).....	244
Figure IV. 48 : Déformations des jauges de la zone supérieure pour une charge de 25 kN.....	245
Figure IV. 49 : Déformations des jauges de la zone inférieure pour une charge de 25 kN.....	245
Figure IV. 50 : Déformée x100 pour le portique 1, à partir des déplacements absolus des capteurs, pour une charge de 70 kN.....	246
Figure IV. 51 : Superpositions des flèches théoriques du modèle Pythagore (non fissuré en bleu, fissuré en gris) et de flèches enregistrées (en orange) durant les trois chargements.....	247
Figure IV. 52 : Déformée x100 pour le portique 1, à partir des déplacements absolus des capteurs, pour une charge de 70 kN.....	249
Figure IV. 53 : Ouverture progressive de la fissure au niveau de la jonction clavetage-poteau, lors du chargement à la rupture.....	251
Figure IV. 54 : Proposition d'indentation et de clé de clavetage pour augmenter l'adhérence entre le béton de clavetage et le béton du poteau.....	252
 Chapitre V	
Figure V. 1 : Les grandes étapes du cycle de vie d'un produit de construction au sein du cycle de vie d'un bâtiment dit « traditionnel », sans réemploi, Lebert et al. [1].....	257
Figure V. 2 : Les grandes étapes du cycle de vie d'un produit de construction de réemploi au sein du cycle de vie d'un bâtiment dit « réemployable », adapté d'après Lebert et al. [1].....	257

Figure V. 3 : Figure A.1 de la norme NF EN 15804+A1, « Type de performance technique et fonctionnelle déclarées et DVR ».....	261
Figure V. 4 : Figure A.2 de la norme NF EN 15804+A1, « Type de performance technique et fonctionnelle déclarées, réparation/maintenance pendant la DVR ».....	261
Figure V. 5 : Schématisation de la prise en compte d'une durée de vie produit et bâtiment, hypothèse (b).....	262
Figure V. 6 : Type de charge structurale selon l'élément porteur : poteau, poutre ou dalle.....	263
Figure V. 7 : Limites du système des portiques étudiés.....	265
Figure V. 8 : Etapes prises pour réaliser l'ACV des portiques.....	270
Figure V. 9 : Modèle ACV pour la fabrication d'un portique, usage 1, initial.....	271
Figure V. 10 : Modèle ACV pour la déconstruction puis reconstruction d'un portique, usages 2 et intermédiaires.....	272
Figure V. 11 : Comparaison des impacts entre les portiques pour la fabrication initiale.....	277
Figure V. 12 : Comparaison des paramètres entre les portiques pour la fabrication initiale.....	278
Figure V. 13 : Analyse détaillée des résultats du portique avec le clavetage en C25 et pour chaque indicateur d'impact, pour la phase construction.....	280
Figure V. 14 : Comparaison des catégories d'impacts entre les portiques pour la phase de déconstruction/reconstruction.....	281
Figure V. 15 : Comparaison des paramètres entre les portiques pour la phase de déconstruction/reconstruction.....	282
Figure V. 16 : Analyse détaillée des résultats du portique avec le clavetage en C25 et pour chaque indicateur d'impact, pour la phase déconstruction/reconstruction.....	284
Figure V. 17 : Comparaison des impacts entre les portiques pour les deux cycles enchaînés.....	285
Figure V. 18 : Comparaison des paramètres entre les portiques pour les deux cycles enchaînés.....	286
Figure V. 19 : Comparaison des résultats d'impacts entre les portiques réemployés et les portiques neufs pour deux cycles d'usages.....	287
Figure V. 20 : Comparaison des résultats de paramètres entre les portiques réemployés et les portiques neufs pour deux cycles d'usages.....	288
Figure V. 21 : Différences de process prises en compte pour le scénario avec réemploi et le scénario neuf.....	289
Figure V. 22 : Impacts cumulés pour l'indicateur "Changement climatique" entre le portique réemployé et les portiques neufs équivalents.....	290
Figure V. 23 : Comparaison graphique de la part des contributeurs pour les cycles n+1 pour l'indicateur « Changement climatique » entre le portique réemployé et les portiques neufs équivalents.....	290
Figure V. 24 : Impacts cumulés pour l'indicateur "Changement climatique" entre le portique réemployé et les portiques neufs équivalents, en appliquant un coefficient de perte de 10% pour le réemploi.....	291
Figure V. 25 : Influence du nombre d'années par cycle sur l'indicateur "Changement climatique" cumulé.....	291
Figure V. 26 : Comparaison de l'indicateur "Changement climatique" entre le portique réemployé et le portique neuf sur plusieurs cycles intégrant une perte de capacité structurale.....	292
Figure V. 27 : Comparaison de l'indicateur "Changement climatique" entre le portique réemployé et le portique neuf sur plusieurs cycles intégrant une perte de capacité structurale et un coefficient de perte de 10%.....	292
Figure V. 28 : Comparaison de l'indicateur "Changement climatique" entre le portique réemployé et le portique neuf sur plusieurs cycles intégrant une perte de capacité structurale et un coefficient de perte de 20%.....	293
Figure V. 29 : Comparaison de l'indicateur "Changement climatique" entre le portique réemployé et le portique neuf sur plusieurs cycles intégrant une perte de capacité structurale et un coefficient de perte de 30%.....	293
Figure V. 30 : Comparaison entre les bâtiments comportant les portiques réemployés et les bâtiments neufs, selon les indicateurs d'impacts de la NF EN 15804+A1/CN.....	295
Figure V. 31 : Comparaison entre les bâtiments comportant les portiques réemployés et les bâtiments neufs, selon les indicateurs d'impacts endpoint ReCiPe H/A.....	296
Figure V. 32 : Comparaison entre les bâtiments comportant les portiques réemployés et les bâtiments neufs, selon les paramètres de la NF EN 15804+A1/CN.....	296
Figure V. 33 : Problématique de la répartition des impacts entre différents cycles et différents propriétaires.....	298
Figure V. 34 : Affectations possibles des impacts environnementaux du réemploi entre plusieurs cycles de vie en ACV.....	299
Figure V. 35 : Répartition des impacts sans allocation, fondée sur la réalité physique de la matière.....	300
Figure V. 36 : Répartition des impacts avec la méthode des stocks.....	300
Figure V. 37 : Répartition des impacts avec substitution (soustraction des impacts du portique neuf que l'on ne produira pas grâce au réemploi).....	300

Figure V. 38 : Répartition des impacts avec allocation de répartition équitable, non pondérée.....	300
Figure V. 39 : Répartition des impacts avec allocation prenant en compte l'effort de surdimensionnement initial réparti sur l'ensemble des cycles.....	301
Figure V. 40 : Répartition des impacts avec allocation instaurant une pondération au tiers, qui permet aux propriétaires réemployeurs de diminuer les impacts en cycles n+1.	301
Figure V. 41 : Avantage par propriétaire selon la méthode choisie.....	302
Figure V. 42 : Synthèse des indicateurs adaptée du projet Pulse-Paris [30], et ajustée pour le réemploi.	304
Figure V. 43 : Pondération par type de connexion, présentée par alba concept, [34].....	305
Figure V. 44 : Graphique de type radar pour les résultats comparatifs de l'indice de réemployabilité à l'échelle d'un projet de bâtiments.....	311
Figure V. 45 : Résultats comparatifs de l'indice de réemployabilité des éléments réemployables et non réemployables (nombre de critères réduits).....	311
 Annexes	
Figure A. 1 : Extrait de la feuille de calcul ayant permis de dimensionner le noyau du bâtiment réversible.....	322
Figure A. 2 : Modes de flambement d'un poteau selon ses conditions d'appuis.	324
Figure A. 3 : Résultats de l'enquête pour la transmission des données entre acteurs de la construction, constats des pratiques.	325
Figure A. 4 : Géométral du portique n°1.	337
Figure A. 5 : Géométral du portique n°2.	338
Figure A. 6 : Géométral du portique n°3.	339
Figure A. 7 : Géométral du portique n°4.	340
Figure A. 8 : Contraintes dans la section au nu de la poutre, issues du modèle réalisé avec le logiciel Pythagore.	341
Figure A. 9 : Contraintes dans la section de la poutre à mi-travée, issues du modèle réalisé avec le logiciel Pythagore...	342
Figure A. 10 : Fiche de suivi de l'essai et des résultats pour le portique n°1.....	343
Figure A. 11 : Fiche de suivi de l'essai et des résultats pour le portique n°2.	344
Figure A. 12 : Fiche de suivi de l'essai et des résultats pour le portique n°3.....	345
Figure A. 13 : Fiche de suivi de l'essai et des résultats pour le portique n°4.	346

Crédits illustrations et photos originales :

Ingrid Bertin (setec, Laboratoire Navier - Ecole des Ponts ParisTech) : Figures 4; 5; 6; 7; 8; 10; 11; 0.1; 0.2; 0.8; 0.9; 0.10; I.10; I.32; I.33; I.35; I.41; I.42; I.43; II.1; II.4; II.5; II.6; II.14; II.15; II.16; II.17; II.24; II.25; II.26; II.27; II.28; III.1; III.2; III.3; III.4; III.5; III.6; III.8; III.15; III.16; III.17; III.18; III.21; III.22; III.23; III.24; IV.3; IV.4; IV.9; IV.10; IV.11; IV.12; IV.13; IV.15; IV.16; IV.19; IV.20; IV.21; IV.22; IV.23; IV.24; IV.25; IV.26; IV.27; IV.28; IV.29; IV.31; IV.32; IV.33; IV.35; IV.36; IV.37; IV.38; IV.39; IV.40; IV.41; IV.43; IV.44; IV.45; IV.47; IV.48; IV.49; IV.50; IV.51; IV.52; IV.53; IV.54; V.2; V.5; V.7; V.8; V.9; V.10; V.11; V.12; V.13; V.14; V.15; V.16; V.17; V.18; V.19; V.20; V.21; V.22; V.23; V.24; V.25; V.26; V.27; V.28; V.29; V.30; V.31; V.32; V.33; V.34; V.35; V.36; V.37; V.38; V.39; V.40; V.41; V.44; V.45.

D'après Charlotte Borrits (setec) : Figures II.18; II.19; II.20; II.21; II.22; II.23; IV.1; IV.5; IV.7; IV.8.

Gitte Spinder : Photos des Figures I.18; I.19; I.20.

Clément Boudet (setec) : Modélisation Revit des Figures III.5; III.23; III.24.

Nirandone Phothirath (setec) : Modélisation Revit de la Figure II.3.

D'après Romain Mesnil (Laboratoire Navier - Ecole des Ponts ParisTech) : Figure III.19.

Entreprise Degaine : Photos de la Figure IV.14.

Rafael Dias Simoes (setec) : Illustrations des pages 316-317; 362-363.

Liste des tableaux

Chapitre 0

Tableau 0.1 : Revue de la littérature pour la part de la construction dans différents impacts : la consommation totale de matériaux, de ressources naturelles, d'énergie et les émissions totales de GES.....	4
---	---

Chapitre I

Tableau I. 1 : Connexion indirecte par l'apport d'un élément permettant un collage définitif	63
Tableau I. 2 : Connexion directe avec organes métalliques	64
Tableau I. 3 : Connexion directe par contact (sans organe métallique)	64
Tableau I. 4 : Connexion indirecte par 3e composant dépendant (raccordé à un élément)	65
Tableau I. 5 : Connexion indirecte par 3e composant indépendant (accessoire de fixation)	65
Tableau I. 6 : Durée de vie dans l'atmosphère et potentiel de réchauffement global des gaz à effet de serre (rapport du GIEC, 2007) [70]	81

Chapitre II

Tableau II. 1 : Formule d'un béton ordinaire C35 et d'un béton haute performance C80, Jaeger, J.-M. [18].....	114
Tableau II. 2 : Classement des éléments porteurs en fonction de leurs prédispositions ou non au réemploi.....	116
Tableau II. 3 : Caractéristiques structurales de quelques tours emblématiques issues du retour d'expérience des ingénieurs de Setec tpi.....	125
Tableau II. 4 : Analyse du modèle le plus favorable en fonction du total de matière mise en œuvre, du taux d'articulation des éléments porteurs verticaux et du taux de matière réemployable par rapport au modèle de référence.....	131
Tableau II. 5 : Résultats de la quantité de matière acier et béton confondus, et en tonnes, mise en œuvre selon les 14 modèles et leurs éléments réemployés sur plusieurs cycles d'usage.....	135
Tableau II. 6 : Résultats des raideurs cibles minimales pour chaque hypothèse structurale du bâtiment réversible avec poteaux continus sur deux étages.....	140
Tableau II. 7 : Description des sept variantes de dimensionnements effectuées pour l'étude de cas.	142
Tableau II. 8 : Ratios de ferrailage en kg/m ³ par éléments et selon les bâtiments dimensionnés.....	144
Tableau II. 9 : Impact matière surdimensionnements pour le réemploi pour la trame choisie de 7,4mx7,4m sur les 10 niveaux / Les éléments colorés indiquent les éléments conçus réemployables pour A1, B1, C1 et les éléments réemployés pour B2a, B2b, C2.	145
Tableau II. 10 : Paramètres de décisions à mobiliser lors de la conception d'une structure démontable	154

Chapitre III

Tableau III. 1 : Résultats de l'enquête pour la transmission des données entre acteurs de la construction.....	162
Tableau III. 2 : Propriétés des nouveaux LOD/LOI pour les systèmes porteurs.....	171
Tableau III. 3 : Application de la nomenclature à une poutre en acier nommée "POUTRES-STR_POU_HEM".....	185
Tableau III. 4 : Scénario « conception à partir d'un stock » : variantes à partir du bâtiment A.....	197
Tableau III. 5 : Scénario « conception avec un stock » : bâtiment final B.....	197
Tableau III. 6 : Détails sur les poteaux réemployés avec le scénario « conception avec un stock ».....	197

Chapitre IV

Tableau IV. 1 : Longueur de clavetage et de recouvrement des armatures pour chacun des portiques	210
Tableau IV. 2 : Proposition de nomenclature pour le code à graver sur tags RFID pour un poteau en béton armé.....	217
Tableau IV. 3 : Synthèse des rapports d'essais du béton utilisé pour la fabrication des portiques	218
Tableau IV. 4 : Correspondance avec les intégrales de Mohr.....	235
Tableau IV. 5 : Valeurs des flèches selon le schéma statique et la fissuration ou non de la section	239
Tableau IV. 6 : Valeurs attendues pour la rupture selon les portiques.....	241
Tableau IV. 7 : Récapitulatif des valeurs de flèches attendues selon le comportement des portiques.....	242
Tableau IV. 8 : Résultats de mesures de tassements et de flèches des portiques testés (1ère phase d'essais).....	243
Tableau IV. 9 : Déformations dans les jauges pour une force exercée de 25kN en µm/m.....	244
Tableau IV. 10 : Moments et déformations théoriques selon les jauges pour une charge de 25 kN.....	244
Tableau IV. 11 : Déplacements absolus des capteurs pour une charge de 70 kN, voir figure IV. 22 pour l'implantation des capteurs.....	245

Tableau IV. 12 : Angles mesurés à partir du dessin des déformées avec le logiciel Rhinoceros, pour une charge de 70 kN.	246
Tableau IV. 13 : Synthèse des valeurs de flèches théoriques et mesurées correspondant au comportement observé pour le portique lors de la 1ère phase d'essais (avec fissuration et contribution du béton tendu pour résister en traction).	247
Tableau IV. 14 : Résultats de mesures de tassements et de flèches des portiques testés (2ème phase d'essais).	248
Tableau IV. 15 : Déformations dans les jauges pour une force exercée de 25kN en $\mu\text{m}/\text{m}$	249
Tableau IV. 16 : Déplacements absolus des capteurs.	249
Tableau IV. 17 : Angles mesurés à partir du dessin des déformées avec le logiciel Rhinoceros.	249
Tableau IV. 18 : Synthèse des valeurs de flèches théoriques et mesurées correspondant au comportement observé pour le portique lors de la 2ème phase d'essais (avec fissuration et contribution du béton tendu pour résister en traction).	250
Tableau IV. 19 : Valeurs maximales atteintes lors de la 2ème phase des essais, selon les portiques.	252

Chapitre V

Tableau V. 1 : Répartition moyenne des contributeurs pour l'indicateur "changement climatique" pour un bâtiment sur son cycle de vie, selon différentes études.	258
Tableau V. 2 : Flux de référence pour chaque scénario de portique.	264
Tableau V. 3 : Différences de matière mise en œuvre entre les portiques, prise en compte dans l'ACV.	266
Tableau V. 4 : Détail du transport des constituants du béton jusqu'à la centrale à béton.	268
Tableau V. 5 : Détail du transport pris en compte pour les différents bétons.	268
Tableau V. 6 : Description de la fabrication du béton jusqu'à l'usine de préfabrication, exemple du béton C60.	268
Tableau V. 7 : Détail du transport des aciers d'armatures jusqu'à l'usine de préfabrication.	269
Tableau V. 8 : Description de la fabrication et du façonnage des armatures jusqu'à l'usine de préfabrication.	269
Tableau V. 9 : Description des éléments pris en compte lors de l'usinage des portiques.	269
Tableau V. 10 : Description des éléments pris en compte lors de la déconstruction des portiques.	270
Tableau V. 11 : Description des éléments pris en compte lors du recyclage en fin de vie des portiques.	270
Tableau V. 12 : Paramètres décrivant les impacts environnementaux, extraits de la NF EN 15804+A1, partie 7.2.3.	273
Tableau V. 13 : Paramètres décrivant l'utilisation des ressources, extraits de la NF EN 15804+A1, partie 7.2.4.	273
Tableau V. 14 : Autres informations environnementales décrivant les catégories de déchets, extraites de la NF EN 15804+A1, partie 7.2.5.	273
Tableau V. 15 : Indicateurs d'impacts de la phase de construction des 5 portiques.	275
Tableau V. 16 : Indicateurs d'impacts de la phase de reconstruction des 5 portiques.	276
Tableau V. 17 : Paramètres pour la phase de construction des portiques.	276
Tableau V. 18 : Paramètres pour la phase de reconstruction des portiques.	276
Tableau V. 19 : Synthèse des échelles de scores proposées par Mayer et al. [35], reprise pour le calcul de la difficulté de désassemblage.	306
Tableau V. 20 : Echelles de scores proposées pour évaluer la traçabilité.	306
Tableau V. 21 : Echelles de scores proposées pour évaluer la déconstructibilité.	307
Tableau V. 22 : Echelles de scores proposées pour évaluer l'impact territorial.	307
Tableau V. 23 : Echelles de scores proposées pour évaluer l'impact sociétal.	308
Tableau V. 24 : Synthèse de calculs pour l'ensemble des critères de réemploi.	309
Tableau V. 25 : Application du calcul des critères de réemployabilité.	310
Tableau V. 26 : Comparaison multicritères des impacts environnementaux sans et avec réemploi.	312

Annexes

Tableau A. 1 : Caractéristiques du béton prises en compte dans les calculs de dimensionnement.	323
Tableau A. 2 : Charges prises en compte pour un programme de bureau.	324
Tableau A. 3 : Propriétés détaillées par matériaux par phases pour une intégration au modèle BIM, afin de permettre et d'anticiper un réemploi structural.	336
Tableau A. 4 : Caractéristiques des déformations à la rupture des portiques, obtenues par la modélisation sur le logiciel Pythagore.	341
Tableau A. 5 : Moments ELS et ELU selon le type de béton de l'assemblage du portique.	342
Tableau A. 6 : Moments ELS et ELU à mi-travées des portiques.	342
Tableau A. 7 : Procédés Ecoinvent utilisés.	357

Liste des annexes

Chapitre 2	322
Partie 2.3.2. : Extrait de la feuille de calcul ayant permis de dimensionner le noyau du bâtiment réversible.....	322
Partie 2.3.4. : Hypothèses et critères de prédimensionnement du bâtiment réversible.....	323
Chapitre 3	325
Partie 3.1.1.2. : Résultats de l'enquête pour la transmission des données entre acteurs de la construction, constats des pratiques.....	325
Partie 3.2.3. : Propriétés détaillées par matériaux par phases pour une intégration au modèle BIM, afin de permettre et d'anticiper un réemploi structural.....	326
Chapitre 4	336
Parties 1.2.3. et 4. : Géométraux des portiques testés	337
Partie 1.3.3.1. : Résultats du modèle Pythagore, vérifications ELS et ELU. Fiches de suivi de l'essai et des résultats par portique.....	341
Partie 1.5. : Résultats obtenus lors des essais pour les capteurs et les jauges pour chaque portique....	347
Chapitre 5	354
Partie 5.2.2. : Questionnaire pour le recueil de données en vue de l'ACV. Procédés Ecoinvent utilisés.....	354
Partie 5.4.5. : Détail du calcul de l'indice de réemployabilité.....	358
Articles et communications	361

Introduction

Chaque année, les chiffres le prouvent, nous ne cessons d'aggraver notre interaction avec la Terre. Nous épuisons les ressources naturelles, nous rejetons des substances polluantes et des gaz à effet de serre et nous provoquons des désastres irrémédiables sur notre planète. Nous n'avons pas encore intégré les avertissements de notre humanité, ainsi Albert Einstein déclarait : « Nous ne sortirons pas le monde de la crise si nous ne changeons pas notre manière de penser » [1]. Il devient urgent de réagir, en effet : « le monde entre après 1945 dans une croissance historiquement exceptionnelle qui marque la Grande accélération de l'Anthropocène. Une caractéristique clé de cette croissance est sa folle consommation tant d'énergie que de matière. [...] Entre 1950 et 1970, la population est multipliée par 1,46, [...] la consommation des matériaux de construction par 2,94. » selon Bonneuil, Fressoz [2]. Chaque année le *Global Footprint Network* déclare la date du « *Earth Overshoot day* », il s'agit du jour dans l'année à partir duquel la demande humaine dépasse la capacité de la terre à régénérer des ressources et, *a fortiori*, à voir la matière contenue, l'exergie, ainsi exploitée. La Figure 1 montre que ce jour arrive de plus en plus tôt chaque année de façon inquiétante. Néanmoins, en 2020, la crise due au coronavirus a fait reculer ce dépassement de 24 jours par rapport à 2019.

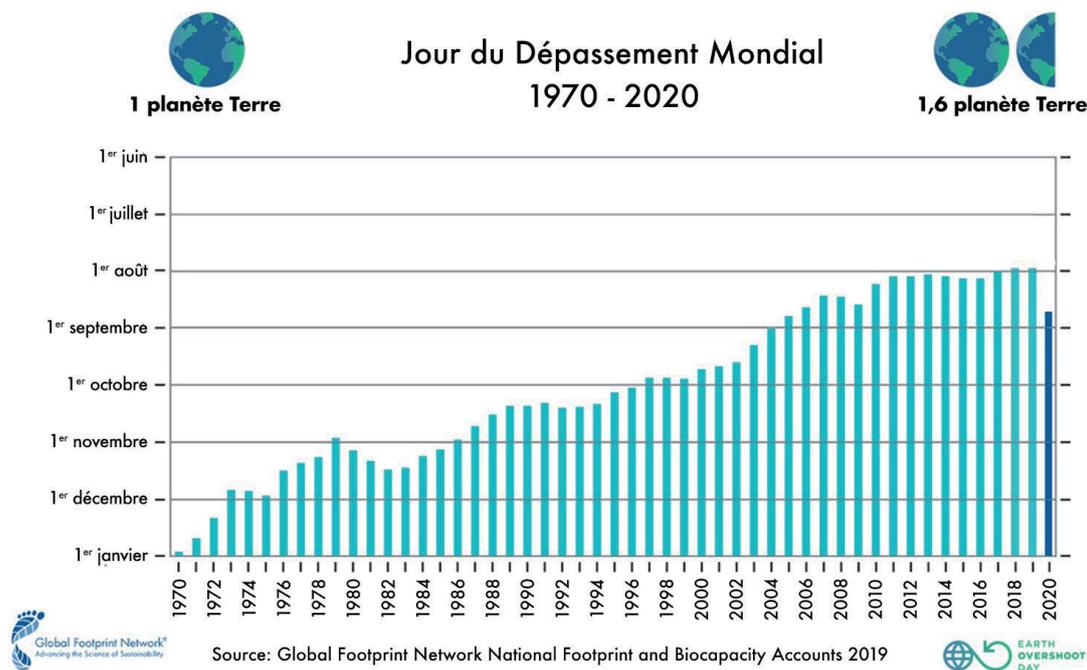
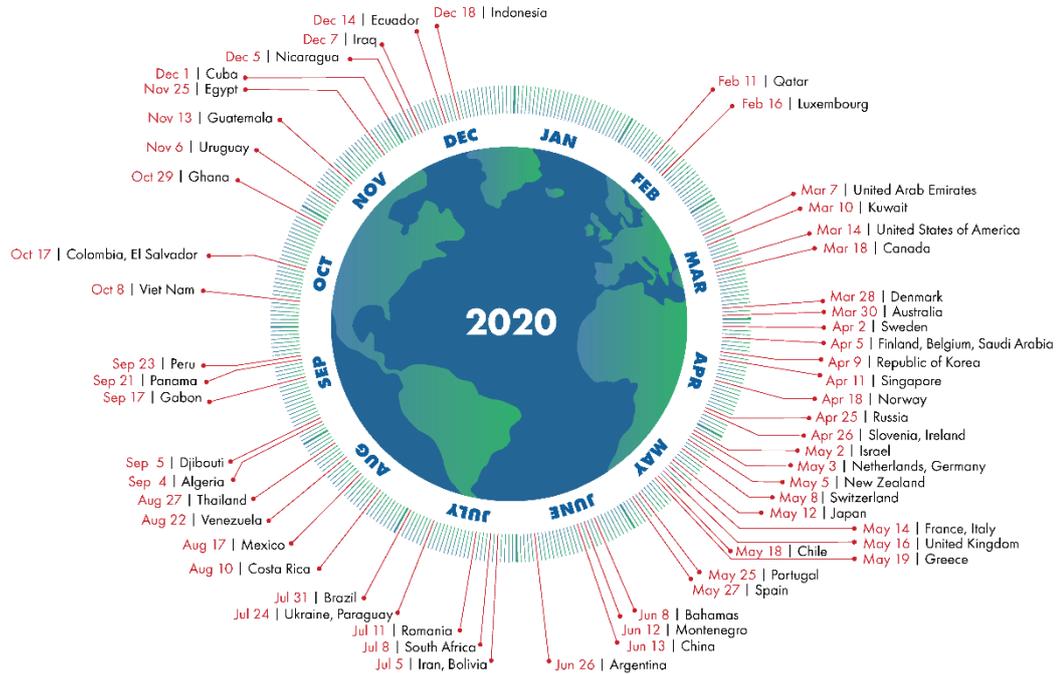


Figure 1 : Earth Overshoot Day 1970-2020 [3]

Les pays les plus développés, sont les plus impactants sur nos ressources comme le détaille la Figure 2, ce qui demande une réaction particulière prioritairement dans ces pays.

Country Overshoot Days 2020

When would Earth Overshoot Day land if the world's population lived like...



Source: Global Footprint Network National Footprint and Biocapacity Accounts 2019



Figure 2 : Country Overshoot Days 2019 [3]

La méthodologie du *Global Footprint Network* s'appuie sur des indicateurs d'empreinte écologique de la population et de biocapacité ramenés à une surface et une dette annuelle. Le recueil de données n'est pas aussi précis selon les pays et l'agrégation de différents indicateurs pour arriver à une date de dépassement induit un certain nombre de simplifications. Par ailleurs la méthodologie est affinée chaque année, ce qui remet en cause les dates de dépassement estimées les années précédentes. Si les méthodes pour calculer l'*Earth Overshoot Day* sont discutables [4], d'autres experts font la quasi-unanimité. Le GIEC rappelle régulièrement que nous sommes confrontés à des risques majeurs avec un réchauffement climatique de 1,5°C qui limite la capacité d'adaptation de certains systèmes humains et naturels avec les pertes qui y sont associées : l'augmentation des risques pour la santé, la sécurité alimentaire, l'approvisionnement en eau, la sécurité humaine, des températures extrêmes plus élevées dans la plupart des régions habitées, de fortes précipitations dans plusieurs régions et des déficits de précipitations dans certaines régions. Tous ces risques augmenteront encore avec le réchauffement climatique de 2°C, selon le GIEC [5], qui semble se profiler si la croissance se maintient à son rythme actuel, comme le présage la tendance signalée par la flèche sur la Figure 3. Pour maintenir une limite du réchauffement à 1,5°C et éviter un changement climatique irréversible, les émissions doivent diminuer d'environ 50% d'ici 2030, selon Post [6].

Cumulative emissions of CO₂ and future non-CO₂ radiative forcing determine the probability of limiting warming to 1.5°C

a) Observed global temperature change and modeled responses to stylized anthropogenic emission and forcing pathways

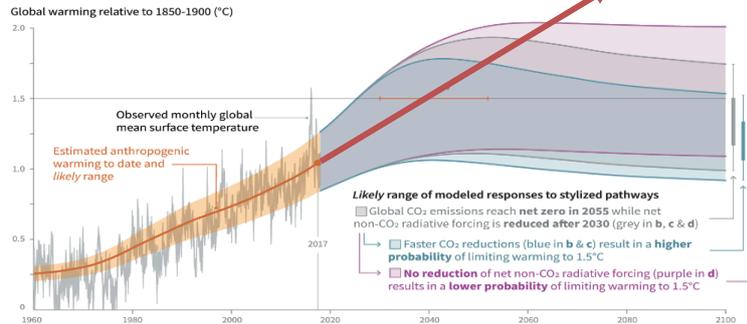


Figure 3 : Cumulative emissions of CO₂ and future non-CO₂ radiative forcing determine the probability of limiting warming to 1,5°C [7]

1. Diminuer l'impact de la construction

L'activité du bâtiment et de la construction est celle qui est responsable de la plus grande part des rejets de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère, et de consommation d'énergie. C'est aussi le secteur responsable du taux d'extraction le plus élevé de matières premières dans le monde, selon Hopkinson et al. [8]. Le Tableau 1 synthétise les principales données dans la littérature.

Auteurs	Consommation de matériaux	Consommation de ressources naturelles	Consommation d'énergie	Emissions de GES
Di Bari et al. [9]	40%			50%
Santos et al. [10]	50%		40%	36%
Crippa et al. [11]		50%		33%
Iacovidou, Purnell [12]		50%	42%	40%
Brütting et al. [13] [14]	50%		33%	33%
The United States (U.S.) Geological Survey's assessment [15]		60%		33%
CITEPA [16]				33%
Bâtiment Energie-Carbone (FR)			45%	
Thiers et al. [17]			33%	33%
Zabalza et al. [18]			33%	33%
Hoxha et al. [19]				40%
Habert et al. [20]				33%
Mousa et al. [21]				36%
Kiss et al. [22]			40%	40%
Kumar Dixit et al. [23]				40%
Lismont et al. [24]			40%	
Shahmir Nizam et al. [25]			40%	
Global Alliance for Buildings and Construction [26]			36%	39%

Tableau 1 : Revue de la littérature pour la part de la construction dans différents impacts : la consommation totale de matériaux, de ressources naturelles, d'énergie et les émissions totales de GES.

Le détail des émissions de GES en France, en Figure 4, permet de distinguer la part du secteur de la construction relative à l'énergie opérationnelle de celle relative à l'énergie grise. L'énergie opérationnelle ou fonctionnelle est celle nécessaire au fonctionnement des bâtiments (chauffage, climatisation, eau chaude, ...) tandis que l'énergie grise est celle qui est nécessaire à la mise en œuvre du bâtiment (matériaux de construction, chantier, ...).

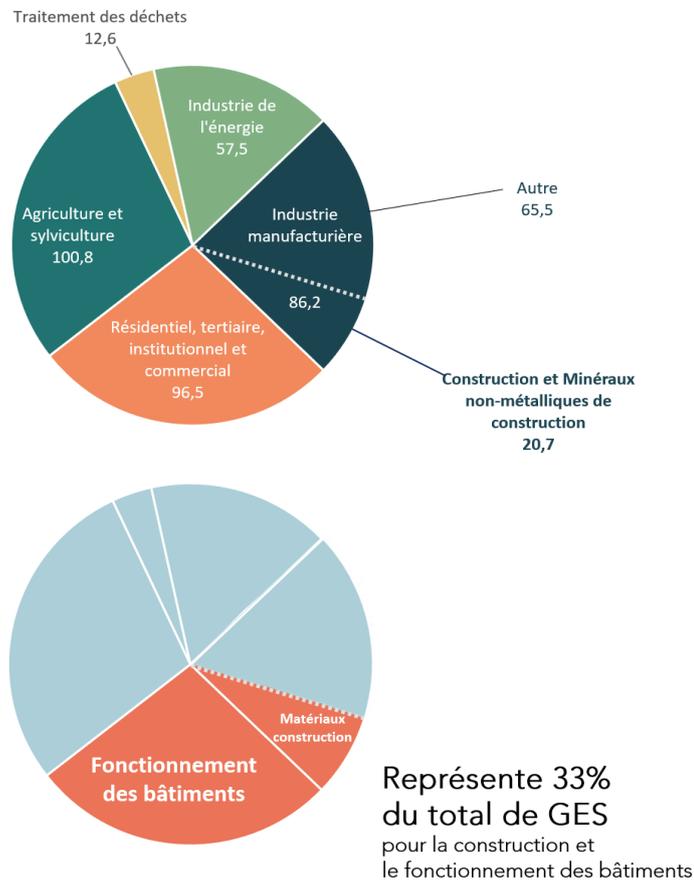


Figure 4 : Emissions de GES par secteur en France en millions de tonnes de CO₂e [16]

Cette tendance semble s'alourdir tant la demande de matériaux est croissante, comme le montre la Figure 5 pour la production du ciment, matériau représentatif de la construction actuelle. Sur ce sujet, une tribune dans le Monde, d'août 2020 [27], alerte sur les dérives consuméristes dans la construction et sur cette non prise en compte de l'énergie grise au profit d'une politique de rénovation thermique, jusqu'à dénoncer des politiques de transition écologique qui provoqueraient le réchauffement climatique. D'après cette tribune les outils scientifiques ne sont pas encore capables de produire des données et des modèles environnementaux fiables, ce qui montre la forte attente vis-à-vis de la communauté scientifique.

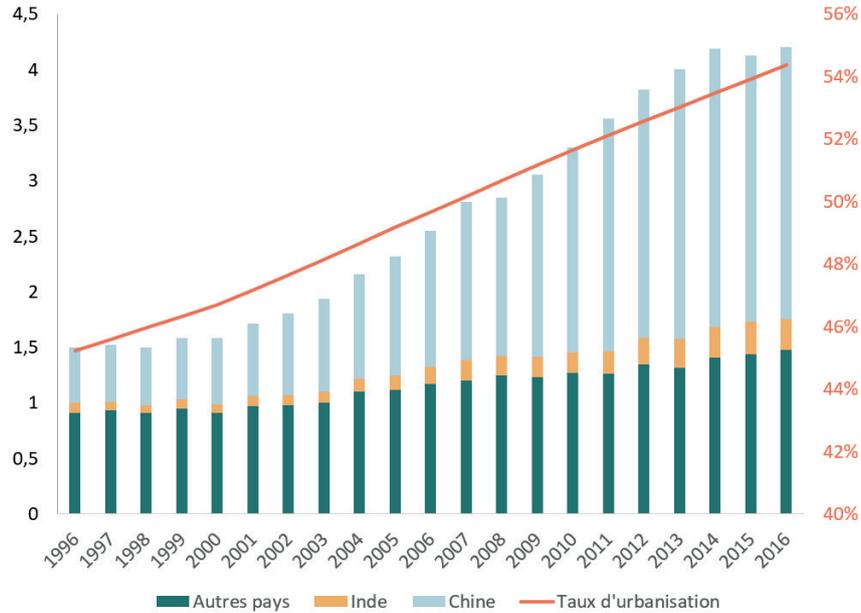


Figure 5 : Production de ciment en milliards de tonnes et taux d'urbanisation [28]

L'OCDE a également publié une étude sur les perspectives de consommation des matériaux qui montre que la demande du secteur de la construction restera prégnante dans les années à venir, selon la Figure 6.

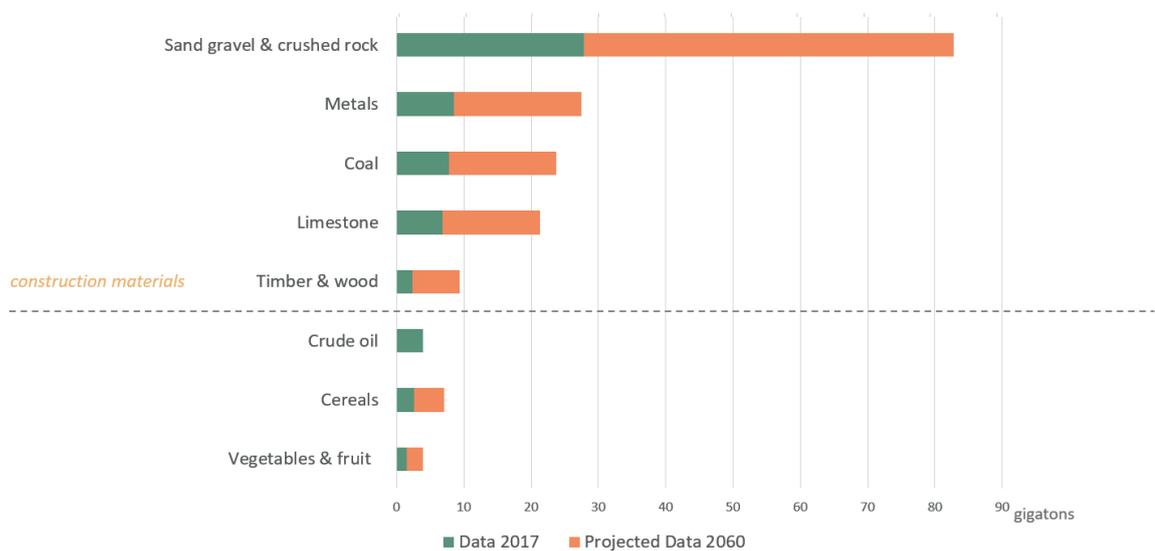


Figure 6 : Matériaux de construction dominants [29]

L'activité du bâtiment et de la construction produit également une large majorité des déchets soit 70% des déchets en France ou 228 millions de tonnes de déchets en 2015 sur la Figure 7. A la fin des années 2000, le volume mondial des ressources extraites équivalait à 60 milliards de tonnes, tandis que le volume des déchets produits se montait à 12 milliards de tonnes, soit 20% de l'extraction, Choppin, Delon [30]. Dans un monde où les ressources ne sont pas inépuisables, et dont l'économie est incertaine, il est nécessaire de repenser notre façon de construire.

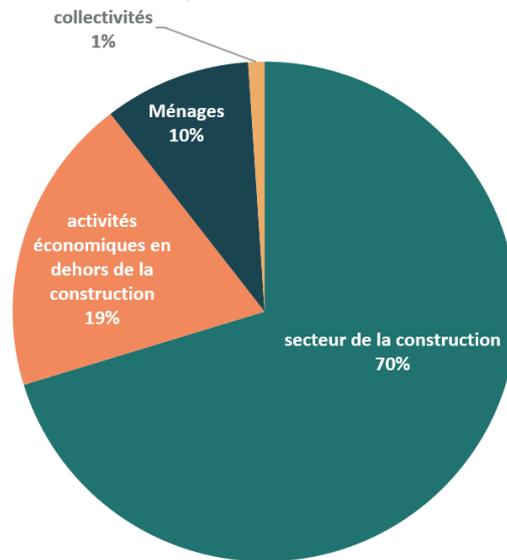


Figure 7 : La production de déchets en France en 2015 [31]

Les constats environnementaux nécessitent de repenser nos méthodes de construction pour lutter contre l'épuisement des ressources naturelles et les émissions de GES qui conduisent au changement climatique. Dans ce contexte, le secteur du bâtiment est le principal contributeur à trois risques environnementaux : l'épuisement des ressources, la consommation d'énergie et la production de déchets, Brüthing et al. [14], Iacovidou et al. [12]. Selon le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE SBCI, 2009), le secteur du bâtiment est le principal secteur émetteur disposant de leviers qui permettraient d'améliorer de manière significative les impacts environnementaux mondiaux, Hoxha, E. et al. [19].

Notre travail est donc motivé par l'action nécessaire que nous devons mettre en place pour diminuer nos impacts environnementaux en tant que concepteurs.

2. Privilégier l'écoconception avec le réemploi

Plusieurs pistes ont été développées ces dernières années pour écoconcevoir les bâtiments. Les guides et les référentiels en la matière se multiplient. Cependant les ordres de grandeur ne sont pas connus et les principes évoqués ne sont pas assez suivis de justifications chiffrées sur les gains possibles. Le recours au recyclage par exemple, ne semble pas assez probant dans la mesure où il s'agit d'une transformation industrielle de la matière qui voit ses propriétés initiales dégradées. Le recyclage est également source d'émissions industrielles. De plus, le taux de recyclage peut être très faible comme dans le cas des granulats recyclés dans le béton, limité par la norme NF EN 206 [32]. Ainsi on peut espérer un taux de substitution d'environ 20% pour les granulats recyclés sur l'ensemble des éléments de structure en béton armé pour un bâtiment de moyenne et grande hauteur. Un projet national de recherche « Recybeton » [33] a émis des recommandations pour augmenter ce taux de granulats recyclés. Cependant les granulats recyclés affectent de façon prévisible les performances du béton en matière de propriétés de transfert, et présentent une absorption plus importante (typiquement entre 5 à 10%) que celle des granulats naturels (plutôt entre 0 et 3%). Pour compenser ces écarts, les formulations de béton à base de granulats recyclés peuvent présenter une teneur en ciment ou en liant équivalent augmentée et plus impactante par rapport à un béton ordinaire, ce qui peut annuler l'effet environnemental bénéfique du recyclage.

D'autres solutions reposent sur la notion de matériaux dits «bas carbone». Si l'on garde l'exemple du béton, «bas carbone» signifie remplacer un ciment classique CEM I par un

ciment peu carboné CEM III qui pourrait réduire de moitié les GES du béton selon les fournisseurs. Cependant un tel ciment pose des problèmes techniques de mise en œuvre, d’approvisionnement, et d’évaluation environnementale. En effet, ce dernier est réalisé avec des laitiers de haut fourneau dont la comptabilité environnementale fait débat. Plusieurs experts demandent une évolution de la méthode d’allocation pour évaluer les impacts environnementaux de ces laitiers¹. Le réemploi lui, puisqu’il préserve l’intégrité de la matière, permet d’éviter la consommation de ressources naturelles pour refabriquer un matériau neuf équivalent, d’éviter l’émission de GES inhérente, mais aussi d’éviter de générer des déchets en fin de vie si l’élément était simplement éliminé. Les quelques études menées dans la littérature sur ces points démontrent les bénéfices significatifs du réemploi, comme l’explicitent Hopkinson et al. [8] avec leur revue.

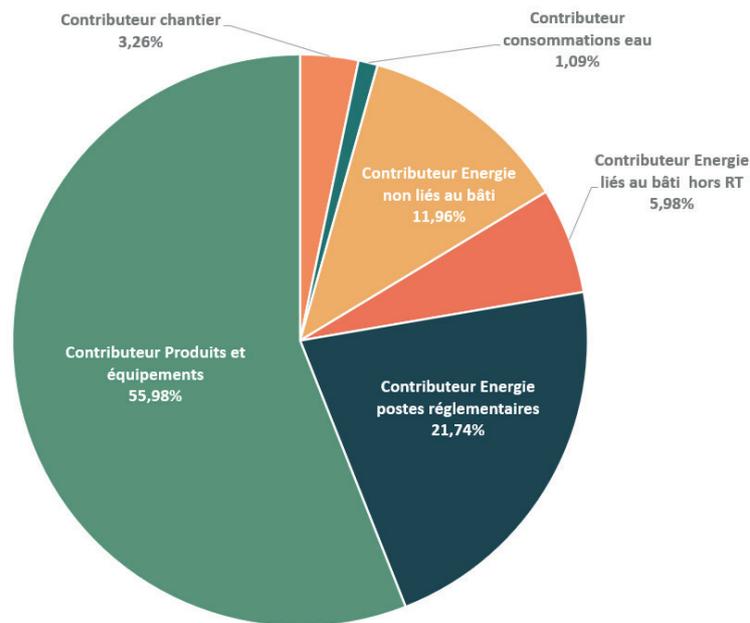


Figure 8 : HQE Performance - Résultats de l’analyse statistique, Indicateur : changement climatique [kg éq. CO₂/m²SHON/an] (médianes - DVP = 50 ans) pour 115 bâtiments de différentes typologies [34]

Le retour d’expérience HQE Performance montre en Figure 8 que le contributeur « Produits et équipements », (défini également en détail en annexes du référentiel E+C- [35]) est prépondérant par rapport aux autres contributeurs pour l’indicateur changement climatique. Diminuer les GES de la construction induit donc de réduire les émissions dues à la fabrication des matériaux de construction. Parmi ces matériaux, certaines familles sont plus impactantes que d’autres. Ainsi, agir sur certains éléments de second œuvre recyclés ou réemployés pourra s’avérer anecdotique à l’échelle du bâtiment. Par contre, la Figure 9 met en exergue le poids des éléments du gros œuvre (fondations et superstructures) puisqu’ils représentent plus de la moitié de l’énergie grise des bâtiments. Cette répartition justifie le focus de notre travail sur les éléments porteurs dans la construction, également expliqué par Hopkinson et al. [8].

¹ Communiqué du groupe diogen de l’AFGC, disponibles en ligne : <https://www.afgc.asso.fr/app/uploads/2020/04/DIOGEN.pdf>, consulté le 06/05/2020.

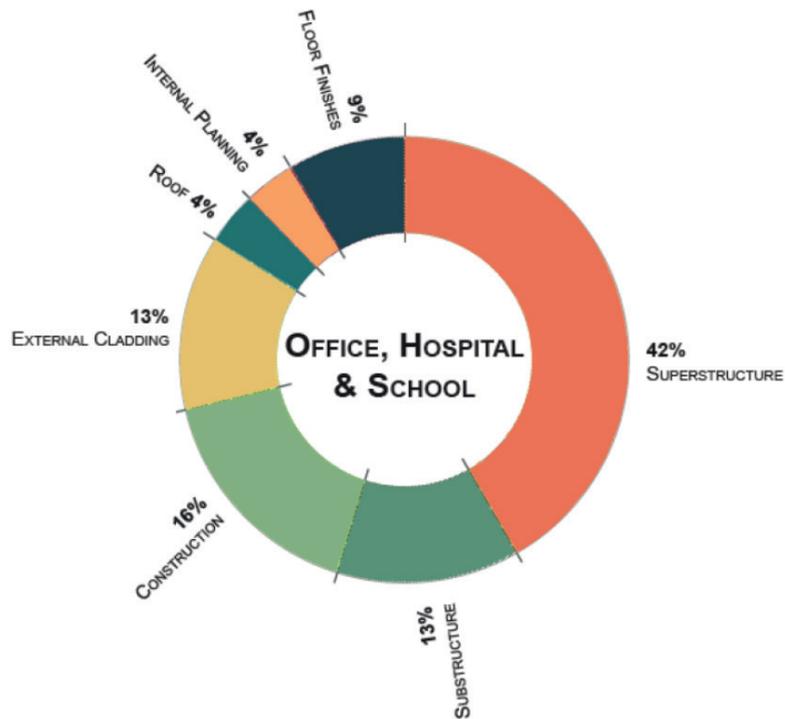


Figure 9 : Average breakdown in building elements of EE, Qarout, L. [36], Kaethner, S.C.e t al. [37].

Parmi les éléments du gros œuvre quelques retours d'expérience nous permettent d'analyser la part de carbone gris (*embodied carbon* : EC) de chaque type de porteurs, en Figure 10 : pour différents programmes de petites hauteurs, et en Figure 11 : pour des bureaux IGH (Immeuble de Grande Hauteur). Cependant certains paramètres comme la grande hauteur ou le système porteur (voiles ou poteaux) influencent considérablement les tendances, comme le confirment Lankhorst et al. [38] , ce qui nous empêche de donner des ordres de grandeurs généraux. Au sein d'une même famille de catégorie de projets (programme, hauteur, système porteur identiques), il est également possible de trouver des écarts importants selon les matériaux choisis. Chaque projet devra donc faire l'objet d'une analyse particulière.

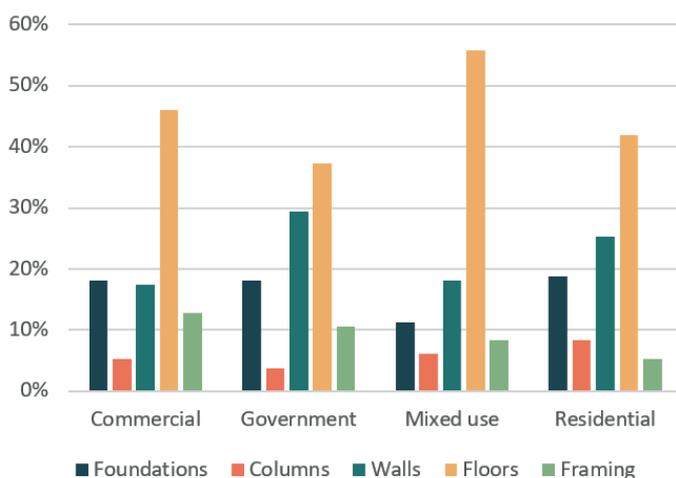


Figure 10 : Part d'EC des éléments porteurs dans des projets de différents programmes selon l'étude de Post [6]

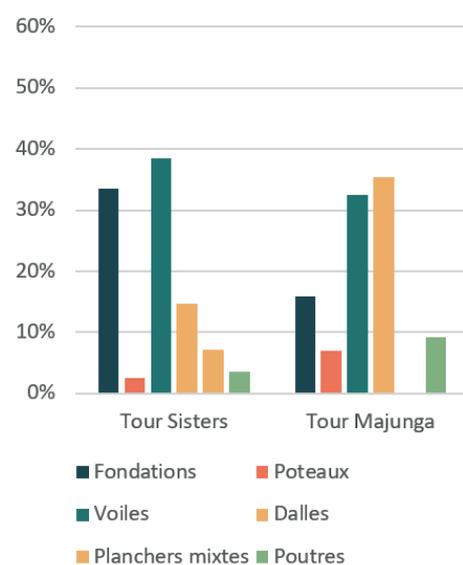


Figure 11 : Part d'EC des éléments porteurs dans des projets de bureaux IGH, projets setec.

3. *Changement de paradigme*

L'industrie de la construction doit s'accorder avec les problématiques de développement durable. Nous devons être conscients de la matière que nous utilisons aujourd'hui et qui sera laissée aux générations futures.

La problématique de ce travail est donc : comment anticiper la mise en œuvre du réemploi des éléments structuraux pour diminuer significativement l'impact environnemental de la construction ?

La démontabilité et la déconstruction vont devenir des enjeux cruciaux à plus ou moins court terme. A travers la proposition de réemploi, il s'agit d'intégrer la possibilité de démonter les ouvrages, à la fois pour en permettre l'adaptabilité et prolonger leur durée de vie, mais aussi faciliter leur futur démantèlement afin de récupérer les matériaux et les réutiliser dans de nouveaux projets. Le cycle de conception s'en trouve inversé puisque l'on part de l'état de fin de vie d'un bâtiment pour mieux déterminer les hypothèses de projets. La mise en place d'assemblages réversibles, qui n'abîment pas la matière ni ses caractéristiques, doit être anticipée dès aujourd'hui. La traçabilité des caractéristiques des éléments doit devenir pérenne pour pallier les problèmes de responsabilités des constructeurs et permettre de maîtriser les aspects réglementaires et surtout assurantiels d'une remise en œuvre.

Evoquons enfin les incitations politiques européennes et françaises existantes qui devraient accélérer ce changement de paradigme dans nos pratiques parmi lesquelles :

- La LTECV (loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte) [39] vise à valoriser 70% des déchets du BTP d'ici 2020 et établit la « hiérarchie des modes de traitement des déchets » soit prévention, réutilisation, recyclage, valorisation (énergétique, par exemple) et élimination ;
- La SNBC (Stratégie Nationale Bas-Carbone) [40] vise, dans le secteur du bâtiment, une baisse de près de 54% des émissions en 2028, notamment par la mise en œuvre de l'éco-conception. Le Gouvernement s'est engagé, via le Plan climat, sur la neutralité carbone en 2050 ;
- La FREC (Feuille de Route pour l'Economie Circulaire) dans sa feuille de route pour développer une économie 100% circulaire, le gouvernement a fixé l'objectif de faire du parc des bâtiments, la banque de matériaux pour les constructions futures grâce, entre autres, à la mise en place d'une plateforme numérique de sourcing ;
- La Loi Elan [41] prévoit de faire des bâtiments neufs des « puits de carbone », de favoriser la réversibilité des bureaux en logements avec les Immeubles de moyenne hauteur (IMH) ;
- Le permis d'expérimenter [42] apparaît dans un décret publié en mars 2018 pour faciliter et favoriser l'innovation, notamment pour les matériaux de réemploi ;
- La Loi économie circulaire [43] prévoit notamment la probable obligation d'un diagnostic ressource (décret en attente à cette heure) pour anticiper le réemploi lors d'une déconstruction, ou d'une réhabilitation, mais aussi une exemplarité de la commande publique envers le réemploi ;
- La Loi énergie climat [44] fixe l'objectif de neutralité carbone en 2050 de la SNBC, la lutte contre la consommation d'énergie fossile, la lutte contre les passoires thermiques, avec des conséquences sur l'écoconception.

Pour répondre à la problématique, notre travail s'articulera autour de six chapitres. Dans le chapitre 0 : « Responsabilités liées au réemploi », nous revenons à la fois sur les responsabilités de chaque professionnel de la construction pour atteindre les objectifs environnementaux mais également sur les responsabilités induites par la nécessaire sûreté des constructions. Ce chapitre expose les contextes : législatif et réglementaire, puis normatif et assurantiel. Dans le chapitre 1 : « Etat de l'art et limites actuelles » nous exposons l'histoire du réemploi, puis analysons les pratiques existantes, les différents concepts de design, l'enjeu de la traçabilité, et l'évaluation environnementale. Avec le chapitre 2 : « Concevoir pour déconstruire » différentes pistes pour constituer le futur stock d'éléments porteurs réemployables sont approfondies : IGH, trame universelle, élément réversible, encastrement démontable. Le chapitre 3 : « Traçabilité de la donnée et environnement BIM » nous permet de définir le cadre méthodologique pour la mise en place d'une traçabilité des éléments de construction à long terme : modalités d'échanges de données, traçabilité, BIM, instrumentation, diagnostic ressource, gestion et optimisation de stocks d'éléments. Dans le chapitre 4 : « Comportement structural du réemploi, partie expérimentale », nous étudions le comportement de portiques en béton armé mettant en œuvre un encastrement démontable, en confrontant théorie et essais. Enfin dans le chapitre 5 : « Analyse environnementale du réemploi » nous revenons sur la problématique du réemploi dans l'ACV, puis décrivons la démarche d'ACV réalisée pour les portiques testés et ses résultats, pour ensuite extrapoler à l'échelle d'un bâtiment, et aboutir à un indice de circularité/réemployabilité.

Chapitre 0

Responsabilités liées au réemploi

Le réemploi est une notion relativement récente qui est de plus en plus nommée dans les textes de loi. C'est également une pratique que l'on rencontre régulièrement dans le domaine de la construction. Ce chapitre va permettre, dans une première partie de mieux appréhender les notions législatives et réglementaires qui font mention du réemploi. Nous verrons qu'un contexte législatif important s'appuie, entre autres, sur les pratiques du réemploi pour atteindre les objectifs de réductions des impacts environnementaux. Les acteurs de la construction sont soumis à l'atteinte de ces objectifs auxquels le réemploi peut contribuer significativement, comme nous le verrons par la suite. Dans une deuxième partie, ce chapitre explicitera le contexte normatif et assurantiel qui touche directement les concepteurs et les constructeurs en termes de responsabilités engendrées par cette pratique novatrice. Certains freins au réemploi sont identifiés et les parties prenantes d'un projet doivent prendre les dispositions nécessaires pour mener à bien ces processus parfois encore expérimentaux.

0.1. Contexte législatif et réglementaire

0.1.1. Rappel de notions législatives

0.1.1.1. Généralités

En France, la construction de bâtiments implique des règles de construction issues du code de la construction et de l'habitation (CCH) notamment dans le titre 1 du livre 1 du CCH [45]. Les règles de construction sont d'application obligatoire pour garantir un niveau minimal de sécurité aux bâtiments, mais aussi en termes de performances thermique et acoustique, d'accessibilité et d'hygiène ou encore pour prévenir les pathologies et les désordres. Chacun des acteurs de la construction, de la commande à la réalisation d'un bâtiment, en passant par sa conception, est concerné et responsable de la qualité de la construction. Les principaux professionnels visés sont :

- Le maître d'ouvrage (MOA), personne pour laquelle le bâtiment est construit ;
- Le maître d'œuvre (MOE), concevant le bâtiment ;
- L'industriel, fabriquant les produits de construction ;
- Le/les entrepreneur(s), réalisant les travaux ;
- Le contrôleur technique, vérifiant certaines dispositions ;
- L'assureur, proposant une protection adaptée.

Il y a lieu de distinguer les textes législatifs et réglementaires qui sont applicables à tous et les règles techniques dont l'application n'est imposée que dans certains cas.

0.1.1.2. Les textes législatifs et réglementaires applicables à tous

Les lois et leurs textes d'application, décrets et arrêtés, et les textes réglementaires locaux, définissent des règles obligatoires pour tous. Les services de l'État les élaborent après avoir consulté les représentants des secteurs économiques concernés. Les lois sont votées par le Parlement. Les décrets et les arrêtés élaborés par l'administration sont des règlements

destinés à assurer l'exécution d'une loi. Les circulaires sont des textes informatifs qui commentent, précisent une loi et un règlement. Le code de la construction et de l'habitation (CCH) intègre la réglementation technique : acoustique, accessibilité, thermique, sismique, incendie, etc. Cependant, certaines dispositions réglementaires du bâtiment sont dans d'autres codes ou ne sont intégrées dans aucun code. Par exemple : les règles relatives à la sécurité des locaux professionnels sont dans le code du travail.

Le droit français est organisé selon une hiérarchie des textes qui, normalement, doivent coïncider : une loi doit ainsi respecter les principes de la constitution. Le droit français doit également respecter les textes imposés au niveau international. La Figure 0. 1 : reprend le principe de la hiérarchie à laquelle nous sommes soumis en France.

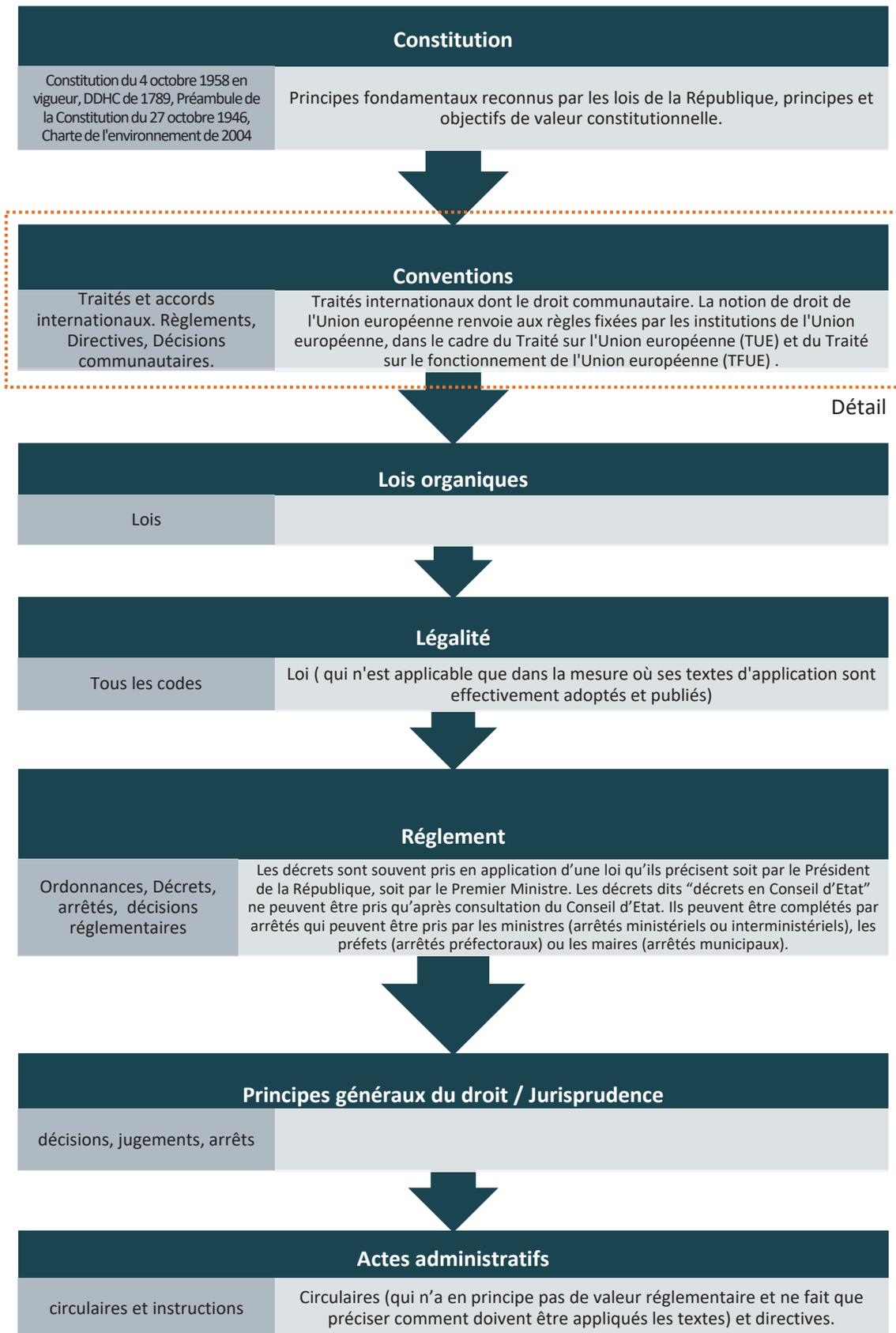


Figure 0. 1 : Hiérarchie du droit français, d'après Légifrance.

Dans le contexte actuel, beaucoup de nos textes législatifs sont en fait issus de décisions prises au niveau de l'Union Européenne qui nous les impose. Aujourd'hui les différents textes européens introduisant des obligations dans le domaine de la construction sont rappelés en Figure 0. 2.

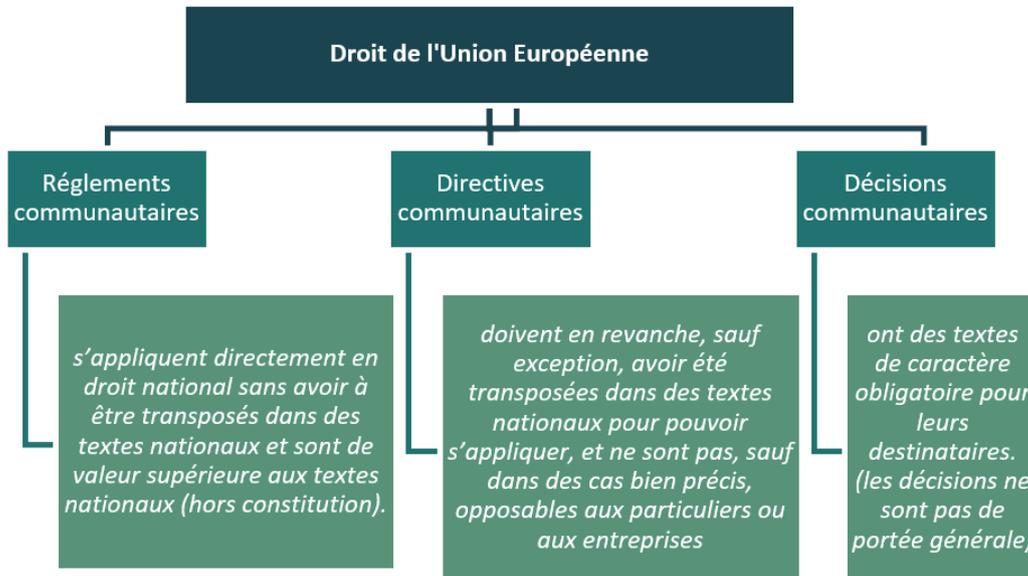


Figure 0. 2 : Détail : Règles européennes s'imposant à l'état français, d'après Légifrance.

Le sujet du réemploi, encore naissant, apparaît de plus en plus dans les textes de loi français. Cependant un manque de précisions dans leur application n'encourage toujours pas le recours à cette démarche.

0.1.1.3. Les règles techniques non obligatoires, mais imposées dans certains cas

De nombreuses normes ne sont pas d'application obligatoire du point de vue législatif, mais sont imposées par les contrats et marchés prévus par la maîtrise d'ouvrage. Le respect des normes facilite également l'assurabilité d'un ouvrage, que l'on approfondira en partie 0.2. de ce chapitre :

- Les normes françaises sont élaborées et diffusées par l'Association Française de Normalisation (A.F.N.O.R.) : <http://www.afnor.org/>;
- Les documents techniques unifiés (D.T.U.) sont élaborés et diffusés sous l'égide du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (C.S.T.B.): <http://www.cstb.fr/>;
- Les normes de conception des ouvrages sont rassemblées dans les Eurocodes ;
- Les avis techniques sont délivrés exclusivement par le C.S.T.B. et fournissent uniquement l'avis d'une commission d'experts sur un procédé ou des matériaux nouveaux ;
- Les règles et recommandations professionnelles sont des documents techniques élaborés par les professionnels eux-mêmes, en l'absence d'autres textes, pour déterminer les modalités d'exécution de travaux.

Cependant 1% des normes, soit 336 textes à fin avril 2018 sont obligatoires car indispensables à l'application de la réglementation (1.0.1.1.2), comme les règles parasismiques par exemple (NF P06-014).

0.1.1.4. Les produits de construction réglementés

Un produit de construction est défini comme un élément issu du milieu naturel ou manufacturé, transformé ou non, en vue de son utilisation comme un élément de construction (par exemple : béton, menuiseries, chaudière, etc.). Le choix d'un produit de construction doit respecter l'usage pour lequel il est prévu, en adéquation avec la destination du bâtiment. Au niveau européen, l'aptitude à l'usage des produits de construction est évaluée dans le cadre de la Directive 89-106 du Conseil du 21 décembre 1988 dite « Directive Produits de Construction », ou DPC et se traduit par le marquage CE réglementaire des produits. Cette Directive a été abrogée en 2011 par le Règlement Produits Construction ou RPC (305/2011/CE). L'indication « CE » est donc un marquage réglementaire permettant la mise sur le marché et la libre circulation dans tout l'espace économique européen des produits qui y sont soumis. Ce n'est pas une marque de qualité. Il indique que les produits permettent de réaliser des ouvrages respectant les exigences essentielles de la directive traitant notamment des questions de sécurité, de santé publique et de protection des consommateurs. Le marquage CE ne dispense pas de vérifier la compatibilité entre les caractéristiques techniques du produit et son aptitude à l'usage prévu, ainsi qu'aux règles de mise en œuvre. Si un nouveau produit ne possède pas ce marquage ou si le produit n'est couvert par aucune norme harmonisée², un processus d'évaluation technique doit être mis en place.

Dans le cadre d'un matériau de réemploi, la Commission Européenne ne s'est pas encore positionnée. Après avoir pris contact auprès de la Commission Européenne, la réponse suivante a été obtenue : « Le Règlement européen ne fait pas mention des produits de réemploi. [...] le fait que ce règlement ne spécifie pas si les produits de réemploi doivent avoir le marquage CE, n'exempte pas ceux-ci de l'être. ». Plusieurs points de vue s'opposent : d'un côté, dès qu'il y a une mise sur le marché d'un produit/cession de produit à titre gracieux ou onéreux, le RPC est applicable ; d'un autre côté, s'il s'agit d'un produit d'occasion ayant déjà été mis sur le marché européen une première fois, il n'y a pas nécessité de porter le marquage CE. Il faut également souligner que tout produit modifié perd son marquage CE. Cependant si les constructeurs souhaitent rester dans le cadre des DTU (Documents Techniques Unifiés) ou des Eurocodes, le marquage CE est nécessaire. Sinon les constructeurs sont dans le cas où les DTU ne sont plus appliqués et sortent donc des techniques courantes reconnues par les assureurs. La démarche d'assurance doit alors être revue avec les contrôleurs techniques et les assureurs entraînant des surcoûts probables.

0.1.2. Définitions législatives des termes

0.1.2.1. Historique de l'apparition du terme réemploi

Le réemploi est juridiquement plutôt issu du droit sur la prévention et la réduction des déchets, que l'on pourrait assimiler à une stratégie descendante (on traite alors la fin de chaîne), et non de façon ascendante à partir du droit de l'économie circulaire (où on traiterai le début de chaîne également).

² Pour identifier l'existence ou non d'une norme européenne harmonisée : <http://www.rpcnet.fr/> rubrique « produit » sur la page d'accueil.

Dès la promulgation de la loi du 15 juillet 1975, le déchet est défini comme : « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon ». Deux possibilités sont définies en dehors de l'abandon : l'élimination (stockage, compostage, incinération) ou la valorisation (recyclage, réutilisation/réemploi, ou valorisation énergétique par incinération avec récupération d'énergie). Cette notion est reprise ensuite dans la loi du 13 juillet 1992, dite loi « Royal » où il est question de « valoriser les déchets par réemploi, recyclage ou toute autre action visant à obtenir des déchets, des matériaux réutilisables, ou de l'énergie. » C'est la première utilisation législative du terme et concept du réemploi, qui est cité en premier dans l'énumération des types de valorisations.

0.1.2.2. Code de l'environnement

Le réemploi est défini, en droit, par la directive européenne 2008/98/CE, du Parlement européen et du Conseil de l'Union européenne du 19 novembre 2008, relative aux déchets, transposée en droit français traduite par l'ordonnance 2010-1579 du 17 décembre 2010, en son article 2 et reprise par l'article L 541-1-1 du code de l'environnement, il doit donc être distingué des concepts voisins, définis par les mêmes textes :

- 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. Les opérations de valorisation énergétique des déchets, celles relatives à la conversion des déchets en combustible et les opérations de remblaiement ne peuvent pas être qualifiées d'opérations de recyclage ;
- Valorisation : toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles en substitution à d'autres substances, matières ou produits qui auraient été utilisés à une fin particulière, ou que des déchets soient préparés pour être utilisés à cette fin, y compris par le producteur de déchets.

0.1.2.3. Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte dite LTECV, 2015 [39]

Cette loi a modifié en titre IV, l'article L 110-1-1 qui définit ainsi : « La transition vers une économie circulaire vise à dépasser le modèle économique linéaire consistant à extraire, fabriquer, consommer et jeter en appelant à une consommation sobre et responsable des ressources naturelles et des matières premières primaires ainsi que, par ordre de priorité, à la prévention de la production de déchets, **notamment par le réemploi des produits**, et, **suivant la hiérarchie** des modes de traitement des déchets, à une réutilisation, à un recyclage ou, à défaut, à une valorisation des déchets. » On note avec cette précision de 2015 que le réemploi n'intervient plus une fois que le déchet est généré, mais bien avant de produire le déchet, en cohérence avec les définitions de 2010.

0.1.2.4. Précisions sur le statut des matériaux : du déchet au produit

D'après l'article L 541-1-1 du code de l'environnement la définition du déchet est la suivante :

- 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 défaire.

L'Ordonnance n°2010-1579 du 17 décembre 2010 - art. 4 a précisé : « Une substance ou un objet issu d'un processus de production dont le but premier n'est pas la production de cette substance ou cet objet ne peut être considéré comme un sous-produit et non comme un déchet au sens de l'article L. 541-1-1 que si l'ensemble des conditions suivantes est rempli :

- L'utilisation ultérieure de la substance ou de l'objet est certaine ;
- La substance ou l'objet peut être utilisé directement sans traitement supplémentaire autre que les pratiques industrielles courantes ;
- La substance ou l'objet est produit en faisant partie intégrante d'un processus de production ;
- La substance ou l'objet répond à toutes les prescriptions relatives aux produits, à l'environnement et à la protection de la santé prévues pour l'utilisation ultérieure ;
- La substance ou l'objet n'aura pas d'incidences globales nocives pour l'environnement ou la santé humaine.

Les opérations de traitement de déchets ne constituent pas un processus de production au sens du présent article. » Ainsi conformément aux définitions précédentes, le réemploi est totalement détaché du statut de déchets.

0.1.2.5. Quitter le statut de déchet

Néanmoins si l'on cherche à réemployer des matériaux qui auraient été déposés et envoyés dans une installation de traitement des déchets, il faudra d'abord sortir ces matériaux de leur statut de déchet. Cette notion fait référence à l'Article L541-4-3 créé par Ordonnance n°2010-1579 du 17 décembre 2010 - art. 4. « Un déchet cesse d'être un déchet après avoir été traité dans une installation visée à l'article L. 214-1 soumise à autorisation ou à déclaration ou dans une installation visée à l'article L. 511-1 soumise à autorisation, à enregistrement ou à déclaration et avoir subi une opération de valorisation, notamment de recyclage ou de préparation en vue de la réutilisation, s'il répond à des critères remplissant l'ensemble des conditions suivantes :

- La substance ou l'objet est couramment utilisé à des fins spécifiques ;
- Il existe une demande pour une telle substance ou objet ou elle répond à un marché ;
- La substance ou l'objet remplit les exigences techniques aux fins spécifiques et respecte la législation et les normes applicables aux produits ;
- Son utilisation n'aura pas d'effets globaux nocifs pour l'environnement ou la santé humaine. »

Les décrets pris en application de cette ordonnance forment les articles D 541-12-4 à D 541-12-14 du code de l'environnement.

On veillera particulièrement à n'étudier la sortie du statut de déchets que pour les déchets suivants :

- Déchet non dangereux : tout déchet qui ne présente aucune des propriétés qui rendent un déchet dangereux ;
- Déchet inerte : tout déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante, qui ne se décompose pas, ne brûle pas, ne produit aucune réaction physique ou chimique, n'est pas biodégradable et ne détériore pas les matières avec lesquelles il entre en contact d'une manière susceptible d'entraîner des atteintes à l'environnement ou à la santé humaine.

Ce qui représente tout de même 97% des déchets du BTP, Benoît et al. [46] soit 221 millions de tonnes. Dans ce travail, on s'attachera à anticiper le réemploi afin que les matériaux ne soient jamais associés à un statut de déchets. Il faut rappeler que la législation relative aux déchets est très contraignante et l'on renvoie aux articles L. 541-7-1, L 541-9, L 541-10, L 541-2 du code de l'environnement, pour les responsabilités induites, ainsi qu'aux discussions en cours concernant la responsabilité élargie au producteur (REP) pour l'obligation de reprise des déchets par les distributeurs. Tout matériau contenant une substance dangereuse (e.g. amiante) est formellement écarté d'un réemploi.

0.1.3. Objectifs relatifs au réemploi fixés par la loi

0.1.3.1. Le Code de l'environnement

L'article L 541-1 du Code de l'environnement opère le rappel des objectifs de la directive européenne 2008/98/CE ; il s'agit notamment de :

- 3° Développer le réemploi et augmenter la quantité de déchets faisant l'objet de préparation à la réutilisation, notamment des équipements électriques et électroniques, des textiles et des éléments d'ameublement. Les cahiers des charges des filières à responsabilité élargie des producteurs définissent des objectifs en ce sens adaptés à chaque filière ;
- 6° Valoriser sous forme de matière 70 % des déchets du secteur du bâtiment et des travaux publics en 2020 ;

Cet article impose donc à tous les acteurs du monde économique d'avoir pour objectifs les réalisations énumérées au titre II de cet article :

1. En priorité, de prévenir et de réduire la production et la nocivité des déchets, notamment en agissant sur la conception, la fabrication et la distribution des substances et produits et en favorisant le réemploi, ainsi que de diminuer les incidences globales de l'utilisation des ressources et d'améliorer l'efficacité de leur utilisation ;
2. De mettre en œuvre une hiérarchie des modes de traitement des déchets consistant à privilégier, dans l'ordre :
 - La préparation en vue de la réutilisation ;
 - Le recyclage ;
 - Toute autre valorisation, notamment la valorisation énergétique ;
 - L'élimination.
3. D'assurer que la gestion des déchets se fait sans mettre en danger la santé humaine et sans nuire à l'environnement, notamment sans créer de risque pour l'eau, l'air, le sol, la faune ou la flore, sans provoquer de nuisances sonores ou

olfactives et sans porter atteinte aux paysages et aux sites présentant un intérêt particulier ;

4. D'organiser le transport des déchets et de le limiter en distance et en volume selon un principe de proximité ;
5. D'assurer l'information du public sur les effets pour l'environnement et la santé publique des opérations de production et de gestion des déchets, sous réserve des règles de confidentialité prévues par la loi, ainsi que sur les mesures destinées à en prévenir ou à en compenser les effets préjudiciables ;
6. D'assurer, notamment par le biais de la planification relative aux déchets, le respect du principe d'autosuffisance ;
7. De contribuer à la transition vers une économie circulaire ;
8. D'économiser les ressources épuisables et d'améliorer l'efficacité de l'utilisation des ressources.

Certaines de ces dispositions impliquent la notion de réemploi au sens large et non pas précisément au domaine de la construction. Néanmoins ce qui est valable à l'échelle de l'objet peut être adapté à l'échelle du bâtiment. La loi impose ainsi l'objectif de la transition vers une économie circulaire, et la priorité d'une prévention de la production des déchets, qui passe d'abord par le réemploi des produits, mesure citée en premier dans la hiérarchie : réutilisation, recyclage, valorisation.

0.1.3.2. LTECV : Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte

C'est cette loi qui a précisé les objectifs pour une la mise en place d'une économie circulaire, en encourageant notamment la généralisation du réemploi dans différents secteurs. Concernant le domaine de la construction la LTECV vise à valoriser 70% des déchets du BTP d'ici 2020 et appelle « par ordre de priorité, à la prévention de la production de déchets, notamment par le réemploi des produits, et, suivant la hiérarchie des modes de traitement des déchets, à une réutilisation, à un recyclage ou, à défaut, à une valorisation des déchets », l'élimination par stockage en décharge n'étant pas évoquée.

0.1.3.3. Le Permis d'expérimenter de la loi ESSOC : Etat au service d'une société de confiance, dite aussi loi confiance

Ce texte est davantage tourné vers l'innovation, mais touche pleinement le sujet du réemploi qui pourrait ainsi être facilité grâce à l'article 49 de la loi n° 2018-727 du 10 août 2018 [47]:

« II. - Dans les conditions prévues à l'article 38 de la Constitution, le Gouvernement est autorisé à prendre par ordonnance, dans un délai de dix-huit mois à compter de la promulgation de la présente loi, toute mesure relevant du domaine de la loi visant à faciliter la réalisation de projets de construction :

1. En prévoyant la possibilité de plein droit pour le maître d'ouvrage de bâtiments de satisfaire à ses obligations en matière de construction s'il fait application de normes de référence ou s'il apporte la preuve qu'il parvient, par les moyens qu'il entend mettre en œuvre, à des résultats équivalents à ceux découlant de l'application des normes de référence et en fixant les modalités selon lesquelles cette preuve est apportée avant le dépôt de la demande d'autorisation d'urbanisme et celles selon lesquelles les résultats atteints sont contrôlés après l'achèvement du bâtiment ;

2. En adoptant une rédaction des règles de construction applicables propre à éclairer, notamment par l'identification des objectifs poursuivis, le maître d'ouvrage sur les obligations qui lui incombent et qu'il respecte selon l'une des modalités prévues au 1° du présent II. »

Si le réemploi peut être mis en œuvre dans le cadre de cet article, il pourrait donc déboucher sur la rédaction de nouvelles règles de construction en sa faveur. La réécriture du code de la construction et de l'habitation (CCH) en objectifs de résultats pourrait également bénéficier aux matériaux de réemploi.

Le décret n° 2019-184 du 11 mars 2019 relatif aux conditions d'application de l'ordonnance n° 2018-937 du 30 octobre 2018 visant à faciliter la réalisation de projets de construction et à favoriser l'innovation a précisé les modalités d'application du « permis d'expérimenter » disponibles en ligne³. Les étapes à suivre sont les suivantes :

1. Le maître d'ouvrage trouve un organisme indépendant qui lui délivrera l'attestation
2. Le maître d'ouvrage fournit son dossier de demande à l'organisme indépendant
3. L'organisme indépendant analyse le dossier, et s'il valide la solution, il produit l'attestation d'effet équivalent grâce au site démarches-simplifiées.fr et la fournit au maître d'ouvrage
4. Le maître d'ouvrage joint l'attestation à sa demande d'autorisation d'urbanisme
5. Le maître d'ouvrage trouve un contrôleur technique, si son opération n'en requiert pas déjà un ou s'il souhaite avoir un contrôleur spécifique à cette mission
6. Le contrôleur technique vérifie que la mise en œuvre de la solution est conforme aux règles énoncées dans le dossier de demande d'attestation, validées et rappelées par l'attestation. Il délivre à la fin des travaux une attestation (Attestation d'effet équivalent, AEE) de bonne mise en œuvre de la SEE (solution d'effet équivalent).

Via l'appel à manifestation d'intérêt « Permis d'expérimenter » lancé le 14 mars 2019, l'Etat s'engage à accompagner les maîtres d'ouvrage souhaitant s'insérer dans cette démarche selon trois volets : appui technique ; soutien financier (pour l'ingénierie établissant la solution d'effet équivalent, mais aussi pour l'organisme délivrant l'attestation) ; promotion.

0.1.3.4. Décret n° 2015-1491 du 18 novembre 2015 relatif aux budgets carbone nationaux et à la stratégie nationale bas-carbone

La Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC) a été instituée par la LTECV, mettant en œuvre la transition vers une économie bas-carbone. Elle a pour but d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 et de réduire l'empreinte carbone de la consommation des Français. La neutralité carbone signifie de compenser les émissions par les absorptions (puits de GES). Pour cela, il faudra drastiquement réduire les émissions de GES de la France, d'après les Figure 0. 3 et Figure 0. 4 . Dans le secteur du bâtiment, la SNBC vise une baisse par rapport à 2015 de près de 56% des émissions de GES d'ici 2033 et 97% en 2050, notamment par la mise en œuvre de l'éco-conception [48].

³ <https://www.cohesion-territoires.gouv.fr/permis-d-exp-erimenter-faciliter-la-realisation-des-projets-de-construction-et-favoriser-l-innovation>, consulté le 02/04/2020.

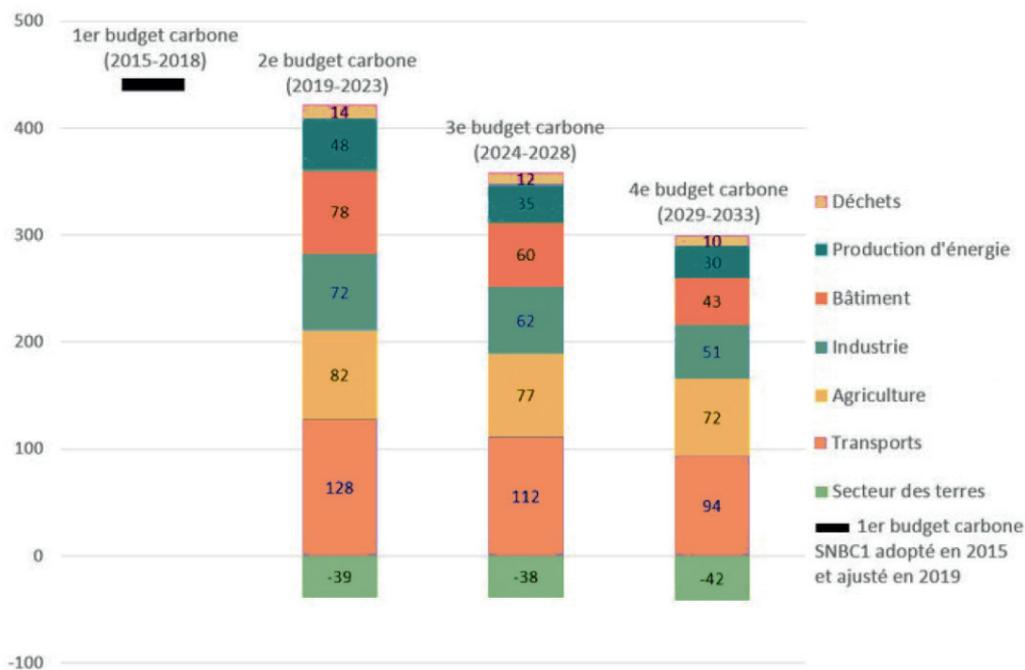


Figure 0. 3 : Budgets carbone 2019-2023, 2024-2028 et 2029-2033 par secteur

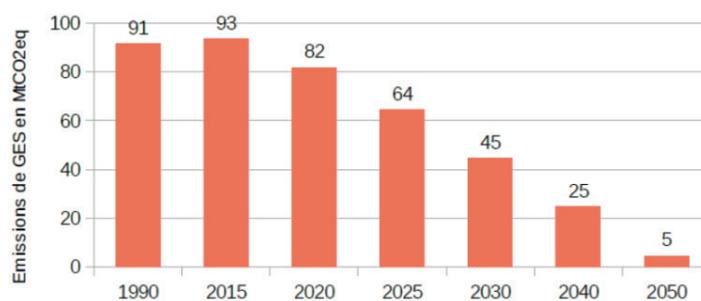


Figure 0. 4 : Emissions du secteur bâtiments, scénario de la SNBC

Le réemploi puisqu'il vise, à terme, la préservation des ressources en mettant fin à l'extraction de matières premières et à la fabrication de matériaux de construction, contribue fortement à faire baisser les émissions de GES dues à ces activités.

0.1.3.5. Loi ELAN n° 2018-1021 du 23 novembre 2018 portant évolution du logement, de l'aménagement et du numérique

Il est question de faciliter la transformation de bureaux en logements dans le titre 1 « Construire plus, mieux et moins cher ». Il est ainsi proposé pour renforcer l'attractivité de la transformation de bureaux en logements, de prévoir un « bonus de constructibilité », c'est-à-dire une surface constructible supplémentaire, dans la limite d'une majoration de 30 % du gabarit de l'immeuble existant. L'article 30 instaure la notion d'immeubles de moyenne hauteur (IMH) précisée dans le décret n° 2019-461 du 16 mai 2019, qui indique qu'est considéré comme immeuble de moyenne hauteur, tout immeuble à usage d'habitation compris entre 28 et 50 mètres de haut et ayant pour but d'harmoniser les règles de sécurité entre les bureaux et les logements de cette catégorie.

Cette flexibilité programmatique, encouragée politiquement, doit être intégrée dans une démarche de conception en vue du réemploi. La structure devra, en effet, permettre une adaptation ou s'adapter à de nouvelles contraintes programmatiques et donc spatiales.

Cette loi évoque également la limitation de l'empreinte carbone par le stockage du carbone de l'atmosphère durant la vie du bâtiment. Les bâtiments neufs devront donc être pensés sur l'ensemble de leur cycle de vie et devenir des « puits de carbone ».

0.1.3.6. Loi énergie-climat n° 2019-1147 du 8 novembre 2019

Cette loi continue d'inscrire l'objectif de neutralité carbone en 2050 pour répondre à l'urgence climatique et à l'Accord de Paris. Elle évoque la SNBC et les modalités d'ajustement des futurs budgets carbone. Elle mentionne aussi la sortie progressive des énergies fossiles et le développement des énergies renouvelables, la lutte contre les passoires thermiques, avec des conséquences sur l'écoconception. On rappelle que les objectifs de la SNBC pour les baisses des GES dues au bâtiment ne semblent atteignables qu'avec un recours massif au réemploi de matériaux.

0.1.3.7. Loi n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire instaurant le diagnostic ressource

Avant 2020, la nécessité d'un diagnostic déchets pour les bâtiments de plus de 1000m² au sol était imposée par le décret n° 2011-610 du 31 mai 2011 portant sur la gestion des déchets issus de la démolition de catégories de bâtiment, mais en pratique il n'est que trop peu appliqué. En effet, ce décret a créé les articles R111-43 à R111-49 du code de la construction et de l'habitation, partie réglementaire, qui posent les obligations, mais ne prévoient pas de sanctions pour non-respect. Ce diagnostic fournit la nature, la quantité et la localisation dans l'emprise de l'opération de démolition :

- des matériaux, produits de construction et équipements constitutifs des bâtiments ;
- des déchets résiduels issus de l'usage et de l'occupation des bâtiments ;
- les indications sur les possibilités de réemploi sur le site de l'opération ;
- l'estimation de la nature et de la quantité des matériaux qui peuvent être réemployés sur le site ;
- à défaut de réemploi sur le site, les indications sur les filières de gestion des déchets issus de la démolition ;
- l'estimation de la nature et de la quantité des matériaux issus de la démolition destinés à être valorisés ou éliminés.

Ce diagnostic est réalisé suite à un repérage sur site. Toutes les modalités portant sur l'obligation de réaliser un tel diagnostic sont précisées dans le Décret n° 2011-610 du 31 mai 2011 relatif au diagnostic portant sur la gestion des déchets issus de la démolition de catégories de bâtiments.

Il est à noter que le Code de l'environnement ne comporte aucune disposition réglementaire en matière de sanction en cas de non-respect des principes indiqués dans les différents articles énoncés précédemment. Cependant des dispositions communes aux contrôles et aux sanctions pour l'ensemble des codes français existent que ce soit en droit administratif ou pénal. Elles ne semblent que rarement appliquées concernant le code de l'environnement et ne renforcent pas le respect des textes.

Depuis février 2020, le diagnostic ressource ou diagnostic « Produits-Matériaux-Déchets » est privilégié par la loi relative à l'économie circulaire [43] et doit en priorité fournir les informations pour un réemploi des matériaux lors de travaux de démolition : « le maître

d'ouvrage est tenu de réaliser un diagnostic relatif à la gestion des produits, matériaux et déchets issus de ces travaux. Ce diagnostic fournit les informations nécessaires relatives aux produits, matériaux et déchets en vue, en priorité, de leur réemploi [...] En cas d'impossibilité de réemploi ou de valorisation, le diagnostic précise les modalités d'élimination des déchets. » Ainsi, l'Art. L. 111-10-4. de cette loi définit un nouveau diagnostic qui fusionne le diagnostic déchets avec le diagnostic ressource. Les décrets sont en attente pour déterminer les catégories de bâtiments qui seront couverts par cette obligation, ainsi que les modalités de réalisation de ce diagnostic et les garanties de compétence des futurs diagnostiqueurs.

Auparavant, le diagnostic ressource était proposé de façon informelle par les acteurs du réemploi dans le cadre d'une démarche volontaire du MOA. Il s'agissait d'une mission non réglementaire qui avait pour but de répertorier le maximum de matériaux réemployables avant la déconstruction d'un bâtiment. Le diagnostic ressource vérifie donc les performances d'un produit de seconde vie et leur corrélation avec des domaines de réemploi possibles.

L'article L. 541-4-4 entérine définitivement la règle selon laquelle le statut de déchet n'est pas applicable au réemploi : « Dans le cadre d'un chantier de réhabilitation ou de démolition de bâtiment, si un tri des matériaux, équipements ou produits de construction est effectué par un opérateur qui a la faculté de contrôler les produits et équipements pouvant être réemployés, les produits et équipements destinés au réemploi ne prennent pas le statut de déchet. »

L'Etat, ainsi que les collectivités territoriales et leurs groupements doivent faire preuve d'exemplarité en privilégiant le réemploi dans leurs cahiers des charges.

0.1.4. Autres incitations concernant le réemploi

0.1.4.1. Taxations à venir

L'augmentation de la taxe générale sur les activités polluantes (TGAP déchets) pour la mise en décharge ou l'incinération est encouragée par les politiques actuelles. Ce genre d'incitation financière peut pousser et accélérer la mise en œuvre de matériaux de réemploi. Puisque la durée de vie de ces matériaux est fortement prolongée, le recours à la mise en décharge ou l'incinération sera considérablement diminué. Par ailleurs, on peut penser que la contribution climat énergie ou taxe carbone, sera de plus en plus répercutée sur le prix des matériaux de construction peu respectueux de l'environnement.

0.1.4.2. L'économie circulaire et économie sociale et solidaire (ESS)

Le réemploi peut parfaitement s'inscrire dans un système économique viable et fait partie intégrante de l'économie circulaire, comme le prouvent les premiers retours d'expérience exposés dans la séquence 5 du MOOC « Matières à bâtir » [49]. Il permet le développement de nouvelles filières durables puisqu'il s'appuie sur un stock considérable de matériaux qui nous entourent. Il n'est donc pas dépendant des matières premières épuisables. Les étapes de la réutilisation génèrent de la main d'œuvre, de la logistique, des savoir-faire qui permettent justement de créer des emplois locaux, généralement non délocalisables, et luttent contre le chômage de nos territoires. Ces emplois, pour la plupart créés avec les principes de l'économie sociale et solidaire (ESS) peuvent nécessiter des qualifications élevées et des compétences bien spécifiques, [50]. Le concept d'ESS désigne un ensemble d'entreprises organisées sous forme de coopératives, mutuelles, associations, ou fondations, dont le fonctionnement interne et les activités sont fondés sur un principe de solidarité et d'utilité sociale, principalement à travers le

réemploi et la réutilisation, [51]. Ces entreprises adoptent des modes de gestion démocratiques et participatifs. Elles encadrent strictement l'utilisation des bénéfices qu'elles réalisent : le profit individuel est proscrit et les résultats sont réinvestis. Leurs ressources financières sont généralement en partie publiques. Elles bénéficient ainsi d'un cadre juridique renforcé par la loi n° 2014-856 du 31 juillet 2014 relative à l'économie sociale et solidaire⁴. À la suite de la crise économique consécutive à la Covid 19, un dispositif exceptionnel de soutien de 10 millions d'euros, a été annoncé le 4 septembre 2020 par le ministère de la Transition écologique et l'Ademe, à destination des structures de réemploi et de réutilisation de l'économie sociale et solidaire (ESS) ayant besoin d'un soutien financier⁵.

Implantables partout en France, les filières de réemploi et les plateformes de matériaux de réemploi se multiplient. Les auteurs Braungart, Mc Donough [1], expriment leur définition : « Le *cradle to cradle* [...] ne cherche pas à « sauver » la planète, mais à apprendre comment y prospérer ». Ils s'appliquent à proposer un nouveau modèle de consommation fondé sur des solutions concrètes pour transformer la matière utilisée aujourd'hui en ressources pour demain. Pour les entreprises, l'économie circulaire pourrait offrir des opportunités de développement de marchés nouveaux.

0.1.4.3. Ville de Paris : PLAN ECONOMIE CIRCULAIRE 2017-2020

La Ville de Paris a établi un plan Economie Circulaire 2017-2020 et une première feuille de route en juillet 2017. Puis une seconde a été adoptée en novembre 2018⁶. Il y est question de nombreuses applications du bâtiment, à l'alimentaire, en passant par le textile. Concernant le bâtiment, l'objectif est de tendre vers la valorisation des matériaux lors d'opérations de réhabilitations lourdes et vers l'intégration du principe de la déconstruction sélective et du réemploi des matériaux, selon la Figure 0. 5. Pour cela, le plan s'appuie sur plusieurs expérimentations mettant en œuvre le réemploi de matériaux de construction de gros et second œuvre dans la programmation de la réhabilitation des sites d'Alembert (Département de Paris), Caserne de Reuilly (Paris Habitat) ou encore Les Canaux (Ville de Paris). Ces expériences pourront dès lors servir de référence pour l'intégration de telles prescriptions dans de futures opérations. Trois actions issues de ce plan visent particulièrement le réemploi de matériaux.

⁴ <https://www.economie.gouv.fr/cedef/economie-sociale-et-solidaire>, consulté le 04/04/2020.

⁵ <https://www.actu-environnement.com/ae/news/equete-ademe-soutien-ess-ressourcies-36090.php4>, consulté le 20/09/2020.

⁶ <https://cdn.paris.fr/paris/2019/07/24/58d790111b39273c144ddc19744a1b5c.pdf>, consulté le 02/04/2020.

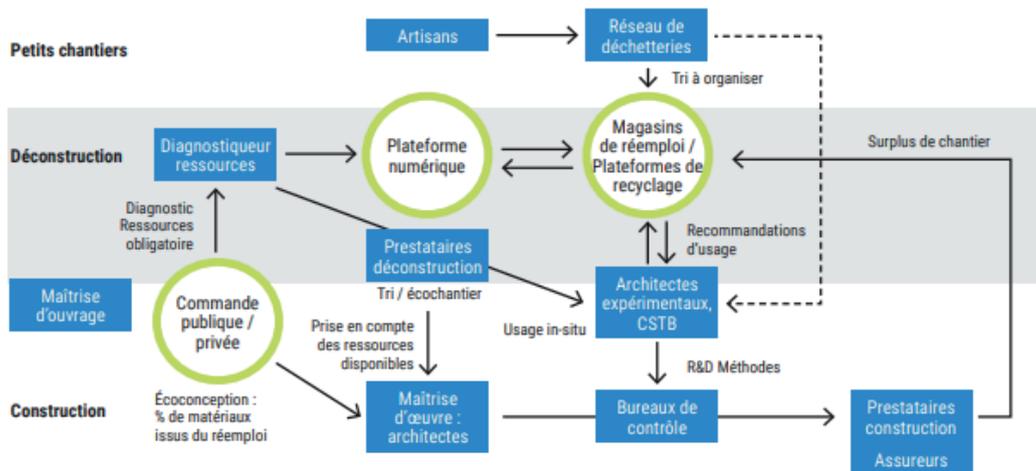


Figure 0. 5 : Action 2 du plan Economie circulaire de la Ville de Paris [52].

De nombreux obstacles réglementaires (obligation de l'homologation des matériaux et processus constructifs), matériels (difficulté à stocker les matériaux issus de la construction dans des zones denses) et financiers (surcoûts liés aux changements des pratiques notamment) s'opposent encore à l'économie circulaire. La Ville de Paris a listé un certain nombre de moyens pour inciter les acteurs, en Figure 0. 6.

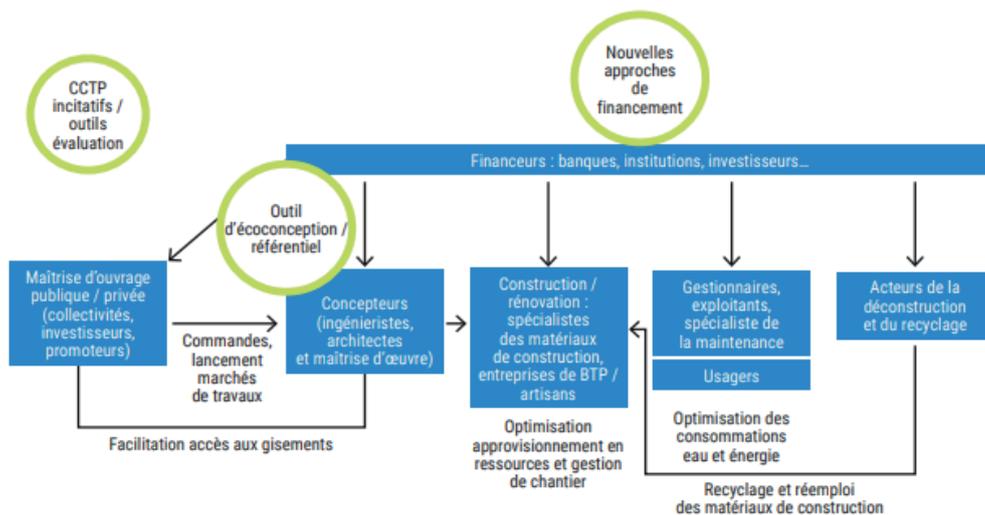


Figure 0. 6 : Action 3 du plan Economie circulaire de la Ville de Paris [52].

Un atelier central municipal du réemploi des matériaux du bâtiment a ainsi été créé en 2017 (action 6 de la 1^{ère} Feuille de route du Plan économie circulaire), et une plateforme dématérialisée interne Ville de Paris a été ouverte pour l'échange de mobilier, petits équipements, matériaux, etc. Les matériaux récupérés sont notamment remis en œuvre lors des travaux de construction, de maintenance ou de réhabilitation des 3 600 bâtiments municipaux parisiens ⁷.

⁷ <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/paris-mise-sur-le-reemploi-dans-le-batiment-45239/>, consulté le 15/12/2019.

0.1.4.4. Feuille de route du Gouvernement en faveur d'une économie 100% circulaire

Le Gouvernement a détaillé sa feuille de route en faveur de l'économie circulaire le 23 avril 2018. Plusieurs mesures concernant directement le BTP ont été annoncées : le renforcement du tri, le réemploi et la valorisation des 247 millions de tonnes de déchets que produit le secteur chaque année. « L'horizon d'une approche pleinement circulaire pour ce secteur est de faire du parc des bâtiments la banque de matériaux des constructions futures » [53], estime le Gouvernement.

Le but est de pouvoir passer à une logique de diagnostic/inventaire pour le réemploi et la valorisation des ressources et déchets de chantier. Le digital est aussi un point clé de cette mesure, puisqu'il est question de dématérialiser le dispositif et de promouvoir l'utilisation des données ouvertes « pour favoriser l'émergence d'applications numériques permettant de faire le lien entre l'offre de matériaux réutilisables et la demande », c'est-à-dire mettre en place des plateformes numériques de sourcing.

Le Ministère de la Transition écologique et solidaire vante par ailleurs l'élaboration de guides techniques « permettant la reconnaissance des performances des matériaux réutilisés et réemployés » qui se ferait avec les acteurs du secteur (maîtres d'ouvrage, contrôleurs techniques, assureurs...).

0.1.4.5. Contexte européen

Plusieurs politiques au niveau européen encouragent la mise en place d'une économie circulaire. Ainsi, en Europe, des plans d'action ont été publiés et sont en cours, tels que « Boucler la boucle - Un plan d'action de l'Union européenne en faveur de l'économie circulaire » [54] en 2015 ou le Green Deal européen en décembre 2019 [55]. En 2020, la Commission Européenne a publié un guide « Circular Economy - Principles for Buildings Design » [56], qui s'adresse aux acteurs de la construction pour les encourager à déployer les principes de durabilité, adaptabilité, démontabilité. Ce guide a pour but d'accompagner l'ensemble des parties prenantes dans la construction pour créer la chaîne de valeur dans cette transition pour une économie circulaire. Il présente des pistes constructives, notamment pour les assemblages démontables évoqués précédemment. La présidence d'Ursula von der Leyen depuis le 1^{er} décembre 2019 est tournée vers les préoccupations environnementales. Son mandat est notamment marqué par des objectifs de transition écologique [57] : l'*European Green Deal* avec un objectif de réduction de 40% des émissions d'ici 2030, et le *Circular Economy Action Plan* qui concernent, entre autres, la construction.

0.2. Contexte normatif et assurantiel

0.2.1. Des normes rendues obligatoires par les usages établis

Les normes sont souvent évoquées comme freins au réemploi. Rony Chebib, directeur général de BTP consultants (contrôle technique) fait ce bilan dans l'ouvrage « Matière grise » [30] : « Aujourd'hui 99% des normes dans le secteur de la construction ne sont pas d'application obligatoire, seules le sont les normes qui font l'objet d'un arrêté. [...] Mais comme les marchés publics (et la majorité des référentiels de certifications d'ouvrages) citent toutes ces normes

dans leur CCAG (cahier des clauses administratives générales applicables aux marchés publics), elles constituent des pièces de référence et deviennent de fait obligatoires et opposables ». Il met en exergue notamment les assureurs qui sont bridés dans leurs schémas répétitifs : « La première chose qu'un assureur continue à demander à l'issue d'un chantier, c'est de savoir si ont été utilisées des techniques non courantes, hors normes. Et en fonction de la réponse, il décide de ce qu'il va assurer ou pas. ».

On le voit donc, ce sont les règles d'usage et le système économique de consommation qui ont cerné petit à petit le système législatif au point de bloquer toute situation inédite de construction. Seules 1% des normes contribuent à l'application de la réglementation et sont obligatoires⁸.

0.2.2. Assurances et responsabilités

La loi impose un certain nombre d'obligations auxquelles les personnes ne peuvent se soustraire même par un accord privé entre elles, on parle de dispositions d'ordre public. Un certain nombre d'activités sont soumises à assurance obligatoire, pour l'essentiel : la construction, la circulation automobile, l'activité médicale, les rapports entre propriétaires et locataires, l'activité de syndicat de copropriété, ...

0.2.2.1. Fonctionnement traditionnel des assurances

Pour être assuré sans surprime il faut respecter les techniques dites « courantes » établies par la C2P (commission prévention produits) de l'AQC (Agence Qualité Construction). En dehors de ces techniques courantes, on se retrouve dans le domaine des techniques non courantes, tout à fait assurables, mais avec un surcoût non négligeable. Il est donc préférable d'identifier et de connaître les cas où le projet construit sera assurable sans surprime, et les cas où il sera assurable avec surcoût. La plupart des maîtres d'ouvrages s'attendent à (et exigera de) pouvoir être assuré sans surprime.

La C2P a catégorisé les textes issus du domaine de la construction afin de les classer en techniques courantes ou en techniques non courantes. Pour cela la commission a analysé des documents qui ont été reconnus par les professionnels du bâtiment, en Figure 0. 7.

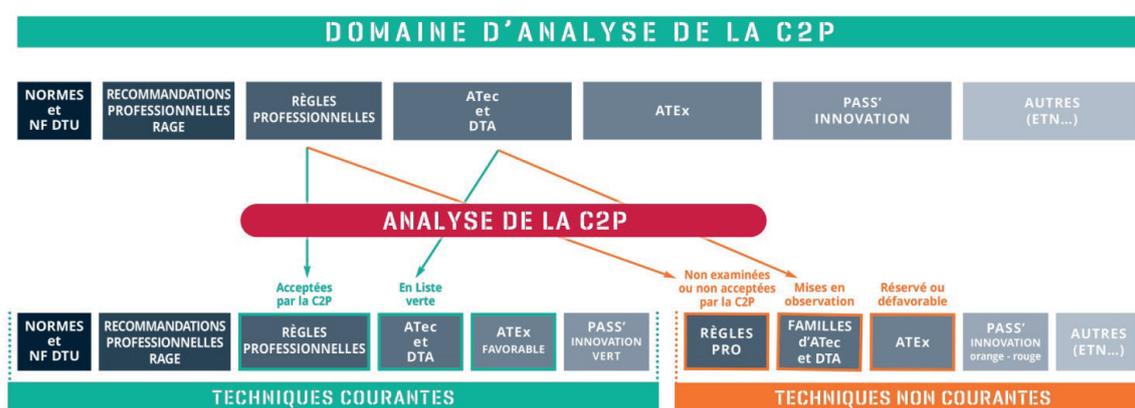


Figure 0. 7 : Objectifs du pôle prévention produits de l'AQC⁹

⁸ <https://normalisation.afnor.org/foire-aux-questions/quelles-normes-application-obligatoire/>, consulté le 02/04/2020

⁹ <https://qualiteconstruction.com/aqc/nos-missions/pole-prevention-produits/>, consulté le 20/10/2017.

Tout autre document ne faisant pas partie de cette liste établie par l'AQC doit donc systématiquement être écarté par les professionnels de la construction, en premier lieu, les maîtres d'œuvre et les entreprises de construction. En s'appuyant sur les documents de cette liste, on pourra tout de même se retrouver, selon les cas, en techniques courantes ou non courantes.

Les techniques courantes imposent généralement indirectement le marquage CE des produits de constructions, via l'application des DTU et des Eurocodes, qui obligent l'utilisation de produits marqués CE. Pour rappel, on se référera à la partie 0.1.1.4 de ce chapitre. Le marquage CE est exigé dès lors :

- que cette famille de produits est soumise à une norme européenne harmonisée ;
- que le fabricant a demandé une évaluation technique.

Les matériaux de réemploi sont souvent dépourvus de marquage ou de certification. Il faut également rappeler que tout produit modifié perd son marquage CE. Il devient alors impossible de le mettre en œuvre dans le respect des règles de l'art.

0.2.2.2. Cas assurables ou non assurables

On se heurte souvent à un abus de langage lorsque l'on se confronte au réemploi qui ne serait pas « assurable ». On entend alors par « assurables » les techniques courantes qui ont l'avantage de ne pas exiger de surprime au contraire des techniques non courantes qui induisent une surprime. Les assureurs sont bien en mesure d'assurer tout ce qu'il est possible de construire, mais lorsque l'on sort des techniques reconnues courantes (en cas d'innovation ou de réemploi), les assureurs doivent missionner leurs experts pour évaluer le risque pris et estimer la prime d'assurance correspondante, dont le montant pourrait être élevé.

En cas de refus d'assurance, il est possible de présenter un recours auprès du Bureau Central de Tarification (BCT) qui apportera une solution d'assurance. Cependant, dans la plupart des cas d'innovations dans la construction il faut sensibiliser les maîtres d'ouvrage sur le processus à mettre en place (protocoles de caractérisation des matériaux), entraînant des coûts et délais supplémentaires par rapport à un projet traditionnel. Il ne faut pas perdre de vue non plus le coût global du projet car une innovation présentant un investissement au moment de la conception peut s'avérer vite rentable notamment en termes d'impacts environnementaux [58]. L'analyse en coût global, s'appuyant sur la norme ISO 15686-5, est un outil facilitant la traduction économique de l'efficacité environnementale et énergétique, qui aide à la décision permettant d'arbitrer entre les différents postes de coûts tout au long du cycle de vie d'un ouvrage, et dès sa conception. Par exemple, concernant la phase de déconstruction en fin de vie, l'approche du coût global peut donc favoriser le réemploi de matériaux pour atteindre les objectifs environnementaux, même si un léger surcoût est nécessaire pour mettre en place une réversibilité au moment de la construction.

De plus, il faut veiller, en tant que maître d'ouvrage ou maître d'œuvre, à ce que le projet ne se retrouve pas en position de non-conformité par rapport à ce qui a été entendu dans la police d'assurance. En effet l'assurance couvrant la responsabilité décennale pourra être mobilisable s'il s'agit de désordre avéré, mais ce ne sera pas le cas en présence d'une non-conformité (non-respect de ce qui a pu être prévu dans les contrats). Il est également important de bien distinguer l'assurabilité des produits, puis de l'ouvrage ; de l'assurabilité des personnes telles que le propriétaire, le concepteur, le constructeur qui doivent eux-mêmes être couverts pour différentes raisons. Lorsque l'on souhaite mettre en œuvre des matériaux de réemploi dans un projet il faut avertir, le plus amont possible, le bureau de contrôle et l'assureur pour déterminer le protocole adéquat.

0.2.3. Responsabilités et risques pour la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre

En cas de non-respect des techniques et/ou des réglementations pour lesquelles ils sont assurés, les maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre peuvent s'exposer à des sanctions administratives, civiles ou pénales. Une vigilance supplémentaire est de mise pour les risques de poursuites pénales, comme indiqué Figure 0. 8 .

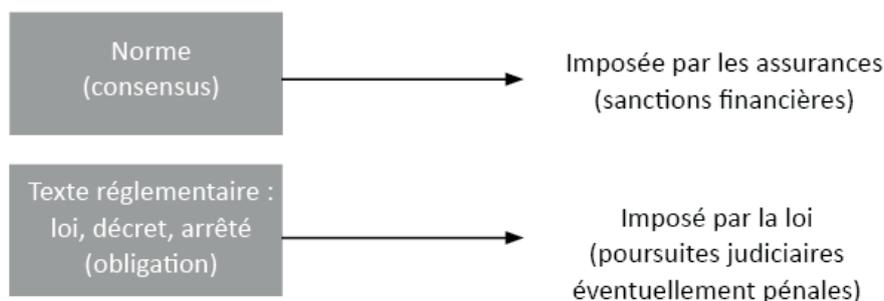


Figure 0. 8 : Principe de respect des textes

0.2.3.1. Critères pour les techniques courantes concernant les personnes MOA/MOE/entreprises

a) La responsabilité décennale

La responsabilité des constructeurs est soumise en France à des règles d'ordre public. La responsabilité légale décennale est fixée par les articles 1792 et 1792-2 du Code civil, elle consacre le principe de présomption de responsabilité d'une durée incompressible de dix ans. **Tout constructeur doit donc être assuré pour cette responsabilité décennale avant le démarrage du chantier.** La plupart des DTU que les professionnels de la construction sont tenus d'appliquer en techniques courantes exige le recours à des matériaux marqués CE. C'est donc grâce à ce marquage que l'entrepreneur qui met en œuvre ces produits peut ensuite engager sa responsabilité décennale.

b) La garantie décennale :

Tout constructeur (entrepreneur, promoteur immobilier, lotisseur, maître d'œuvre, architecte, technicien, bureau d'étude, ingénieur-conseil) impliqué dans la construction d'*un ouvrage neuf ou existant*, ou tout prestataire lié au maître d'ouvrage par un contrat de louage d'ouvrage, est soumis à un régime de responsabilité décennale. Par ailleurs, la fédération française de l'assurance explique que le système français est à double détention depuis 1978 :

1. L'assureur dommages indemnise la victime selon les clauses types,
2. L'assureur dommages exerce ensuite des recours contre les constructeurs responsables et leurs propres assureurs en responsabilité décennale.

Tout constructeur d'ouvrage doit donc avoir une assurance responsabilité décennale. S'il rencontre des difficultés pour s'assurer, le constructeur peut s'adresser au BCT (Bureau Central de la Tarification) qui peut fixer les conditions tarifaires et la franchise pour qu'il obtienne forcément une assurance.

c) La garantie biennale

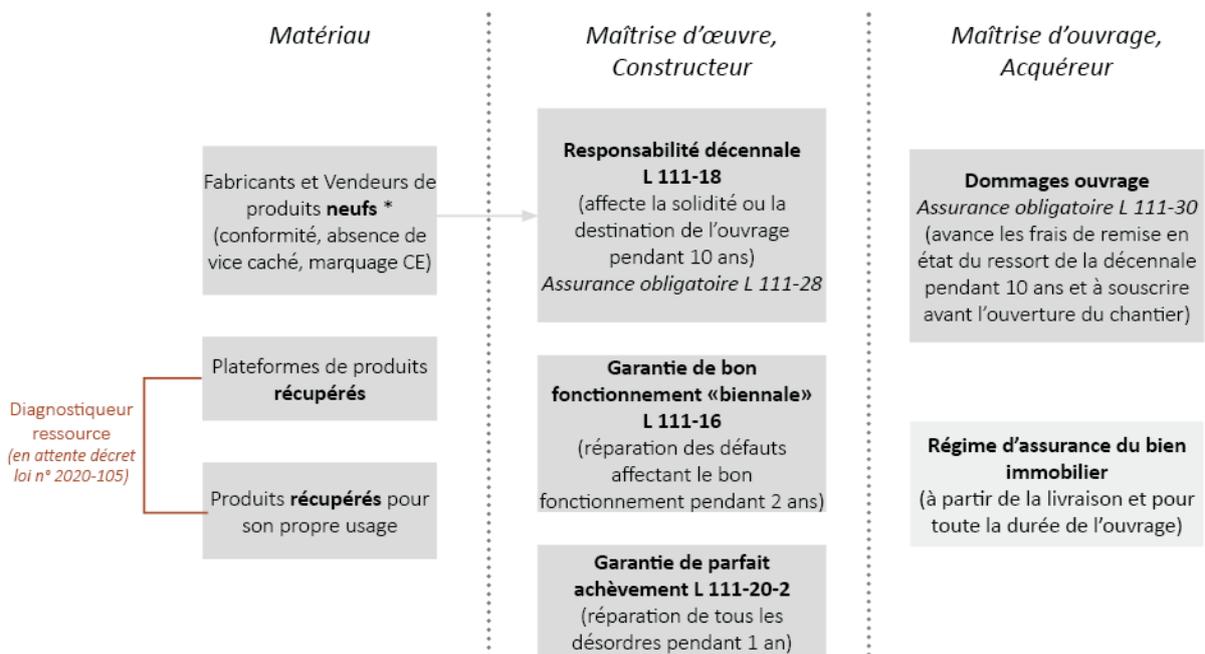
La garantie biennale impose à l'entrepreneur de réparer ou remplacer, pendant une durée de 2 ans après la réception, tout élément d'équipement qui ne fonctionne pas correctement.

d) La garantie de parfait achèvement

La garantie de parfait achèvement impose à l'entrepreneur de réparer tous les désordres (vices cachés et défauts de conformité) signalés au cours de l'année qui suit la réception des travaux, quelles que soient leur importance et leur nature.

0.2.4. Perspectives d'évolutions

Ce sont principalement les usages et notamment les normes imposées dans les contrats surtout pour marchés publics, qui imposent un cadre auquel le réemploi n'est pas en mesure de se conformer. Bien que les politiques actuelles et certaines lois encouragent le réemploi, le manque de textes d'application et l'absence de cadre normatif rendent difficilement possible sa mise en œuvre. Aujourd'hui, cela semble impossible que le réemploi soit compatible avec une technique courante. Certains matériaux récupérés récemment pourraient cependant comporter tous les renseignements nécessaires dont un marquage CE (Conformité Européenne). Mais il n'est pas non plus évident pour le réemploi d'être compatible avec une technique non courante. Cela entraînerait par ailleurs un surcoût (via surprime assurance) qui est en général inenvisageable pour le maître d'ouvrage. Le schéma synthèse en Figure 0. 9 reprend les problématiques de la pratique du réemploi pour les éléments visés par la décennale (structure).



*La jurisprudence CC, Civ 3°, 28 février 2018 a considéré un fournisseur de matériaux comme constructeur qui était alors sous couvert de décennale, ce qui doit alerter également les plateformes proposant des matériaux de réemploi.

Figure 0. 9 : Synthèse des obligations en termes de responsabilité civile de la chaîne d'acteurs pour un réemploi

La responsabilité civile décrite dans la Figure 0. 9 n'enlève pas, par ailleurs, la responsabilité pénale en cas de désordres provoquant les blessures involontaires par exemple. Il est aussi à rappeler que l'Etat peut être son propre assureur (L 111-32).

0.2.4.1. Le rôle des plateformes

Un des freins au réemploi est de trouver l'entreprise qui acceptera de poser le matériau de seconde main en impliquant sa responsabilité décennale. L'entreprise doit prendre la responsabilité d'assumer un matériau dont elle ne connaît pas forcément l'origine, la durée de sa première mise en œuvre, tout en garantissant son bon fonctionnement pendant encore 10 ans. Elle risque de s'inscrire en faux contre son assurance. Actuellement les plateformes de matériaux proposent des produits qui ne sont pas nécessairement marqués CE et qui n'ont pas forcément fait l'objet d'un protocole de caractérisation ce qui laisse un risque pour les acheteurs et constructeurs soumis à la responsabilité décennale. Les plateformes du réemploi pourraient proposer un nouveau service de certifications permettant de garantir le matériau proposé au réemploi et prêt à remplir sa fonction pour au moins 10 ans. On pourrait également imaginer obtenir ces garanties par des processus spécifique types ATEX au CSTB, mais qui alourdiraient considérablement le réemploi du point de vue financier et temporel. Une autre piste, selon la Figure 0. 10 , serait de créer un organisme public pour gérer nationalement à la fois une plateforme de matériaux et une compétence de certifications des produits récupérés.

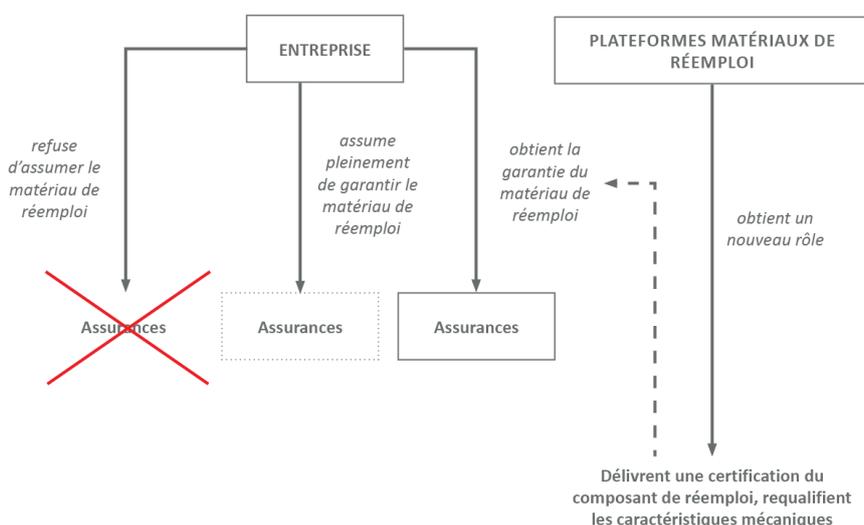


Figure 0. 10 : Scénario pour le rôle des plateformes de réemploi

0.2.4.2. Renforcer la traçabilité

La traçabilité des matériaux pourrait d'abord être mise en place par les industriels. Cette démarche qualité permettrait d'apporter une garantie supplémentaire au prescripteur. Mais pour l'intérêt général, le législateur pourrait imposer ce principe par la loi et ainsi permettre une lecture claire et unifiée de cette traçabilité. Les deux courants du réemploi, c'est-à-dire, à partir de l'existant, ou anticipé dans le futur, doivent prendre en compte la problématique de la traçabilité. Le premier courant doit être accompagné d'un protocole pour retrouver les données relatives au matériau récupéré et pourra s'inspirer des modalités du décret du permis d'expérimenter en partie 0.1.3.3. Le deuxième courant doit renforcer la capitalisation et la traçabilité de la donnée depuis la fabrication d'un matériau jusqu'à sa mise en œuvre, sa vie en œuvre et sa fin de vie avant réemploi. Dans tous les cas, les outils numériques (maquette BIM, banque de matériaux en ligne, systèmes de traçabilité) pourront générer un support utile pour renforcer ces pratiques.

0.3. Conclusion

De nombreuses incitations législatives sont donc apparues en France ces dernières années en faveur du réemploi, notamment à travers la recherche d'une économie circulaire et d'une écoconception. Cette tendance s'observe également au niveau international, selon le «2019 Global Status Report for Building and Construction», [26]. Plus globalement, chaque professionnel de la construction est concerné par l'atteinte des objectifs de diminution des GES inscrits dans la loi, dont le réemploi constitue un levier important, et doit modifier et améliorer ses pratiques. En ce qui concerne le réemploi, les responsabilités engagées sont importantes pour les concepteurs et constructeurs, notamment avec le système de garantie décennale. Le caractère novateur et expérimental génère un accueil frileux du réemploi de la part des divers intervenants. Cependant, comme on le verra à travers les prochains chapitres, différents moyens permettent de fiabiliser les processus de réemploi, en particulier en renforçant la traçabilité. Comme on vient de le voir, des dispositifs nationaux accompagnent les démarches d'innovation dont peut bénéficier le réemploi. Les développements des chapitres suivants se feront au regard de ce contexte afin de rester dans une optique de faisabilité vis-à-vis du secteur de la construction. Ainsi, le réemploi concerne toute la chaîne d'acteurs qui doit se mobiliser pour rendre ce processus plus courant.

Références bibliographiques :

- [1] W. Mc Donough et M. Braungart, *Cradle to cradle : Créer et recycler à l'infini*, 4e éd., vol. Manifestô, Paris: Editions Alternatives, 2011, p. 240.
- [2] C. Bonneuil et J.-B. Fressoz, *L'Evènement Anthropocène. La Terre, l'histoire et nous.*, Nouvelle éd., Points Histoire, 2016, p. 336.
- [3] G. F. N. N. F. A. 2019, «Overshootday,» [En ligne]. Available: <https://www.overshootday.org/newsroom/infographics/>. [Accès le 31 Mars 2020].
- [4] A.-A. Durand, «L'humanité vit à crédit à partir du 29 juillet... mais la méthode utilisée pour calculer cette date fait débat,» *Le Monde*, 29 Juillet 2019.
- [5] IPCC, P. R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H. O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, P. Slade, S. Connors, R. Van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, K. Kissick, E. Huntley, J. Malley et M. Belkacemi, «Summary for Policymakers. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*,» IPCC, 2019.
- [6] N. M. Post, «Tackling an invisible enemy, Climate activists engage in complicated maneuvers to reduce embodied carbon in buildings,» *ENR*, pp. 24-30, 4 November 2019.
- [7] IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, «2018: Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C*,» 2018. [En ligne]. Available: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_SPM_version_report_LR.pdf. [Accès le 8 octobre 2019].
- [8] P. Hopkinson, H.-M. Chen, K. Zhou, Y. Wang et D. Lam, «Recovery and reuse of structural products from end-of-life buildings,» *Engineering Sustainability*, vol. 172, n° 1ES3, p. 119–128, 16 Août 2018, DOI:10.1680/jensu.18.00007.
- [9] R. Di Bari, O. Jorgji, R. Horn, J. Gantner et S. Ebertshäuser, «Step-by-step implementation of BIM-LCA: A case study analysis associating defined construction phases with their respective environmental impacts,» *SBE D-A-CH 19 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 323, p. 10, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/323/1/012105.
- [10] R. Santos, A. Aguiar Costa, J. D. Silvestre et L. Pyl, «Informetric analysis and review of literature on the role of BIM in sustainable construction,» *Automation in Construction*, vol. 103, pp. 221-234, 2019, doi: 10.1016/j.autcon.2019.02.022.
- [11] J. Crippa, L. Cavassin Boeing, A. P. Angonese Caparelli, M. do Rocio de Mello Maron da Costa, S. Scheer et A. Medeiros Ferreira Araujo and Diogo Bem, «Built Environment Project and Asset Management,» *A BIM-LCA integration technique to embodied carbon estimation applied on wall systems in Brazil*, vol. 8, n° 15, pp. 491-503, 2018, doi: 10.1108/BEPAM-10-2017-0093.
- [12] E. Iacovidou et P. Purnell, «Mining the physical infrastructure: Opportunities, barriers and interventions in promoting structural components reuse,» *Science of the Total Environment*, n° 1557-558, pp. 791-807, 2016, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.098.
- [13] J. Brütting, G. Senatore et C. Fivet, «Optimization Formulations for the Design of Low Embodied Energy Structures Made from Reused Elements,» *Lecture Notes in Computer Science*, 2018.
- [14] J. Brütting, C. De Wolf et C. Fivet, «The reuse of load-bearing components,» *SBE19 Brussels BAMB-CIRCPATH IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 225, n° 1012025, p. 8, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/225/1/012025.
- [15] U.S. Department of the Interior et U.S. Geological Survey, «Mineral Commodity summaries 2018,» [En ligne]. Available: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2018/mcs2018.pdf>. [Accès le 13 September 2018].
- [16] CITEPA, 2014, «Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques. Bilan des émissions en France de 1990 à 2017. RAPPORT NATIONAL D'INVENTAIRE / FORMAT SECTEN,» Juillet 2019. [En ligne].

- Available: https://www.citepa.org/wp-content/uploads/publications/secten/Citepa_Secten-2019_Rapport_Completv3.pdf. [Accès le 29 Juin 2020].
- [17] S. Thiers et B. Peuportier, «Thermal and environmental assessment of a passive building equipped with an earth-to-air heat exchanger in France,» *Solar Energy*, n° 182, p. 820–831, 2008, doi: 10.1016/j.solener.2008.02.014.
- [18] I. Zabalza Bribiàn, A. Aranda Uson et S. Scarpellini, «Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification,» *Building and Environment*, n° 144, pp. 2510-2520, 2009, doi: 10.1016/j.buildenv.2009.05.001.
- [19] E. Hoxha, G. Habert, S. Lasvaux, J. Chevalier et R. Le Roy, «Influence of construction material uncertainties on residential building LCA reliability,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 144, pp. 33-47, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.068.
- [20] G. Habert, D. Arribe, T. Dehove, L. Espinasse et R. Le Roy, «Reducing environmental impact by increasing the strength of concrete: quantification of the improvement to concrete bridges,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 35, pp. 250-262, 2012, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.05.028.
- [21] M. Mousa, D. X. Luo et D. B. McCabe, «Utilizing BIM and Carbon Estimating Methods for Meaningful Data Representation,» *Procedia Engineering*, n° 1145, pp. 1242-1249, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.04.160.
- [22] B. Kiss, M. Röck, A. Passer et Z. Szalay, «A cross-platform modular framework for building Life Cycle Assessment,» *SBE D-A-CH 19 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 323*, n° 1012103, p. 10, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/323/1/012103.
- [23] M. Kumar Dixit, J. L. Fernández-Solís, S. Lavy et C. H. Culp, «Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review,» *Energy and Buildings*, vol. 42, pp. 1238-1247, 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.02.016.
- [24] A. Lismont et K. Allacker, «Turning the existing building stock into a resource mine: proposal for a new method to develop building stock models,» *SBE D-A-CH 19 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 323*, n° 1012070, p. 10, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/323/1/012070.
- [25] R. Shahmir Nizam, C. Zhang et L. Tian, «A BIM based tool for assessing embodied energy for buildings,» *Energy & Buildings*, vol. 170, pp. 1-14, 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.03.067.
- [26] Global Alliance for Buildings and Construction, International Energy Agency et the United Nations Environment Programme (2019), «2019 global status report for buildings and construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector.,» 2019. [En ligne]. Available: <http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/30950/2019GSR.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Accès le 4 Avril 2020].
- [27] E. Mootz, «Nos bâtiments sont obèses quand l'urgence climatique exige une architecture ascétique,» *Le Monde*, 12 Août 2020.
- [28] Statista, «Statista,» [En ligne]. Available: <https://fr.statista.com/statistiques/570415/principaux-pays-producteurs-de-ciment-dans-le-monde/>. [Accès le 12 Octobre 2018].
- [29] OECD, «Global Material Resources Outlook to 2060. Economic drivers and environmental consequences.,» Octobre 2018. [En ligne]. Available: <https://www.oecd.org/environment/waste/highlights-global-material-resources-outlook-to-2060.pdf>. [Accès le 21 Août 2019].
- [30] J. Choppin et N. Delon, Matière grise, Matériau, Réemploi, Architecture, Paris: Editions du Pavillon de l'Arsenal, 2014, p. 370.
- [31] ADEME, L. Haeusler, J. Talpin et M. Hestin, «Déchets Chiffres-clés, L'essentiel 2018,» Mars 2019. [En ligne]. Available: https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/dechets_chiffrescles_essentiel2018_010690.pdf. [Accès le 9 Juin 2019].
- [32] AFNOR, Association française de normalisation, *NF EN 206+A1 Novembre 2016 - Norme Béton*, 2016.

- [33] A. BEN FRAJ, R. BODET, S. BRAYMAND, X. CHOMIKI, O. COLLIN, D. COLLONGE, P. DANTEC, F. DE LARRARD, S. DECREUSE, F. DECROIX, A. FERAILLE, S. FONTENY, B. FOURE, P. FRANCISCO, F. JEZEQUEL, F.-R. MERCIER, I. MOULIN et S. ORSETTI, «Comment recycler le béton dans le béton, Recommandations du projet national RECYBETON,» Mars 2019. [En ligne]. Available: https://www.pnrecybeton.fr/wp-content/uploads/2020/03/RECYBETON_Recommandations_2019-03.pdf. [Accès le 23 Septembre 2019].
- [34] DGALN, DHUP et HQE Performance, «Performance environnementale des bâtiments,» Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie; Ministère du Logement, de l'Egalité des Territoires et de la Ruralité, 2019.
- [35] Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire et Ministère de la Cohésion des Territoires, «Référentiel « Énergie - Carbone » - Méthode d'évaluation de la performance énergétique et environnementale des bâtiments neufs,» 4 Janvier 2019. [En ligne]. Available: <http://www.batiment-energiecarbone.fr/IMG/pdf/referentiel-energie-carbone-methode-evaluation-2017-07-01.pdf>. [Accès le 27 Mars 2019].
- [36] L. Qarout, «Reducing the Environmental Impacts of Building Materials: Embodied Energy Analysis of a High-performance Building,» University of Wisconsin Milwaukee, PhD Thesis, 2017.
- [37] S. Kaethner et J. Burrige, «Embodied CO₂ of structural frames,» *The Structural Engineer*, pp. 33-40, 2012.
- [38] G. J. Lankhorst, J. Arts, K. C. Terwel et H. M. Jonkers, «Life Cycle Analysis: Load-Bearing Structures Of High-Rise Buildings in Western Europe,» *CTBUH Journal*, n° 13, pp. 28-35, 2019.
- [39] Legifrance, «LOI n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte,» 17 Août 2015. [En ligne]. Available: <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000031044385&categorieLien=id>. [Accès le 30 Novembre 2017].
- [40] Legifrance, «Décret n° 2015-1491 du 18 novembre 2015 relatif aux budgets carbone nationaux et à la stratégie nationale bas-carbone,» 18 Novembre 2015. [En ligne]. Available: <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?categorieLien=id&cidTexte=JORFTEXT000031493783>. [Accès le 24 Octobre 2017].
- [41] Legifrance, «LOI n° 2018-1021 du 23 novembre 2018 portant évolution du logement, de l'aménagement et du numérique (1),» 23 Novembre 2018. [En ligne]. Available: <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000037639478&categorieLien=cid>. [Accès le 25 Novembre 2019].
- [42] Legifrance, «Ordonnance n° 2018-937 du 30 octobre 2018 visant à faciliter la réalisation de projets de construction et à favoriser l'innovation,» 30 Octobre 2018. [En ligne]. Available: <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000037542730&categorieLien=id>. [Accès le 4 Novembre 2018].
- [43] Legifrance, «LOI n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire,» 10 Février 2020. [En ligne]. Available: <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000041553759&dateTexte=20200326>. [Accès le 3 Mars 2020].
- [44] Legifrance, «LOI n° 2019-1147 du 8 novembre 2019 relative à l'énergie et au climat,» 8 Novembre 2019. [En ligne]. Available: <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000039355955&categorieLien=id>. [Accès le 3 Décembre 2019].
- [45] Legifrance, «Code de la construction et de l'habitation,» 13 Mars 2020. [En ligne]. Available: <https://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do?cidTexte=LEGITEXT000006074096>. [Accès le 29 Mars 2020].
- [46] J. Benoît, G. Saurel, M. Billet, F. Bougrain et S. Laurenceau, REPAR 2 : Le réemploi passerelle entre architecture et industrie, ADEME, BELLASTOCK, CSTB, avril 2018, 545 p.

- [47] Legifrance, «LOI n° 2018-727 du 10 août 2018 pour un Etat au service d'une société de confiance,» 12 Août 2018. [En ligne]. Available: <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000037307624&dateTexte=20200402#LEGIARTI000037309113>. [Accès le 18 Mai 2019].
- [48] Ministère de la transition écologique et solidaire, «Projet de Stratégie Nationale Bas-Carbone,» Janvier 2020. [En ligne]. Available: https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/2020-01-20_MTES_SNBC2.pdf. [Accès le 2 Avril 2020].
- [49] ICEB, «Le Réemploi : Matières à bâtir,» MOOC Bâtiment Durable, 10 Mars 2020. [En ligne]. Available: <https://www.mooc-batiment-durable.fr/courses/course-v1:ICEB+2018MOOCBAT04+SESSION01/about>. [Accès le 11 Mars 2020].
- [50] Ademe et Cress, «Les structures de l'Economie Sociale et Solidaire en Île de France, des acteurs de la Transition Ecologique et Energétique. Etat des lieux,» Ademe, 2020.
- [51] Avise, «avise, portail du développement de l'économie sociale et solidaire,» 17 Décembre 2018. [En ligne]. Available: <https://www.avise.org/articles/quand-leconomie-circulaire-est-sociale-et-solidaire>. [Accès le 8 Novembre 2019].
- [52] Mairie de Paris, Direction des espaces verts et de l'environnement et Agence d'écologie urbaine, «Plan Economie Circulaire de Paris, Feuille de route,» Mairie de Paris, Paris, 2017.
- [53] J. Ibelaidene, «Economie circulaire : les 5 mesures qui impacteront le BTP,» Le Moniteur, 23 Avril 2018. [En ligne]. Available: <https://www.lemoniteur.fr/article/economie-circulaire-les-5-mesures-qui-impacteront-le-btp.1966709>. [Accès le 30 Avril 2018].
- [54] Commission Européenne, «Boucler la boucle - Un plan d'action de l'Union Européenne en faveur de l'économie circulaire,» 2 Décembre 2015. [En ligne]. Available: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0003.02/DOC_1&format=PDF. [Accès le 26 Avril 2016].
- [55] European Commission, «The European Green Deal,» 11 Décembre 2019. [En ligne]. Available: https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication_en.pdf. [Accès le 2 Février 2020].
- [56] European Commission, «Circular Economy - Principles for Buildings Design,» 21 Février 2020. [En ligne]. Available: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/39984>. [Accès le 26 Mars 2020].
- [57] U. Von der Leyen, «A Union that strives for more, My agenda for Europe. POLITICAL GUIDELINES FOR THE NEXT EUROPEAN COMMISSION 2019-2024,» 2019. [En ligne]. Available: https://ec.europa.eu/commission/sites/beta-political/files/political-guidelines-next-commission_en.pdf. [Accès le 18 Décembre 2019].
- [58] Agence Qualité Construction, «La démarche coût global, une approche responsable,» Janvier 2019. [En ligne]. Available: <https://qualiteconstruction.com/publication/la-demarche-cout-global-une-approche-responsable/>. [Accès le 10 Février 2020].

Chapitre I

Etat de l'art et limites actuelles

Ce chapitre abordera premièrement la notion de réemploi à travers les temps pour en saisir le sens, et en exposer les différentes pratiques, puis les définitions en vigueur pour la construction actuelle. Dans le but d'une généralisation du réemploi, en particulier des éléments de structure, une revue des travaux de recherche en cours et de leurs limites sera ensuite décomposée pour répondre aux obstacles identifiés : les méthodes de conception en vue d'un réemploi structural ainsi que les prédispositions de certains types d'assemblages, les méthodes de traçabilité des données (dont l'outil Building Information Modeling : BIM, et les systèmes d'identification et d'instrumentation) et les méthodes d'évaluation de l'impact environnemental du réemploi, en particulier l'Analyse du cycle de vie (ACV).

1.1. Les pratiques de réemploi

1.1.1. Brève(s) histoire(s) du réemploi

Avant l'industrialisation, et encore jusqu'au milieu du XX^e siècle, des formes d'économie circulaire existaient depuis toujours, comme des travaux historiques l'attestent. La réparation, le recyclage, le réemploi, la réutilisation étaient des pratiques courantes. Toute une économie parallèle, organisée autour des chiffonniers, récupérait chiffons, os, produits divers en vue d'une réutilisation. L'historienne Sabine Barles [1] souligne que jusque vers 1870 on observe une circulation spontanée de la matière entre la ville, l'industrie et l'agriculture. Nous allons donc parcourir succinctement le cours de l'histoire afin d'analyser l'évolution des pratiques en faveur ou en défaveur du réemploi et les mettre en perspective avec les pratiques contemporaines.

1.1.1.1. La déconstruction, pratique courante entre symbole historique et économie de matière, jusqu'au XX^e siècle

A la fois pour marquer leur disparition, le renversement d'un pouvoir ou encore la réappropriation du patrimoine par le peuple, des bâtiments parfois monumentaux comme la Bastille ou l'Abbaye de Cluny, Hoyet [2], ont pu faire l'objet d'un démantèlement minutieux pour en récupérer le maximum de matière, comme on peut le voir en Figure I. 1. Nécessité économique ou bon sens, les pierres, mais aussi les charpentes en bois ont pu être démontées pour être réutilisées, « on préfère même, jusqu'au milieu du XIX^e siècle environ, les vieilles tuiles aux neuves car elles ont fait leur preuve », Choppin, Delon [3]. Les pièces métalliques ont quant à elles, plutôt été recyclées par refonte pour refabriquer des éléments métalliques sur mesure pour de nouveaux projets. Ces déconstructions ont également nourri les affaires commerciales par la mise en vente de ces matériaux, dont certains entrepreneurs ont largement tiré profit.



Figure I. 1 : Déconstruction de la Bastille en 1789

L'ouvrage « Déconstruction et réemploi », Ghyoot et al. [4] du collectif Rotor, paru en 2018, revient longuement sur l'histoire du réemploi à travers les âges et l'arrêt relativement brutal de ces pratiques avec l'industrialisation. La mécanisation des chantiers, en particulier de démolition, interdit tout réemploi. L'apparition d'assemblages irréversibles, comme les mortiers au ciment, n'autorise plus d'autres scénarios que la démolition grossière. De plus l'augmentation en parallèle du prix de la main d'œuvre pousse à optimiser les temps de construction comme de déconstruction au détriment des techniques démontables.

1.1.1.2. « L'ad hocisme » ou la persistance d'un réemploi marginalisé

Repris par Rotor, Ghyoot al. [4], *l'ad hocisme* repose sur une « conception qui parvient à tirer le meilleur parti des ressources disponibles ». On pourra attribuer cette pratique au réemploi de nécessité, celui de l'autoconstruction, des bidonvilles, de construire avec le peu de ressources à disposition, sorte de *low-tech* subie. Certains parviennent à sublimer la nécessité. Un de ces précurseurs de ce réemploi est Samuel Mockbee, professeur d'architecture à l'Université d'Auburn, qui propose des maisons ou lieux pour la communauté, dont trois exemples sont illustrés en Figure I. 2 à Figure I. 5 notamment pour loger la population défavorisée américaine, à travers des cours pratiques en architecture. Son acte de construire paraît proche de celle du bricoleur avec des outils d'assemblages simples, des échelles réduites où l'homme peut construire avec peu de moyens.



Figure I. 2 : Rural Studio, Glass Chapel, 2000



Figure I. 3 : Rural Studio, Glass Chapel, 2000



Figure I. 4 : Rural Studio, Lucy Carpet House, 2002



Figure I. 5 : Rural Studio, Harris/Butterfly House, 1996

Certains en ont fait un art, comme les installations environnementales de Richard Greaves, dont la « cabane à sucre » est visible en Figure I. 6, que l'on peut également rapprocher de l'œuvre de Gaudi, Ferdinand Cheval, Simon Rodia ou encore Kurt Schwitters. L'artiste met ainsi en évidence les normes et les principes de construction par leur antinomie. Il utilise pour cela des objets, rebuts récupérés au gré de ses trouvailles et rencontres fortuites.



Figure I. 6 : "The Sugar House" de Richard Greaves, 2001

Ces pratiques ont tendance à associer le réemploi à la pauvreté, laissant aussi parfois transparaître l'image de déchets qui peut encore dérouter de nos jours les maîtres d'ouvrages du réemploi. Plus récemment, des associations comme les bâtisseurs d'Emmaüs tirent toujours parti de ces matériaux récupérés pour améliorer les logements de personnes dans le besoin, et ce à moindre coût. En parallèle, les exemples de réemploi d'éléments de second œuvre, principalement pour des bureaux, se multiplient. Cependant, pour le bien de l'environnement, le système « consommateur, jeteur »-« récupérateur, nécessaire » devrait muter vers un système circulaire généralisé et décorrélé de distinctions sociales, pour devenir la norme pour tous.

1.1.1.3. De la préhistoire à nos jours, les habitats nomades

En parallèle, que ce soit aux origines de la lignée humaine ou aujourd'hui avec des peuples chasseurs, pêcheurs ou cueilleurs et des sociétés pastorales, l'habitat nomade a toujours fait partie de nos moyens d'habiter le territoire. Les peuples ont développé leurs propres techniques et optimisé le montage et démontage de leurs habitats pour les adapter à leurs modes et fréquences de déplacement. Certains de ces peuples ont conservé leur autonomie en dehors d'une société industrialisée imposée au monde. La légèreté des structures et l'efficacité thermique de certaines réalisations sont toujours remarquables et exemplaires. Ainsi en Figure I. 7, on peut constater que les déplacements des habitations se font facilement à la force humaine uniquement. L'habitat nomade a permis à l'homme de traverser les siècles et de résister à un environnement parfois très hostile. S'apparentant aux premières manifestations de réemploi et réutilisation dans la construction, l'habitat nomade démontre un usage des assemblages réversibles remarquablement optimisé.



Figure I. 7 : Habitat nomade Vietnam

Ainsi une yourte peut être montée ou démontée en seulement 30 minutes. La structure en bois résiste au moins une vingtaine d'années. Les conditions extrêmes ont prouvé que l'on pouvait conserver 25°C à l'intérieur pour une température de -40°C à l'extérieur. La forme géométrique de la yourte permet, en grande partie de résister aux charges horizontales. En Figure I. 8, on peut observer le détail d'assemblages sommaires en ficelles, parfaitement réversibles. Les habitats nomades, démontrent qu'un système montable/démontable est intuitif pour l'homme depuis son origine et continue de se transmettre chez certains peuples. La tradition héritée jusqu'à nos jours, génère un modèle efficace et optimisé au cours des siècles dont on peut déduire un certain bon sens. Ces techniques vernaculaires restent cependant au stade du campement et nos modes de vie urbains se sont largement détachés de cette frugalité ancestrale.



Figure I. 8 : Assemblages traditionnels des yourtes.

1.1.2. Renouveau du réemploi depuis 2005

1.1.2.1. *Obstacles actuels au réemploi*

Depuis l'industrialisation et la mécanisation de la construction, le réemploi a quitté les pratiques courantes pour devenir anecdotique. Pourtant face aux problématiques environnementales, plusieurs architectes tentent de relancer ces pratiques, sous couvert de bon sens, et sont de plus en plus écoutés. Cependant on peut se demander pourquoi cette pratique qui semble si vertueuse n'est pas déjà généralisée dans la construction actuelle.

Bien que de plus en plus mis à l'honneur ces dernières années, le réemploi ne fait pas encore l'unanimité au sein des concepteurs et beaucoup ignorent encore ce que ce concept englobe. Le réemploi, puisqu'il impose la récupération d'un élément, d'un matériau, contraint la maîtrise d'œuvre, aussi bien techniquement que conceptuellement.

Un rapport en 2016 a identifié, pour le compte de l'Ademe, les freins et les leviers au réemploi de produits et matériaux de construction, [5] afin de proposer des pistes d'améliorations et d'évolution du cadre réglementaire pour favoriser le réemploi. Les principaux problèmes rencontrés, notamment dans le contexte français, lorsque l'on souhaite mettre en œuvre des matériaux de réemploi sont :

- Le choix des matériaux car les plateformes ne sont pas nombreuses et proposent une gamme de produits très limitée (parmi le second œuvre) et stocker des matériaux disponibles au réemploi n'est pas toujours aisé ;
- La disponibilité des matériaux, en effet les stocks de matériaux de réemploi sont fluctuants et la mise à disposition de matériaux ne concorde pas toujours avec les phases de conception ;
- Les contraintes normatives et assurantielles puisque les produits de réemploi ne répondent plus aux normes actuelles et doivent être déclassés ou détournés ce qui n'entre plus dans les techniques courantes des assurances et fera l'objet de probables surprimes, comme nous l'avons abordé dans le chapitre 0 ;
- Les responsabilités des concepteurs et constructeurs qui doivent engager leur responsabilité décennale sur des produits de seconde de vie, ce qui peut échauder certains acteurs ;
- Le manque de traçabilité malgré le déploiement de méthodologies pour réaliser un diagnostic ressource, les données récupérées sont parfois insuffisantes pour connaître les propriétés des matériaux récupérés ;
- La caractérisation des performances résiduelles lorsqu'il s'avère nécessaire de lancer une telle procédure, des coûts et des délais supplémentaires sont alors à prévoir.

Malgré ces obstacles certains professionnels se spécialisent dans le domaine du réemploi et des projets exemplaires voient le jour. Ainsi il est possible, de trouver une alternative à ces freins (par le déclassement, ou en travaillant un calepinage contournant les défauts d'un matériau, par exemple) en faisant preuve de créativité et d'ingéniosité. Le principal frein lié aux responsabilités a tendance à écarter les éléments de structure et à privilégier les éléments de second œuvre pour concrétiser un réemploi.

On entend alors que l'on a déjà convaincu un maître d'ouvrage de mettre en œuvre des éléments de réemploi et on ne développera pas ici le travail qu'il reste à accomplir pour faire entrer cette pratique dans les mœurs de chacun des acteurs de la construction. A ce propos, en 2020, l'Institut pour la conception éco-responsable du bâti (ICEB) a réalisé un MOOC « le Réemploi : Matières à bâtir » [6] pour former l'ensemble des professionnels du secteur du bâtiment.

1.1.2.2. Réemploi à partir de l'existant et du diagnostic ressource

Il convient de décrire les méthodes mises en place concernant ce réemploi à partir de l'existant et de dresser un premier retour d'expérience de ces dernières années depuis la création de collectifs spécialisés en réemploi comme Bellastock ou Rotor. Ce retour d'expérience permettra de tirer les leçons de cette pratique et de mieux anticiper ses enjeux dans les conceptions des bâtiments neufs.

Le collectif Rotor a été fondé en 2005 en Belgique et figure aujourd'hui parmi les experts incontestés en la matière. Son ouvrage référence, Ghyoot al. [4] se conclut en permettant de développer le réemploi à grande échelle. Leur démarche s'applique au réemploi des matériaux existant aujourd'hui issus des gisements de déconstructions. Trois défis ont été identifiés :

- Défi 1, garantir la stabilité de l'offre dans le temps ;
- Défi 2, détailler les caractéristiques techniques des produits de construction ;
- Défi 3, fournir les garanties nécessaires.

Rotor a également créé en 2016 le « spin-off » Rotor DC qui récupère, reconditionne et propose à la vente des éléments de réemploi.

Son homologue français se nomme Bellastock, et s'est constitué dès 2006 également. D'abord sous forme associative, Bellastock s'est peu à peu professionnalisée jusqu'à devenir reconnue à ce jour comme expertise dans les domaines du réemploi *in situ* et de l'urbanisme de transition. Parmi leurs études on peut nommer « Repar 2 » [7], en collaboration avec le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) et l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) et d'autres experts de la construction comme des contrôleurs, ingénieurs (LERM setec), qui constitue le référentiel méthodologique pour mettre en œuvre le réemploi de l'existant sur les chantiers de démolition. Leurs premières expérimentations présentent l'inconvénient de dégrader fortement la qualité des matériaux (voiles béton récupérés puis réemployés en dallage extérieur). Ils ont également théorisé, parmi les premiers, le diagnostic ressource, dont les principales étapes sont reprises en Figure I. 9, qui fait en sorte de ne pas passer par un statut de déchets des matériaux, afin d'éviter les contraintes liées à ce statut et, plus encore, à la sortie de ce statut.

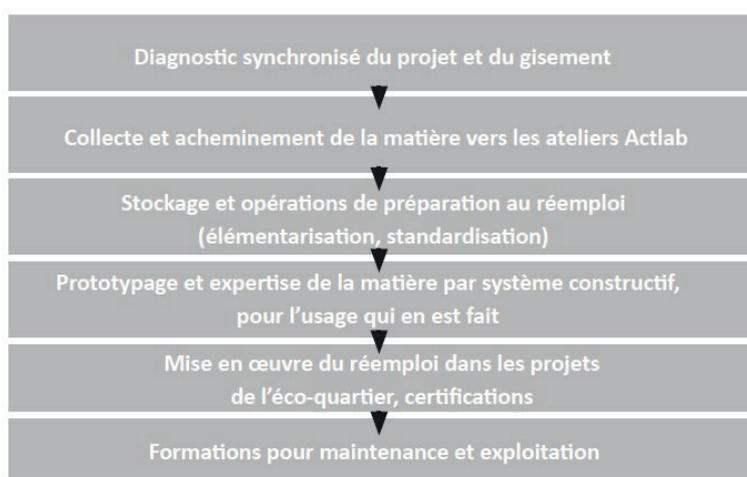


Figure I. 9 : Processus de déconstruction sur le site d'Actlab, Bellastock

Aujourd'hui de nombreux bureaux d'études ont vu le jour et se constituent assistants à la maîtrise d'ouvrage réemploi ou économie circulaire sur de nombreux projets.

1.1.2.3. Projets contemporains de réemploi

L'agence Construire de Patrick Bouchain, est l'une des pionnières du réemploi qu'elle associe à la HQH (Haute Qualité Humaine) puisque les intervenants de ces projets s'investissent davantage dans cet acte de construire vertueux. Dès 2003, l'Académie Fratellini de Patrick Bouchain mettait en place des solutions de réemploi avec des références constructives régionales en rapport avec le site d'implantation. Pour ce projet, le recours aux matériaux de réemploi a été multiple, comme mis en évidence en Figure I. 10, (tôles des façades, poteaux, évacuation des eaux, dalle, ...), mais l'équipe s'est heurtée à la difficulté de déconstruire une charpente canadienne située non loin de là. Cette charpente existante était laissée à l'abandon et son propriétaire était d'accord pour la céder. Un appel d'offre a été lancé, mais le coût estimé pour la déconstruction, le déplacement et la reconstruction était trop élevé pour ce projet au budget très serré. A cela s'ajoutait le délai supplémentaire à la manœuvre qui a fini de décourager les architectes.

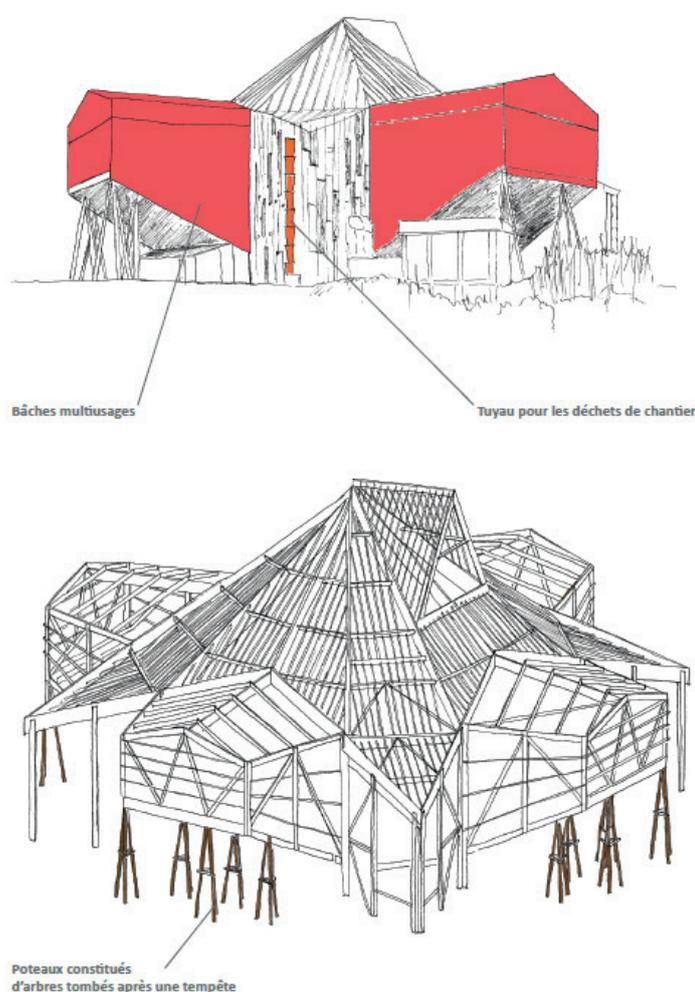


Figure I. 10 : Axonométrie et perspective de l'Académie Fratellini, St Denis, dessinées d'après la visite sur site.

Le travail de Wang Shu, prix Pritzker 2012, est démonstratif de prise de conscience du patrimoine. Par son action il contribue à sauvegarder le patrimoine et le savoir-faire de son pays. Il réemploie les briques millénaires récupérées sur les chantiers de démolition et perpétue les valeurs chinoises, comme on peut le voir mis en œuvre sur le projet du Ningbo Museum en Figure I. 11. Les chinois ont toujours réemployé les matériaux de constructions par tradition et par nécessité. Aujourd'hui les ingénieurs construisent des projets contemporains en rasant des

terrains occupés et en délaissant les anciens matériaux, au risque d'effacer totalement les méthodes traditionnelles de construction. Wang Shu a réussi à concilier le réemploi de la tradition avec la conception contemporaine tout en exposant dans ses constructions le savoir ancestral. Il montre que contemporain n'est pas antinomique de tradition et que des solutions sont applicables. Le réemploi est un enjeu à développer davantage pour produire une architecture sensée.

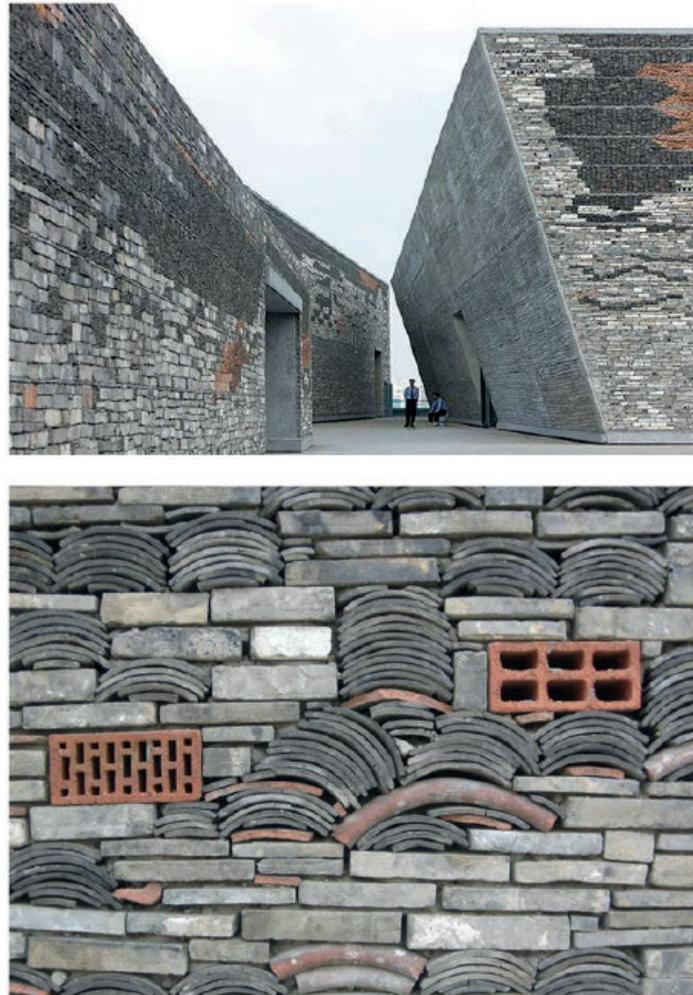


Figure I. 11 : Wang Shu, Ningbo Museum Réutilisation de tuiles et briques dont la mise en œuvre a été étudiée pour mettre en valeur une technique d'assemblage du réemploi.

Encore plus récemment, la réhabilitation de la grande Halle de Colombelles, visible en Figure I. 12, par les architectes Encore heureux a permis de confronter l'équipe de maîtrise d'œuvre au cadre normatif et assurantiel existant. Ainsi avec le bureau d'études Albert & Compagnie, l'équipe a mis au point un système de « CCTP à trous » permettant de prévoir une variante pour un scénario avec réemploi de matériaux, fortement encouragé, et une base en neuf, afin de ne pas pénaliser le projet en cas de difficulté à se fournir en matériaux de réemploi [6]. A cette occasion également, un lot spécifique « réemploi » a permis de fournir les matériaux de réemploi pour ce chantier. Le contrôleur a validé ce principe qui pourrait faire jurisprudence dans le milieu professionnel. En complément l'assurance Dommage Ouvrage de la Maîtrise d'ouvrage a demandé des essais sur les produits de réemploi qui ont été pilotés par le lauréat du lot réemploi, ce qui a permis à l'entreprise qui a assuré la pose d'engager sa responsabilité décennale.



Figure I. 12 : Encore Heureux + Construire, Réhabilitation d'une halle industrielle en tiers-lieu, Colombelles 2019, 3 700 m².

Comme on l'a vu, le réemploi tend à devenir primordial dans l'écoconception, mais ces premiers retours d'expérience de l'ère contemporaine du réemploi montrent que les efforts sont mis sur le traitement de l'existant. Les méthodologies s'appuient sur un diagnostic du gisement existant pour redonner à disposition la matière mise en œuvre précédemment. Un courant est donc oublié : celui de changer nos pratiques de conceptions actuelles pour systématiser un réemploi en fin de vie. Des auteurs ont même inventé le terme de « domicologie » [8], pour l'étude des cycles de vie de l'environnement bâti, qui examine le continuum depuis les étapes de planification, de conception et de construction jusqu'à la fin de l'utilisation, l'abandon et la déconstruction ou la réutilisation des structures. La domicologie reconnaît ainsi la nature cyclique de l'environnement bâti et prône un monde où aucun bâtiment n'a besoin d'être démolé. Les structures seront conçues avec l'idée qu'une fois qu'elles auront atteint la fin de leur utilité, elles pourront être déconstruites, les composants précieux étant réutilisés ou recyclés. La domicologie rejoint donc la philosophie du travail présenté ici qui, pour notre part, se distingue par une volonté de concevoir pour totalement réemployer, et non recycler.

L'objectif de ce travail est bien de définir les méthodes et dispositifs à intégrer dans les bâtiments neufs d'aujourd'hui afin qu'ils soient 100% réemployables lors de leur fin de vie et d'augmenter significativement la part de matière réemployée dans la construction en levant les freins listés avec le réemploi de l'existant.

1.2. Les concepts de design

Notre travail s'efforcera de proposer les dispositions à prendre et les dispositifs permettant le réemploi à long terme d'éléments structuraux. Les éléments qui auront été identifiés comme les plus pertinents pour le réemploi pourront faire l'objet d'une conception revisitée pour en augmenter les possibilités de remise en œuvre. Dans ce chapitre, il sera donc question de relever les avancées dans ce domaine de la conception.

1.2.1. De la possibilité de déconstruire...

Comme nous l'avons vu précédemment en partie 1.1.1, les pratiques de réemploi ont disparu au XX^e siècle au moment de la mécanisation de la construction pour ne renaître que bien plus tard et être à nouveau théorisées à partir de 2005. Cependant entre ces deux périodes les méthodes de construction se sont développées et certaines possèdent, malgré elles, une aptitude particulière au réemploi. Il s'agit notamment des bâtiments de l'âge d'or de la préfabrication. Nous verrons également que la notion de démontabilité et le domaine du management de déchet sont apparus progressivement dans la littérature sans objectif de réemploi, mais certains principes énoncés nourrissent les dispositions à prendre pour un réemploi.

1.2.1.1. *La Grand'Mare : 1968-1969, Marcel Lods, Paul Depondt, Henri Beauclair, Quartier de la Grand'Mare, Rouen, France*

Rebuté par le caractère figé des constructions en béton et soucieux de répondre à la forte demande en logements, l'architecte Marcel Lods préconise, dès les années 1930, la préfabrication en métal d'éléments standardisés. Épaulé par Paul Depondt et Henri Beauclair, il fonde le Groupement pour l'étude d'une architecture industrialisée (GEAI), avec les représentants de grandes entreprises de l'acier et du verre. Deux prototypes voient le jour, qui permettent de poser les bases typologiques des immeubles à venir : des plots de quatre étages, un rez-de-chaussée dévolu aux espaces techniques et communs, une cage d'escalier centrale, trois ou quatre appartements par niveau. En 1968, le GEAI obtient la commande de 500 logements à Rouen. De l'ossature aux finitions, tous les éléments sont fabriqués en usine, livrés puis assemblés comme un jeu de construction : les 25 plots sont érigés en 15 mois. La presse se fait l'écho de l'ingéniosité de la méthode de construction, de la clarté des appartements, de la possibilité de déplacer les cloisons. Cependant les industriels, pressés d'exploiter commercialement le procédé, s'opposent à Lods qui le juge encore inabouti. Le GEAI vole en éclat. De fait, les « Verre et Acier » trahissent rapidement leur caractère expérimental : faible isolation phonique, vibrations, bouches de chauffage mal placées, dégâts des eaux à répétition et, pire, mauvaise résistance au feu.

La flexibilité, pour ce projet, a été étudiée depuis la structure, d'après la Figure I. 13 et Figure I. 14, jusqu'à l'aménagement, laissant présager qu'un démontage aisé des éléments de structure est envisageable. La préfabrication permet la production de documents très détaillés sur les composants et leur mise en œuvre. Cependant, le démontage de la structure n'étant pas prévu initialement, peu de documents ont été conservés à cette fin.



Figure I. 13 : Marcel Lods, procédé GEAI, Rouen La Grand' Mare, 1969-72¹



Figure I. 14 : Marcel Lods, procédé GEAI, Rouen La Grand' Mare, 1969-72

1.2.1.2. Les Marelles : 1971-1975, Bernard Kohn et Georges Maurios, Boussy-Saint-Antoine, France

Soutenu par le Ministère de l'Équipement, ce programme de 116 appartements expérimentaux est singulier à plus d'un titre. La technique, d'abord : l'ossature des bâtiments reprend un procédé mis au point par l'architecte Georges Maurios, alors sous l'influence de Louis Khan. Des poutres et des poteaux creux en béton sont préfabriqués, comme l'on peut voir

¹ <http://mpzga.free.fr/habevol/evolutif2013.html>, consulté le 10/10/2018

sur les Figure I. 15 et Figure I. 16. Assemblés, ils forment un réseau tridimensionnel de gaines qui rend possible la disposition libre des pièces humides. Pour séparer et distribuer les appartements, un système sophistiqué de panneaux alvéolaires emboîtables est mis au point. Quant aux façades, elles peuvent recevoir des huisseries variées, que complètent des panneaux colorés.

L'équipe s'installe sur le site et se dote d'outils d'aide à la conception, dont une maquette qui tient autant du jeu de construction que de la maison de poupée. On assemble les éléments structurels, ajuste les composants mobiles, positionne le mobilier. Pour une meilleure compréhension des volumes, les aménagements successifs, filmés comme à hauteur d'homme, sont aussi montrés sur écran. Pourtant, l'expérience participative tourne court, ne concernant finalement que seize familles. Car face à la lenteur des ventes, mais sans avoir cherché à en faire un argument commercial, le promoteur décide d'y mettre fin. Agrémentée de larges terrasses visibles en Figure I. 17, la résidence reste appréciée des habitants, mais beaucoup ignorent aujourd'hui que leur logement est, dans sa conception même, évolutif.

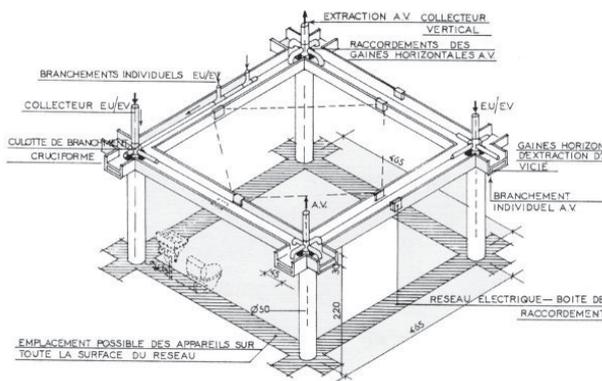


Figure I. 15 : Détails constructifs. Les Marelles : 1971-1975, Bernard Kohn et Georges Maurios

Figure I. 16 : Chantier. Les Marelles : 1971-1975, Bernard Kohn et Georges Maurios



Figure I. 17 : B. Kohn & G. Maurios, Yerres, Les Marelles, 1971-1975

1.2.1.3. Métro de Ryad, setec tpi

Pour la conception et la construction de six lignes dans des délais extrêmement serrés, le recours à la préfabrication a été indispensable pour le futur métro de Riyad. Au sein du consortium FAST, chargé de la conception, setec a assuré les missions de Project Management Office pour les lignes 4, 5 et 6, ainsi que la conception des dépôts de remisage et maintenance des trains. Les deux dépôts, l'un enterré et l'autre en surface, sont intégralement conçus en BIM, outil collaboratif dont on constate l'utilité quand les acteurs se multiplient. Les éléments de grandes dimensions et de portées impressionnantes ont été préfabriqués en prenant des précautions à la hauteur de ce projet exceptionnel. Les moyens mis en œuvre ont permis d'améliorer le processus de préfabrication et de proposer des dispositifs innovants. Mis à part le radier coulé en place, l'essentiel du gros œuvre a été préfabriqué :

- pose de poteaux préfabriqués sur des platines noyées dans le radier ;
- pose de poutres précontraintes préfabriquées sur les corbeaux des poteaux ;
- pose de poutres alvéolaires précontraintes secondaires sur les poutres principales.

Notamment on pourra retenir le recours à des platines, que l'on peut voir Figure I. 18, protégeant l'extrémité des poteaux et permettant la continuité des armatures. Ce système semble adaptable à l'anticipation d'une déconstruction qui pourrait se faire sans détériorer le béton des poteaux. Les Figure I. 19, Figure I. 20 montrent l'assemblage des poutres sur les corbeaux des poteaux préfabriqués puis de la dalle préfabriquée appuyée sur les poutres. Si toutes les zones d'assemblages étaient identifiables et démontables, il serait possible de récupérer ces éléments pour un autre projet. La probabilité de démonter le métro dans les 50 prochaines années est faible, mais il serait possible de retranscrire ces principes constructifs à des projets aux cycles de vie plus courts comme les bureaux par exemple.



Figure I. 18 : Détail de la platine du poteau préfabriqué Métro de Ryad

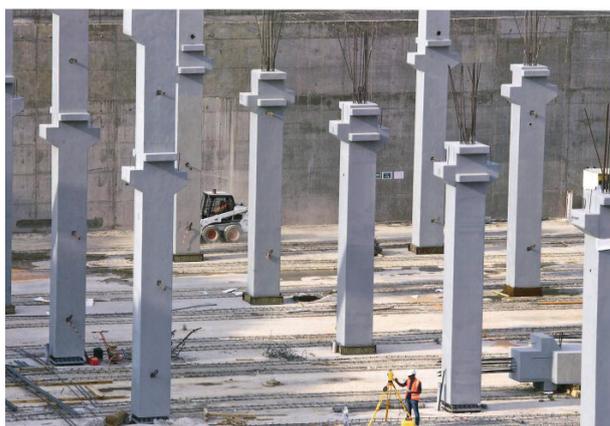


Figure I. 19 : Poteaux préfabriqués du Métro de Ryad



Figure I. 20 : Pose de la dalle préfabriquée du Métro de Ryad

1.2.1.4. *Illwerke Zentrum Montafon: 2010-2013, Hermann Kaufmann, Vandans, Vallée du Montafon, Autriche*

Bien que le bois ait depuis longtemps fait ses preuves, le secteur de la construction lui a toujours préféré le béton et l'acier. Renouvelable, disponible localement, léger, facilement usinable, il est aujourd'hui reconsidéré par les majors du BTP à l'aune des exigences environnementales. C'est ainsi que la multinationale Rhomberg s'est associée à Herman Kaufmann, figure de l'école d'architecture du Vorarlberg. Ils mettent au point le procédé LCT (Life Cycle Tower) dont les composants industrialisés répondent aux standards de la construction passive. Une tour de huit étages de bureaux, édifiée dans la ville de Dornbirn, LCT One, sert de premier démonstrateur. Un second bâtiment, LCT two, prouve l'adaptabilité du système. L'illwerke Zentrum Montafon, implanté en montagne, s'avance au-dessus d'une retenue d'eau exploitée par le maître d'ouvrage. L'immeuble abrite des bureaux, un restaurant d'entreprise et un centre d'information ouvert au public. Haut de quatre étages, il s'étire sur 120 m, fondations, rez-de-chaussée, cages d'escaliers sont en béton armé ; le reste est constitué des éléments LCT. Chaque unité de plancher bois-béton vient se poser, du côté façade, sur deux poteaux en lamellé-collé et du côté central du bâtiment, sur une poutrelle en acier soutenue par des piliers, comme on peut le distinguer sur la Figure I. 21 et la Figure I. 22. Tous les niveaux offrent ainsi des surfaces ininterrompues et baignées de lumière car les composants de façade sont très largement vitrés, comme on le constate Figure I. 23. Les réseaux sont distribués longitudinalement, sous un capot fixé au plafond. Élaboré en concertation avec les employés, l'aménagement fait la part belle au mobilier qui organise l'espace des plateaux. La travée centrale est une zone partagée, ponctuée de salons ou de tables communes. Placés le long des fenêtres, les bureaux profitent directement des vues.

Au-delà de ses qualités architecturales, le système est prometteur par sa polyvalence annoncée pouvant répondre et s'adapter à plusieurs programmes. La décomposition des modules a été optimisée en termes de manipulation (engins de levage légers) et de dimensions (transportables). L'assemblage mécanique semble autoriser un démontage facile, redonnant ces éléments structurels à disposition de nouveaux projets via un réemploi.

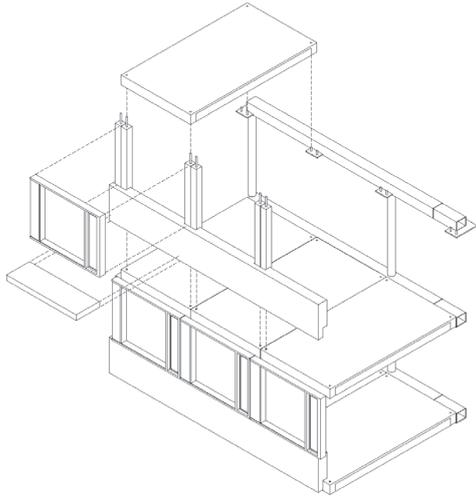


Figure I. 21 : Axonométrie. IZM - Illwerke Zentrum Montafon, Vandans, Montage [9]



Figure I. 22 : Chantier. IZM - Illwerke Zentrum Montafon, Vandans, Montage [9]



Figure I. 23 : Photo. IZM - Illwerke Zentrum Montafon, Vandans, Montage [9]

1.2.2. ...à la volonté de démonter

En première approche, le sujet de réemploi d'éléments structuraux n'a pas été beaucoup abordé au sein de la littérature scientifique. Aucun article n'a été trouvé avec une démarche clairement identifiée de conception en vue de la déconstruction future et la récupération des matériaux en fin de cycle. Cependant la démarche a été évoquée partiellement à plusieurs reprises notamment à travers la définition des concepts de *DfD (Design for Deconstruction)* ou *DfA (Design for Adaptability)*. Le concept n'est donc pas inédit, mais il est assez récent et l'intérêt autour de ces thématiques ne cesse d'augmenter, notamment ces trois dernières années, comme le confirment récemment, en mars 2020, Benachio et al. [10] dans leur revue de 45 articles abordant l'économie circulaire dans la construction, incluant le

réemploi, les stocks de matériaux, les Analyses de Cycles de Vie (ACV) et les passeports matériaux. Un passeport matériaux contient toutes les informations utiles en vue de la réutilisation future ou du recyclage d'un produit (composition, données de mise en œuvre et de localisation, etc.) avec l'idée de les attacher au produit tout au long de sa vie. Pour ces auteurs, il faut intégrer la volonté de réemployer plus en amont, dès les phases de conception, pour assurer le succès de cette démarche et disposer de toutes les données pour permettre la traçabilité et la réalisation d'ACV. Ils montrent entre autres, que le réemploi abordé uniquement en fin de vie pour traiter le problème des déchets présente des bénéfices limités et se heurte au manque de normes dans ce domaine.

L'approche du sujet, traitée dans la littérature, et qui pourrait enrichir la mise en place de réemploi, concerne la définition de degrés de préfabrication (avec une échelle de progression entre l'usine et *in situ*), de flexibilité autorisée, ainsi que de degré de destruction engendrée en cas de déconstruction. Cela influence le type de connexions (boulonnage, soudage, collage, assemblages mécaniques, à sec, etc.). Récemment des études liant conception et stock d'éléments de réemploi recensés sur une base de données ont été réalisées et feront l'objet de la partie 1.2.2.2 de ce chapitre. Il faudrait cependant travailler à qualifier plus précisément les incidences de ces choix en termes de répercussions environnementales et sur le comportement global des structures de bâtiments.

1.2.2.1. *Design for... (DfX)*

L'ingénieur structure joue un rôle important dans l'atténuation des émissions de GES, à court et à long terme, de l'environnement bâti. Cinq stratégies de conception de structures vertueuses ont ainsi été identifiées : choix des matériaux, recyclage / réutilisation en fin de vie, conception optimisée pour minimiser l'utilisation de matériaux, masse thermique structurale et adaptabilité du système structural. Les recherches s'appuient donc sur les stratégies de :

- conception pour les matériaux, *Design for Materials (DfM)* ;
- conception pour le recyclage, *Design for Recycling (DfR)* ;
- conception pour l'efficacité, *Design for Efficiency (DfE)* ;
- conception pour énergie, *Design for Energy (DfEn)* ;
- conception pour l'adaptabilité, *Design for Adaptability (DfA)*.

Concevoir selon les principes de *DfA* repose sur plusieurs hypothèses subjectives. L'hypothèse majeure est qu'une structure adaptable augmentera la durée de vie d'un bâtiment. La durée de vie typique d'un bâtiment est fixée à 50 ans, dans la plupart des référentiels environnementaux [11]. Certains bâtiments industriels, certains parkings n'ont qu'une durée de vie de 25 à 40 ans selon Guy et al. [12], alors que les bâtiments commerciaux, résidentiels, de bureaux, de santé et d'éducation ont une durée de vie variable de 50 à 90 ans. A long terme, les stratégies (*DfEn* ou *DfA*) offrent un fort potentiel d'économie de GES, mais sont rarement portées par la profession. La stratégie *DfM* offre la plus grande réduction des GES à court terme, puisque le choix des matériaux est prépondérant pour l'impact changement climatique sur un bâtiment et une durée de vie typique de 50 ans (cf. Introduction générale et partie 1.4.3). De plus, *DfM* semble une solution plus réalisable stratégiquement, qui peut être appliquée principalement par les ingénieurs structure. A ce titre les matériaux de réemploi sont les plus prometteurs car l'impact des matériaux est drastiquement réduit jusqu'à être quasi-nul en cas de réemploi *in situ*.

1.2.2.2. *Design for Deconstruction/Disassembly (DfD) vs Design for Reuse (DfReu)*

Le réemploi dans la construction peut potentiellement viser environ trois milliards de tonnes de matières premières dans le monde, représentant des intérêts économiques importants, soit environ 40 à 50 % du flux total de l'économie mondiale, Cai et al. [13]. Face aux manques observés dans la littérature concernant l'anticipation du réemploi, un nouveau concept sera défini dans ce travail : le *DfReu*, *Design for Reuse*. La conception pour la déconstruction (*DfD*) est un concept existant, Akadiri et al. [14] et développé dans le domaine du management de déchets. La conception pour la déconstruction (*DfD*) ne concerne pas seulement la récupération des composants du bâtiment en fin de vie, mais également les processus qui facilitent l'assemblage et le désassemblage du bâtiment. Les principes du *DfD* ont été résumés en 10 points par Guy et al. [12] :

1. Prévoir des plans du bâtiment exécuté avec le détail des assemblages et la nature des matériaux et le phasage de déconstruction.
2. Sélectionner des matériaux selon leur impact environnemental et en anticipant leur valorisation (réemploi, recyclage privilégiés).
3. Prévoir les assemblages visibles et accessibles.
4. Minimiser et éviter les assemblages chimiques.
5. Utiliser les assemblages boulonnés, vissés, cloués et limiter le nombre de types d'assemblages différents.
6. Rendre les équipements indépendants du bâtiment, en vue de leur maintenance.
7. Favoriser les manipulations simples réalisables par un seul opérateur.
8. Rechercher la simplicité de structure et de forme.
9. Encourager l'interchangeabilité, la modularité.
10. Sécuriser le phasage de déconstruction pour le personnel sur le chantier.

Le concept *DfD* couvre ainsi des recherches concernant les outils d'évaluation du cycle de vie, les outils de durabilité environnementale et les outils de calcul du coût du cycle de vie. Cependant, le *DfD* est fondé sur la déconstruction et la réduction des déchets, mais n'intègre pas suffisamment l'anticipation du réemploi. L'ouvrage « *Design for reuse primer* » présente en fait plusieurs projets appliquant les principes du *DfD*, [15] et non du *DfReu* comme nous souhaitons le définir. La plupart des études existantes se sont focalisées sur le taux de recyclage plutôt que sur le réemploi, selon Hopkinson et al. [16]. Par ailleurs, un article fait état des barrières au *DfD*, Akinade et al. [17] dont : le manque de législation, le manque de capitalisation de données lors de la conception, le manque d'exutoire pour les matériaux à valoriser, le manque de marché et le manque d'outils d'aide à la conception. Ce constat est commun aux pratiques de réemploi. Cependant, les deux concepts de conception pour le réemploi (*DfReu*) et de conception pour la déconstruction (*DfD*) sont bien distincts. Le *DfReu* est spécifique à la conception en vue du réemploi (et non du recyclage). Alors que le *DfD* est plus global pour faciliter le désassemblage des éléments d'un bâtiment, mais dont l'exutoire peut être un simple tri pour le recyclage ou la valorisation énergétique et pas nécessairement pour le réemploi. En revanche, les deux concepts *DfD* et *DfReu*, comprennent des dispositions permettant d'anticiper la déconstruction. Un phasage de déconstruction doit être anticipé lors de la conception, au même titre que le phasage de construction, comme le confirment Sanchez et al. [18], qui s'appuient notamment sur la maquette numérique BIM, pour modéliser les séquences de désassemblages. Le concept de *DfReu* est donc privilégié dans la suite de ce travail.

Plusieurs difficultés ont déjà été identifiées en matière de réemploi, Cai et al. [13], Bertin et al. [19], telles que le manque de directives, la nécessité de certifier les éléments récupérés, la garantie de sécurité (en particulier avec les éléments structurels), le réassemblage correct des

éléments, l'amélioration de la méthode *DfD* intégrant les aspects de réutilisation, l'incitation financière telle que l'augmentation des coûts de mise en décharge. Santos et al. [20] recommandent aussi l'adoption d'un indice de circularité. Notre travail visera donc à augmenter de manière significative ces directives pour les concepteurs et les constructeurs.

Comme mentionné dans l'introduction, les éléments porteurs ont l'impact environnemental le plus important et exigent un effort particulier pour leur réemploi, Hopkinson et al. [16]. L'un des défis du réemploi des éléments porteurs est bien de permettre un grand nombre de possibilités spatiales. Cela signifie qu'avec un minimum d'éléments différents, il est nécessaire de répondre et de s'adapter à un maximum de programmes différents, de plans, de portées, de charges, de types de connexion, selon Fivet [21] et Bertin et al. [19]. Nous devons mettre en œuvre un nouveau paradigme, puisque le processus de conception structurelle classique est inversé, Brütting et al. [22], et que les éléments réutilisés pourraient imposer des portées ou des hauteurs sous plafond spécifiques, Gorgolewski [23], limitées à leur propre géométrie. La disponibilité des éléments stockés avec leurs propres propriétés mécaniques et géométriques déterminera la future conception à adapter. Brütting et al. [24] ont travaillé sur l'optimisation d'un stock donné en développant des techniques d'optimisation pour concevoir des structures en treillis avec le plus d'éléments possible issus du stock. Le réemploi des anciens systèmes porteurs reste complexe, Cai et al. [13]. Ainsi, l'anticipation du réemploi dans les projets actuels et futurs est essentielle et permet un taux de récupération optimal.

Dans l'ouvrage « *Strategies for Sustainable Architecture* », Sassi [25], l'auteure anticipe la fin de vie en conseillant de prévoir un accès aux systèmes de fixation, de privilégier des systèmes de fixations simples et pouvant être démontés à l'aide d'outils rudimentaires. Elle avertit également les concepteurs des effets des démontages et remontages successifs, en recommandant de choisir des matériaux solides.

En conséquence, le réemploi nécessite des actions supplémentaires telles que l'évaluation des performances résiduelles, l'évaluation de la possibilité de réassemblage, Bertin et al. [19], mais des solutions techniques existent telles que la dépollution, la réparation, le renforcement en polymère renforcé de fibres ou *Fibre Reinforced Polymer (FRP)* et la reconception de l'assemblage, Cai et al. [13]. Dans certains cas, le torseur des forces va changer avec le réemploi par rapport à sa fonction précédente, ce qui nécessite que les nouvelles propriétés soient connues pour le recalcul, Iacovidou et al. [26]. À cette fin, les éléments linéaires en acier et en bois (poteaux, poutres, câbles) sont plus appropriés, car ils comportent souvent des connexions réversibles Brütting et al. [22], [27]. Ce travail s'attachera donc à montrer comment réduire ces actions supplémentaires avec une traçabilité adéquate. Par ailleurs, l'ACV doit permettre d'évaluer les impacts environnementaux du réemploi. C'est pourquoi nous passerons en revue les limites des pratiques actuelles de l'ACV dans la partie 1.4.1 de ce chapitre.

1.2.3. Assemblages déconstructibles

1.2.3.1. Théorie des assemblages non abrasifs

Dans son ouvrage, « La poubelle et l'architecte » [28], Jean-Marc Huygen confronte les méthodes d'assemblages dites abrasives et celles non abrasives. L'emploi de boulons permet de ne pas abîmer la matière, mais surtout de faciliter le démontage et le remontage sans effet de fatigue de la matière. Les auteurs de « Déconstruction et Réemploi », Ghyoot et al. [4] complètent en remettant en cause certains guides de *DfD* par exemple « contrairement aux vis, les clous modifient peu l'élément dans lequel ils sont enfoncés. Par ailleurs, si la tête d'une vis se dégrade, il devient quasiment impossible de retirer celle-ci ». Ils nuancent également pour les assemblages dits « chimiques » : « de tels assemblages ne sont pas nécessairement

irréversibles. Des dalles de pierre fixées avec du plâtre, par exemple, sont parfaitement démontables [...] Les mortiers à chaux sont aussi propices au démantèlement [...]».

Jean Prouvé a été l'un des pionniers à développer ces concepts industriels d'assemblages non abrasifs qui rendent éternels ses projets : « après le rachat de son usine de Maxéville, [il] construit sa propre maison, à Nancy, à l'aide d'éléments réemployés. Réutilisant en façade les panneaux de bois de ses habitations d'urgence, ainsi qu'une grande poutre métallique centrale, il explique que sa maison « est faite de bric et de broc [...], mais tous les éléments se sont assemblés sans problème », Choppin, Delon [3]. La capacité du matériau métallique et l'ingéniosité du processus industriel ont permis une grande pérennité en évitant toute fatigue des éléments due aux manipulations de montage. Prouvé a également veillé à concevoir des éléments légers et manipulables facilement par un ou deux ouvriers, permettant d'accéder à des parcelles difficiles. Ses « maisons tropicales » étaient conçues préfabriquées en France pour être envoyées puis construites dans le territoire colonial français, comme le montre une photographie d'époque pendant le montage, en Figure I. 24. A préciser ici que l'on cite cet exemple pour la prouesse technique de l'assemblage et que l'on ne cautionne pas le transport de matériaux sur de telles distances, les enjeux de l'époque n'étant pas ceux du développement durable. Pour cela les maisons devaient être montées et habitables le plus rapidement possible. Elles étaient également adaptables à d'autres programmes comme : salle des fêtes, logements, bureaux, école, ... La longueur du bâtiment variait pour s'adapter aux besoins à partir d'un nombre restreint de composants. Les maisons tropicales ont été montées et démontées à plusieurs reprises, y.c. pour des expositions contemporaines en France, comme à Nancy sur la Figure I. 25, et continuent de prouver leur durabilité. La plupart des assemblages sont boulonnés pour permettre un montage et démontage aisé, Cinqualbre [29].



Figure I. 24 : Montage de la Maison tropicale Niamey [30]



Figure I. 25 : Maison tropicale reconstruite dans le jardin du Musée des Beaux-Arts de Nancy [31]

Ailleurs en Europe, notamment aux Pays-Bas, Superuse Studios Architectes met également en avant cette technique de conception de façon très contemporaine : « Nous avons pris en compte cette question [la démontabilité] en utilisant une méthode de construction très flexible. L'armature en acier n'est pas soudée mais boulonnée, tandis que les éléments de l'enveloppe peuvent être changés », Choppin, Delon [3].

1.2.3.2. Connexions démontables

En architecture, la conception des bâtiments est souvent abordée avec des stratégies descendantes alternatives alors qu'une approche ascendante ou inductive depuis les connexions des bâtiments est nécessaire. Les chercheurs, Escalera et al. [32] ont réfléchi à la

fermeture du cycle de la boucle matérielle, que cela s'applique ou non aux bâtiments. Il en ressort que tous les éléments peuvent être divisés en cinq catégories générales :

- Produits, systèmes et composants installés sur site et fabriqués avec peu ou pas de traitement sur site (par exemple, les briques) ;
- Composants d'ingénierie assemblés sur site et fabriqués hors site (par exemple en acier de construction, éléments en béton préfabriqués, produits de bois d'ingénierie) ;
- Produits finis sur site (dépend du site sur le plan dimensionnel et technique) et traités hors site (par exemple, béton coulé sur place, asphalte, agrégats, sol) ;
- Produits transformés sur site (dépend de la dimension sur site) et fabriqués (p. ex. cloisons sèches, câblage électrique, isolation, tuyauterie) ;
- Produits de faible masse installés sur site et fabriqués (sur site fonctionnellement et techniquement dépendant) (par exemple peintures, scellants, vernis, colles, mastics).

Ceci génère trois types de processus de déconstruction organisés :

- Destructif, les connexions et le matériel ou les composants sont endommagés ;
- Partiellement destructif ou semi-destructif, les connexions sont détruites pendant la déconstruction sans endommager les composants ;
- Non destructif, ni les connexions ni les matériaux ou composants ne sont endommagés.

Cette dernière, la déconstruction non destructive, peut être de deux types :

- Réversible, processus de déconstruction similaire à l'inverse de la construction ;
- Semi réversible, processus de déconstruction plus complexe que le processus de la construction correspondante.

La motivation des choix entre ces processus provient de quatre raisons majeures qui ont été identifiées : fonctionnalité, fabricabilité, coût, esthétique.

1.2.3.3. Classification en fonction des forces primaires fondamentales utilisées dans différents processus d'assemblage

Cette classification hiérarchisée de Messler et al. [33] met en évidence la nécessité de simplifier et de minimiser le nombre d'espèces chimiques intervenant dans l'assemblage. L'assemblage mécanique apparaît comme celui nécessitant le moins d'efforts et d'opérations au démontage :

- Assemblage mécanique (efforts mécaniques), fixation mécanique, fixation intégrale ;
- Collage par adhérence (forces chimiques), utilisation d'adhésifs, collage au solvant, collage / Mortier ;
- Soudage (forces physiques), soudage par fusion, soudage sans fusion, brasage, soudure ;
- Variantes de processus, soudage par brasage (forces physiques), projection thermique - métaux / céramiques (forces physiques), polymères de pulvérisation thermique (forces chimiques) ;

- Processus hybrides, liaison par rivet (mécanique / chimique), liaison par soudure (physique / chimique), brasage par soudure (physique).

1.2.3.4. *Classification en fonction du degré de flexibilité des connexions*

Plus applicable au bâtiment que la précédente, cette classification de Durmisevic et al. [34] ne s'est pas focalisée sur une hiérarchisation, mais plutôt sur l'exhaustivité des types de connexions directes et indirectes. Son objet n'était pas, non plus, d'identifier les possibilités de démontages de ces connexions, ce qui soulève un réel manque sur ce sujet dans la littérature.

- Connexion chimique directe ;
- Connexions directes entre deux composants préfabriqués ;
- Connexion indirecte avec un troisième matériau chimique ;
- Connexions directes avec des dispositifs de fixation supplémentaires ;
- Connexion indirecte via des composants tiers dépendants ;
- Connexion indirecte via des composants indépendants tiers ;
- Connexion indirecte avec dispositif de fixation supplémentaire.

Cependant, comme le constate Salama [35] les études précédentes comme celle de Durmisevic fournissent un cadre très théorique qui doit maintenant être appliqué et traduit en actions pratiques dans la conception et les systèmes constructifs des bâtiments.

1.2.3.5. *Classification appliquée aux éléments porteurs*

Pour le matériau acier, les assemblages boulonnés offrent la meilleure possibilité de désassemblage. Le montage type "mécano" déjà bien expérimenté et la stabilité du matériau acier offrent une durabilité intéressante et présentent une fatigue très limitée due à la répétition de démontage/remontage.

Pour le matériau bois, les assemblages par emboîtement bois-bois, présentent également un bon potentiel de réversibilité puisqu'ils ne font intervenir aucun autre élément de fixation. Néanmoins la technique d'assemblage en force pourrait poser quelques problèmes au démontage. Le bois, par ses techniques ancestrales, propose de nombreuses solutions pour des assemblages entièrement en bois. On peut notamment se rapprocher du savoir-faire des japonais dans ce domaine. On évitera au maximum le recours aux colles (d'autant plus lorsque leur émissivité de COV est suspecte).

Pour le matériau béton, le retour d'expérience montre qu'il est beaucoup plus aisé de déconstruire une structure constituée d'éléments préfabriqués en béton plutôt qu'une structure coulée en place. Les bâtiments préfabriqués existant dans notre parc immobilier n'ont pas été conçus pour être déconstruits mais les différents composants peuvent être séparés à l'aide de techniques de démolition relativement légères. Une partie de la matière, détruite, ne sera pas récupérable mais une grande partie des éléments structurels peut être sauvée.

Concernant les systèmes structurels en eux-mêmes, les systèmes porteurs poteaux-poutres semblent davantage adaptés à la possibilité de réemploi, par leur qualité de flexibilité, d'adaptabilité, et de plateaux libres. Patrick Rubin et Jean-François Blassel [36] mettent en avant l'aspect réversible de telles structures. La décomposition en poteaux et poutres permet également de générer des éléments porteurs linéiques proposant une manutention facilitée par rapport à des éléments surfaciques plus imposants. La préfabrication de modules peut

également être optimisée pour la déconstruction dans la mesure où ces modules sont conçus pour pouvoir être remplacés, démontés grâce à un système mécanique.

La préfabrication actuelle applique souvent le principe d'une pièce métallique, connecteur ou platine, qui assemble deux éléments linéaires en bois ou en béton armé. Les éléments de charpentes métalliques préfabriquées sont montés et assemblés directement entre eux grâce à des boulons. Plus rarement il est également possible de démonter une soudure métallique, mais il s'agit d'une opération chronophage qui n'est pas à privilégier pour le réemploi. Bien que les coûts des bâtiments présentant des structures en acier et des connexions démontables soient élevés, ils deviennent rentables à long terme en maintenant les matériaux du bâtiment dans l'économie circulaire et en allongeant considérablement leur durée de vie, Akanbi et al. [37]. Certaines solutions proposées relèvent davantage de la pièce d'industrie que d'un dimensionnement par un ingénieur structure. Par la suite le développement de ce travail sera axé sur la faculté d'action de l'ingénieur structure. Les tableaux suivants permettent d'illustrer ces familles d'assemblages avec des solutions techniques existant sur le marché. En transposant le travail de Durmisevic [38] au domaine des éléments structuraux, on obtient les 5 familles suivantes :

- Connexion indirecte par l'apport d'un élément permettant un collage définitif, développée en Tableau I. 1 ;
- Connexion directe avec organes métalliques, développée en Tableau I. 2 ;
- Connexion directe par contact (sans organe métallique), développée en Tableau I. 3 ;
- Connexion indirecte par 3e composant dépendant (raccordé à un élément), développée en Tableau I. 4 ;
- Connexion indirecte par 3e composant indépendant (accessoire de fixation), développée en Tableau I. 5.

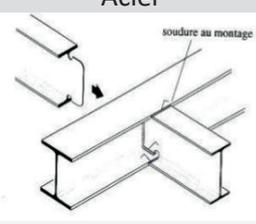
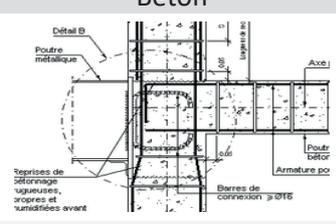
Connexion indirecte par l'apport d'un élément permettant un collage définitif			
Matériaux	Acier	Béton	Bois
Solutions			-
Description	Soudure directe	Coulage en place	Collage, résine
Avantages		-	
Points d'attention	Démontage entièrement destructeur, qui complexifie une opération de déconstruction		

Tableau I. 1 : Connexion indirecte par l'apport d'un élément permettant un collage définitif

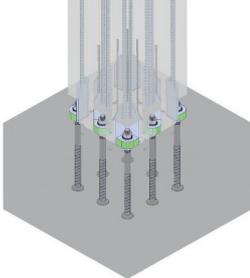
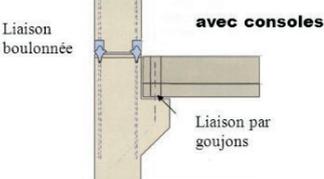
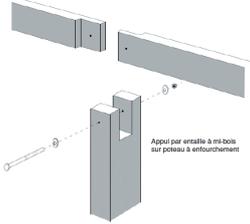
Connexion directe avec organes métalliques			
Matériaux	Acier	Béton	Bois
Solutions	-	  <p>Liaison boulonnée</p> <p>avec consoles</p> <p>Liaison par goujons</p>	 <p>Appui par entaille à mi-bois sur poteau à enfouissement</p>
Description	Poutres superposées avec organe de fixation	Liaisons par goujons et <i>Assemblages Peikko</i> « <i>Bolted Column Connection</i> »	Contact avec organes métalliques
Avantages	Démontage manuel simple, non ou partiellement destructeur. Indépendance entre les éléments assemblés.		
Points d'attention	Utilisation structurelle limitée avec ces organes métalliques démontables		

Tableau I. 2 : Connexion directe avec organes métalliques

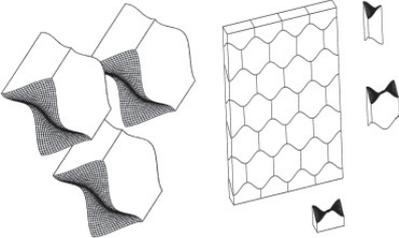
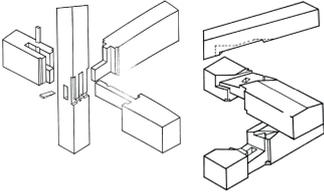
Connexion directe par contact (sans organe métallique)			
Matériaux	Acier	Béton	Bois
Solutions	-		
Description	-	Système autobloquant ostéomorphe, résistance assurée superposition mécanique de blocs	Tenon et mortaise, embrèvement, appui sur lambourde, assemblages moisés...
Avantages	Démontage manuel simple et non destructeur		
Points d'attention	Utilisation structurelle limitée, cinétique d'assemblage impactant le démontage, dépendance entre les éléments (systèmes exclusifs « mâle-femelle »)		

Tableau I. 3 : Connexion directe par contact (sans organe métallique)

Connexion indirecte par 3e composant dépendant (raccordé à un élément)			
Matériaux	Acier	Béton	Bois

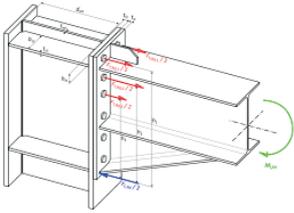
Solutions			
Description	Assemblages boulonnés et soudés	Assemblage par troisième composé coulé dans béton et Assemblages Peikko PC Corbel/Beam shoe	Assemblages métallo soudés
Avantages	Démontage manuel simple, non ou partiellement destructeur		
Points d'attention	Dépendance exclusive entre les éléments (standardisation difficile), impact économique non négligeable		

Tableau I. 4 : Connexion indirecte par 3e composant dépendant (raccordé à un élément)

Connexion indirecte par 3e composant indépendant (accessoire de fixation)			
Matériaux	Acier	Béton	Bois

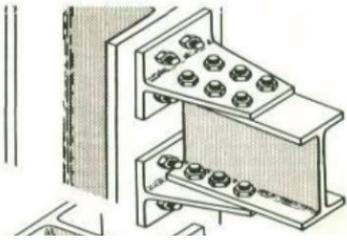
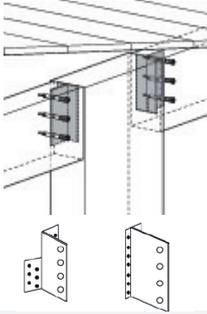
Solutions		-	
Description	Assemblages boulonnés ou par axes	-	Assemblages avec tôles perforées et profilées assemblées par clouage (étrier, cornière)
Avantages	Démontage manuel simple, non ou partiellement destructeur, indépendance entre les éléments assemblés (standardisation possible)		
Points d'attention	Tolérances à maîtriser, impact économique non négligeable		

Tableau I. 5 : Connexion indirecte par 3e composant indépendant (accessoire de fixation)

En France la démarche BAZED [39], lauréat de l'appel à projet « Déchets du BTP » de l'ADEME en 2012, avait pour but de constituer une aide globale à la conception de bâtiments pour réduire la génération de déchets du BTP. La démarche a abouti en un guide technique en ligne qui propose des recommandations et liste des projets exemplaires selon les différentes catégories : structure, enveloppe, aménagement intérieur, équipement, environnement ; et pour différentes interventions : maintenance, rénovation, adaptabilité, démontabilité, anticipation du réemploi dans la construction neuve. On peut notamment relever deux projets exemplaires incluant une structure démontable : le projet en Figure I. 26 qui a été construit dans le but d'être démonté au bout de 20 ans grâce à une structure en bois et des assemblages en plaques acier boulonnées ; et le projet en Figure I. 27 qui permet une grande accessibilité aux réseaux du bâtiment grâce à une charpente métallique préfabriquée, mais aussi des éléments du second

œuvre démontables. Ces exemples datant de la fin des années 90 montrent que les systèmes constructifs existent pour un démontage, mais l'anticipation du réemploi n'a pas été théorisée.



Figure I. 26 : Bureaux, Wereldhave, Pays-Bas, XX Architecten, 1999 [39]



Figure I. 27 : The Center for Building Performance and Diagnostics, Carnegie Mellon University, Etats-Unis, Bohlin Cywinski Jackson, 1997 [39]

1.2.3.6. En France, le projet Demodolor

Le MECD (Matériaux et Equipements pour la Construction Durable) regroupe plusieurs acteurs majeurs de l'industrie de la construction comme les centres techniques : CERIB, le CTICM, le CTMNC, le FCBA ; mais aussi des laboratoires. Le projet Demoludor est né à la suite de l'appel à projet sur les déchets du BTP lancé par l'ADEME en 2012. Ce projet a débouché sur la conception de plusieurs systèmes constructifs démontables pour le gros œuvre et l'enveloppe, à l'origine d'une large part dans le volume de déchets de la construction. Le MECD a le mérite de rassembler des industriels des filières de matériaux différents.

Mené sur un peu plus de deux ans, le projet s'est déroulé en phases successives : l'analyse des marchés et des volumes de matériaux et de déchets, la détermination de solutions constructives porteuses, la conception de leur adaptation et les premiers essais mécaniques de validation et, enfin, une analyse environnementale et socio-économique des potentialités. Le dispositif ici illustré en Figure I. 28 est un plancher mixte acier-béton pour lequel le principe de connexion, habituellement effectué par goujons soudés à la poutre acier et noyés dans la dalle béton coulée en place, est alors remplacé par des boulons fixés au travers de la poutre acier et connectés à des dalles béton préfabriquées par l'intermédiaire de zones de clavetage. Ces zones de clavetage correspondent aux zones de réservations que l'on distingue et dans lesquelles une petite quantité de béton est coulée en place. La petite zone de clavetage peut être détruite plus tard, laissant intact le reste de la dalle préfabriquée réutilisable ultérieurement. C'est l'un des rares exemples de démontabilité appliqués au béton coulé en place qui reste la première technique constructive en France, et qui fera l'objet du chapitre IV de ce travail.

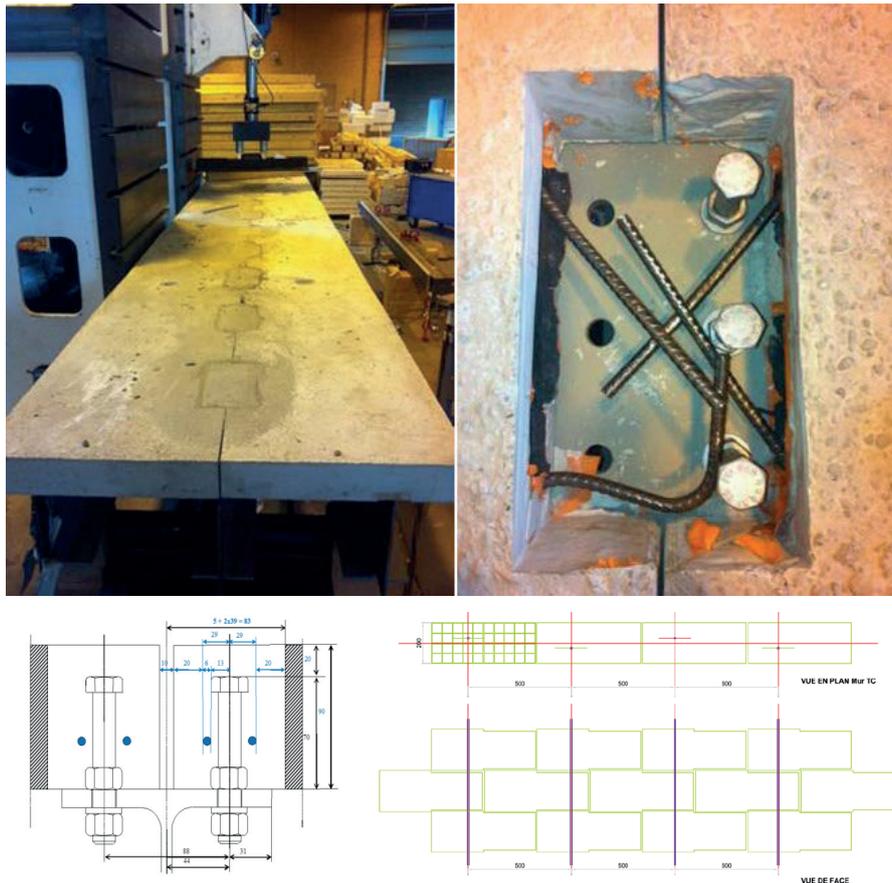


Figure I. 28 : Systèmes constructifs du projet Demodulor (Plancher mixte acier-béton et maçonnerie porteuse à sec)

Le mur démontable en terre cuite en bas à droite sur la Figure I. 28 est associé à un plancher sec acier-bois-béton (usage résidentiel). La solution associe une maçonnerie porteuse en briques de terre cuite (mise en œuvre à sec et reprenant les charges gravitaires) entre des profils acier horizontaux haut et bas reliés par des tirants en acier mettant en précontrainte la paroi (solidarisation des éléments, efforts de traction, flexion, etc.) entre chaque niveau de plancher. Ce dernier est constitué d'un bac acier, de panneaux bois revêtus de dalles de béton allégé Thermolitys®, conçu à l'occasion du projet. L'ensemble entièrement démontable ne comporte que des composants manuyportables, avec des assemblages mécaniques (pas de mortier ni enduit). Un autre projet similaire a été mis au point par Ortlepp et al. [40] et repose également sur l'usage de la précontrainte associée à la technique de la maçonnerie à sec, en murs, comme en dalles.

Pour le dimensionnement des ouvrages en résistance et contreventement, les niveaux de performances permettent déjà de répondre aux cas de logements R+1 qui constituent le cœur de cible visée. L'enjeu est maintenant de confronter ces premières expériences à des bâtiments de plus grande envergure où les contraintes structurales sont plus fortes. On étudiera notamment dans ce travail le réemploi d'immeubles de grande hauteur.

1.2.3.7. *Projet européen REDUCE pour les structures métalliques*

Le projet a pour but de fournir des méthodologies, des outils et des conseils pour aider à la conception pour la déconstruction (*DfD*), en particulier des planchers mixtes en acier-béton pour les bâtiments à multi-étages. Il doit conduire à de nouvelles méthodes de prise en compte du cisaillement des systèmes de connexion proposés en Figure I. 29, et basées sur des essais de

flexions des poutres visibles en Figure I. 30 pour vérifier l'action du système et pour développer des règles de conception. Le projet prévoit également de quantifier les avantages de ce système réutilisable à l'aide d'indicateurs d'ACV et d'économie circulaire et d'améliorer l'utilisation du BIM pour faciliter la déconstruction. Des simulations aux éléments finis sur ABAQUS ont été réalisées au laboratoire de « *ArcelorMittal Chair of Steel and Façade Engineering* » (AMCFE). La capacité de démontage, de résistance et les déplacements ont été déterminés. Les résultats de ces études serviront de première base pour le développement d'un futur guide de conception de planchers mixtes réemployables, Odenbreit et al. [41]. Une étude similaire menée aux Pays-Bas par Nijghet al. [42] propose également ce type de plancher démontable réemployable. Ces deux propositions de planchers réemployables reposent sur l'usage de goujons boulonnés injectés de résine. Une fois la résine retirée, tous les éléments du plancher seraient réutilisables selon les auteurs. Une explication plus approfondie pour retirer la résine est toutefois nécessaire pour bien comprendre le processus de déconstruction.

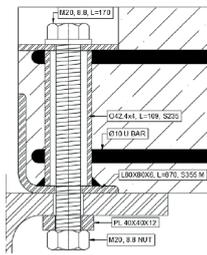


Figure I. 29 : Principe de connexion du système de plancher du projet

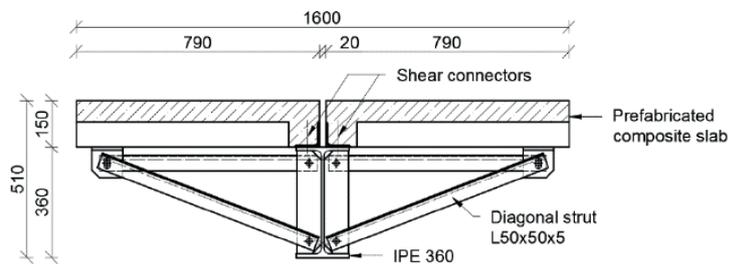


Figure I. 30 : Coupe transversale des poutres testées

L'état de l'art des assemblages existants démontre une hétérogénéité des applications possibles, et peu d'assemblages réversibles sont utilisables pour des rôles structuraux dans des bâtiments multi-étages. On peut également remarquer que la plupart des solutions techniques proposées par les industriels repose sur des connexions métalliques. Néanmoins, il faut rappeler que notre patrimoine bâti français est constitué à plus de 80% de béton, selon l'UGE (ex Ifsttar) [43], dont la technique de mise en œuvre de prédilection est le coulé en place. Nous nous efforcerons donc ici, de rechercher le cas éventuel d'assemblage démontable en béton coulé en place afin d'élargir le champ des applications possibles pour le réemploi.

Il en est de même pour les classifications existantes qui sont davantage adaptées à la caractérisation de liaisons entre éléments de second œuvre. Nous tenterons d'élargir ces classements afin de couvrir les problématiques propres à la fonction structurelle pour permettre d'évaluer la démontabilité des liaisons entre éléments porteurs.

1.3. Potentiel de traçabilité : le BIM comme support

1.3.1. Besoins de traçabilité : répertorier, stocker, garantir

Selon le matériau déconstruit et récupéré, des questions se posent. Il est en effet difficile de maîtriser la qualité et les caractéristiques physiques ou structurelles des éléments démontés. Plus largement, la nécessité d'engager des essais de caractérisations entraîne inévitablement

des surcoûts et des délais supplémentaires. Le principal obstacle lorsque l'on s'attèle à récupérer des éléments structurels de grande échelle, hormis le stockage et la manutention, c'est qu'il est difficile de connaître les caractéristiques exactes des matériaux. Leur réemploi se restreint souvent à un détournement plus ou moins astucieux, mais qui est limité en comparaison des capacités structurelles suggérées. Dominique Gauzin-Müller déplore que : « La traçabilité et un étiquetage décrivant tous les composants faciliteront sans doute un jour les décisions, mais c'est un processus long et technocratique. », Choppin, Delon [3]. Les entreprises communiquent peu et souvent ne conservent pas à long-terme les documents techniques qui permettraient d'attribuer leurs performances structurelles aux éléments récupérés.

Par ailleurs, des études à plus grande échelle ont été menées dans le domaine du métabolisme urbain, qui ont également l'objectif de quantifier et qualifier les flux de matières comprenant les matériaux de construction. Dans sa thèse de doctorat, Augiseau [44], distingue deux approches de capitalisation de la donnée, l'approche ascendante et l'approche descendante. Ainsi l'estimation du stock de matériaux de construction peut se faire de façon descendante à partir des archives et des statistiques ou de façon ascendante, via les modélisations de l'existant et les données transmises sur projet. Dans ce cadre, la modélisation BIM des projets de construction devient une composante majeure pour constituer un stock de matériaux de manière ascendante. La précision de l'échelle du projet, par rapport à celle du quartier et du territoire, laisse par ailleurs espérer que le niveau d'informations transmises comprendra les caractéristiques physico-mécaniques des matériaux structuraux permettant une (ré)intégration à un modèle de calculs, pour un nouveau projet à long terme. Ce travail sur la traçabilité en vue de la capitalisation des données structurales s'intégrera donc dans cette stratégie ascendante, anticipée au moment de la conception initiale des bâtiments.

1.3.2. Le processus BIM aujourd'hui

Il faut bien distinguer l'outil à notre disposition que représente le BIM et son environnement, des informations que l'on viendra attacher à un modèle numérique. En effet, les possibilités sont quasiment infinies en genre et en nombre de données que l'on peut attacher à un modèle, d'autant plus lorsque l'on évoque le projet d'architecture, [45]. Cependant cette liberté peut aussi entraîner un manque d'harmonisation dans les méthodes d'implémentation du modèle. Il faut donc rattacher le travail de modélisation et de génération de la donnée avec en parallèle un travail de méthodologie et de contrôle du processus BIM, indépendant de la valeur des informations. Plusieurs organismes nationaux et internationaux se sont penchés sur ce travail afin de proposer un contexte normatif pour encadrer le BIM. Tout l'environnement BIM : de la cinématique de construction en passant par l'*IoT (Internet of Things)* ou les capteurs, est en cours d'étude afin de mettre en place le meilleur moyen de rattacher ces outils à un modèle numérique BIM. Un fichier issu d'un logiciel BIM ne pourra pas contenir tous les outils développés dans l'environnement BIM. L'enjeu est certainement de mettre en place la bonne chaîne d'outils avec des liens fluidifiant l'accès à l'information.

1.3.2.1. Les dimensions BIM

Ce sont des regroupements par thématique, d'informations incluses dans la maquette numérique, c'est-à-dire des informations liées aux objets présents dans le modèle numérique BIM. Selon les dimensions du BIM définies par Mediaconstruct, building SMART France [46], deux dimensions semblent particulièrement intervenir pour le réemploi, identifiées en Figure I. 31 :

- La 4D introduit la dimension du temps dans le BIM, permettant de lier les éléments géométriques avec une information "temps" ou un planning de

construction, ce qui va permettre aux différents acteurs d'un projet de visualiser dans le temps la durée d'un événement ou la progression d'une phase de construction, et par extension de déconstruction ;

- La 6D traite de tout ce qui concerne le développement durable d'un bâtiment, par exemple les analyses énergétiques, l'analyse de cycle de vie, les certifications environnementales.

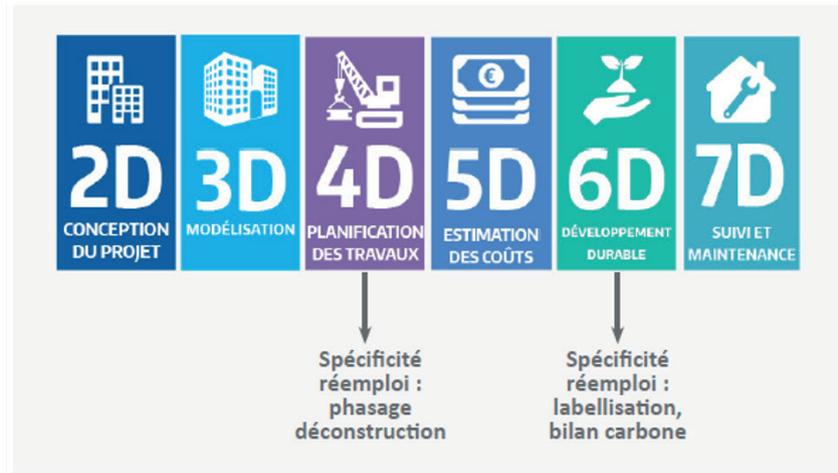


Figure I. 31 : Les dimensions actuelles du BIM

L'étude d'un phasage de déconstruction peut ainsi faire appel à ces différentes dimensions : la 4D pour planifier les opérations de désassemblage, la 5D pour estimer les coûts des différentes opérations et la 6D pour réaliser l'analyse environnementale du procédé, comme l'illustre l'article de Sanchez et al. [18], qui mettent également en œuvre la visualisation d'une séquence de désassemblage à l'aide du logiciel de modélisation BIM.

1.3.2.2. Principe de paramètres BIM

Chaque logiciel BIM présente une organisation des objets modélisés. Par exemple avec le logiciel Revit, utilisé dans ce travail, la classification des éléments ou occurrences est la suivante :

- Catégorie, *ex* : poteau ;
- Famille, *ex* : poteau rond ;
- Type, *ex* : poteau rond \varnothing 0,6.

La gradation de cette classification permet de préciser progressivement les caractéristiques de l'objet modélisé. Il existe des paramètres « de type », communs à tous les éléments du même type, et des paramètres « d'occurrence », spécifiques à un seul élément. Il existe également des paramètres « système » (propres au logiciel), des paramètres « partagés » (propres à une entreprise), des paramètres « projet » (créés par le BIM coordinateur pour un projet spécifique).

1.3.2.3. Nomenclature

Le logiciel utilisé génère automatiquement des nomenclatures à partir des informations souhaitées, préalablement fixées. On peut ainsi obtenir le volume total de béton dans le projet, puis le préciser par étage, par qualité de béton, etc. La précision des informations est à déterminer en fonction des besoins et du détail de modélisation présent dans la maquette numérique. C'est bien au modélisateur de prévoir et/ou de renseigner tous les paramètres liés

aux objets en fonction des analyses que l'on souhaite mettre en place. Le BIM Manager, en conception, pourra organiser la gestion générale de la nomenclature, de l'arborescence des dossiers et du projet dans les maquettes numériques, ainsi que la gestion commune des bibliothèques d'objets.

On peut aussi mettre en place des liens entre les données des maquettes et des données externes, comme les données environnementales contenues dans les Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) par exemple, ce qui permettrait de générer des nomenclatures avec les impacts environnementaux des matériaux modélisés dans la maquette.

1.3.2.4. *Transmission de la donnée BIM*

Entre acteurs

Au sein des équipes, le BIM Manager supervise notamment les BIM coordinateurs et les projeteurs-modélisateurs. Cette hiérarchie est indispensable à la qualité des processus BIM. En exploitation, le BIM Manager fournit les données nécessaires à tout moment aux différents métiers de l'asset management : le gestionnaire d'actifs (*asset manager*), le gestionnaire locatif et technique (*property manager*), le responsable des services aux utilisateurs de l'immeuble (*facility manager*). Cette transmission de la donnée est cruciale afin que tous les acteurs de la construction puissent former une chaîne d'information et garantir la pérennité de la data. Si cette chaîne est mise en place, on peut alors espérer retrouver les caractéristiques des matériaux en fin de vie, en vue d'un réemploi.

Entre logiciels

Une étude a porté sur les critères de conception *DfD*, Akinade et al. [47] en se basant sur les retours d'expérience des professionnels et sur la nécessité d'améliorer le format d'échange IFC (*Industry Foundation Classes*) qui permet de transmettre des modèles BIM entre différents logiciels BIM. Le format d'échange IFC pour les modèles BIM est abordé par plusieurs études Lee et al. [48], Ilhan et al. [49], pour promouvoir l'intégration des données relatives au développement durable, mais rencontre des difficultés en raison des erreurs de fichiers générés lors de l'exportation et de l'importation, Forth et al. [50]. À ce sujet, plusieurs documents ont montré la faiblesse de l'interopérabilité, l'absence de standards industriels couvrant de manière globale les différents domaines d'application du BIM pour les bâtiments durables, le manque de méthodes et la faible précision des modèles de prévision basés sur le BIM, Lu et al. [51]. La méthodologie développée en chapitre II dans notre étude proposera une extension des standards BIM.

1.3.2.5. *Les niveaux de détail et développement LOD et niveaux d'information LOI*

Le niveau de détail ou niveau de développement (LOD) est un standard actuel décrivant le niveau de précision de la modélisation BIM développée par BIMFORUM [52]. Les LOD sont divisés en cinq catégories : 100 pour un faible contenu d'information et 500 pour un contenu d'information élevé. L'établissement de critères de propriété pour le réemploi est davantage lié au niveau d'information (*Level of Information LOI*) du modèle BIM. Forth et al. [50] recommandent une nomenclature plus précise des objets BIM avec l'apposition d'affixes pour garantir une affectation correcte et spécifique des matériaux, contenant par exemple la classe de résistance minimale à la compression pour le béton, l'essence ou le type de matériau pour le bois ou le type et la transformation des métaux. Instaurer des nouveaux LOD pour le BIM exige une meilleure compréhension de la manière dont les potentiels de réemploi doivent être pris en compte en ce qui concerne les composants tels que les données de fabrication, les différents

composants, la qualité des matériaux, la résistance des matériaux, les propriétés, etc., ainsi que les techniques de construction utilisées et la manière dont les composants sont reliés aux autres, Iacovidou et al. [26]. Le réemploi doit également pouvoir s'appuyer sur le BIM pour améliorer la définition de la durée de vie restante des composants réutilisés comme la capacité résiduelle des éléments structurels, Cai et al. [13]. Aujourd'hui on parle davantage de *LOIN (Level of Information Needed)* et la suite de travail en ch. 3 fournit une nomenclature compatible avec le processus BIM et spécifiée explicitement pour le réemploi des éléments structurels.

1.3.2.6. Norme PPBIM (Propriétés des Produits pour la maquette numérique BIM)

La norme XP P07-150 est portée par le comité de normalisation PPBIM « Propriétés des produits et systèmes utilisés en construction – Définition des propriétés, méthodologie de création et de gestion des propriétés dans un référentiel harmonisé ». La commission de normalisation PPBIM a été établie en 2012 par l'AFNOR (Association Française de Normalisation) à l'initiative de l'AIMCC (Association des industriels des produits de construction) et de Mediaconstruct-Building Smart France. La norme XP P07-150, dite PPBIM a d'abord été publiée comme une norme expérimentale en décembre 2014 en France. Elle consiste à définir une méthode de gestion normalisée d'un dictionnaire de propriétés des produits de construction pour le BIM. La norme PPBIM spécifie comment les propriétés et les groupes de propriétés devraient être établis par des utilisateurs et des experts dans un dictionnaire. Dans le contexte du BIM, ces groupes de propriétés seront liés aux objets BIM. Son rôle est également de déterminer comment le contenu de ce dictionnaire commun serait appliqué aux autres dictionnaires.

Le but principal de la norme est de vérifier l'information, qui devrait être échangée parmi les acteurs dans le processus de construction. Le contrôle de la fiabilité de l'information partagée devient primordial avec la révolution numérique dans l'industrie de la construction et la démultiplication de la génération de données. Le dictionnaire utilisable pour tous doit permettre l'utilisation de l'information par tous les acteurs, leurs logiciels et leurs chaînes de production. Pour ces raisons, le contenu de ce dictionnaire sera validé par un collège d'experts, qui assurera la qualité des échanges dans le secteur de la construction. Cette norme expérimentale laisse un espoir que les informations relatives à l'économie circulaire et au réemploi figurent dans le dictionnaire.

1.3.2.7. Lien avec le PTNB (Plan de Transition Numérique dans le Bâtiment)

Le Plan Transition Numérique dans le Bâtiment (PTNB) 2015-2018 visait, entre autres, à expérimenter la norme XP P07-150 et à créer la plateforme Kroqi (échanges collaboratifs BIM) dont la gestion sera entièrement opérée par le CSTB. Le marché n'a été mené que sur la 1^{ère} tranche sur décision du PTNB qui a revu les modalités de développement autour de « POBIM », le développement de l'interface informatique de gestion des propriétés et la numérisation des règles. Le terme « Objet » adopté pour POBIM (Propriétés et Objets pour le BIM) au niveau du PTNB a eu un impact en augmentant les classifications. En effet, alors que la norme XP P07-150 parle de « groupe de propriétés », cette entité a été traduite en « modèles d'objets génériques ». Cette approche a aussi pour conséquence une focalisation des débats autour des problématiques de classifications ou au *Level of Information Needed (LOIN)*. La problématique « data », et surtout le transport d'une masse d'informations importante sont souvent mis en exergue comme un point d'attention qui est certes réel, mais hors du domaine d'application de

POBIM. A terme, un dictionnaire contenant 150 modèles d'objets génériques et 1 500 propriétés résultant d'un travail de consensus des experts a pu voir le jour.

Sur le plan environnemental le PTNB a cherché à encourager les acteurs du bâtiment à déployer la démarche BIM, afin de réaliser des évaluations énergétiques, environnementales, et économiques des bâtiments. Les différents retours d'expérience mettent en avant les principaux intérêts du BIM :

- La centralisation des données techniques ;
- Le calcul de l'impact environnemental plus en amont ;
- Une meilleure vision globale et holistique du projet ;
- Un gain de temps et de fiabilité ;
- La gestion de conflits et un gain en collaboration et interopérabilité.

La difficulté majeure, soulignée par l'ensemble des porteurs de projets, réside dans le caractère chronophage des processus, la nécessité de saisie manuelle et les problèmes de compatibilité entre la maquette numérique et les logiciels de calculs thermiques et d'ACV, qui sera développée dans la partie 1.4.1.2. Ces résultats démontrent le décalage entre les potentiels théoriques et les pratiques.

L'objectif général du PTNB était de massifier l'usage des méthodes numériques, en particulier celui de la maquette numérique et du travail collaboratif en BIM, pour tous les professionnels. Les actions ont rendu possible l'annonce du gouvernement d'un objectif de généralisation de l'usage du BIM pour les constructions neuves à l'horizon 2022 et pour lequel il redéploie désormais 10M d'€ affectés à ces plans pour mettre en œuvre le plan « BIM 2022 ».

1.3.3. Développements du BIM et potentiel pour le réemploi

La compatibilité avec les outils BIM devrait permettre de développer le concept de *DfReu*. Les sujets durables dans la pratique du BIM se sont considérablement multipliés ces derniers temps dans la littérature, Santos et al. [20]. Ainsi, il y a toujours un manque d'aide aux concepteurs pour les outils BIM principalement axés jusqu'à maintenant sur la visualisation et la prédiction d'estimations. Le BIM vise, dans la plupart des articles, à réduire la production de déchets de construction en proposant un cadre décisionnel, Won et al. [53], Liu et al. [54], Bilal et al. [55], mais les travaux futurs, tels que cette présente étude, doivent relier le BIM au sujet des déchets de construction, également pendant la phase de conception, afin de ne pas les générer. La littérature actuelle repose donc essentiellement sur des développements BIM pour le *DfD*.

1.3.3.1. Outil BIM-DfD, méthode et quantitatif des matériaux

L'article *BIM-based deconstruction tool : Towards essential functionalities*, Akinade et al. [47] de 2017, relève que, dans la littérature existante sur les pratiques et les outils *DfD* existants, il est apparu qu'aucun des outils n'était conforme aux standards BIM et que la mise en œuvre du BIM avait été ignorée pour les activités concernant la fin de vie (End-of-Life, EoL). Le plus souvent, ces outils se présentent sous la forme de plug-ins aux logiciels BIM existants pour étendre leurs fonctionnalités. Les auteurs ont enquêté auprès de professionnels de la construction et experts du BIM. Leur analyse thématique des réponses obtenues révèle que sept fonctionnalités BIM clés doivent être exploitées pour le *DfD* :

- Amélioration de la collaboration des différents acteurs (interopérabilité) ;
- Visualisation du processus de déconstruction ;
- Identification des matériaux récupérables ;
- Élaboration de plans de déconstruction ;

- Analyse des performances et simulation des alternatives de fin de vie ;
- Amélioration de la gestion en exploitation et du suivi de la vie du bâtiment ;
- Interopérabilité avec les logiciels BIM existants.

Par ailleurs, les auteurs confirment qu'il est souhaitable que la démolition soit remplacée par une déconstruction des bâtiments.

L'évolution proposée dans ce travail concerne la quantification des matériaux récupérables. Les informations sur les matériaux de construction pourraient être enrichies pour permettre la prévision de leur performance tout au long du cycle de vie. Cela permettrait donc au BIM d'être utilisé pour identifier les types de matériaux récupérables et leur quantité sur toute leur durée de vie. Lors de la conception, il est encouragé une phase « *Build-up* » de visualisation du processus de déconstruction qui aidera à élaborer un rapport d'audit de pré-construction approprié et à mettre en place des stratégies *in situ* pour les transports et la gestion des déchets localement.

Le BIM présente, selon les auteurs, le potentiel de générer des plans de déconstruction automatiquement à partir de paramètres de conception, ainsi que de générer des rapports tels que les rapports d'audit de pré-démolition et les rapports d'audit de pré-rénovation. Dans la pratique actuelle, ces aspects appartenant à la 4D du BIM, ne sont pas répandus dans les projets.

Enfin, les études de cas de cet article ont permis l'analyse des performances et la simulation d'alternatives de fin de vie. Cependant, la modélisation paramétrique n'a pas été utilisée pour visualiser le processus de déconstruction des bâtiments en phase de conception et avant la déconstruction proprement dite, ce qui laisse les conclusions au stade de recommandations. Les auteurs prédisent donc que l'utilisation du BIM pour l'analyse et la simulation du processus de déconstruction aidera à justifier les avantages environnementaux et économiques de la déconstruction. L'étude révèle également la nécessité d'explorer comment l'IFC pourrait être étendu pour permettre l'échange de données entre les outils DfD et le logiciel BIM.

1.3.3.2. Outil BIM-DfD pour évaluer le potentiel de démontabilité

Akinade et al. [56] ont développé un score d'évaluation de la déconstructibilité fondé sur le BIM (*A BIM based Deconstructability Assessment Score : BIM-DAS*) pour aider à déterminer la possibilité de déconstruire un bâtiment. Ce score met l'accent sur les critères permettant de faciliter la déconstruction, mais ne guide pas les concepteurs en matière de méthodologie.

Les performances résiduelles des éléments de construction sont encore insuffisamment évaluées et Akanbi et al. [37] fournissent des éléments supplémentaires avec un estimateur de performance sur toute la durée de vie (*A BIM-based whole-life performance estimator : BWPE*) fondé sur le BIM, qui prend en compte les critères de vieillissement des matériaux pour permettre leur réemploi. Les étapes de la méthodologie de cette étude sont les suivantes :

- Modéliser l'effet du temps et d'autres propriétés sur les performances de récupération des bâtiments ;
- Développer un système fondé sur le BIM pour prévoir les performances de récupération des bâtiments dès la phase de conception ;
- Tester le modèle en utilisant la conception d'études de cas de bâtiments réels.

Ce travail permet d'évaluer la performance de récupération des composants structurels des bâtiments dès la phase de conception. L'API, le langage de programmation Visual Studio et C # de Revit ont été utilisés pour réaliser l'intégration de la fonctionnalité BWPE au logiciel Revit. Cet outil BWPE a été pensé pour offrir aux concepteurs de bâtiments une opportunité de tester

différentes combinaisons de facteurs et d'examiner l'effet sur la performance de récupération des bâtiments. Une approche de modélisation mathématique a été adoptée pour développer le BWPE en utilisant les facteurs identifiés dans la distribution de la fiabilité de Weibull pour les produits manufacturés, qui font office de loi de vieillissement. Les résultats montrent que les structures en acier induisent des assemblages démontables et une préfabrication des matériaux, les rendant, pour la plupart, réutilisables. Parmi les autres facteurs qui influencent le réemploi des matériaux, les auteurs font allusion à l'utilisation de boulons et écrous au lieu de clous et de collage, privilégient les assemblages préfabriqués, et écartent au maximum les finitions secondaires, ainsi que les matériaux toxiques ou dangereux. Il est souligné également dans cette étude, l'importance de développer un profil de performance pour les bâtiments afin de connaître le meilleur moment pour obtenir une valeur de récupération optimale. Pour permettre l'évaluation de la performance tout au long de leur cycle de vie, les caractéristiques des composants du bâtiment doivent être suivies et prises en compte à tout moment. Cet outil sera donc utile au stade de la conception, pour identifier les types et les volumes de matériaux qui seront réutilisables, recyclables et ceux qui devront être envoyés à la décharge, et constitue une aide à l'exploitation-maintenance des bâtiments.

Néanmoins, il n'est pas possible de développer un modèle qui estime la performance de récupération de l'ensemble du système de construction, car chaque composant réagit en fonction de différents facteurs dont certains ne peuvent pas être mesurés de manière objective. Concernant les garanties légales et les performances résiduelles des matériaux de construction récupérés après plusieurs années d'utilisation, cette étude part du principe que le potentiel de récupération des composants du bâtiment peut être déterminé lors de la conception et que la qualité des matériaux est affectée uniformément avec le temps.

1.3.3.3. Développement Suez, BatiRIM

L'entreprise Suez a développé, en partenariat avec Resolving, une solution de déconstruction sélective des grands bâtiments nommée BatiRIM. Un nom « RIM » calqué sur l'acronyme BIM, qui signifie ici « *Ressource Information Modeling* ». L'outil digital, fondé sur la maquette numérique BIM, permet d'identifier et de quantifier les matériaux et produits issus des chantiers de rénovation ou de déconstruction, ce qui permet, avant même le lancement des travaux, d'évaluer leur potentiel de réutilisation ou leur besoin de recyclage. Les plans des édifices sont intégrés dans une interface, en 2D ou 3D, puis utilisés au moyen d'une tablette tactile.

1.3.4. Nécessaire traçabilité des matériaux

La préfabrication pourrait devenir une réelle garantie du produit qui le suivrait pendant toute la durée de sa vie, de ses vies. On peut imaginer d'introduire une puce, un composant, une carte d'identité dans le matériau préfabriqué. Les auteurs de *Cradle to Cradle* proposent également : « Nous pourrions encoder les informations concernant les différents ingrédients des matériaux dans une sorte de « passeport de sur-cyclage », Mc Donough, Braungart [57] que des scanners permettraient de lire, au bénéfice des générations à venir. » La technologie de puces RFID (par radio identification) pourrait s'adapter aux matériaux de construction. Ainsi à chacune de ses déconstructions, le matériau conserverait ses capacités structurelles initiales, l'information technique voyagerait avec lui. La précision et l'efficacité de la préfabrication sont aujourd'hui tellement abouties, qu'elles pourraient facilement garantir une efficacité matérielle à long terme. Il est souligné dans la littérature que les capacités du BIM à intégrer des

technologies telles que la RFID, les SIG, le Big Data, l'Internet des objets (IoT) et autres sont progressivement améliorées, Bilal et al. [58]. L'une des lacunes constatées pour faciliter le réemploi est la nécessité d'une traçabilité fiable. Le modèle BIM permet d'informer et de stocker des informations. En outre, le modèle numérique n'est pas suffisant pour assurer la durabilité et l'intégrité des données et doit être couplé à des dispositifs de traçabilité physique.

1.3.4.1. Gestion numérique des données bâtiments

Comme évoqué précédemment, la génération d'un grand nombre de données n'a de sens que si leur capitalisation est réalisée correctement et si leur analyse permet d'améliorer les processus pour diminuer les impacts environnementaux.

Upcyclea est un logiciel français de gestion circulaire des ressources qui propose la gestion des gisements et la transformation d'un bâtiment en banque de données, à travers différents processus :

- Le passeport circulaire ;
- La géolocalisation ;
- La nomenclature ;
- La gestion des stocks et des disponibilités ;
- Le contrôle qualité des données ;
- Le développement d'extensions API vers plateformes (BIM, SAP, etc.) ;
- Le suivi et la traçabilité de la matière.

Upcyclea SAS assure l'hébergement des données et utilise l'intelligence artificielle pour développer des algorithmes capables d'exploiter les descriptions semi-formelles saisies dans Upcyclea, ainsi que plusieurs critères de pertinence (Rentabilité économique, impact carbone...) et s'appuie sur les recommandations de l'EPEA et des principes de cradle to cradle.

Aux Pays-Bas, la Fondation Madaster encourage, stimule et supervise le développement et l'utilisation du Passeport matériau et propose des services similaires à Upcyclea mais à une échelle nationale voire internationale puisque ce projet a reçu le financement de l'Union Européenne Horizon 2020. Madaster a l'ambition de rendre l'information toujours plus structurée et accessible. La plateforme Madaster offre la possibilité d'héberger un certain nombre de données liées à un projet immobilier, mais également de les anonymiser pour servir à des recherches nationales. Les données d'un objet immobilier spécifique restent la propriété du propriétaire de l'immeuble. L'ensemble des données de la plate-forme est supervisé par la Fondation Madaster afin de garantir la confidentialité, la sécurité et la disponibilité publique des données (anonymes).

1.3.4.2. La traçabilité passive, puces RFID et QR Code

Des puces RFID peuvent être incorporées à l'intérieur des composants ou fixées à ceux-ci. Des codes-barres collés à la surface des éléments sont également des solutions de traçabilité, Cai et al. [13]. Il existe actuellement trois types d'étiquettes (ou puces) RFID disponibles : passives ; semi-passives ; et étiquettes RFID actives, Iacovidou et al. [59]. Les étiquettes passives en raison de leur simplicité, leur adaptabilité et leur résistance aux environnements difficiles ont un grand nombre d'applications génériques dans une variété d'industries et de secteurs. Elles ne possèdent pas de source d'alimentation et sont activées à l'approche d'un lecteur de puces.

En outre, rien ne garantit que les étiquettes RFID continueront à fonctionner après 20 ans d'utilisation, mais il est toutefois certain que les informations relatives aux propriétés d'un composant seront capturées périodiquement / ponctuellement, ce qui peut conférer une certaine confiance quant à leur utilisation. Certains détracteurs de cette technologie évoquent que le cuivre présent dans les étiquettes RFID peut nuire à certains processus (également de

recyclage, comme celui de l'acier). En usage, la plupart des composants des puces est encapsulée dans un matériau neutre comme du plastique.

360 Smart connect est une *start-up* française qui prévoit l'incorporation de puces RFID dans le béton avant ou pendant sa mise en œuvre. La puce RFID est autonome, potentiellement immortelle et l'énergie nécessaire à sa lecture est apportée par le lecteur. Les informations sont hébergées numériquement à distance. Ce béton connecté grâce au système NFC, permet :

- Une traçabilité intelligente, directement par smartphone grâce au système NFC ;
- Un porte-documents dématérialisé, reliant l'ouvrage à ses documents ;
- Une réception puis transferts de propriété au client ;
- Une balise reliant la pièce physique à l'élément fini de la maquette numérique ;
- Une maintenance, en prenant les consignes et en prouvant le passage.

Le fonctionnement proposé par la *start-up* est d'héberger un nombre considérable de données sur le cloud, mais la sécurité du système repose sur la fiabilité de l'hébergeur. Cependant il est possible d'encoder un nombre limité de caractère (environ 200) directement sur la puce et de façon irrémédiable ce qui permettrait de définir une nomenclature efficace des données pour le réemploi.

1.3.4.3. La traçabilité physique active : capteurs, IoT, monitoring prédictif

Les étiquettes RFID actives, du fait qu'elles possèdent leur source d'alimentation, ont une plage de lecture-écriture supérieure (5 à 30m) à celle des étiquettes passives (plage de lecture-écriture de moins de 2 m de long), mais sont plus chères que les étiquettes passives en raison de coûts de matériel et de fabrication plus élevés. En tant que telles, les étiquettes actives sont généralement appliquées dans des zones spécialisées où les coûts plus élevés et le niveau de détail des informations stockées sont justifiés (par exemple, pour localiser des actifs importants), Iacovidou et al. [59].

Bien que les puces RFID proposent une version active, il est préférable de se tourner vers les capteurs pour bénéficier d'une instrumentation complète d'un bâtiment. Les capteurs associés à l'*Internet of Things* (IoT) permettent de suivre l'évolution de l'élément au cours des années et d'alimenter la base de données en parallèle. L'IoT signifie l'Internet des Objets et concerne toutes sortes de technologies aussi bien pour l'automobile que pour le bâtiment. Le potentiel de l'IoT a initialement été décelé en vue de l'exploitation et de la maintenance intelligentes du bâtiment. Il a également une grande utilité en vue du réemploi en assurant un suivi exhaustif du comportement en œuvre d'une structure. L'intégration des données des capteurs dans le modèle BIM devrait contribuer à ce domaine innovant, Santos et al. [20], Veselka et al. [60], car il pourrait être doté d'une capacité de GPS et de localisation, Iacovidou et al. [59].

Le réemploi des éléments structurels nécessite de connaître tout leur historique notamment en termes de sollicitations spécifiques et de déformations subies. L'IoT a d'abord été mis en œuvre pour des applications en vue de la maintenance des ouvrages. Aujourd'hui il peut aider à une meilleure connaissance de la structure, avec par exemple :

- surveillance du comportement global de la structure ;
- marquage direct des matériaux permettant leur géolocalisation ;
- alerte de déformations en temps réel.

L'instrumentation-monitoring peut donc être facilement adaptée à des fins de réemploi. Les méthodologies de surveillance de santé structurale des ouvrages ou *Structural Health Monitoring* (SHM), renseignent sur le vieillissement des éléments et alimentent la mise à jour et la vérification des modèles de calcul. La solution *captae*[®] développée par le LERM setec offre une perspective intéressante pour équiper les bâtiments en construction. *Captae*[®] est une centrale miniaturisée d'acquisition et transmission sans fil, autonome en énergie, qui transmet des paramètres physiques propres à la structure auscultée : fissurométrie optique 3D, inclinométrie bi-axiale, accélérométrie vibrations 3D, en complément de fonctions résidentes (température, hygrométrie). Equipée d'interfaces analogiques et numériques compatibles avec les capteurs standards dans les domaines du génie-civil, de la géotechnique et de l'environnement, la solution proposée avec *captae*[®] permet également l'intégration de nouvelles fonctionnalités en fonction des besoins (piézomètre, tassomètre, extensomètre...), ce qui répond aux critères identifiés pour le suivi du comportement global de la structure en vue du réemploi de ses éléments.

Des approches prédictives actuelles sont déjà en place pour l'analyse prédictive et l'estimation des déchets, Bilal et al. [55]. KwokWai et al. [61] encouragent également le développement de la prévision, de la gestion et de la surveillance des impacts environnementaux de la construction de projets grâce au BIM. La surveillance est également prometteuse pour suivre et évaluer tous les changements pendant la phase de construction et leurs impacts environnementaux, dans la mesure où ils sont pris en compte dans la mise à jour de l'ACV en temps réel, Veselka et al. [60]. Les lignes directrices proposées dans notre travail relient les systèmes de traçabilité pertinents au réemploi des éléments porteurs.

Il ne faut pas négliger le problème de la mobilisation d'énergie pour le fonctionnement des serveurs nécessaires à la transmission des informations envoyées par les capteurs. L'objectif environnemental du réemploi ne peut écarter l'approche systémique du processus, c'est pourquoi les énergies secondaires pour mettre en place ce processus doivent être limitées au maximum.

1.3.5. Les banques de matériaux

Une fois le modèle BIM correctement établi et rempli, il faut capitaliser les données qu'il contient sur une base de données. Cette base de données permet de construire un vaste catalogue d'éléments constituant un bâtiment qui pourrait être mis à disposition pour un réemploi futur. Un unique article a exploré la création d'une banque de matériaux, Cai et al. [13] pour stocker les propriétés des matériaux ; plusieurs articles présentent l'intérêt d'un tel développement, Ilhan et al. [49] pour parvenir au réemploi. Dans le contexte d'une ancienne structure existante, une banque de matériaux ou de composants pourrait gérer plus efficacement leur réemploi direct. Brütting et al. [24] ont également affirmé qu'à l'avenir, une collaboration efficace entre les stocks d'éléments, les bases de données et un marché pour les éléments réutilisés faciliterait le processus de réemploi. Certaines études se focalisent donc sur la modélisation du stock existant (relevé et numérisation de bâtiments existants, extrapolation du parc immobilier du futur) et sur leur capitalisation vers une banque de données pour anticiper la mise à disposition de cette matière en vue d'une valorisation à long terme, comme l'expliquent Gepts et al. [62] et Ajayabi et al. [63].

Bien que la traçabilité soit déjà performante dans certains domaines, en particulier celui de la chaîne alimentaire, elle est encore sous-développée dans le domaine de la construction. Face à ce constat partagé, Oberti et al. [64] proposent un projet de plate-forme numérique de traçabilité « *Da.Ma.Tra (Material Traceability Database)* » fondée sur l'innovation ouverte, à disposition des acteurs de la construction.

Précédemment, le projet BAMB Horizon 2020, financé par l'Union européenne, a mis en évidence le concept de passeport de matériaux, en décrivant les données de composition des matériaux sous la forme de passeports numériques, [65]. Un travail, dans le cadre de BAMB par Heinrich et al. [66], a été réalisé pour lister les données globales (techniques, économiques, sanitaires, environnementales...) qu'il faudrait capitaliser dans ce passeport, mais ne détaille pas les attendus spécifiques sur les caractéristiques structurales. Nous prévoyons donc de préciser ces données propres au domaine structural dans le chapitre III. Certains auteurs vont plus loin en proposant les passeports sous forme de *blockchain*, comme Ganter et al. [67].

BAMB, a l'ambition de faire évoluer le secteur de la construction vers un modèle circulaire. Les partenaires de BAMB étudient les solutions techniques pour déconstruire et réutiliser les matériaux, conçus pour être réutilisés en tenant compte des caractéristiques du système actuel de construction, identifiant les obstacles et les opportunités, notamment pour implanter des passeports de matériaux et des protocoles de conception réversible de bâtiments. Plusieurs guides méthodologiques ont été produits autour des thématiques : *Materials Passports ; Reversible Building Design ; Circular Building Assessment ; Business models ; Policies and Standards*, etc. ; mais leur utilisation n'est pas encore généralisée.

Une banque de matériaux pourrait conduire à évaluer de nombreux ensembles de données simulées, et créer des statistiques entre les stocks de composants et les réemplois possibles afin de fixer de nouveaux principes de conception, Fivet [21]. La banque de matériaux peut également constituer une occasion d'établir la certification des matériaux et composants fournissant une assurance ou une garantie pour les propriétés critiques des matériaux et composants réutilisés, telles que la capacité de charge résiduelle, la capacité d'assemblage et le taux de dégradation potentiel. Cai et al. [13], recommandent que ce protocole crucial soit soutenu par la politique gouvernementale en certifiant les employés des banques de matériaux. Le gisement urbain existant peut alimenter une base de données à l'aide de relevés généralisés par drones, par photogrammétrie, par balayage laser et faciliter grandement l'accès des concepteurs à un large choix de matériaux réutilisables. Un développement pour une banque de matériaux pour le réemploi des éléments porteurs sera présenté dans le chapitre III.

Parallèlement, le problème des impacts environnementaux des données massives produites pour ces banques de matériaux et pendant la durée de vie des bâtiments en service apparaît. Des modèles BIM de plus en plus complexes nécessiteront une capacité de stockage d'informations plus importante car ils généreront des quantités énormes de données, en particulier avec la mise en place du suivi des composants, Wong et al. [68]. Par conséquent, le secteur de la construction, d'après la littérature, génère des données massives, principalement par le biais de modèles BIM, Wong et al. [68], jusqu'à nécessiter de l'ordre de 50 Go. Comme le nombre de données ne cesse d'augmenter, principalement en raison de l'utilisation de capteurs, et persiste au-delà de la fin de vie, ce phénomène devrait s'aggraver, conduisant à des sources de "*BigBIMData*" plus abondantes, Bilal et al. [55]. Selon Wong et al. [68], l'utilisation de la technologie BIM basée sur le cloud, contribuera à la création de « big data ». Le secteur du numérique étant responsable aujourd'hui de 4 % des émissions mondiales de GES et la forte augmentation des usages laissant présager un doublement de cette empreinte carbone d'ici 2025, d'après l'Ademe [69], un encadrement pour limiter la génération de données devrait être envisagé. Santos et al. [20] ont également abordé la question de la propriété intellectuelle, et l'absence de normes couvrant les droits des données partagées dans le cadre d'un projet BIM. Cela a également des répercussions en termes de responsabilités, notamment en ce qui concerne les assurances, comme abordé dans le chapitre 0 préliminaire et le chapitre III.

Ce travail s'efforcera de proposer une nomenclature contenant le nombre adéquat de données requises pour le réemploi des éléments porteurs.

1.4. L'évaluation environnementale du réemploi

Le réemploi se veut vertueux sur le plan environnemental puisqu'il vise à prolonger considérablement le cycle de vie de la matière. Le réemploi d'un élément permet d'éviter la fabrication d'un élément équivalent en neuf et donc contribue à lutter contre l'épuisement des ressources, à diminuer les émissions et à empêcher la génération de déchets. Cependant il est nécessaire d'évaluer ces pratiques d'un point de vue environnemental et notamment en utilisant la méthode d'analyse du cycle de vie (ACV). D'autres référentiels environnementaux permettent aussi d'évaluer des gains éventuels grâce au réemploi. La revue de la littérature permet de faire le point sur les recherches actuelles dans ce domaine.

1.4.1. Définitions et contexte ACV

1.4.1.1. Du bilan carbone à l'ACV

Dans le génie civil et le bâtiment, la part la plus importante des émissions de GES revient aux matériaux entrants, pendant la phase de construction, comme démontré dans l'introduction de ce mémoire. Dans le cadre du réemploi une attention particulière doit également être portée sur le processus de déconstruction afin d'évaluer si celui-ci est plus ou moins important que le processus de démolition et de comparer l'intégralité du poste chantier (construction, déconstruction, démolition) entre un bâtiment avec et sans réemploi.

Le bilan carbone et le bilan GES

Le bilan carbone est un outil estimant les émissions de gaz à effet de serre d'une structure ou d'un produit. Si le bilan carbone[®] a été initié par l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), il est devenu une marque déposée en 2011. Ce sont donc désormais les membres et adhérents de l'Association Bilan Carbone qui ont le monopole de l'utilisation de cette mesure d'empreinte écologique. Seules les personnes accréditées par l'association et utilisant les outils et la base officiels peuvent réaliser ces bilans. Le bilan carbone[®] n'est pas privilégié dans la communauté scientifique car il ne prend en compte qu'un indicateur, ce qui peut entraîner un déplacement de pollution, alors que l'ACV est beaucoup plus complète et prend en compte de nombreux indicateurs d'impacts, au-delà des gaz à effet de serre (GES). Le bilan carbone[®] ne doit pas être confondu avec le Bilan GES réglementaire issu des obligations contenues dans le décret N° 2011-829 du 11 juillet 2011 qui concerne certaines personnes morales de droit privé (entreprises, association, etc.).

Définition des GES

La quantité de GES (Gaz à effet de serre) émis est évaluée selon des « kilogrammes équivalents CO₂ », 1 kg eq CO₂ correspondant à la masse de dioxyde de carbone (CO₂) qui aurait le même effet sur le changement climatique sur une période de 100 ans. L'autre unité utilisée est le « kilogramme équivalent carbone » (kg eq C) avec 1 kg eq CO₂ = (44/12) kg eq C.

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) fixe et ajuste régulièrement les valeurs de potentiel de réchauffement global (PRG) afin de convertir les diverses émissions de gaz à effet de serre en unités comparables d'équivalent CO₂, lors des calculs globaux de sources et de puits. À la suite du protocole de Kyoto signé en 1997, les six gaz à effet de serre directs considérés sont ceux classés dans le Tableau I. 6. Il faut donc veiller à prendre en compte les dernières valeurs de PRG en vigueur.

Gaz	Durée de vie (années)	PRG selon la période considérée		
		20 ans	100 ans	500 ans
Dioxyde de carbone (CO ₂)	100	1	1	1
Méthane (CH ₄)	12	72	25	7,6
Oxyde nitreux (N ₂ O)	114	289	298	153
PFC-14 (tétrafluorure de carbone, CF ₄)	50 000	5 210	7 390	11 200
HFC-23 (trifluorométhane, CHF ₃)	270	12 000	14 800	12 200
Hexafluorure de soufre (SF ₆)	3 200	16 300	22 800	32 600

Tableau I. 6 : Durée de vie dans l'atmosphère et potentiel de réchauffement global des gaz à effet de serre (rapport du GIEC, 2007) [70]

D'autres gaz à effet de serre sont par ailleurs à considérer comme : les éthers fluorés (HFE) ; les CFC, Halon, HCFC, CCl₄, CH₃Br, CH₃CCl₃, soit les substances visées par le protocole de Montréal ; les Perfluoropolyéthers (PFPMIE) ; la vapeur d'eau. Cette dernière est le principal gaz à effet de serre mais seule une partie très infime de la vapeur d'eau atmosphérique est due aux activités humaines et elle reste peu de temps dans l'atmosphère. L'essentiel de la vapeur d'eau est donc responsable de l'effet de serre naturel, sans lequel la planète Terre aurait une température moyenne de -18°C, [71]. On la néglige donc dans la participation à l'augmentation de l'effet de serre, [72].

La méthode normalisée ACV

L'Analyse du Cycle de Vie est une méthode d'évaluation environnementale qui est particulièrement reconnue et appliquée. Quelques ouvrages de référence en expliquent la démarche : « Analyse du cycle de vie, Comprendre et réaliser un écobilan », Jolliet et al. [73] ou son application plus opérationnelle dans le cadre de projets de construction : « L'analyse du cycle de vie dans le bâtiment, Comprendre et réaliser une ACV », Lebert et al. [74]. Elle est encadrée par des normes ce qui la légitime davantage. Son approche systémique lui permet de fournir une étude globale et multicritère des impacts environnementaux aussi bien d'un produit que d'un bâtiment entier dans le cadre de la construction. La multitude des indicateurs d'impacts calculés permet d'éviter tout déplacement de pollution. L'ACV est aujourd'hui l'outil le plus abouti dans le domaine de l'évaluation environnementale.

Dans une démarche d'ACV des mesures sont faites afin de constituer les données environnementales scientifiques nécessaires au calcul. Cela implique de connaître chaque procédé de fabrication d'un produit, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à sa fin de vie et tout le processus de construction d'un bâtiment, jusqu'à sa fin de vie également.

Pour procéder à une analyse de cycle de vie on a recours à un inventaire de cycle de vie (ICV) qui prend en compte les flux de matières et d'énergies entrants et sortants à chaque étape du cycle de vie. Ensuite on évalue ces données et on calcule la contribution de chaque flux selon des coefficients préétablis pour obtenir les résultats par indicateurs d'impacts : l'effet de serre, l'épuisement des ressources non renouvelables, l'acidification de l'air, l'eutrophisation des eaux, etc. Enfin on en tire des conclusions afin de prévenir, limiter, diminuer les impacts environnementaux du sujet étudié. Un esprit critique et une grande rigueur sont requis pour établir et argumenter les choix des hypothèses retenues dans le modèle ACV.

Aujourd'hui quatre normes encadrent la réalisation d'une ACV appliquée au domaine de la construction :

- NF EN ISO 14040 (octobre 2006), Management environnemental-Analyse du cycle de vie-Principes et cadre ;
- NF EN ISO 14044 (octobre 2006), Management environnemental-Analyse du cycle de vie-Exigences et lignes directrices + Amendement A1 (février 2018) ;

- NF EN 15804+A1 (avril 2014), Contribution des ouvrages de construction au développement durable – Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction, à compléter avec NF EN 15804/CN (Juin 2016) et NF EN 15804+A2 (octobre 2019) - Déclarations environnementales sur les produits ;
- NF EN 15978 (mai 2012), Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Évaluation de la performance environnementale des bâtiments - Méthode de calcul.

La norme précise les quatre principales étapes d'une ACV, désignées dans la Figure I. 32.

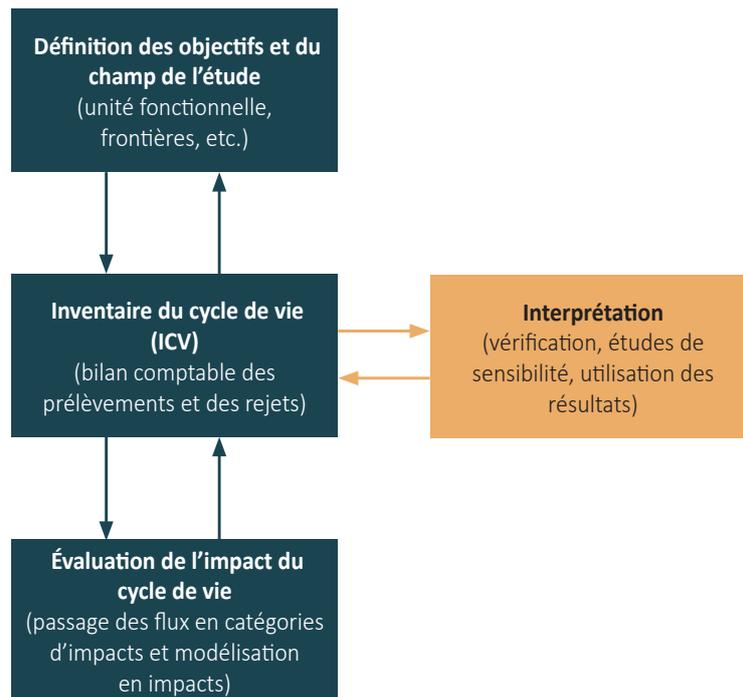


Figure I. 32 : Les 4 étapes de l'ACV selon les normes ISO 14040 et 14044.

Les différentes étapes sont explicitées dans l'ouvrage de Jolliet et al. [73] et reprises ci-après.

L'étape 1, « définition des objectifs et du système » doit permettre de définir la fonction et les limites du système (l'unité fonctionnelle commune des systèmes que l'on va comparer), la durée de vie, les différents scénarios à comparer.

L'étape 2, « Inventaire du cycle de vie » ou ICV, est l'étape clé de recueil des données où les quantités de matière, l'énergie consommée, les distances de transports, ... devront être recensées de façon rigoureuse et exhaustive. La fiabilité des données devra être appréciée et une incertitude pourra être éventuellement mise en place.

L'étape 3, « Analyse de l'impact », permet de justifier la méthode d'évaluation des impacts choisie, voire d'appliquer plusieurs méthodes en parallèle. Les résultats obtenus permettent de comparer des ordres de grandeur.

L'étape 4, « Interprétation », doit faire la critique de l'analyse menée à chaque phase et peut engendrer des analyses complémentaires d'incertitudes et de sensibilités pour vérifier l'influence d'un paramètre dans l'étude. On pourra également réinterroger le choix de la méthode d'évaluation et les catégories utilisées (intermédiaires ou dommages, cf. Figure I. 34).

Enfin, l'ACV, en tant qu'outil d'aide à la décision peut permettre d'orienter des propositions d'amélioration, de planification stratégique, de politique publique, mercatique, etc.

Les catégories d'impacts et les méthodes d'évaluation

A la fin de l'ICV en étape 2, nous obtenons les flux (extractions et émissions) de l'ensemble des matériaux et procédés de fabrication répertoriés.

En étape 3, ces flux sont ensuite multipliés à des facteurs de caractérisation qui dépendent de la méthode choisie. Dans le cadre de notre étude et du contexte industriel français dans lequel elle se déroule, nous appliquerons la méthode de la norme NF EN 15804+A1 [75] et la norme complémentaire NF EN 15804/CN. La Figure I. 33 récapitule les étapes 2 et 3.

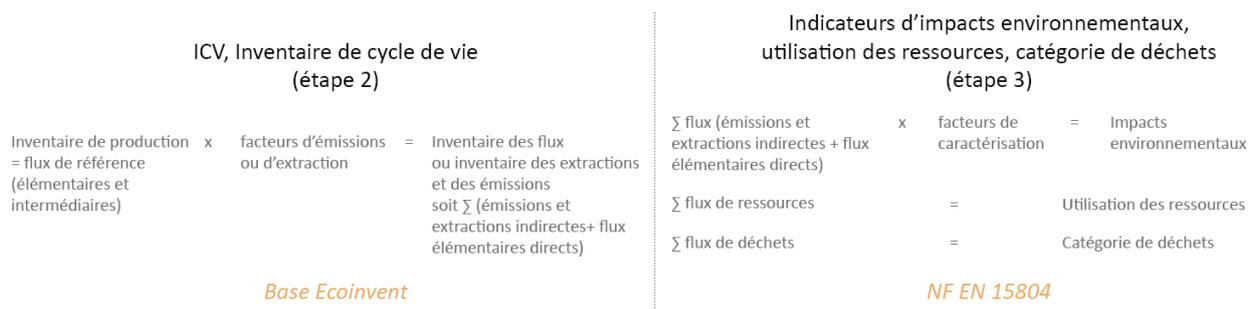


Figure I. 33 : Etapes 2 et 3 de l'ACV, avec choix de la base utilisée et de la méthode d'évaluation.

Plus globalement plusieurs méthodologies existent pour générer les résultats d'une ACV. Ces résultats peuvent être calculés grâce des catégories intermédiaires (impacts environnementaux) et des catégories de dommages qui vont différer selon la méthode sélectionnée. Les méthodes d'évaluation doivent donc être choisies en fonction des objectifs de l'étude. La Figure I. 34, extraite de l'ouvrage de Jolliet et al. [73] explicite le passage depuis les flux élémentaires recueillis lors de l'inventaire, aux catégories intermédiaires, puis aux catégories de dommages. Sur cette figure, les chemins des flèches pourront varier selon la méthode choisie.

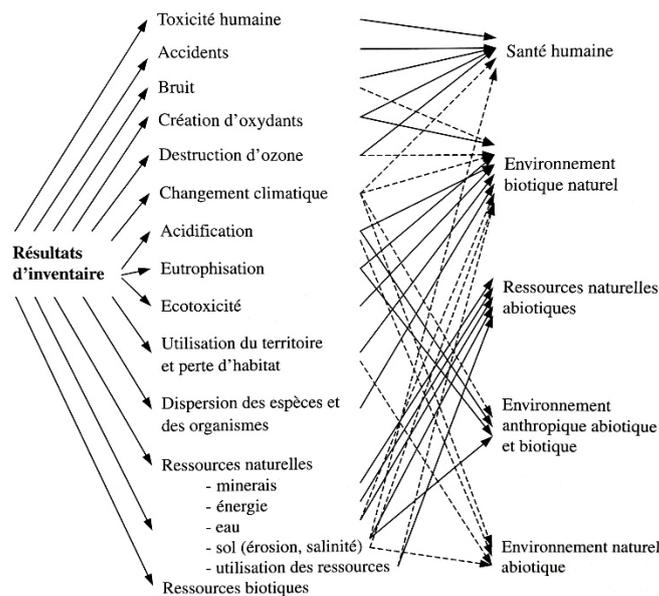


Figure I. 34 : Structure de l'analyse des impacts depuis les résultats d'inventaire du cycle de vie jusqu'aux catégories de dommages, Jolliet et al. [73]

Au dire d'experts internationaux, rapportés par B. Peuportier, les catégories d'impacts intermédiaires (*midpoint*) doivent être complétées par des catégories de dommages (*endpoint*). Les catégories *midpoint* reflètent les problèmes environnementaux connus susceptibles de générer des dommages à l'environnement, alors que les catégories *endpoint* concernent la protection de sujets (santé humaines, écosystèmes, etc.) et les dommages effectivement causés à l'environnement, comme rappelé par Lebert et al. [74]. Les résultats *endpoint* sont plus incertains mais les deux types de catégories sont nécessaires pour une analyse plus complète des différents impacts. Dans le chapitre V nous allons donc utiliser les catégories intermédiaires selon la NF EN 15804+A1/CN pour se conformer au contexte industriel français et nous utiliserons, en complément, une méthode avec des catégories dommages pour comparer les grandes tendances obtenues pour les différents indicateurs d'impacts.

Base de données française, les fiches FDES

En France, une base, encadrée au niveau national, a été mise en place. Il s'agit de la base INIES qui comprend ces données permettant d'associer à chaque quantité de produits, d'équipements, d'énergie, d'eau, des impacts environnementaux selon une unité de référence appelée « unité fonctionnelle ». Ces données environnementales peuvent être de quatre types :

- FDES (Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire) pour les produits de construction en France, ou les DEP (Déclarations environnementales des produits) au niveau européen ;
- PEP (Profil Environnemental Produit) pour les équipements ;
- MDEGD (Modules de Donnée Environnementale Générique par Défaut) établis par les Ministères qui doivent être utilisés pour les produits de construction et équipements en l'absence de FDES / DEP ou PEP adaptés ;
- DES (Déclaration Environnementale de Service) pour les procédés et les services (eau, énergie, traitement des déchets).

Les FDES sont soumises à obligation de vérification par tierce partie indépendante depuis le 1er juillet 2017. Ces vérificateurs sont habilités par le programme « FDES vérifiée INIES » ou « PEP ecopassport ». Aujourd'hui les données transmises sur la base INIES sont donc toutes vérifiées officiellement.

La norme NF EN 15804/CN précise qu'en France, on utilise couramment le terme de FDES qui regroupe à la fois la Déclaration Environnementale et des informations sanitaires pour le produit faisant l'objet de cette FDES. La FDES est donc bien une « DEP » complétée par des informations sanitaires. Les FDES cohabitent alors avec les DEP (Déclaration Environnementale Produit).

Pour les matériaux ou produits ne possédant pas de déclaration environnementale, des données génériques ont été créées par l'Etat : les MDEGD (Module de Donnée Environnementale Générique par Défaut). Ces données sont défavorables aux produits pour inciter fortement les industriels de ces filières à réaliser leur propre ACV détaillée des produits manufacturés.

En l'absence de certaines données sur la base INIES, il existe des configurateurs développés par certains groupements d'industriels qui peuvent être utilisés ainsi, dans le cadre E+C- (1.4.2.1) :

- BEtie (Syndicat National du Béton Prêt à l'Emploi) ;
- SAVE (Solutions Acier Valeurs Environnementales) ;
- DE-bois (acteurs de la filière bois) ;
- Environnement IB (CERIB, éléments préfabriqués en béton) ;
- PepinBio, aKacia (Karibati, produits biosourcés).

En complément, le groupe de travail de l'AFGC (groupe DIOGEN pour Données d'Impact pour les Ouvrages de GENie civil), inclut des laboratoires, fabricants, entreprises de construction et ingénieries, et travaille à la mise au point d'une base de données spécifique aux ouvrages d'art.

Dans le domaine de la recherche, la base internationale suisse, Ecoinvent, est la plus reconnue.

A noter que la NF EN 15804+A1/CN est la méthode imposée pour établir les FDES/DEP des produits de construction, vérifiées puis regroupées sur la base nationale INIES. Ainsi cette base dispose de données françaises issues des industriels français. Cependant à ce jour cette base est critiquée, d'une part par les maîtrises d'œuvre sur projet, et d'autre part par la communauté scientifique, car elle présente des manques puisque tous les produits de construction ne font pas encore l'objet d'une déclaration, que les résultats présentés sont figés (pas d'accès à l'ICV, pas de possibilité de reprendre le calcul) et que les indicateurs de la NF EN 15804+A1 sont parfois remis en cause. Néanmoins, nous adopterons la NF EN 15804+A1, dans le contexte de notre étude qui se situe dans le cadre industriel français, contraint par l'application de la norme.

1.4.1.2. Outil BIM pour l'ACV

Plusieurs articles dans la littérature développent la relation entre BIM, LODs, et LCA, Röck et al. [76] [77] et également la 6D BIM (couvrant les données environnementales relatives au développement durable), Ganter et al. [67] avec des répercussions sur la façon de structurer l'inventaire du cycle de vie (ICV) et d'utiliser les ensembles de données de l'ACV. En comprenant les limites de ces flux de données BIM pour réaliser une ACV, deux catégories principales des pratiques actuelles se distinguent. Il s'agit d'une part des informations géométriques extraites du modèle (nomenclature, type de matériau) qui impliquent un logiciel ACV spécialisé, et d'autre part des données ACV spécifiques contenues directement dans le modèle avec un plugin ACV directement inclus dans le logiciel BIM, Shahmir Nizam et al. [78]. Trois stratégies principales ont été développées dans la littérature, selon Wastiels et al. [79] : réaliser une ACV à partir d'un logiciel dédié (saisie des données), d'un logiciel BIM (plugin ACV intégré, extraction automatique des données), d'un facilitateur externe comme une plateforme web (extraction automatique des données BIM et importation automatique des données ACV). Les différentes méthodes sont synthétisées en Figure I. 35. Les *workflows* permettant au BIM d'exporter les données d'entrée pour le logiciel d'ACV relient le BIM et l'ACV. Il est reconnu que la connexion BIM-ACV n'est pas encore optimale, Figl et al. [80]. La littérature souligne la complexité de la gestion, entre les exigences précises en matière de données et les estimations simplifiées nécessaires aux premiers stades d'un projet, Di Bari et al. [81], Cavalliere et al. [82], [83]. Certaines études tentent d'aborder ces questions en fournissant des méthodes comme première approche pour obtenir des résultats d'ACV avec peu de données [82].

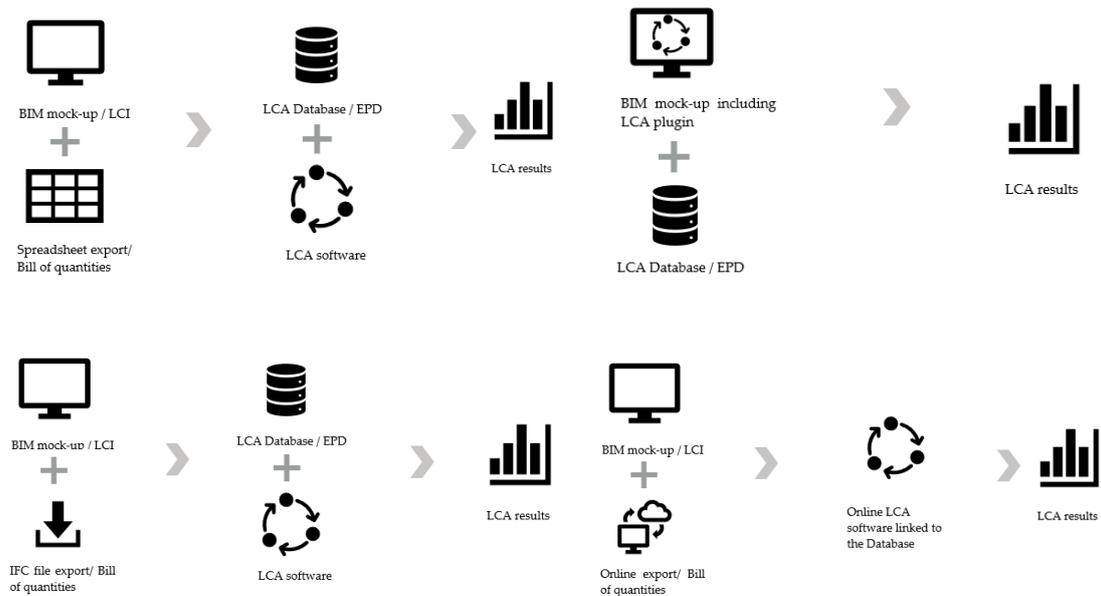


Figure I. 35 : Synthèse des différentes stratégies de calcul ACV depuis un modèle BIM

De rares articles ont travaillé à relier le BIM 6D et l'ACV et à affiner les données environnementales attachées aux objets BIM pour faciliter l'extraction des données alimentant le logiciel d'ACV, Figl et al. [80]. Le BIM 6D peut ainsi aider à établir le cadre pour guider le spécialiste ACV ou le modélisateur à remplir correctement le modèle numérique et à gagner du temps lors de l'exécution des données. Cependant, la plupart des documents sur les méthodes d'ACV basées sur le BIM ne précisent pas les LOD correspondant aux différents niveaux de détails de l'ACV dans les études de cas, Cavalliere et al. [82] [83]. Pour parvenir au réemploi, il faut fournir et intégrer les informations BIM nécessaires pour simuler le processus de montage et de démontage, comme un plan de déconstruction Akinade et al. [17] et les propriétés des matériaux permettant de réaliser une ACV, Najjar et al. [84]. En effet, l'ACV exige de la rigueur et des données complètes obtenues à un stade avancé du projet, alors que les ingénieurs ont besoin d'une ACV simplifiée dans les premières étapes, lorsqu'il est encore possible de modifier les choix de conception influençant l'impact environnemental avec un faible LOD dans le modèle BIM. Cette différence de précision peut affecter les résultats obtenus avec des quantités souvent plus élevées surestimées dans les premières étapes (faible LOD 200) et une réduction générale des impacts obtenus avec des quantités affinées dans la phase avancée du projet (LOD 350 et plus), Nilsen et al. [85], Cavalliere et al. [83]. Il est préférable de réaliser une ACV comparative pour un LOD et une phase donnés, car le résultat final est discutable.

De nombreux outils et cadres méthodologiques visant à améliorer le flux de travail et l'interopérabilité ACV-BIM ont été développés pour permettre une évaluation plus rapide et plus efficace, Forth et al. [50], Shadram et al. [86], mais ils se limitent à l'échange de données et ne tiennent pas compte de la capacité du concepteur à modifier le dimensionnement et ne proposent aucune option de conception pour réduire l'impact environnemental. Cependant, Wastiels et al. [79] prennent également en compte le BIM-ACV pour donner un retour d'information en temps réel sur les décisions de conception. Automatiser l'intégration des données BIM dans les logiciels d'ACV et faciliter l'extraction des attributs des objets BIM permet la mise à jour des données lorsque la conception du projet change en évitant deux opérations de mise à jour (logiciel BIM puis logiciel d'ACV) pour n'en garder qu'une seule (logiciel BIM) jusqu'à la mise à jour en temps réel des caractéristiques.

1.4.2. Référentiels environnementaux

Les labels français E+C-, HQE, BBCA sont les principaux recherchés par les maîtres d'ouvrages. Nous allons les présenter en précisant la prise en compte du réemploi.

1.4.2.1. Label E+C-

Objectifs tester et anticiper la future réglementation

Afin de préparer les exigences de la future réglementation RE2020 de la construction neuve et permettre au secteur du bâtiment de s'approprier ces nouveaux enjeux, les pouvoirs publics ont mis en place l'expérimentation fondée sur le référentiel « Energie-Carbone », ou encore E+C-, élaboré en concertation avec tous les acteurs de la construction pendant plus d'un an. Pour les bâtiments neufs, la lutte contre le changement climatique doit s'articuler autour de deux grands axes :

- La généralisation des bâtiments à énergie positive ;
- Le déploiement de bâtiments à faible empreinte carbone tout au long de leur cycle de vie, depuis la conception jusqu'à la démolition.

Le réemploi s'inscrit donc dans l'axe du bâtiment à faible empreinte carbone puisqu'il permet de lutter contre l'épuisement des ressources naturelles et propose un exutoire vertueux en fin de vie, réduisant drastiquement les émissions de GES (par soustraction des besoins identiques en neuf).

Cette expérimentation est en majeure partie calquée sur les exigences du référentiel HQE performance. Le référentiel « Energie-Carbone » s'appuie aussi sur la RT 2012 qui sert de référence pour la consommation énergétique des usages réglementés, et il s'enrichit en intégrant les usages énergétiques non réglementés et donc les impacts environnementaux des bâtiments sur leur cycle de vie avec leurs émissions de gaz à effet de serre en imposant l'utilisation des données des matériaux de la base INIES.

Elle permet à tous les acteurs volontaires de la construction de s'impliquer dans de nouveaux modes de conception et d'évaluation, et de bénéficier par la même occasion d'un retour d'expérience et d'une montée en compétence sur le sujet. En effet, l'approche en cycle de vie constitue une méthodologie innovante qui sera généralisée dans la future RE2020. Le retour d'expérience E+C- permettra de déterminer quels sont les niveaux d'ambition atteignables techniquement et soutenables économiquement dans la future réglementation des bâtiments neufs.

Les différents niveaux atteignables

Le référentiel « Energie-Carbone » fixe des niveaux pour évaluer le projet sur deux aspects : 4 niveaux Energie et 2 niveaux Carbone, détaillés en Figure I. 36. Ces deux indicateurs correspondent respectivement au bilan énergétique du bâtiment sur tous ses usages (Bepos) et aux émissions de gaz à effet de serre émis par le projet (Eges) sur son cycle de vie. Le réemploi est donc concerné par les « niveaux » carbone qui prennent en compte les impacts depuis l'extraction de la matière première jusqu'à la fin de vie, basés sur deux indicateurs :

- Eges : Indicateur des émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie.
- Eges PCE : Indicateur des émissions de GES de produits de construction et des équipements utilisés.

Le résultat attendu est la comparaison avec des niveaux-seuils : $Eges \leq Eges_{max}$ & $Eges_{PCE} \leq Eges_{PCEmax}$.

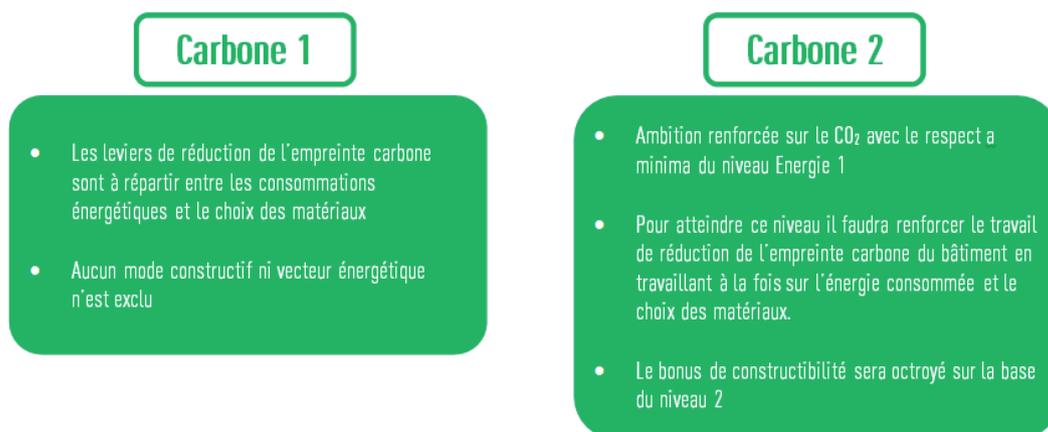


Figure I. 36 : Niveaux de performance relatifs aux émissions de gaz à effet de serre pour le label E+C-, selon l'expérimentation « Bâtiment à énergie positive & réduction carbone » ².

Retours des MOA :

Un maître d'ouvrage (MOA) peut choisir le couple d'indicateurs adaptés à son cas de figure pour expérimenter et obtenir son label : par exemple un niveau « Énergie à 2 » et un niveau « Carbone à 1 ». Aujourd'hui sur 1 141 bâtiments évalués en mars 2020, seuls 122 ont atteint le niveau C2 et un unique bâtiment a réussi à cumuler les niveaux C2 et E4 [11].

Des outils ACV compatibles E+C-

La liste des logiciels autorisés pour le calcul de la performance environnementale (indicateur Eges) est mise à disposition et certains d'entre eux assument également le calcul des consommations d'énergie (indicateur Bepos) : ClimaWin de BBS Slama, OneClick LCA de Bionova Ltd, ELODIE du CSTB, Pleiades ACV de IZUBA énergies, ThermACV des Logiciels PERRENOUD, Béa de Bastide Bondoux, ArchiWIZARD de Graitec Innovation, Vizcab de Combo Solutions et COCON d'Eosphère. Tous ces outils sont basés sur une approche d'analyse de cycle de vie et proposent parfois des compatibilités avec les maquettes BIM pour extraire directement les quantités de matière modélisées.

Cas du réemploi dans la certification

Plusieurs dispositions du calcul des Eges et Eges PCE sont défavorables au réemploi. Le périmètre d'études est notamment celui du permis de construire avec une période d'étude de référence (PER) du cycle de vie préalablement déterminée. Pour tous les bâtiments, il s'agit d'une donnée conventionnelle prise égale à 50 ans. Cette restriction temporelle empêche la prise en compte des réutilisations futures (ou passées) des matériaux de réemploi. Les données d'entrée concernant les produits étant nécessairement issues de FDES/ DEP, il sera impossible d'entrer l'impact d'un produit de réemploi dans le calcul.

1.4.2.2. BBKA

L'association BBKA, à l'origine du label BBKA, a pour objectif de :

- Faire prendre conscience de l'urgence à diminuer l'empreinte carbone des bâtiments ;
- Développer la connaissance sur le bâtiment bas carbone ;

² <http://www.batiment-energiecarbone.fr/niveaux-de-performance-a88.html>, consulté le 20/05/2017.

- Valoriser les bonnes pratiques : le label BBCA ;
- Inciter à construire « bas carbone ».

Le label BBCA comprend un référentiel indiquant et encourageant le niveau « bas carbone » d'un bâtiment. Contrairement au label E+C-, il n'est pas issu d'une démarche encadrée par l'Etat. Le label BBCA différencie le neuf et la rénovation avec deux labels distincts. Ce référentiel a également le mérite de reconnaître le réemploi et d'en assumer les manques malgré un impact environnemental très prometteur. Ainsi l'indicateur « économie circulaire », dont nous allons expliciter le calcul un peu plus loin, précise davantage les démarches vertueuses que le label E+C-.

Le label BBCA atteste de l'exemplarité d'un bâtiment en matière d'empreinte carbone. Pour cela le parti pris du label concerne les émissions pendant la phase de construction du bâtiment qui sont, pour les bâtiments neufs, plus élevées que celles en exploitation, le retour d'expérience HQE performance indique une répartition 60% en construction et 40% en exploitation, d'après la Figure 8 de l'introduction générale. Il comprend également, comme E+C- : toutes les consommations d'énergie du bâtiment sur la phase exploitation (postes RT et hors RT), ainsi que la consommation d'eau, le chantier, et les matériaux et produits de construction.

Les différents niveaux atteignables

Le Référentiel BBCA est un référentiel monocritère, élaboré par la Commission technique BBCA et le CSTB qui en est le garant scientifique, qui mesure l'empreinte carbone du bâtiment. Le label BBCA repose sur des seuils de référence maximum d'émissions carbone à partir desquels on évalue les émissions évitées qui s'expriment en kg équivalent CO₂/m² de surface de plancher. Le label BBCA compte trois niveaux de performance :

- BBCA standard : est attribué aux bâtiments qui font de réels efforts de limitation de leurs émissions globales tant sur la phase construction que sur l'exploitation et qui peuvent intégrer le stockage carbone dans leurs systèmes constructifs.
- BBCA performance : valorise les bâtiments qui font des efforts supplémentaires par rapport à BBCA Standard sur la construction et l'exploitation. Des points Innovation Climat contribuent également à atteindre ce niveau
- BBCA excellence : valorise les bâtiments qui font des efforts particulièrement importants et vont au-delà du niveau BBCA performant. C'est l'excellence en termes de Construction Bas Carbone.

Données nécessaires pour le calcul

Pour chacun des lots identifiés (répondant à la définition E+C-), il est attendu de la part du modélisateur que 100% des produits et équipements de construction soient modélisés à l'aide de l'un des logiciels reconnus par l'expérimentation E+C-. Tous les quantitatifs des produits et équipements de construction doivent pouvoir être vérifiés par DPGF du projet candidat. Leur calcul repose principalement sur une Analyse du Cycle de Vie (ACV) et il est conforme à la méthodologie du référentiel E+C-. Le score BBCA est calculé sur la base de quatre indicateurs divisés en deux catégories, selon la répartition suivante :

- Catégorie 1, Emissions évitées et stockage carbone :
 - Construction raisonnée,
 - Exploitation maîtrisée,
 - Stockage carbone.
- Catégorie 2, Innovation climat :
 - Economie circulaire.

La catégorie 1 concerne les émissions de Gaz à Effet de Serre évitées et le stockage carbone. L'indicateur construction raisonnée couvre les émissions de gaz à effet de serre liées à la construction (mixité intelligente des matériaux, sobriété de la conception...), l'entretien (selon une exploitation avec une énergie faiblement carbonées, ENR...), le renouvellement et la fin de vie du bâti et des systèmes. L'indicateur exploitation maîtrisée couvre les émissions de gaz à effet de serre liées aux consommations d'énergie tous usages du bâtiment en phase d'exploitation. Le Stockage Carbone valorise le carbone biogénique, directement capté dans l'atmosphère par le produit bio-sourcé et stocké dans le bâtiment, c'est un levier clef de la neutralité carbone.

La catégorie 2, bénéfique au réemploi, contrairement au référentiel E+C-, est nommée « Innovation Climat » et repose sur un indicateur Économie Circulaire qui est évalué au travers de la prise en compte, à la fois quantitative et qualitative :

- De la déconstruction sélective ;
- Du réemploi de produits lors de la construction ;
- De la mutualisation des espaces ;
- Du potentiel de changement d'usage du bâtiment ;
- Du potentiel d'extension du bâtiment.

Le score total du projet BBCA est égal à la somme des points « émissions et stockage carbone », et des points « innovation climat » (limités à 10 points maximum).

Cas du réemploi dans le label

Comme nous l'avons vu, des points « innovation » complètent l'évaluation BBCA. Le label BBCA met donc l'accent sur des champs d'innovation à potentiel et déterminants dans une démarche d'écoconstruction, en particulier le réemploi. Le périmètre reste, comme pour E+C-, celui du permis de construire avec une période limitée à 50 ans, mais il prend également en compte la déconstruction d'un bâtiment préexistant à la construction neuve présent sur la parcelle.

Pour valoriser le réemploi, le label BBCA compte des points innovation en calculant la masse de produits de construction réemployés divisée par la surface de plancher. Il est attribué un point BBCA pour 5kg /m² SDP de matériau réemployé :

$$\text{Point ec reemploi} = \frac{\text{masse de produits de construction réemployés}}{\text{SDP} * 5}$$

Pour justifier du caractère réemployé des produits de construction et équipements, le mode de preuve pourra être un bordereau de suivi du produit attestant de son origine et de la mise en œuvre réelle sur le chantier.

Pour la déconstruction sélective, permettant, à terme, le réemploi des matériaux, un point BBCA est attribué pour sa mise en place sur le chantier. Ce point est attribué si un **diagnostic ressource** a été réalisé, et si les exigences spécifiques à la dépose méthodique ont été intégrées dans le DCE de l'entreprise de déconstruction/curage. On peut donc considérer que l'attribution de ce point est plutôt qualitative alors que les autres points sont attribués selon une prise en compte quantitative (masse, m²).

1.4.2.3. HQE-GBC, certification HQE

L'Alliance HQE-GBC est l'alliance des professionnels pour un cadre de vie durable. Elle réunit syndicats, fédérations professionnelles, sociétés, collectivités et professionnels à titre individuel autour de projets de bâtiments, d'aménagements et d'infrastructures à toutes les étapes de leur cycle de vie : construction, exploitation, rénovation. Elle est le membre français

du *World Green Building Council* (World GBC), association mondiale regroupant des professionnels engagés dans la construction durable dans plus de 74 pays.

Les critères d'évaluation

La Qualité Environnementale du Bâtiment (QBE) selon HQE se structure, en 14 cibles (ensembles de préoccupations), que l'on peut regrouper en quatre thèmes :

- Énergie
 - Cible n°4 : Gestion de l'énergie
- Environnement
 - Cible n°1 : Relation du bâtiment avec son environnement immédiat
 - Cible n°2 : Choix intégré des produits, systèmes et procédés de construction
 - Cible n°3 : Chantier à faible impact environnemental
 - Cible n°5 : Gestion de l'eau
 - Cible n°6 : Gestion des déchets d'activités
 - Cible n°7 : Maintenance et Pérennité des performances environnementales
- Confort
 - Cible n°8 : Confort hygrothermique
 - Cible n°9 : Confort acoustique
 - Cible n°10 : Confort visuel
 - Cible n°11 : Confort olfactif
- Santé
 - Cible n°12 : Qualité sanitaire des espaces
 - Cible n°13 : Qualité sanitaire de l'air
 - Cible n°14 : Qualité sanitaire de l'eau

Les quatre thèmes de la QEB sont évalués chacun sur une échelle de 0 à 4 étoiles. Seul le thème 2 concerne le réemploi des matériaux. Ce thème 2 « Environnement » permet d'obtenir jusqu'à 4 étoiles selon le calcul sur la somme des cibles « Environnement » (cibles 1, 2, 3, 5, 6 et 7) du référentiel de certification.

Cas du réemploi dans l'évaluation

Pour la cible n°2, qui prend en compte la « Démontabilité / séparabilité des produits et procédés de construction en vue de la gestion optimale de leur fin de vie », il s'agit de mettre en œuvre des produits et procédés constructifs permettant une gestion environnementale optimale de leur fin de vie. Par exemple, favoriser au maximum, dans un cadre économique acceptable : **la réutilisation, le réemploi**, le recyclage, la valorisation, etc. aussi bien pour les matériaux de second œuvre que de gros œuvre. L'enfouissement des produits et procédés constructifs ne devant être par exemple qu'une solution par défaut. Les modes de preuve, concernant les sujets techniques du réemploi sont les suivants :

Niveau PERFORMANT :

- Audit Programme :
 - Note justificative sur la séparabilité a minima de 50% (en surface) des produits de second œuvre hors structure, enveloppe et équipements techniques, ainsi que sur leur démontabilité (suivant stade d'avancement de l'opération).
- Audit Conception :
 - Note justificative sur la séparabilité a minima de 50% (en surface) des produits de second œuvre hors structure, enveloppe et équipements techniques, ainsi que sur leur démontabilité (suivant stade d'avancement de l'opération).
 - CCTP.

- Audit Réalisation :
 - Note justificative sur la séparabilité a minima de 50% (en surface) des produits de second œuvre hors structure, enveloppe et équipements techniques, ainsi que sur leur démontabilité (suivant stade d'avancement de l'opération)
 - DOE, Fiches techniques des produits de second œuvre

Niveau TRES PERFORMANT :

- Audit Programme :
 - Note justificative / Présentation du procédé constructif (les procédés constructifs) mis en œuvre
 - Notice de déconstruction du bâtiment et diagnostic relatif aux déchets issus de la démolition de bâtiments
- Audit Conception :
 - Idem programme et :
 - CCTP lots architecturaux, CCTP décrivant le(s) procédé(s) constructif(s).
- Audit Réalisation :
 - Idem conception et :
 - DOE, Fiches techniques des produits.

L'attribution du label repose donc sur une démarche qualité relative au développement durable, ce qui permet d'intégrer des critères tels qu'une meilleure gestion des ressources, y compris pour la construction. De ce fait, l'attribution repose sur l'organisme certificateur et le principe de cibles induit une évaluation qualitative, qui peut être moins bien anticipée par la maîtrise d'œuvre qu'avec un système de calcul de critères plus efficaces à partir de masse de matériaux mis en œuvre ou de surface construite. Ce mode d'évaluation est néanmoins bénéfique au réemploi, notamment pour la prise en compte de critères difficilement quantifiables comme la démontabilité.

1.4.2.4. Certification BREEAM

BREEAM est une méthode d'évaluation des performances environnementales des bâtiments développée par le *Buiding Research Establishment (BRE)* en Angleterre et un standard de référence en termes de construction durable. Le référentiel comprend 10 catégories de problématiques environnementales : gestion, bien-être et santé, énergie, transport, matériaux, eau, déchets, paysage et écologie, pollution, innovation. Le référentiel BREEAM comprend un système de pondération de ces catégories comme: Matériaux 12,5% ou Déchets 7,5%. On retiendra, en particulier, les outils d'évaluation de méthodes, produits et matériaux de construction, qui concernent des éléments potentiellement issus d'un réemploi. Le référentiel BREEAM comprend donc un volet « Matériaux, déchets, utilisation des sols et écologie » qui prévoit :

- La réalisation d'une ACV des matériaux utilisés qui seront analysés sur les critères environnementaux et sur toute leur durée de vie pour permettre une analyse environnementale globale de l'ouvrage
- La mise en place de mesures pour limiter les dégradations de l'ouvrage

La note finale est classée en catégories : *Unclassified, Pass, Good, Very Good, Excellent, Outstanding*. La méthode d'évaluation est plus complexe et dépend en grande partie de l'organisme certificateur. Cette méthode paraît plus difficilement abordable par les concepteurs qui devront être accompagnés d'experts pour les conseiller. L'effort réalisé pour mettre en œuvre le réemploi pourrait alors être moins bien valorisé avec cette certification qu'avec celles précédemment présentées.

1.4.2.5. Certification Leed

Il s'agit du programme nord-américain de standardisation des bâtiments de haute qualité environnementale créé en 1998 par l'US Green Building Council (USGBC). Il existe plusieurs outils : *LEED for New Construction and Commercial Interiors* utilisé pour les constructions neuves et *LEED for Existing Buildings : Operations & Maintenance (EBOM)* dédié aux bâtiments existants. La certification *LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)* est la plus diffusée dans le monde. Cette certification *LEED* a pour objectif de promouvoir les bâtiments écologiques et de réduire leurs impacts environnementaux lors de leur construction et pendant leur exploitation. Les critères de labellisation du label *LEED* comportent de nombreuses évaluations dans ces domaines :

- Aménagement écologique des sites, gestion des eaux pluviales, transport alternatif, perturbation minimale du terrain, diminution de la pollution lumineuse ;
- Gestion efficace de l'eau : aménagement paysager nécessitant peu d'eau, technologies innovatrices en matière d'eaux usées, réduction de la consommation d'eau ;
- Énergie et atmosphère, optimisation de la performance énergétique, systèmes d'énergie renouvelable, énergie verte, élimination des CFC et halons ;
- Matériaux et ressources, réutilisation du bâtiment, gestion des déchets de construction, contenu recyclé, matériaux locaux, bois certifié ;
- Qualité des environnements intérieurs : contrôle du CO₂, ventilation plus efficace, matériaux à faible émission, maniabilité des systèmes, confort thermique ;
- Innovation et processus de design.

Le label *LEED* prend certainement mieux en compte le réemploi que *BREAM* ou *HQE*. Cela peut s'expliquer puisque *LEED* est principalement utilisé aux États-Unis, où existe une culture assez forte du réemploi, avec un secteur développé pour la récupération de bois massif.

Tous ces référentiels ont un intérêt pour comprendre les différents périmètres d'études considérés. Ainsi l'ensemble des référentiels propose globalement un panel quasi exhaustif pour évaluer les impacts environnementaux du réemploi mais aussi la réemployabilité d'un projet. Ces périmètres permettront donc de mieux préciser celui de notre étude ACV réalisée dans le chapitre IV. Ces référentiels révèlent aussi la part de subjectivité pour évaluer le réemploi dont certains aspects sont d'ordre qualitatif. De ce point de vue, il sera probablement judicieux de compléter une étude ACV par une évaluation de réemployabilité prenant en compte ces critères plus qualitatifs.

1.4.3. Les premières tendances de résultats

Comme relevé précédemment, la plupart des recherches jusqu'à maintenant, se sont focalisées sur le taux de recyclage plutôt que sur le réemploi, selon Hopkinson et al. [16]. Shahmir et al. [78] montrent par ailleurs dans leur article de revue, les difficultés pour réaliser le recueil de données dans le cadre d'une ACV abordant le réemploi, notamment pour la prise en compte du transport et de la phase de construction et déconstruction. Malgré le manque d'études de cas dans la littérature, plusieurs organismes reconnus ont publié des résultats d'ACV, fondés certainement sur leur propre base de données internes, permettant d'obtenir les

ordres de grandeurs des impacts environnementaux selon les principales familles de contributeurs dans la construction.

Ainsi *The London Energy Transformation Initiative (LETI)*, a publié à travers son guide [87], l'impact des bâtiments commerciaux en Figure I. 37 et des bâtiments résidentiels en Figure I. 38 selon le découpage correspondant aux modules proposés dans la NF EN 15804+A1.

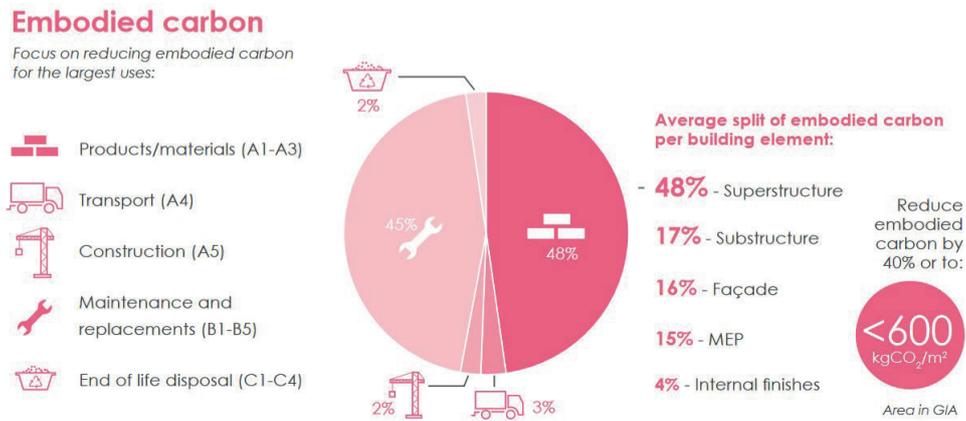


Figure I. 37 : Commercial offices, Area in GIA LETI [87]

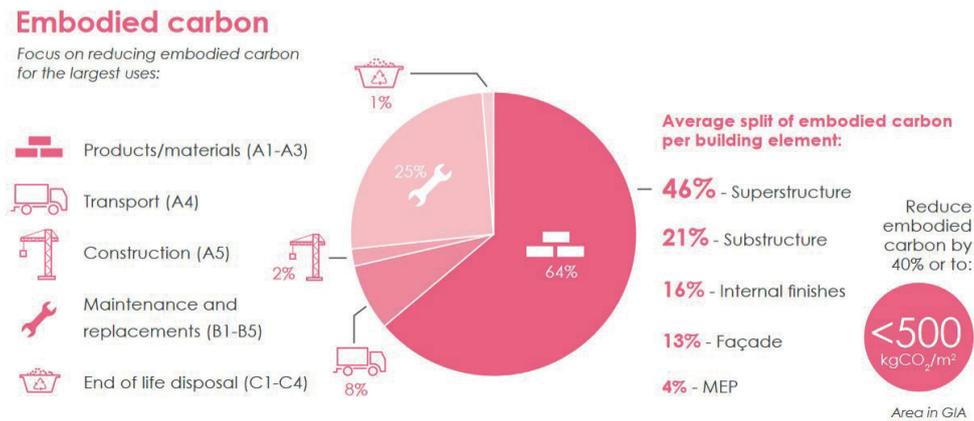


Figure I. 38 : Medium and large scale housing, Area in GIA, LETI [87]

Sur ces résultats, on voit par exemple que la part des process construction et déconstruction est négligeable par rapport à l'impact de l'étape de production des composants du bâtiment. Ces résultats sont en accord avec la Figure 8 présentée en introduction où le poste chantier est évalué à 3% du total des impacts pour l'indicateur changement climatique. Par ailleurs, une étude indique que le choix du système constructif a une grande influence sur l'impact du chantier qui double entre un IGH (Immeuble de Grande Hauteur) en structure métallique et un IGH en béton coulé en place, d'après Lankhorst et al. [88].

Une autre tendance est celle de la diminution de la part du carbone opérationnel par rapport à la part du carbone gris dû aux importantes avancées techniques pour réduire les consommations d'énergie. On retrouve ces tendances à travers les années en Figure I. 39, tendances qui sont également confirmées par les recherches de Thiers et Peuportier [89].

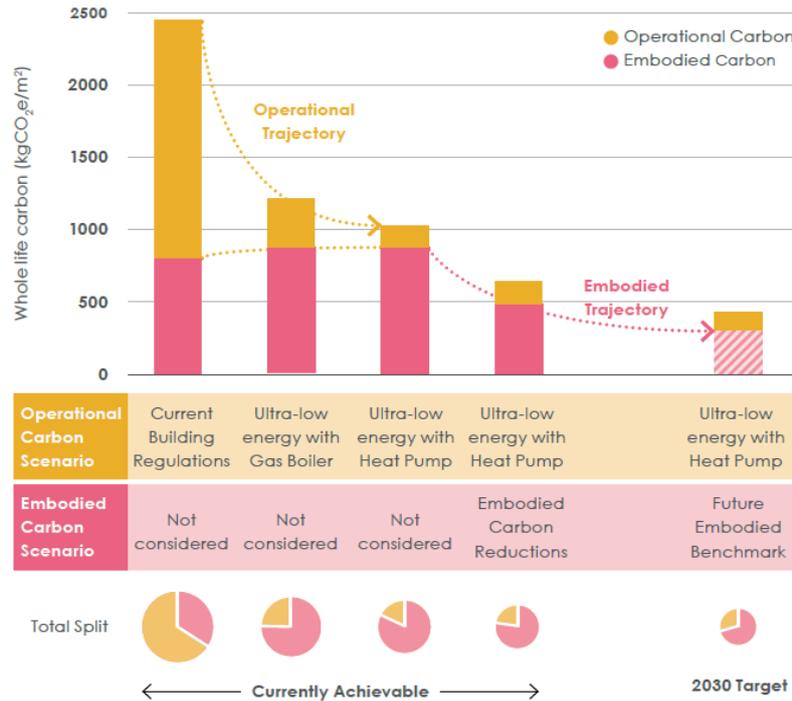


Figure 1.39 : Diagram showing operational and embodied carbon and trajectories [87]

En parallèle, quelques articles dans la littérature mettent en évidence certaines des limites de la méthode ACV qui nécessite un regard critique sur les hypothèses prises dans les modèles pouvant influencer les résultats. Ainsi Hoxha et al. [90] ont examiné la manière de traiter les incertitudes des données par le biais de l'analyse de contribution et de sensibilité et attirent l'attention sur les conséquences pour l'interprétation de résultats d'ACV. Dans le même temps, Najjar et al. [84] ont mis en évidence plusieurs lacunes, telles que des bases de données incomplètes ou des données insuffisantes dans les premières phases de conception qui réduisent le potentiel des applications d'ACV. La plupart des études présentent des hypothèses simplifiées en raison du manque de données entrantes, en particulier pour les scénarios de fin de vie dans lesquels "seules la démolition et l'élimination dans des décharges seront envisagées", d'après Vandervaeren et al. [91].

Bien que la plupart des articles se soient concentrés sur la méthodologie de l'ACV, certains fournissent des résultats en termes d'impacts environnementaux, en particulier en dehors du changement climatique le plus répandu. Ainsi, selon l'étude de Marzouk et al. [92], "la phase de fabrication et de transport hors site représente le poids le plus élevé de particules appauvrissant la couche d'ozone avec 92,83 %, tandis que la phase de déconstruction et de démolition est celle qui contribue le plus à l'eutrophisation". Ce résultat montre l'intérêt de ne pas se focaliser sur l'indicateur changement climatique. Dans le domaine des immeubles de grande hauteur (IGH), un ouvrage du *Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH)* dédié à leur ACV constitue un référentiel solide en la matière, Trabucco et al. [93].

Certaines difficultés dans l'évaluation de l'impact du réemploi avec l'ACV sont dues à plusieurs incertitudes telles que la détermination de la durée de vie, le nombre de cycles d'utilisation, les opérations de reconditionnement, ce qui entraîne un manque de données, selon Vandervaeren et al. [91]. Ainsi dans notre travail, il est prévu de passer par l'expérimentation pour générer nos propres données afin de réaliser une ACV dans le chapitre V. Des auteurs ont par ailleurs récemment démontré pour une structure en portiques, un résultat de -35% pour l'indicateur changement climatique pour les portiques réemployés, par rapport à des portiques neufs, [94], ce que nous pourrions comparer à notre propre étude. Le

réemploi reste une question compliquée puisque l'ACV doit s'adapter afin de prendre en compte les différents cycles d'utilisation d'un même produit.

Parallèlement nous devons donc développer d'autres outils complémentaires pour évaluer le réemploi, avec l'introduction de nouvelles mesures, comme les indicateurs de potentiel de réemploi, Iacovidou et al. [26], basés non seulement sur l'impact direct pendant la fabrication, la construction ou la déconstruction, mais aussi sur l'identification de la traçabilité, la capacité de démontage, la capacité d'adaptation à de nouvelles configurations d'utilisation. Nous proposerons une méthode pour calculer un indice de réemployabilité dans le chapitre V.

1.4.4. Les particularités liées au réemploi face aux référentiels environnementaux et à l'ACV

1.4.4.1. Désigner le périmètre d'étude

Cette étape permet de définir les objectifs de l'ACV, en précisant quelle application en sera faite : écoconception, comparaison ou déclaration environnementale. La cible de l'étude (interne ou externe à l'entreprise) est précisée à ce stade, ainsi que la manière dont seront divulgués les résultats (pour des affirmations comparatives par exemple). Le champ de l'étude doit par ailleurs préciser les fonctions du produit étudié, l'unité fonctionnelle choisie, les frontières du système étudié et les limites de l'étude. C'est aussi à ce stade que les différentes règles pour les calculs appliqués à l'étude seront arrêtées.

En ce qui concerne la durée de vie, la plupart des référentiels la fixe à 50 ans pour un bâtiment. Cette durée de vie alors limitée à un seul cycle d'utilisation pour le bâtiment empêche la prise en compte des différents cycles de vie des matériaux réemployés dans plusieurs bâtiments au cours des années et pour une période totale supérieure à 50 ans. En revanche, une ACV permettra de déterminer plus librement le périmètre de l'étude et de prendre en compte les différents cycles d'usages.

Par ailleurs le réemploi induit plusieurs scénarios possibles de secondes vies pour un produit initial, qu'il va falloir évaluer différemment : même fonction, déclassement, détournement.

Une étude ACV détaillée pour chacun de ces hypothétiques scénarios ne semble pas viable dans les pratiques courantes et les rythmes des projets dans la vie professionnelle.

1.4.4.2. Allocations et coproduits dans le cadre de réemploi

En ce qui concerne le statut de co-produit, l'article L 541-4-2 du Code de l'Environnement, modifié par la loi n°2015-992 du 17 août 2015 - art. 82, définit : une substance ou un objet issu d'un processus de production dont le but premier n'est pas la production de cette substance ou cet objet ne peut être considéré comme un sous-produit et non comme un déchet au sens de l'article L. 541-1-1 que si l'ensemble des conditions suivantes est rempli :

- L'utilisation ultérieure de la substance ou de l'objet est certaine ;
- La substance ou l'objet peut être utilisé directement sans traitement supplémentaire autre que les pratiques industrielles courantes ;
- La substance ou l'objet est produit en faisant partie intégrante d'un processus de production ;
- La substance ou l'objet répond à toutes les prescriptions relatives aux produits, à l'environnement et à la protection de la santé prévues pour l'utilisation ultérieure ;

- La substance ou l'objet n'aura pas d'incidences globales nocives pour l'environnement ou la santé humaine.

Les opérations de traitement de déchets ne constituent pas un processus de production au sens du présent article. Dans ce sens, plusieurs produits de réemploi peuvent prétendre à ce statut de coproduits et entrer dans le calcul correspondant pour l'ACV.

Cependant le problème des coproduits est plus large lorsque l'on s'intéresse aux bénéfices probables du réemploi, et induit inévitablement la question des allocations.

Ainsi, bien que la méthode d'allocation ait été initialement mise en place pour traiter les problèmes de coproduction industrielle, il faut maintenant l'adapter aux pratiques du réemploi. En effet, l'allocation pour la coproduction industrielle repose sur le fait que lors de la fabrication d'un produit, le processus génère la fabrication d'un autre produit, secondaire. L'enjeu est alors d'attribuer une part des impacts totaux à l'un et l'autre des deux produits fabriqués, comme expliqué par Jolliet et al. [13]. Dans le cadre du réemploi, l'allocation n'a pas lieu pour deux produits fabriqués simultanément avec un usage immédiat, mais pour un unique produit qui aura deux usages successifs dans le temps.

Est-ce le bâtiment initial déconstruit ou le second bâtiment reconstruit qui bénéficie des avantages du réemploi ? Puisque l'allocation (ou l'affectation) est une répartition de la charge environnementale entre les différentes parties prenantes, comme rappelé par Jolliet et al. [73], on peut comprendre que le maître d'ouvrage ayant anticipé la déconstruction et le réemploi de son bâtiment neuf en ayant davantage investi dans la construction souhaite en tirer parti sur le plan environnemental (raisonnement en coût global). En même temps l'acteur qui va venir déconstruire soigneusement le bâtiment et récupérer des matériaux pour les remettre en œuvre dans un nouveau projet souhaitera également valoriser cette démarche sur le plan environnemental. Un récent article « *Comparison of environmental assessment methods when reusing building components: A case study* » paru en juin 2020 fait l'état des lieux des choix possibles pour attribuer les impacts du réemploi, De Wolf et al. [95]. Il liste ainsi les différentes méthodes :

- *Cut-off method (100:0)*, ou méthode des stocks : l'ensemble des impacts du bâtiment déconstruit est imputé au bâtiment initial ;
- *End-of-life method (0:100)* : c'est au dernier bâtiment réutilisant les éléments que seront imputés les impacts précédents ;
- *Distributed allocation*, ou méthode 50:50 : une répartition de tous les impacts entre tous les cycles d'usage est effectuée ;
- *Degrressive* : méthode proposée par les auteurs de l'article pour répartir les impacts en fonction du nombre de cycles d'usage.

En fonction des choix opérés, les résultats ne seront donc pas les mêmes. Une justification approfondie doit alors accompagner la démarche d'ACV.

1.4.4.3. Focus sur les modules de la norme NF EN 15804+A1/CN

Cibler les modules à étudier

Une fois le périmètre fixé avec les limites de l'étude, la norme NF EN 15804+A1/CN renvoie à différents modules de A à D sur la Figure I. 40 : qui peuvent être traités indépendamment. L'ensemble des données regroupant les modules A à C permettra le calcul global de l'analyse de cycle de vie. Le module D est présenté à titre indicatif afin de rendre compte du potentiel de valorisation de l'objet étudié. Dans ce module D, il est question de la possibilité de réutilisation qu'il convient d'analyser en détails.

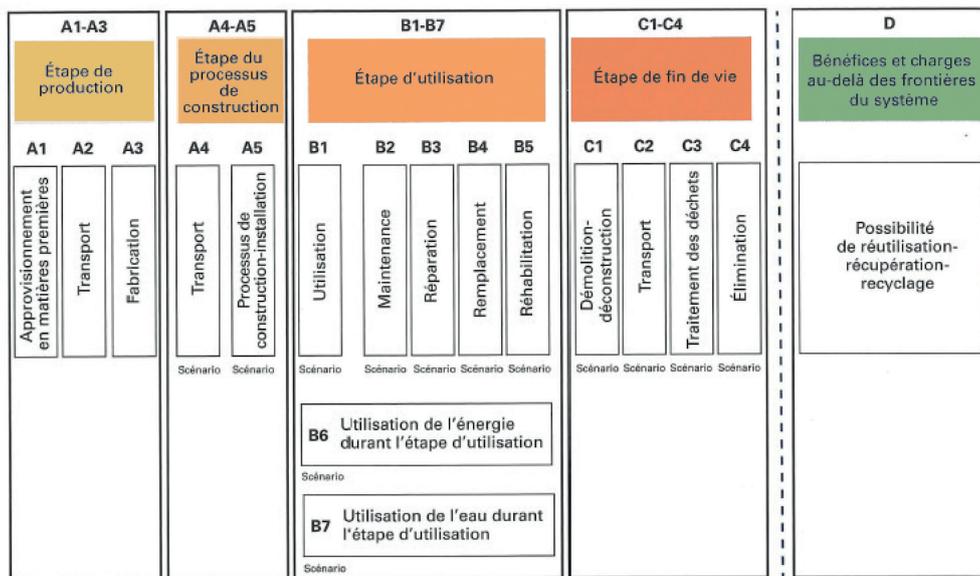


Figure I. 40 : Les grandes étapes, ou modules du cycle de vie. Source : CSTB, [74].

Les modules impliqués par le réemploi : A1 et C3/C4

Pour l'ACV d'un bâtiment mettant en œuvre des matériaux réemployés, les impacts visés sont ceux des déchets alors évités et des matières premières épargnées. En effet, en réemployant un matériau, on évite à la fois son traitement ou son élimination : recyclage, valorisation, enfouissement ; mais également les matières premières dont on aurait eu besoin pour refabriquer ce matériau neuf en l'absence de réutilisation. La prise en compte du réemploi au niveau de l'ACV se situe donc à plusieurs niveaux :

- A1 : Matière première évitée car non consommée (pour produire un élément neuf que l'on ne produit pas ici grâce au réemploi d'un ancien élément) ;
- C3 : Réutilisation directe des éléments donc pas de traitement des déchets ;
- C4 : Déchets évités car non produits donc pas d'élimination à prévoir.

1.4.4.4. La problématique du module D

Aujourd'hui les fournisseurs renseignent sur la possibilité de recycler, grâce à leurs données concernant le taux de matières recyclées entrant dans leur processus de fabrication, qui apparaissent clairement dans le module D. Mais aucune donnée concernant la proportion de matériaux réemployés n'existe. Il faut également rappeler que la plupart des informations sur les matériaux de construction proviennent d'ACV réalisées directement par les industriels fabriquant ces matériaux.

Le module D inclut les impacts « au-delà des frontières » du système étudié, notamment pour le recyclage, c'est-à-dire qu'une différence entre un produit recyclé et le même produit non recyclé est calculée pour une situation actuelle. La situation actuelle signifie que l'on prend les données de la filière existante pour ce produit et le taux de recyclage actuel des matières entrantes pour ce produit. Aucun scénario prospectif n'est utilisé. La Figure I. 41 explique la règle de calcul actuelle avec l'exemple des dalles.

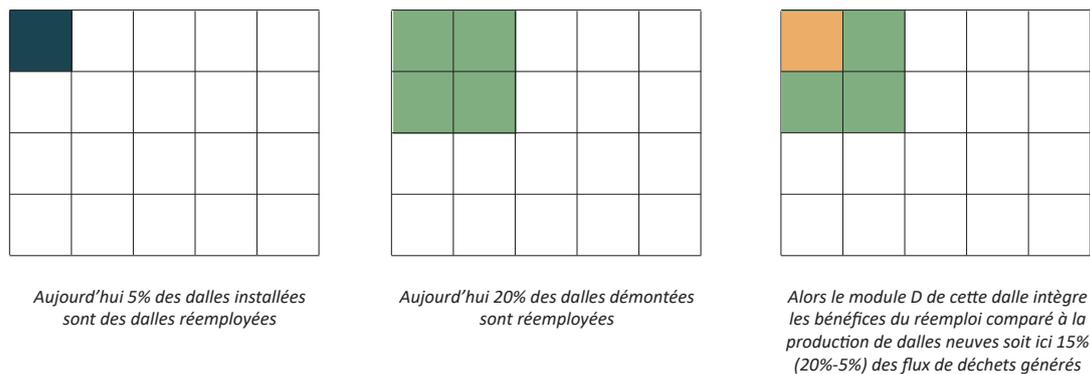


Figure I. 41 : Règle de calcul du module D, d'après Lebert et al. [74]

Selon ce raisonnement, alors dans un cas idéal où on aurait, aujourd'hui, 100% des dalles installées qui sont des dalles réemployées, le module D intégrerait 0% des bénéfices du réemploi, comme illustré en Figure I. 42.

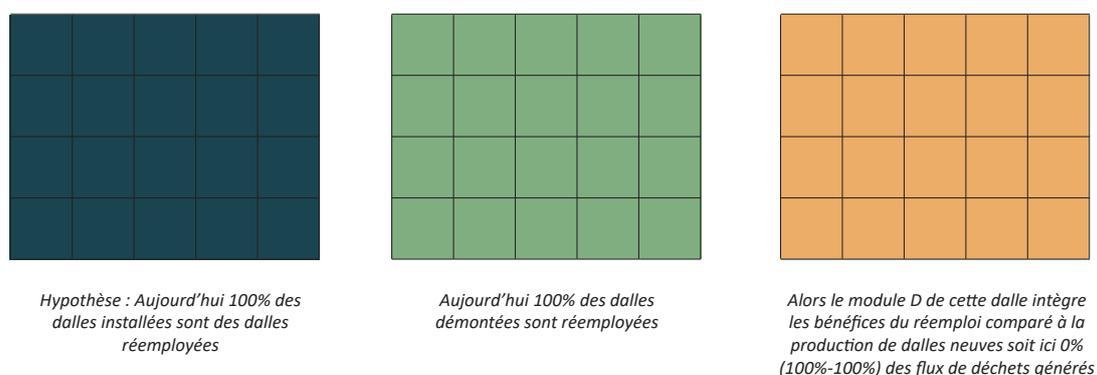


Figure I. 42 : Hypothèse, pour la règle de calcul du module D, d'après Lebert et al. [74]

Au contraire, il faudrait plutôt que les 5% en matières entrantes de la Figure I. 41 soient bien valorisés en déduisant également l'équivalent de matière première vierge qu'il aurait fallu pour produire ces 5% en dalles neuves. Par ailleurs, le module D, tel qu'il est défini aujourd'hui, ne permet pas d'inclure plusieurs scénarios de réemploi, ou un autre scénario pour lequel la fonction du produit serait moindre (déclassement pour faciliter le réemploi).

Actuellement, le module D, n'est donc pas adapté aux pratiques de réemploi et les filières professionnelles de réemploi ne sont pas encore en mesure de communiquer les données adéquates (trop peu de filières existantes). Cependant la déclaration de ce module D est obligatoire dans la nouvelle version de la norme NF EN 15804+A2 d'octobre 2019. On s'affranchira donc du module D dans la suite de ce chapitre et l'on préférera étudier différents scénarios de fin de vie précis avec l'ACV dans le chapitre V.

Face à ce manque de visibilité du réemploi dans le module D, il est difficile de convaincre un maître d'ouvrage de l'intérêt environnemental de cette pratique. Le niveau encore « amateur » du réemploi est préjudiciable puisqu'il ne permet pas de fournir de données environnementales à grande échelle qui pourraient être comparées rigoureusement avec les données industrielles concernant le recyclage. L'évolution récente des FDES en DEP est tout de même encourageante puisque l'indicateur intermédiaire « composants destinés à la réutilisation » des nouvelles DEP n'existait pas dans les anciennes FDES.

Il est tout de même possible de trouver des valorisations dans certains référentiels environnementaux évoqués en partie 1.4.2, mais également de créer de nouveaux indicateurs comme le calcul d'un indice de réemployabilité que l'on étudiera plus en détails dans le chapitre V et qui peut également constituer un critère d'économie circulaire plus regardé.

L'ACV présente l'intérêt d'être une méthode scientifique normée qui permet de réaliser des calculs fiables. Le cadre est pourtant laissé ouvert pour la prise en compte des impacts du réemploi entre différents cycles d'usage, ce qui peut également engendrer quelques dérives en conduisant à des résultats très différents selon la méthode choisie. Nous étudierons notamment des possibilités d'allocations en fin de chapitre V afin de justifier d'un positionnement. La principale difficulté reste le recueil de données pour l'inventaire. A cette fin, nous prévoyons la mise en place d'une expérimentation, dans le chapitre IV, qui permettrait de générer ces données.

Cependant, un certain nombre de critères liés au réemploi n'est pas couvert par l'ACV. En particulier, le potentiel de réemploi et le degré de démontabilité d'une structure ne peut pas se percevoir de façon évidente à travers une ACV. La piste d'un indice de circularité permettrait de faire le lien entre les impacts environnementaux de l'ACV et le caractère démontable abordé dans les classifications d'assemblages. Cette piste sera approfondie dans le chapitre V afin de préparer l'indice de réemployabilité qui permettrait d'évaluer la conception d'un bâtiment anticipant son réemploi.

1.5. Conclusion

Aujourd'hui la distinction entre le réemploi et le recyclage n'est pas encore ancrée dans les mœurs. Cela se traduit par un vide réglementaire entourant la mise en pratique du réemploi, ce qui limite son potentiel d'applications.

Le contexte législatif est de plus en plus favorable au réemploi, cependant le contexte assurantiel s'y oppose toujours puisque les matériaux de réemploi ne correspondent pas aux critères de techniques courantes et ne sont encadrés par aucune norme ou certification. Le réemploi est alors considéré comme un procédé exceptionnel qui sort des techniques courantes. On note tout de même une évolution et une volonté de changement avec, par exemple, un groupe de travail de la C2P (Commission Prévention Produits) dédié à l'assurabilité du réemploi, ou encore le n°178 (janvier - février 2020) de la Revue « Qualité Construction » de l'AQC avec à la une l'« Economie circulaire – Un nouvel art du réemploi ».

Bien que les textes de loi français mentionnent le réemploi, un manque de précisions dans leur application n'encourage toujours pas le recours plus large à cette démarche. D'autres lois et décrets sont voués à voir le jour, par exemple pour encadrer la profession de diagnostiqueur ressources.

Certaines expérimentations ont pourtant réussi à mettre en œuvre le réemploi à partir d'éléments existants (comme le pavillon Circulaire des architectes Encore Heureux), mais aucun concepteur n'anticipe aujourd'hui dans les constructions neuves, la possibilité de réemploi des matériaux à très long terme et de façon renouvelable. Ce travail cherchera ainsi à apporter des éléments en vue de faire progresser les pratiques. Les principaux enjeux sont ceux de la

réduction de GES et de lutte contre l'épuisement des ressources naturelles. Il faut donc à la fois valoriser la matière déjà mise en place dans le parc immobilier en proposant une réutilisation des gisements existants et accompagner la construction en neuf vers une transition pour la déconstruction et le réemploi, comme le synthétise la Figure I. 43. Il s'agit donc d'essayer de maîtriser la gestion à très long terme de la réserve de ressources que la Terre peut nous offrir.

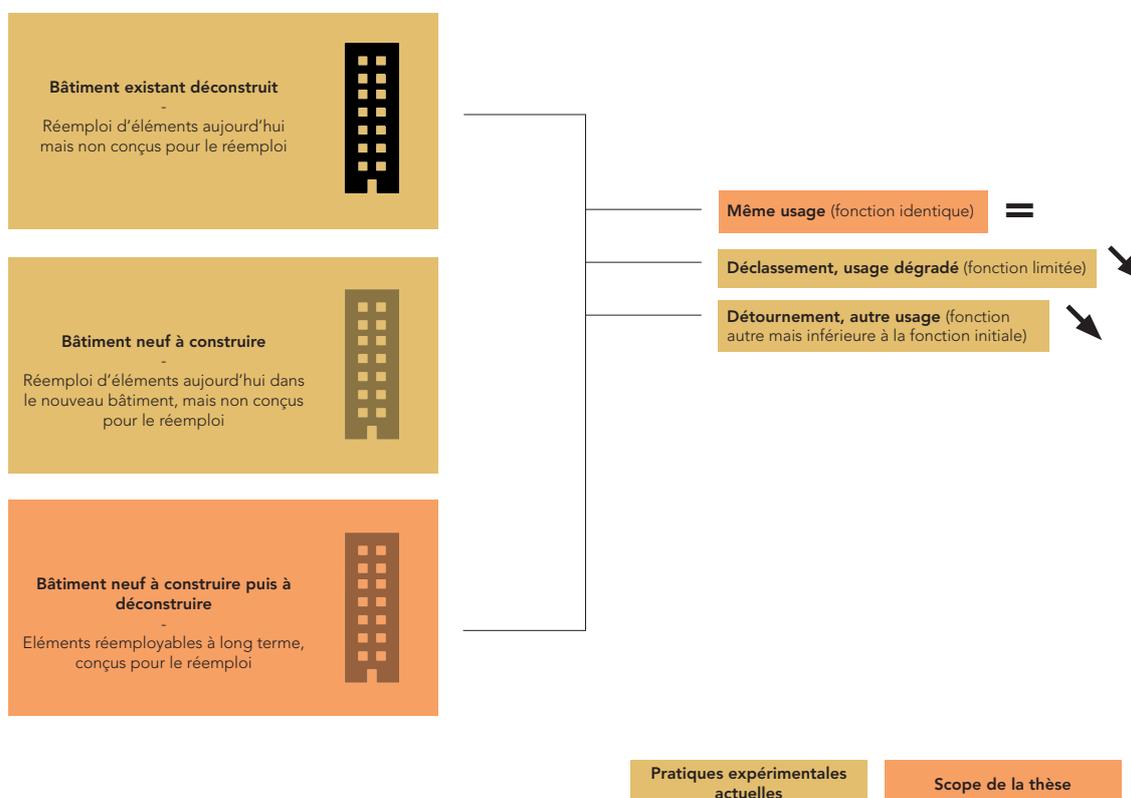


Figure I. 43 : Synthèse des pratiques du réemploi dans la construction

Le réemploi se veut vertueux sur le plan environnemental puisqu'il vise à prolonger considérablement le cycle de vie de la matière. Le réemploi d'un élément permet d'éviter la fabrication d'un élément équivalent en neuf et donc contribue à lutter contre l'épuisement des ressources. D'autre part cette nouvelle fabrication évitée représente aussi une économie au niveau des émissions de GES qui sont donc diminuées. Cependant, ces logiques reposant sur le bon sens doivent être prouvées. On propose pour ce faire d'utiliser la méthode ACV. Un renforcement du module D intégrant les données issues d'une filière de réemploi contribuerait à évaluer l'impact d'un produit de réemploi. L'entreprise « Mobius réemploi » a d'ailleurs annoncé, fin juillet 2020, avoir produit la première FDES d'un matériau de réemploi (faux-plancher technique) validée dans la base INIES. Par ailleurs certains référentiels environnementaux intègrent davantage cette solution par des modes de calculs du taux de réemploi dans un projet.

La démontabilité et la déconstruction vont devenir des enjeux cruciaux à plus ou moins court terme. Les matériaux réutilisables seront autant de déchets évités et de matière épargnée. A travers la proposition de réemploi, il s'agit d'intégrer la possibilité de démonter les ouvrages, à la fois pour en permettre l'adaptabilité, mais aussi leur futur démantèlement afin de récupérer les matériaux et les réutiliser dans de nouveaux projets. La mise en place d'assemblages réversibles, qui n'abîment pas la matière ni ses caractéristiques, doit être anticipée dès aujourd'hui.

L'enjeu est à la fois technique relevant de la mécanique des structures (conception d'éléments et nouveaux assemblages, analyse structurelle, nouveaux modèles de calculs et cheminement des forces) qui fera l'objet des chapitres II et IV, mais aussi du domaine numérique (processus BIM, production et gestion de données, data science, traçabilité et objets connectés), du domaine de l'assurance (garantie de la traçabilité, responsabilités des concepteurs avec les éléments de réemploi) qui fera l'objet du chapitre III, et de l'analyse environnementale (analyse de cycle de vie, référentiels environnementaux, données à enrichir, indicateurs, constitution de filières organisées, intégration de nouveaux scénarios du réemploi), étudiée dans le chapitre V.

Dans ce contexte tout est à écrire du point de vue des solutions constructives car un changement de paradigme est à effectuer pour anticiper la déconstruction et le réemploi des éléments structuraux. C'est ce que nous allons proposer dans ce travail, chapitre II, avec la définition d'un nouveau concept : le « *DfReu, Design for Reuse* », qui se détachera du concept existant de « *DfD, Design for deconstruction/disassembly* » davantage centré sur la gestion et réduction de déchets (recyclage, valorisation énergétique) que sur le réemploi, et qui n'a pas pour but de remettre en œuvre les matériaux dans les constructions.

La traçabilité des matériaux pourrait d'abord être mise en place par les industriels. Cette démarche qualité permettrait d'apporter une garantie supplémentaire au prescripteur. Le concepteur aurait ensuite la charge de préciser et d'alimenter le modèle numérique du bâtiment pour capitaliser les caractéristiques des matériaux en vue de leur réemploi. Une méthodologie pour capitaliser cette donnée sera proposée dans le chapitre III.

L'environnement numérique doit donc conjuguer la traçabilité et une caractérisation instantanée des éléments destinés à un réemploi. Le diagnostic ressource naissant doit pouvoir s'appuyer sur une maquette numérique associant les données nécessaires attachées à chaque élément. Ces données pourront déboucher sur un indice de réemployabilité d'un bâtiment, mais également informer sur la durabilité de chacun des éléments mis en œuvre en intégrant des lois de vieillissement et des modèles d'ACV. Le potentiel prometteur du BIM doit permettre de surmonter les difficultés d'une pratique du réemploi, aujourd'hui basée sur l'existant.

Face aux manques de données dans la littérature en ce qui concerne l'approche de *DfReu* pour les éléments structuraux et aux manques de retours d'expérience de déconstruction de structure en remise en œuvre de réemploi, il nous apparaît nécessaire de proposer un protocole expérimental pour générer ces données manquantes. L'expérimentation sera l'objet du chapitre IV.

Enfin les essais menés permettront également de réaliser une ACV complète à l'échelle de l'élément puis appliquée au bâtiment dans le chapitre V. Ce travail permettra de définir un indice de circularité et de réemployabilité, pour mieux évaluer cette pratique.

Références bibliographiques :

- [1] S. Barles, *L'invention des déchets urbains : France, 1790-1870*, Champ Vallon, 2005, p. 304.
- [2] N. Hoyet, *Matériaux et Architecture durable, Fabrication et transformations propriétés physiques et architecturales, approche environnementale*, Paris: Dunod, 2013, p. 224.
- [3] J. Choppin et N. Delon, *Matière grise, Matériau, Réemploi, Architecture*, Paris: Editions du Pavillon de l'Arsenal, 2014, p. 370.
- [4] M. Ghyoot, L. Devlieger, L. Billiet, A. Warnier et Rotor, *Déconstruction et réemploi, Comment faire circuler les éléments de construction*, Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, 2018, p. 232.
- [5] RDC Environment, éco BTP, I Care & Consult, M. Coppens, E. Jayr, M. Burre-Espagnou et G. Neveux, «IDENTIFICATION DES FREINS ET DES LEVIERS AU RÉEMPLOI DE PRODUITS ET MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION, Rapport final,» [En ligne]. Available: <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/identification-freins-reemploi-btp-201604-rapport.pdf>. [Accès le 21 Novembre 2017].
- [6] ICEB, «Le Réemploi : Matières à bâtir,» MOOC Bâtiment Durable, 10 Mars 2020. [En ligne]. Available: <https://www.mooc-batiment-durable.fr/courses/course-v1:ICEB+2018MOOCBAT04+SESSION01/about>. [Accès le 11 Mars 2020].
- [7] J. Benoît, G. Saurel, M. Billet, F. Bougrain et S. Laurenceau, *REPAR 2 : Le réemploi passerelle entre architecture et industrie*, ADEME, BELLASTOCK, CSTB, avril 2018, p. 545 p.
- [8] R. LaMore, G. H. Berghorn et M. M. Syal, «We need to recycle old buildings, to demolish them,» Citylab.com, Novembre 2018. [En ligne]. Available: https://www.citylab.com/design/2018/11/urban-blight-vacant-buildings-demolish-deconstruct/576253/?utm_source=twitter&utm_medium=social. [Accès le 1 Mars 2020].
- [9] Hermann Kaufmann + Partner ZT GmbH, «IZM – Illwerke Zentrum Montafon, Vandans,» [En ligne]. Available: <https://www.hkarchitekten.at/de/projekt/izm-illwerke-zentrum-montafon/>. [Accès le 3 Mars 2018].
- [10] G. L. F. Benachio, M. do Carmo Duarte Freitas et S. F. Tavares, «Circular economy in the construction industry: A systematic literature review,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 260, n° 1121046, 12 Mars 2020, DOI:10.1016/j.jclepro.2020.121046.
- [11] Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire et Ministère de la Cohésion des Territoires, «Référentiel « Énergie - Carbone » - Méthode d'évaluation de la performance énergétique et environnementale des bâtiments neufs,» 4 Janvier 2019. [En ligne]. Available: <http://www.batiment-energiecarbone.fr/IMG/pdf/referentiel-energie-carbone-methode-evaluation-2017-07-01.pdf>. [Accès le 27 Mars 2019].
- [12] B. Guy et N. Ciarimboli, «DfD, Design for Disassembly in the built environment: a guide to closed-loop design and building,» 2005. [En ligne]. Available: <https://www.lifecyclebuilding.org/docs/DfDseattle.pdf>. [Accès le 23 Mars 2020].
- [13] G. Cai et D. Waldmann, «A material and component bank to facilitate material recycling and component reuse for a sustainable construction: concept and preliminary study,» *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 21, pp. 2015-2032, 2019, doi: 10.1007/s10098-019-01758-1.
- [14] P. O. Akadiri, E. A. Chinyio et P. O. Olomolaiye, «Design of A Sustainable Building: A Conceptual Framework for Implementing Sustainability in the Building Sector,» *Buildings*, vol. 2, pp. 126-152, 2012, doi: 10.3390/buildings2020126.
- [15] L. Ogbu, *Design for Reuse Primer, Public Architecture*, 2010, p. 125.
- [16] P. Hopkinson, H.-M. Chen, K. Zhou, Y. Wang et D. Lam, «Recovery and reuse of structural products from end-of-life buildings,» *Engineering Sustainability*, vol. 172, n° 1ES3, p. 119–128, 16 Août 2018, DOI:10.1680/jensu.18.00007.

- [17] O. Akinade, L. Oyedele, A. Oyedele, J. M. Davila Delgado, M. Bilal, L. Akanbi, A. Ajayi et H. Owolabi, «Design for deconstruction using a circular economy approach: barriers and strategies for improvement,» *Production planning & Control*, p. 12, 2019, doi: 10.1080/09537287.2019.1695006.
- [18] B. Sanchez et C. Haas, «A novel selective disassembly sequence planning method for adaptive reuse of buildings,» *Journal of Cleaner Production*, n° 1183, pp. 998-1010, 20 Février 2018, DOI:10.1016/j.jclepro.2018.02.201.
- [19] I. Bertin, F. Lebrun, N. Braham et R. Le Roy, «Construction, deconstruction, reuse of the structural elements: the circular economy to reach zero carbon,» *SBE D-A-CH 19 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 323, n° 1012020, p. 10, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/323/1/012020.
- [20] R. Santos, A. Aguiar Costa, J. D. Silvestre et L. Pyl, «Informetric analysis and review of literature on the role of BIM in sustainable construction,» *Automation in Construction*, vol. 103, pp. 221-234, 2019, doi: 10.1016/j.autcon.2019.02.022.
- [21] C. Fivet, «Design of Load-Bearing Systems for Open-Ended Downstream Reuse,» chez *SBE19 Brussels BAMB-CIRCPATH, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 225 012031, Brussels, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/225/1/012031.
- [22] J. Brütting, C. De Wolf et C. Fivet, «The reuse of load-bearing components,» *SBE19 Brussels BAMB-CIRCPATH IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 225, n° 1012025, p. 8, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/225/1/012025.
- [23] M. Gorgolewski, «Designing with reused building components: some challenges,» *Building Research & Information*, vol. 36, n° 12, pp. 175-88, 2008.
- [24] J. Brütting, J. Desruelle, G. Senatore et C. Fivet, «Design of Truss Structures Through Reuse,» *Structures*, vol. 18, pp. 128-137, 2019, doi: 10.1016/j.istruc.2018.11.006.
- [25] P. Sassi, *Strategies for Sustainable Architecture*, New York: Taylor & Francis, 2006, p. 312.
- [26] E. Iacovidou et P. Purnell, «Mining the physical infrastructure: Opportunities, barriers and interventions in promoting structural components reuse,» *Science of the Total Environment*, n° 1557-558, pp. 791-807, 2016, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.098.
- [27] J. Brütting, G. Senatore et C. Fivet, «Optimization Formulations for the Design of Low Embodied Energy Structures Made from Reused Elements,» *Lecture Notes in Computer Science*, 2018.
- [28] J.-M. Huygen, *La poubelle et l'architecte, vers le réemploi des matériaux*, Arles: Actes sud Beaux Arts, L'Impensé, 2008, p. 184.
- [29] O. Cinqualbre, Jean Prouvé : *La Maison tropicale*, Paris: Editions du Centre Pompidou, 2009, p. 160.
- [30] wikiarquitectura, «Maisons Tropicales, Jean Prouvé, Niamey, Niger - Brazzaville, République du Congo, 1949-1952,» [En ligne]. Available: <https://fr.wikiarquitectura.com/b%C3%A2timent/maisons-tropicales/#>. [Accès le 22 Mars 2020].
- [31] C. Bougourd et P. Dubois, «Les Paradoxes Patrimoniaux de l'Architecture Moderne,» 17 Octobre 2012. [En ligne]. Available: <http://strabic.fr/Les-paradoxes-patrimoniaux-de-l-architecture-moderne>. [Accès le 28 Octobre 2019].
- [32] C. Escaleira, R. Amoêda et P. J. S. Cruz, «Buildings' connections and material recovery: from deductive to inductive approach,» chez *Portugal SB13 - Contribution of Sustainable Building to Meet EU 20-20-20 Targets*, 2013.
- [33] R. Messler, *Joining of Materials and Structures From Pragmatic Process to Enabling Technology*, 1st éd., Butterworth-Heinemann, 2006, p. 816.
- [34] E. Durmisevic et J. Brouwer, «Design Aspects of Decomposable Building Structures,» chez *Design for Deconstruction and Materials Reuse, CIB Task Group 39 – Deconstruction Meeting*, Karlsruhe, 2002.
- [35] W. Salama, «Design of concrete buildings for disassembly: An explorative review,» *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 6, pp. 617-635, 2017, doi: 10.1016/j.ijbsbe.2017.03.005.
- [36] V. de Calignon, A.-M. Fèvre, C. Henneguez, A. Giacobelli, C. Muys et P. Rubin, *Construire Réversible*, Paris: Canal Architecture, 2017, p. 98.

- [37] L. A. Akanbi, L. O. Oyedele, O. O. Akinade, A. O. Ajayi, M. Davila Delgado, M. Bilal et S. A. Bello, «Salvaging building materials in a circular economy: A BIM-based whole-life performance estimator,» *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 129, pp. 175-186, 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.10.026.
- [38] E. Durmisevic, «Transformable Building Structures, Design for disassembly as a way to introduce sustainable engineering to building design & construction,» Cedris M&CC, Delft, 2006.
- [39] ADEME, Nobatek INEF, ARMINES et xb architectes, «BAZED, Conception Construction Zéro Déchet,» [En ligne]. Available: <https://www.bazed.fr/>. [Accès le 7 Novembre 2017].
- [40] S. Ortlepp, R. Masou et R. Ortlepp, «Green construction methods of buildings capable for disassembly to support circular economy,» *Challenges for Technology Innovation: An Agenda for the Future*, pp. 21-25, 2017.
- [41] C. Odenbreit et A. Kozma, «Dismountable Flooring Systems for Multiple Use,» chez *SBE19 Brussels BAMB-CIRCPATH, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 225 012028*, Brussels, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/225/1/012028.
- [42] M. P. Nijgh et M. Veljkovic, «Design of composite flooring systems for reuse,» chez *SBE19 Brussels BAMB-CIRCPATH, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 225 012026*, Brussels, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/225/1/012026.
- [43] IFSTTAR, «Un béton "vert" est-il possible?,» 5 novembre 2018. [En ligne]. Available: https://www.ifsttar.fr/fileadmin/redaction/dossiers-thematiques/infrastructures/beton-vert/11364_Beton_Vert_FR_interactif.pdf. [Accès le 18 septembre 2019].
- [44] V. Augiseau, «La dimension matérielle de l'urbanisation, Flux et stocks de matériaux de construction en Ile-de-France,» Université Paris-Est, Ecole Doctorale Sciences, Ingénierie et Environnement, Thèse de Doctorat, Paris, 2017.
- [45] N. Hoyet, F. Duchene et M. De Fouquet, *BIM et architecture*, Dunod, 2016, p. 210.
- [46] BS France- Mediaconstruct, building SMART France, «Notions clés du BIM,» [En ligne]. Available: <https://www.buildingsmartfrance-mediaconstruct.fr/definition-notions-bim/>. [Accès le 20 Septembre 2019].
- [47] O. O. Akinade, L. O. Oyedele, K. Omoteso, S. O. Ajayi, M. Bilal, H. A. Owolabi, H. A. Alaka, L. Ayris et J. H. Looney, «BIM-based deconstruction tool: Towards essential functionalities,» *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 6, pp. 260-271, 2017, doi: 10.1016/j.ijbsbe.2017.01.002.
- [48] S. Lee, S. Tae, S. Roh et T. Kim, «Green Template for Life Cycle Assessment of Buildings Based on Building Information Modeling: Focus on Embodied Environmental Impact,» *Sustainability*, vol. 7, p. 16498–16512, 2015, doi: 10.3390/su71215830.
- [49] B. Ilhan et H. Yaman, «Green building assessment tool (GBAT) for integrated BIM-based design decisions,» *Automation in Construction*, vol. 70, pp. 26-37, 2016, doi: 10.1016/j.autcon.2016.05.001.
- [50] K. Forth, A. Braun et A. Borrmann, «BIM-integrated LCA - model analysis and implementation for practice,» *SBE D-A-CH 19 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 323*, n° 1012100, p. 9, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/323/1/012100.
- [51] Y. Lu, Z. Wu, R. Chang et Y. Li, «Building Information Modeling (BIM) for green buildings: A critical review and future directions,» *Automation in Construction*, vol. 83, pp. 134-148, 2017, doi: 10.1016/j.autcon.2017.08.024.
- [52] BIMFORUM, «LEVEL OF DEVELOPMENT (LOD) SPECIFICATION PART I & COMMENTARY For Building Information Models and Data,» Avril 2019. [En ligne]. Available: <https://bimforum.org/wp-content/uploads/2019/04/LOD-Spec-2019-Part-I-and-Guide-2019-04-29.pdf>. [Accès le 9 Janvier 2020].
- [53] J. Won et J. C. Cheng, «Identifying potential opportunities of building information modeling for construction and demolition waste management and minimization,» *Automation in Construction*, vol. 79, pp. 3-18, 2017, doi: 10.1016/j.autcon.2017.02.002.

- [54] Z. Liu, M. Osmani, P. Demian et A. Baldwin, «A BIM-aided construction waste minimisation framework,» *Automation in Construction*, vol. 59, pp. 1-23, 2015, doi: 10.1016/j.autcon.2015.07.020.
- [55] M. Bilal, L. O. Oyedele, O. O. Akinade, S. O. Ajayi, H. A. Alaka, H. A. Owolabi, J. Qadir, M. Pasha et S. A. Bello, «Big data architecture for construction waste analytics(CWA): A conceptual framework,» *Journal of Building Engineering*, vol. 6, pp. 144-156, 2016, doi: 10.1016/j.jobee.2016.03.002.
- [56] O. O. Akinade, L. O. Oyedele, M. Bilal, S. O. Ajayi, H. A. Owolabi, H. A. Alaka et S. A. Bello, «Waste minimisation through deconstruction: A BIM based Deconstructability Assessment Score (BIM-DAS),» *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 105, pp. 167-176, 2015, doi: 10.1016/j.resconrec.2015.10.018.
- [57] W. Mc Donough et M. Braungart, *Cradle to cradle : Créer et recycler à l'infini*, 4e éd., vol. Manifestô, Paris: Editions Alternatives, 2011, p. 240.
- [58] M. Bilal, L. O. Oyedele, J. Qadir, K. Munir, O. O. Akinade, S. O. Ajayi, H. A. Alakaa et H. A. Owolabi, «Analysis of critical features and evaluation of BIM software: towards a plug-in for construction waste minimization using big data,» *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 2016, doi: 10.1080/2093761X.2015.1116415.
- [59] E. Iacovidou, P. Purnell et M. K. Lim, «The use of smart technologies in enabling construction components reuse: A viable method or a problem creating solution?,» *Journal of Environmental Management*, vol. 216, pp. 214-223, 2018, doi: 10.1016/j.jenvman.2017.04.093.
- [60] J. Veselka, J. Růžička, A. Lupíšek, P. Hájek, S. Mančík, V. Žďára et M. Šíroký, «Connecting BIM and LCA: The Case Study of an Experimental Residential Building,» *SBE D-A-CH 19 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 323*, n° 1012106, p. 6, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/323/1/012106.
- [61] J. Kwok Wai Wong et J. Zhou, «Enhancing environmental sustainability over building life cycles through green BIM: A review,» *Automation in Construction*, vol. 57, pp. 156-165, 2015, doi: 10.1016/j.autcon.2015.06.003.
- [62] B. Gepts, E. Meex, E. Nuyts, E. Knapen et G. Verbeeck, «Existing databases as means to explore the potential of the building stock as material bank,» chez *SBE19 Brussels BAMB-CIRCPATH, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 225*, Brussels, 2019, DOI:10.1088/1755-1315/225/1/012002.
- [63] A. Ajayabi, H.-M. Chen, K. Zhou, P. Hopkinson, Y. Wang et D. Lam, «REBUILD: Regenerative Buildings and Construction systems for a Circular Economy,» chez *SBE19 Brussels BAMB-CIRCPATH, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 225*, Brussels, 2019, DOI:10.1088/1755-1315/225/1/012015.
- [64] I. Oberti et I. Paoletti, «Da.Ma.Tra: Material Traceability Database,» *Digital Transformation of the Design, Construction and Management Processes of the Built Environment*, pp. 85-93, 2020, doi: 10.1007/978-3-030-33570-0_8.
- [65] EPEA, L. Luscuere, R. Zanatta, D. Mulhall, SundaHus, J. Boström et L. Elfström, «BAMB, Deliverable 7, Operational Materials Passports,» 24 Janvier 2019. [En ligne]. Available: <https://www.bamb2020.eu/wp-content/uploads/2019/02/D7-Operational-materials-passports.pdf>. [Accès le 24 Février 2020].
- [66] M. Heinrich et L. Werner, «Materials Passports - Best Practice. Innovative Solutions for a Transition to a Circular Economy in the Built Environment,» Horizon2020 buildings as materials banks program (BAMB), 2019. [En ligne]. Available: https://www.bamb2020.eu/wp-content/uploads/2019/02/BAMB_MaterialsPassports_BestPractice.pdf. [Accès le 12 Janvier 2020].
- [67] M. Ganter et T. Lützkendorf, «Information management throughout the life cycle of buildings – Basics and new approaches such as blockchain,» *SBE D-A-CH 19 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 323*, n° 1012110, p. 10, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/323/1/012110.
- [68] J. Wong et J. Zhou, «Enhancing environmental sustainability over building life cycles through green BIM: A review,» *Automation in Construction*, vol. 57, pp. 156-165, 2015.

- [69] ADEME, «La face cachée du numérique, Réduire les impacts du numérique sur l'environnement,» Ademe, Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, Angers, 2019.
- [70] GIEC, «Summary for Policymakers of the 4th assessment report,» 2007.
- [71] «La vapeur d'eau est-elle un gaz à effet de serre?,» Futura Planète, 9 Juin 2020. [En ligne]. Available: <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/rechauffement-climatique-vapeur-eau-elle-gaz-effet-serre-912/>.
- [72] D. Jayat, «Le plus grand gaz à effet de serre... c'est l'eau !,» *L'OBS*, 2017.
- [73] O. Jolliet, M. Saadé et P. Crettaz, Analyse du cycle de vie, Comprendre et réaliser un écobilan, Première éd., vol. 23, Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, 2005, p. 242.
- [74] A. Lebert et J.-L. Chevalier, L'analyse du cycle de vie dans le bâtiment, Comprendre et réaliser une ACV, Champs-sur-Marne: CSTB Editions, 2018, p. 202.
- [75] AFNOR, Association française de normalisation, *NF EN 15804+A1 April 2014, Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products*, AFNOR.
- [76] M. Röck, A. Passer, D. Ramon et K. Allacker, «The coupling of BIM and LCA—challenges identified through case study implementation,» *Sixth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering*, pp. 841-846, Octobre 2018.
- [77] M. Röck, A. Hollberg, G. Habert et A. Passer, «LCA and BIM: Visualization of environmental potentials in building construction at early design stages,» *Building and Environment*, vol. 140, pp. 153-161, 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.05.006.
- [78] R. Shahmir Nizam, C. Zhang et L. Tian, «A BIM based tool for assessing embodied energy for buildings,» *Energy & Buildings*, vol. 170, pp. 1-14, 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.03.067.
- [79] L. Wastiels et R. Decuyper, «Identification and comparison of LCA-BIM integration strategies,» *SBE D-A-CH 19 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 323*, n° 1012101, p. 8, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/323/1/012101.
- [80] H. Figl, M. Ilg et K. Battisti, «6D BIM—Terminal: Missing Link for the design of CO₂- neutral buildings,» *SBE D-A-CH 19 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 323*, n° 1012104, p. 6, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/323/1/012104.
- [81] R. Di Bari, O. Jorgji, R. Horn, J. Gantner et S. Ebertshäuser, «Step-by-step implementation of BIM-LCA: A case study analysis associating defined construction phases with their respective environmental impacts,» *SBE D-A-CH 19 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 323*, p. 10, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/323/1/012105.
- [82] C. Cavalliere, G. Habert, G. R. Dell'Osso et A. Hollberg, «Continuous BIM-based assessment of embodied environmental impacts throughout the design process,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 211, pp. 941-952, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.11.247.
- [83] C. Cavalliere, A. Hollberg, G. R. Dell'Osso et G. Habert, «Consistent BIM-led LCA during the entire building design process,» *SBE D-A-CH 19 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 323*, n° 1012099, p. 9, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/323/1/012099.
- [84] M. Najjar, K. Figueiredo, M. Palumbo et A. Haddad, «Integration of BIM and LCA: Evaluating the environmental impacts of building materials at an early stage of designing a typical office building,» *Journal of Building Engineering*, vol. 14, pp. 115-126, 2017, doi: 10.1016/j.job.2017.10.005.
- [85] M. Nilsen et R. A. Bohne, «Evaluation of BIM based LCA in early design phase (low LOD) of buildings,» *SBE D-A-CH 19 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 323*, n° 1012119, p. 9, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/323/1/012119.
- [86] F. Shadram, T. D. Johansson, W. Lu, J. Schade et T. Olofsson, «An integrated BIM-based framework for minimizing embodied energy during building design,» *Energy and Buildings*, vol. 128, pp. 592-604, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.07.007.
- [87] LETI, London Energy Transformation Initiative, «LETI Climate Emergency Design Guide, How new buildings can meet UK climate change targets,» Janvier 2020. [En ligne]. Available: <https://b80d7a04-1c28-45e2-b904->

e0715cface93.filesusr.com/ugd/252d09_3b0f2acf2bb24c019f5ed9173fc5d9f4.pdf. [Accès le 29 Janvier 2020].

- [88] G. J. Lankhorst, J. Arts, K. C. Terwel et H. M. Jonkers, «Life Cycle Analysis: Load-Bearing Structures Of High-Rise Buildings in Western Europe,» *CTBUH Journal*, n° 13, pp. 28-35, 2019.
- [89] S. Thiers et B. Peuportier, «Thermal and environmental assessment of a passive building equipped with an earth-to-air heat exchanger in France,» *Solar Energy*, n° 182, p. 820–831, 2008, doi: 10.1016/j.solener.2008.02.014.
- [90] E. Hoxha, G. Habert, S. Lasvaux, J. Chevalier et R. Le Roy, «Influence of construction material uncertainties on residential building LCA reliability,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 144, pp. 33-47, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.068.
- [91] C. Vandervaeren, W. Galle et N. De Temmerman, «Parametric life cycle assessment of a reusable brick veneer,» *SBE D-A-CH 19 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 323*, n° 1012137, p. 9, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/323/1/012137.
- [92] M. Marzouk, E. Mohammed Abdelkader et K. Al-Gahtani, «Building information modeling-based model for calculating direct and indirect emissions in construction projects,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 152, pp. 351-363, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.138.
- [93] D. Trabucco, A. Wood, O. Vassart, N. Popa et D. Davies, *Life Cycle Assessment of Tall Building Structural Systems*, Chicago: Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 2015, p. 190.
- [94] J. Brütting, G. Senatore, M. Schevenels et C. Fivet, «Optimum Design of Frame Structures From a Stock of Reclaimed Elements,» *Frontiers in Built Environment*, vol. 6, n° 157, 27 Mai 2020, DOI:10.3389/fbuil.2020.00057.
- [95] C. De Wolf, E. Hoxha et C. Fivet, «Comparison of environmental assessment methods when reusing building components: A case study,» *Sustainable Cities and Society*, vol. 61, n° 1102322, p. 11, 10 Juin 2020, DOI:<https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102322>.

CHAPITRE II

Concevoir pour déconstruire

Pour augmenter le potentiel de réemployabilité d'un bâtiment, l'état de l'art du chapitre I nous a amené à cerner trois thématiques principales : la conception structurale, la traçabilité des données, et l'analyse environnementale. Dans ce chapitre nous allons aborder la première de ces trois thématiques et étudier comment la conception d'un bâtiment démontable peut se définir en vue de réemployer un maximum d'éléments en fin de vie. Les enjeux structuraux et techniques sont ici abordés dans le but de faciliter le démontage des éléments porteurs. Ces enjeux impliquent de nouvelles méthodes de conception : trame, dimensionnement, modélisation, articulation ou encastrement influençant la raideur et la démontabilité. Cette démontabilité permettra de déterminer le stock disponible d'éléments structurels qui constituera les banques de matériaux de demain. Ce chapitre est scindé en 5 parties : 1. Générer le stock grâce aux processus de conception pour le réemploi d'éléments porteurs, avec une adaptation des préceptes du DfD ; 2. Maximiser le stock au sein d'un bâtiment archétypal : l'IGH (Immeuble de Grande Hauteur) ; 3. Maximiser le stock par la recherche d'une géométrie universelle ; 4. Maximiser le stock en augmentant la démontabilité des assemblages et proposition d'une solution et 5. Proposition du concept DfReu, *Design for Reuse*, avec ses critères de réemployabilité des structures de bâtiments.

Le schéma de la figure II.1 illustre la démarche de recherche développée (en orange) en complément des préceptes du DfD (en vert), dans l'objectif de récupérer en fin de vie un maximum d'éléments du gros œuvre d'un bâtiment.

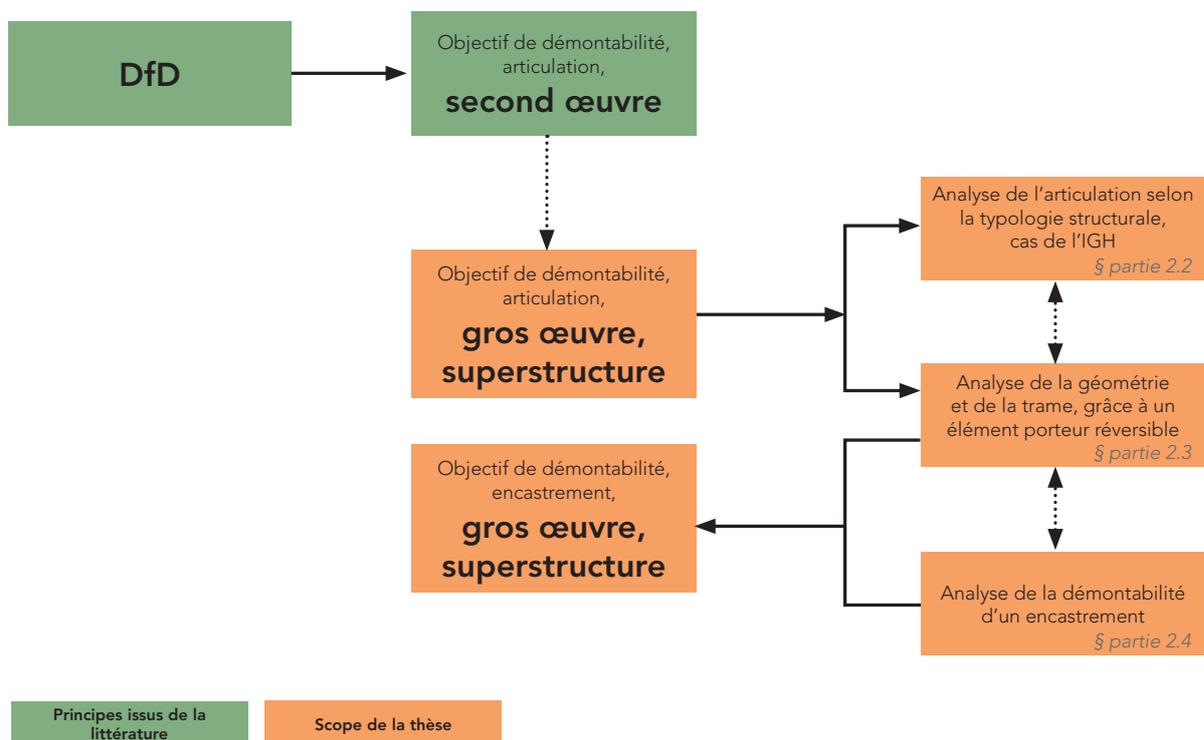


Figure II. 1 : Méthodologie de recherche pour la conception structurale en vue d'un réemploi

2.1. Nouveau processus de conception et changement de paradigme

Comme annoncé précédemment dans le constat environnemental, le gros œuvre représente la majeure partie des émissions de CO₂ eq des composants d'un bâtiment, Qarout [1], Kaethner et al. [2]. La conception doit donc aujourd'hui prévoir une réversibilité des assemblages, qui n'abîme pas la matière ni ses caractéristiques, pour que le bâtiment, lorsqu'il sera considéré en fin de vie, puisse être totalement et avec un minimum d'efforts déconstruit. L'ingénieur, comme l'architecte, du futur, se voit doté d'une nouvelle mission, celle de déconstructeur pour mieux reconstruire. Aujourd'hui, il peut déjà développer son expertise lors des chantiers de déconstruction pour repérer les éléments à fort potentiel de réutilisation ou les éléments à préserver pour leur valeur patrimoniale. Dorénavant, pour les projets de bâtiments neufs, il peut également mieux anticiper leur réemploi en fin de vie. Concevoir réemployable induit une adaptation des pratiques actuelles dont l'enjeu est de constituer, aujourd'hui, le stock de matériaux de demain. Pour cela, différentes pistes seront évoquées dans cette partie pour permettre de constituer ce stock à différentes échelles (éléments, bâtiments) et selon une adaptation progressive des pratiques actuelles.

2.1.1. La constitution d'un stock de matériaux

L'ensemble du parc immobilier existant est qualifié de gisement urbain ou de mine urbaine par les professionnels du réemploi [3], c'est-à-dire que la matière déjà mise en œuvre constitue un stock qui pourrait être source d'un réemploi aujourd'hui ou demain. En parallèle du parc existant, de nouveaux bâtiments sont construits tous les jours avec des matériaux neufs et constitueront à leur tour, le stock de matière du futur. Le gisement actuel est compliqué à évaluer. L'Ifsttar indique qu'en France, plus de 80% du patrimoine bâti est en béton [4]. Un communiqué de presse de Cimbéton affirmait pour 2018 que « concernant les maisons individuelles groupées, l'utilisation du béton est majoritaire avec 96,6% de parts de marché. En logement collectif, elles atteignent 98,49% » [5]. Par ailleurs, l'UNICEM indique que le béton est le « matériau le plus utilisé dans le monde » [6] ; tout comme le SNBPE dans son dossier de presse [7]. Enfin, Infociments détaille la consommation de l'industrie cimentière française pour 2019 dont le béton prêt à l'emploi représente 61,8% [8]. Ainsi le béton coulé en place est massivement représenté comme matériau structural dans les projets neufs, comme le confirme l'observatoire E+C- [9]. L'étude prospective de l'Ademe et du CSTB prévoit une infime baisse, non significative, de la part de béton dans la construction d'ici 2050 [10]. Le stock disponible, et à venir, est donc principalement issu de béton coulé en place, ce qui a son importance en termes de démontabilité. Les pistes pour le « concepteur-réemployeur » sont donc, soit de s'inscrire dans cette prospective en se greffant aux méthodes en place de construction en béton armé, soit d'assumer un nouveau mode de construction décorrélé des pratiques en place. Nous allons aborder par la suite ces deux pistes du point de vue technique et structural.

2.1.2. Les assemblages préfabriqués du DfD et leurs limites en vue d'un réemploi structural

Nous avons détaillé les principes globaux du DfD, *Design for Disassembly* ou *Design for Deconstruction* dans le chapitre I, partie 1.2.2.2. Ils reposent sur un certain nombre de dispositions rappelées :

- Accessibilité et visibilité
- Tolérances nécessaires

- Réversibilité (démontage par assemblages mécaniques)
- Facilité et simplicité de démontage (rapide et avec des outils courants)
- Robustesse pour supporter les étapes de montage et démontage
- Indépendance entre les éléments : les éléments de construction peuvent être issus de différents fabricants et être réassemblés par un type de connexion universelle

A l'échelle du bâtiment, le DfD prévoit également de :

- Limiter le nombre de connexions
- Homogénéiser les assemblages (types et taille)

La technique sèche, grâce à des assemblages mécaniques réversibles, est relevée comme la plus pertinente par Escalera et al. [11], Sassi [12], ou Messler et al. [13], bien qu'elle soit souvent limitée à des applications pour le second œuvre. Une étude pour des applications structurales est nécessaire.

Les systèmes d'assemblages développés par les industriels de la préfabrication permettent, en effet, de construire de façon non dommageable vis-à-vis de la matière, et peuvent garantir une déconstruction sans dégradation. Seules les traces d'usure, du temps et des usages, pourront être nettoyées ou conservées, et s'inscrire dans les étapes du processus de reconditionnement. Les industriels de la préfabrication ont donc développé, sans forcément en avoir conscience, un système de construction qui peut devenir réversible sans remettre en cause leur processus déjà en place. La préfabrication peut ainsi faciliter l'adaptabilité des différents usages d'un espace, comme le confirme Hoyet [14]: « La transformation d'un bâtiment peut être facilitée dans la durée si la conception technique et constructive l'a intégrée. Les filières constructives dites « sèches » sont particulièrement adaptées à ces mutations. Ce sont les matériaux assemblés mécaniquement qui y répondent. ». Il suffirait de prendre en compte officiellement ces principes pour permettre de multiples réemplois à l'élément préfabriqué.

Par ailleurs l'industrie de la préfabrication apporte de nombreuses garanties : série, standardisation, rationalisation, mécanisation, contrôle (qualité, quantité, temps de production), continuité de production. Il apparaît que le secteur de la construction n'a pas encore tiré pleinement parti du potentiel d'assemblage et de désassemblage à long terme et également de la possible traçabilité des caractéristiques de l'élément que peut permettre l'environnement de la préfabrication. Les éléments préfabriqués sont également conçus pour être transportés sur leur lieu d'assemblage, et par définition sont plus maniables (avec réduction des nuisances).

Cependant nous avons vu dans l'état de l'art, chapitre I, partie 1.2.3., que les assemblages proposés par les industriels et utilisés dans les systèmes préfabriqués étaient majoritairement en métal. De tels assemblages doivent ensuite être modélisés et analysés pour vérifier leur incidence sur le comportement structural global d'une structure. Dans un modèle aux éléments finis, la liaison entre deux éléments porteurs peut être considérée comme une articulation (transmission des efforts normaux et tranchants) ou comme un encastrement (transmission des efforts normaux et tranchants mais aussi des moments). Tout l'enjeu sera donc de savoir si ces assemblages métalliques se comportent comme des articulations ou comme des encastresments et de les modéliser le plus justement possible. En réalité les assemblages présentent souvent un comportement intermédiaire : soit semi-articulés ou soit semi-encastresments. Au vu des principes du DfD, il faudrait donc privilégier les assemblages assimilables à des articulations, plus faciles à monter et à démonter, qui n'abîment pas la matière, ainsi plus facilement réemployables. Les principes du DfD étant limités principalement aux éléments du second œuvre, il est primordial d'étudier les conséquences de la multiplication des articulations au sein d'un modèle de calculs d'une structure. Ce sera l'objet de la partie

théorique suivante puis de l'étude de cas de la partie 2.2. Cependant les connexions mécaniques à sec ne sont pas très fréquentes dans les constructions, en particulier à cause de leur coût.

2.1.3. Les assemblages coulés en place

La technique du béton armé coulé en place reste la plus répandue en France. Une piste qui apparaît originale et susceptible de se développer facilement consiste alors à rendre réemployables les éléments coulés en place. De nombreuses structures ont un fonctionnement qui repose sur des assemblages en béton coulés en place, Brocato [15]. Un des intérêts du béton est de reconstituer un monolithisme, une fois qu'il est durci. L'inconvénient est qu'il faut détruire ce monolithisme pour désassembler les éléments de la structure. Cependant s'il est possible de mieux circonscrire la démolition du béton pour préserver l'intégrité de la plupart des éléments, on peut alors se rapprocher d'une démontabilité.

80% de notre patrimoine est en béton selon l'Ifsttar [4], d'où l'intérêt de regarder en détail le cas de ce matériau. Une revue de la littérature par Salama [16] démontre également l'intérêt du désassemblage des bâtiments en béton grâce au potentiel des éléments préfabriqués clavetés dont la conception pourrait être améliorée en vue d'un désassemblage. Notamment, il faut pouvoir augmenter la démontabilité au-delà de l'articulation. Ainsi la proposition d'un assemblage encastré démontable constituerait une proposition concrète et fiable. Elle sera développée dans la partie 2.4 puis dans le chapitre IV.

2.1.4. Durabilité des matériaux pour le réemploi

2.1.4.1. Bois

Le bois en structure présente une durabilité qui peut varier de 10 ans à plus de 100 ans selon la conception de l'ouvrage, les conditions climatiques et le choix de l'essence. Nous considérons ici que le bois, comme le béton, est abrité au sein des bâtiments et n'est pas exposé aux agressions externes. Selon la norme NF EN 335-1, on considérera ici une classe d'emploi 1 voire 2, et selon l'Eurocode 5, une classe de service 1, voire 2 pour le cas des murs à ossature bois. Le choix de l'essence de bois est déterminé en fonction de sa durabilité naturelle hors aubier. Si celle-ci n'est pas suffisante pour satisfaire aux exigences de la classe d'emploi souhaitée, on optera pour une durabilité conférée grâce à un traitement adéquat. On écartera donc les dégradations liées à une exposition aux intempéries mais on gardera une attention particulière concernant les attaques d'organismes vivants (champignons, insectes, bactéries) et les variations d'humidité ambiante. Le fascicule de documentation P20-651 permet d'appréhender le sujet de la conception des ouvrages en bois en fonction de la durabilité intrinsèque du bois en tenant compte des normes européennes harmonisées. On notera que d'après ce guide, la plupart des essences hors aubier de résineux et de feuillus offrent une durabilité supérieure à 100 ans en classe d'emploi 1 et que certains feuillus comme le chêne Rouvre offrent cette même durabilité en classe d'emploi 3a qui autorise une exposition aux intempéries fréquente mais courte. Néanmoins, en pratique il n'est évident de pouvoir disposer de bois hors aubier, hors commande spéciale, ce qui revient à dire que la plupart des bois utilisés dans la construction pour laquelle la classe d'emploi 2 est visée, sont traités contre les attaques de champignons, d'insectes à larves xylophages et de termites. Leur longévité est alors comprise entre 10 et 50 ans. Notons également que les normes européennes traitant de la durabilité du bois ne portent que sur les attaques lignivores et que la réglementation française impose de surcroît un traitement de tous les éléments en bois participant à la structure de l'ouvrage contre les insectes à larves xylophages sur tout le territoire français et contre les termites selon les zones géographiques sous décret préfectoral.

Rappelons que certains temples japonais en bois sont plus que millénaires, comme les temples d'Horyu-ji construits au début du 7^e siècle, d'après l'UNESCO [10] et que le matériau bois a fait ses preuves de durabilité au cours de notre histoire (fondations en pieux à Venise, charpentes de cathédrales, etc.).

2.1.4.2. Béton

Pour un usage de structure dans un bâtiment, la classe d'exposition des bétons abrités est XC1, selon la norme NF EN 206/CN, qui correspond à un béton sec ou humide en permanence. Le béton au sein d'une structure d'un bâtiment est abrité des potentielles agressions externes et a peu de chance de se dégrader dans le temps s'il a été mis en œuvre correctement. Le béton a même plutôt tendance à augmenter sa résistance dans le temps et au fil des années. A ce propos, l'ancien règlement BAEL (Béton Armé aux Etats Limites) préconisait $1,10 f_{cj}$ dès que l'on dépassait 90 jours, alors que le règlement en vigueur, l'Eurocode 2, plafonne de manière sécuritaire la valeur de f_{ck} à sa valeur à 28 jours, ce qui démontre que l'on reconnaissait bien l'augmentation de la résistance du béton dans le temps avec le BAEL.

Par ailleurs, la grande durabilité est rendue possible grâce à une composition particulière des bétons à hautes performances qui résistent beaucoup mieux aux pathologies, ces dernières pouvant faire vieillir prématurément le béton et le dégrader. En effet, d'après Malier et al. [17], les bétons de haute performance comme le C60/75 ou C80/95 contiennent de la fumée de silice qui permet : globalement d'obtenir une structure poreuse fine et discontinue qui réduit la diffusion ionique (dont la plus connue est celle des ions chlorure) à travers la matrice et l'interface pâte de ciment ; de réduire la concentration d'ion hydroxyde OH^- dans les pores de la pâte cimentaire et ainsi lutter contre les phénomènes d'alcali réaction ; de réduire la présence de l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ grâce à la réaction pouzzolanique de la fumée de silice et de lutter contre la carbonatation et la corrosion des armatures en cas de dépassement. Par ailleurs les agents de réduction d'eau ou défloculants, contenus dans les superplastifiants ajoutés dans les bétons de haute performance, permettent également de diminuer la porosité (par une meilleure répartition dans la pâte cimentaire) et ainsi rendent le béton plus robuste vis-à-vis de possibles dégradations.

Un exemple de formulation d'un béton ordinaire C35 est comparé à la formulation d'un béton hautes performances C80/95 dans le Tableau II. 1.

	Viaduc Dordogne - semelles	Projet COEUR DEFENSE
Type de ciment	CPJ-CEM II/A 52.5 PM CP2	CPA-CEM I 52.5 PM CP2
Ciment	350 kg/m ³	425 kg/m ³
Sable	690 kg/m ³	790 kg/m ³
Gravier	1190 kg/m ³	1050 kg/m ³
Eau	160 kg/m ³	145 kg/m ³
Fumée de silice		25 kg/m ³
Adjuvant	0.6% du poids de CPJ	2% du poids de CPA
Rapport E/C	0.46	0.34
fck	35 MPa	80 MPa

Tableau II. 1 : Formule d'un béton ordinaire C35 et d'un béton haute performance C80, Jaeger, J.-M. [18]

La nature des adjuvants peut modifier significativement les propriétés des bétons, mais il faudra contrôler l'impact environnemental de ces derniers.

Pour les IGH, on utilise couramment des bétons de haute qualité : de classe C60/75 pour le noyau, et C80/95 pour les poteaux, mais ces bétons ne sont pas disponibles sur l'ensemble du territoire français et sont utilisés spécifiquement pour ces ouvrages exceptionnels. Cependant, dans une optique d'un multi réusage, ces bétons sont également intéressants pour des bâtiments plus petits, car leur durabilité est supérieure à celle d'un béton ordinaire.

2.1.4.3. Acier

L'acier est un matériau de construction très performant, autant d'un point de vue résistance que durabilité. Comme pour le bois et le béton, lorsque l'acier est utilisé en élément de structure d'un bâtiment, il est épargné des principales agressions d'origine externe et doit présenter une protection contre le feu. La principale dégradation de l'acier est liée au phénomène de corrosion qui peut être évitée par un traitement anticipé. Ainsi les fabricants promettent une durée de vie pratiquement illimitée aux éléments de structures bien conçus et entretenus¹. La soudabilité des aciers de construction les rend d'un usage très souple pour des projets complexes. Par ailleurs leur assemblage par boulonnage est très courant à l'instar des structures en bois.

2.1.5. Les enjeux d'une structure réemployable, problématique de conception des immeubles démontables

Un bâtiment est généralement composé d'éléments horizontaux (planchers), lesquels supportent les charges fonctionnelles (dépendantes du programme déterminé : bureaux, logements, etc.) et les transfèrent aux éléments verticaux (poteaux, voiles). Lorsque la hauteur du bâtiment augmente on introduit généralement un noyau central dont le rôle est primordial : à la fois reprendre une partie de ces charges fonctionnelles mais également assurer une majeure partie du contreventement.

Par ailleurs, les éléments en béton armé constituant le noyau des IGH sont difficilement démontables et encore moins réemployables, compte tenu des exigences de monolithisme et de raideur attendues de la part de ce dernier. De même, les éléments constituant les fondations sont très spécifiques à une parcelle donnée et à un contexte géotechnique unique et par conséquent difficilement réutilisables. Il est donc nécessaire de minimiser les niveaux dans le sous-sol, qui ont également tendance à présenter des impacts environnementaux au m² plus élevés qu'en superstructure, [19].

Le noyau, par sa conception, n'étant pas un élément présentant une opportunité de réemploi, on cherchera ainsi à privilégier les éléments poteaux, poutres, et à supprimer les noyaux pour maximiser les éléments réemployables et donc la matière mise en œuvre réemployable.

¹ <https://www.construiracier.fr/choisir-lacier/construire-et-protéger/perennite/>, consulté le 10/05/2019.

En revanche, on préférera les éléments linéiques, comme les poteaux et les poutres, plus manipulables que les voiles et les dalles.

Ainsi on peut établir un classement des éléments présentant des prédispositions au démontage et au réemploi et des éléments *a priori* non réemployables dans le Tableau II. 2.

Réemployables	Non réemployables
Structure poteaux-poutres sans noyau	Noyau
Poteaux	Voiles
Poutres	Dalles ²
	Fondations

Tableau II. 2 : Classement des éléments porteurs en fonction de leurs prédispositions ou non au réemploi.

La lecture de ce tableau guide la recherche de réemployabilité vers certaines typologies à privilégier comme celle du système poteaux-poutres sans noyau. D'autres typologies réticulées permettraient de proposer des éléments articulés dans une façade rigide, avec une réduction ou une suppression du noyau central également. La typologie choisie pour la structure influencera ainsi le nombre d'éléments démontables.

Concernant les charges à reprendre, on distingue deux principaux types d'actions appliquées aux bâtiments :

- Les actions verticales liées au poids propre de la structure, les charges d'équipement et les charges d'exploitation ;
- Les actions latérales liées aux effets du vent et le cas échéant d'un séisme.

Pour les bâtiments comportant une vingtaine d'étages le contreventement (résistance au vent) peut être assuré uniquement par une structure de type poteaux-poutres sans noyau central, selon Banks et al. [20]. Ce principe implique un encastrement des poutres dans les poteaux pour garantir la rigidité du bâtiment. La présence du noyau central permet de monter plus haut, toujours selon Banks et al. [20]. Le défi de l'ingénieur structure est donc ici de concevoir un bâtiment à la fois suffisamment raide et déconstructible. Or le principe de déconstructibilité défini par le DfD induit la multiplication d'articulations qui remet en cause la raideur globale du bâtiment, et qui peut nécessiter de modifier le principe de contreventement. Des assemblages mécaniques préfabriqués vont davantage correspondre à une liaison articulée (du fait des tolérances de montage, voire d'un certain jeu dans l'assemblage). Dès lors, la raideur de ceux-ci est à connaître afin de modéliser le comportement global de la structure. Dans les parties suivantes, nous allons montrer comment ce paramètre est d'autant plus important à maîtriser que le bâtiment est haut.

L'autre piste consiste, comme on l'a vu précédemment, à concevoir des assemblages coulés en place mais démontables, qui assureraient cette raideur recherchée. Par ailleurs, le béton coulé en place correspond, sauf exception comme celle dite des articulations

² Une étude spécifique pourrait être entreprise pour faciliter le réemploi des dalles en prévoyant une décomposition en éléments manipulables et transportables, e.g., en poursuivant la recherche de la proposition faite dans le cadre du projet Demodolor, mais en travaillant aux applications pour des immeubles de plus grande hauteur.

« Freyssinet », à un encastrement, ce qui est la solution constructive la plus utilisée en France aujourd'hui, car bien maîtrisée, robuste et économique. Il est donc intéressant, parallèlement, d'étudier plus en détails la possibilité de démonter facilement ces encastresments en béton armé coulé en place.

2.2. La structure archétypale de l'IGH, et son stock potentiel

Les IGH (Immeubles de Grande Hauteur) font figure de stock idéal généré par un seul bâtiment, du fait du grand nombre d'éléments identiques. Ce type de structures est également au cœur de l'activité de Setec, dans l'équipe structures complexes, au sein de laquelle est réalisée la présente thèse CIFRE. Ce sont ces deux raisons qui ont motivé l'étude spécifique de telles structures. Celles-ci présentent une complexité technique qui autorise, *lato sensu*, des applications sur des bâtiments plus petits. La recherche de leur réemployabilité conduit à étudier l'impact du choix des typologies, et des types de liaisons, sur le comportement global. Un surdimensionnement est attendu pour améliorer la réemployabilité et compenser la perte de raideur due aux articulations. Un raisonnement systémique sur plusieurs cycles d'usages est alors nécessaire pour en analyser les impacts environnementaux.

2.2.1. Prédisposition de l'IGH pour le réemploi

Le réemploi consistant à maximiser le nombre d'éléments similaires, simplifiés et facilement démontables, les IGH se prêtent particulièrement bien à celui-ci car ils comportent de nombreux éléments identiques et ont souvent le même type de portée pour le même programme. Généralement pour dimensionner une telle structure, l'ingénieur va décomposer la hauteur du bâtiment en batteries³ et chaque batterie sera composée de poteaux identiques. Cette méthode permet de réduire le nombre de poteaux différents. Cela permet également, lors de la construction de garder des méthodes optimisées pour fabriquer les poteaux rapidement et à moindre coût. Les éléments porteurs horizontaux sont, pour la plupart, les mêmes pour l'ensemble du bâtiment. Disposer de plusieurs éléments porteurs identiques pour le réemploi permet de raisonner en lots homogènes, ce qui est plus avenant à la fois pour trouver un repreneur, qui aura généralement besoin de plusieurs éléments répétitifs, et à la fois pour caractériser les éléments (on pourra éventuellement tester de façon exhaustive un élément

³ La batterie dans un IGH correspond à un bloc volumique de l'IGH au sein duquel les éléments porteurs verticaux ont la même dimension. Concrètement, cela permet de rationaliser la construction de poteaux (coffrage et bétonnage) identiques au sein d'une même batterie et de diminuer la taille des poteaux au fur et à mesure que l'on change de batterie et que l'on s'élève. Un IGH peut comporter 3 à 5 batteries généralement. Cette notion de batterie est, à l'origine, liée aux batteries d'ascenseur qui desservent différentes tranches d'étages. Ainsi dans le cas de 3 batteries dans l'IGH : la « batterie basse » dessert le tiers inférieur, la « batterie moyenne » dessert le tiers du milieu et la « batterie haute » le tiers supérieur.

représentatif du lot). Dans cette optique, il sera davantage aisé de démonter des éléments porteurs linéaires (poteaux, poutres) et articulés de façon distincte.

2.2.2. Conception d'un IGH et typologie structurale

2.2.2.1. Définition légale, Article R122-2 du Code de la Construction et de l'habitation

« Constitue un immeuble de grande hauteur, tout corps de bâtiment dont le plancher bas du dernier niveau est situé, par rapport au niveau du sol le plus haut utilisable pour les engins des services publics de secours et de lutte contre l'incendie :

- à plus de 50 mètres pour les immeubles à usage d'habitation, tels qu'ils sont définis par l'article R. 111-1 (1) ;
- à plus de 28 mètres pour tous les autres immeubles. »

2.2.2.2. Critères dimensionnants des IGH⁴

La stabilité de la tour doit être assurée sous charges verticales et horizontales. Plus l'immeuble est haut, plus les actions latérales prendront de l'importance par rapport aux actions verticales. En plus de la vérification des contraintes à l'ELS (Etats Limites de Service) et à l'ELU (Etats Limites Ultimes), pour un IGH, des critères doivent être particulièrement vérifiés :

- Pour les actions verticales : la structure doit respecter les critères d'horizontalité des planchers et de tassement, de raccourcissement différentiel noyau et poteaux, de résistance structurelle des horizontaux (planchers) et des verticaux (noyau, poteaux), de flèches de plancher ($1/500^{\text{ème}}$) avec rigidité de la poutre de façade, de déplacements différentiels entre étages (ou drift) limités à 10-15 mm, de capacité du sol de fondation à recevoir la tour ;
- Pour les actions latérales, principalement le contreventement : l'ossature de la tour doit respecter les critères de limitation des déplacements horizontaux et d'accélération en tête de tour, de flèche horizontale sous effets du vent ($\approx 1/700^{\text{ème}}$) (critères de confort des usagers, façade) ;
- La stabilité au feu et sécurité incendie.

Il faut aussi rappeler que parmi les actions latérales, on note le séisme, bien qu'il ne soit pas prépondérant en Europe par rapport à d'autres régions du monde. La prise en compte du séisme a donc été écartée du travail présenté ici.

Le critère d'accélération en tête est principalement un critère de confort afin que les occupants des étages les plus élevés ne ressentent pas de nausée au premier coup de vent. Ces critères ne sont pas directement explicités par les codes de calcul et peuvent légèrement différer selon les référentiels (cf. partie « confort en tête de tour » du Vademecum ADIVBois [22]). En

⁴ Les principes théoriques rappelés dans les parties suivantes sont issus de plusieurs cours dispensés par les ingénieurs Setec au sein de différentes écoles : Ecole des Ponts ParisTech [18] [49], ECP [50] [52], ESTP [21], CHEC-CHEM [53].

général, dans la pratique française, on limite le déplacement horizontal en tête de tour à $1/700^{\text{ème}}$, $1/800^{\text{ème}}$ de la hauteur de la tour et l'accélération horizontale en tête de tour au niveau du dernier plancher est limitée à maximum 20 milli-g, d'après le cours dispensé à l'ESTP par Jaeger [21].

D'autres phénomènes sont également à prendre en compte bien qu'ils soient moins difficiles à intégrer :

- L'interaction sol-structure. La tour doit être solidement ancrée dans le substratum. Sous l'action des efforts horizontaux la structure d'une tour s'apparente alors à une poutre en console encastrée à sa base, tout défaut de raideur à la base peut être très préjudiciable ;
- L'interaction structure-façade. Les déformations verticales dépendront de la hauteur des poutres de façade, de la portée entre les poteaux de façade alors que les déformations horizontales dépendront du dimensionnement des éléments, et de la complexité rigidité des connexions structurales. La structure est dimensionnée de manière à limiter les déformations différentielles entre les étages (soit entre $H/400$ et $H/250$).

D'après l'ensemble des actions décrites précédemment, il s'avère que les principaux critères dimensionnant pour un IGH concernent le contrôle de la flexibilité de l'ouvrage sous les efforts latéraux qui s'exercent sur celui-ci (vent, séisme) et principalement la limitation des déplacements horizontaux en tête de tour.

Le contreventement peut être assuré par :

- Un noyau central qui fonctionne alors comme une poutre tubulaire encastrée sur les fondations,
- Une structure de façade de type poteaux-poutres
- Une combinaison des deux précédents.

2.2.2.3. Typologies structurales d'IGH

Les différentes typologies sont plus ou moins adaptées à une hauteur d'IGH donnée. Ainsi, en Figure II. 2, le guide « Tall Buildings », Banks et al. [20] illustre la typologie adaptée à la hauteur recherchée.

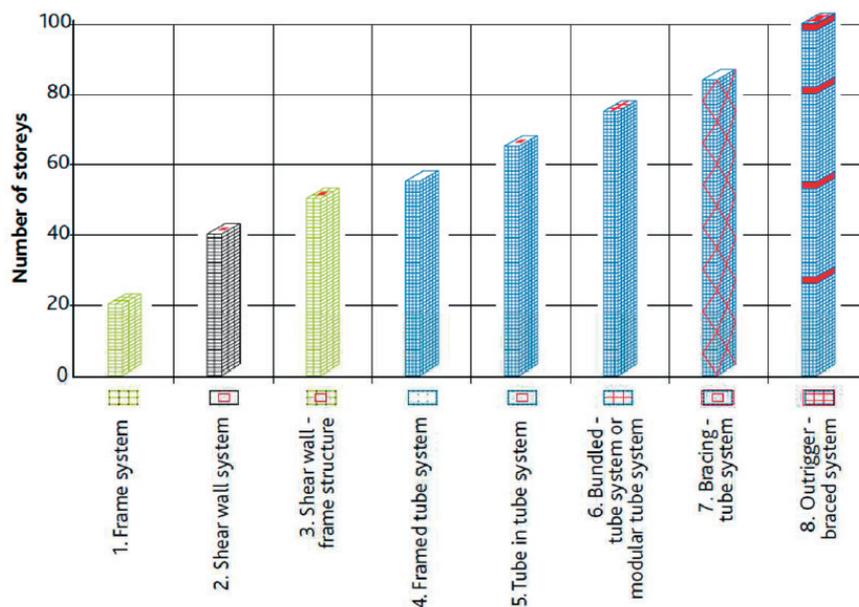


Figure II. 2 : Typologie structurale selon le nombre d'étages de l'IGH, d'après Banks et al. [20]

Sur la Figure II. 2, la stabilité du système poteau-poutre (1. Frame system) est assurée par les liaisons en encastrement, celle de la structure à noyau central (2. Shear wall system) par ce dernier, lequel fonctionne comme une poutre encastree en pied. La stabilité du modèle 3 (Shear wall-frame structure) est une combinaison des deux précédents avec une répartition des efforts repris en fonction de la rigidité relative du noyau et de la grille de portiques. Dans le modèle 4 (Framed tube system), la façade fonctionne comme un tube, tandis que le modèle 5 (Tube in tube system) est une combinaison de 4 et de 2. Dans le modèle 6 (Bundled-tube system), des refends viennent compléter le contreventement extérieur. Le système 7 (Bracing-tube system) est encore appelé exo squelette. Son efficacité vis-à-vis du vent est très bonne du fait de la triangulation en périphérie. La structure en « outrigger » permet de faire collaborer noyau et façade au contreventement grâce à des poutres de grande rigidité (qui se déforment peu) sur un étage complet, qui relie les deux parties. Le système 8 (Outrigger-braced system) en est une variante. Un exemple de structure en outrigger est donné ci-après en Figure II. 3 pour le projet de la Tour Entisar qui est également exposée Figure II. 12. Les voiles en orange sur la Figure II. 3 permettent d'assurer la rigidité de l'ensemble de l'étage d'outrigger, en constituant la liaison entre le noyau et la structure de façade.

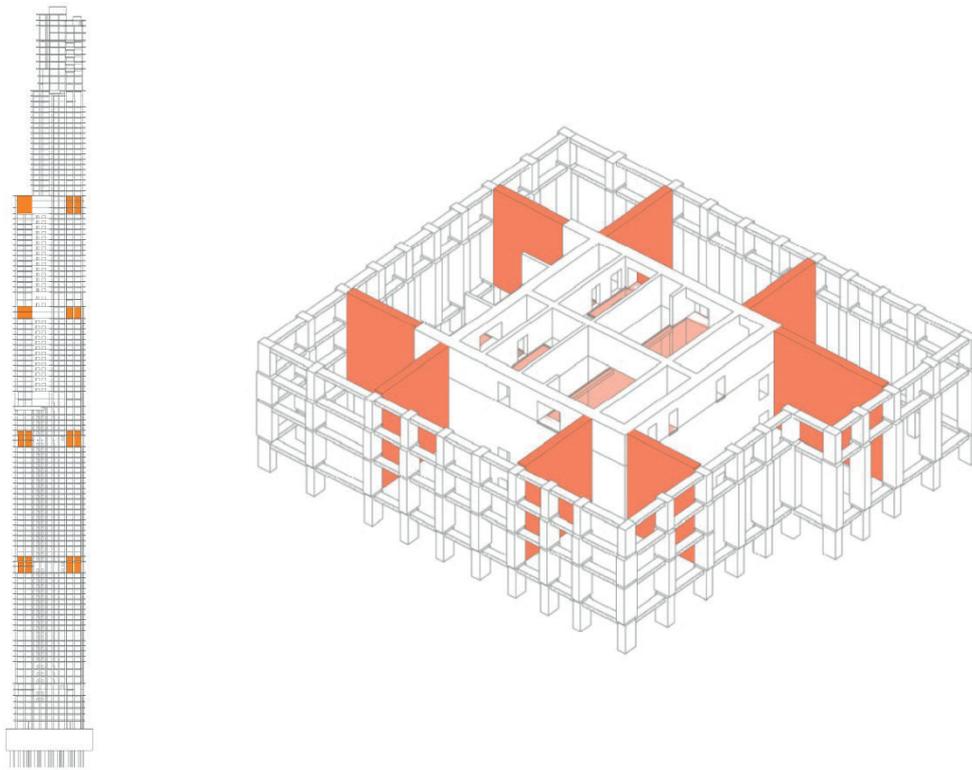


Figure II. 3: Système porteur pour le projet de la tour Entisar avec détail d'un niveau en 3D comportant les voiles pour constituer l'étage d'outrigger.

Parmi les systèmes porteurs, les plus performants en termes de hauteur atteinte sont les outriggers et les diagrids (ou bracing-tube system), selon Banks et al. [20]. Dans une structure, les efforts qui agissent latéralement compriment un côté de la façade et tendent l'autre, comme indiqué sur la Figure II. 4. Les diagrids présentent également l'avantage de pouvoir recourir à des connexions articulées, tout en rendant le contreventement optimal. Avec cette typologie, les éléments étant placés en limite d'enveloppe, ils créent une inertie maximale qui permet d'obtenir une rigidité au vent avec un minimum de matière, comme représenté

schématiquement dans la Figure II. 4 avec le cas (c) du contreventement en façade porteuse, par rapport aux cas (a) du noyau central et (b) du système noyau et outriggers.

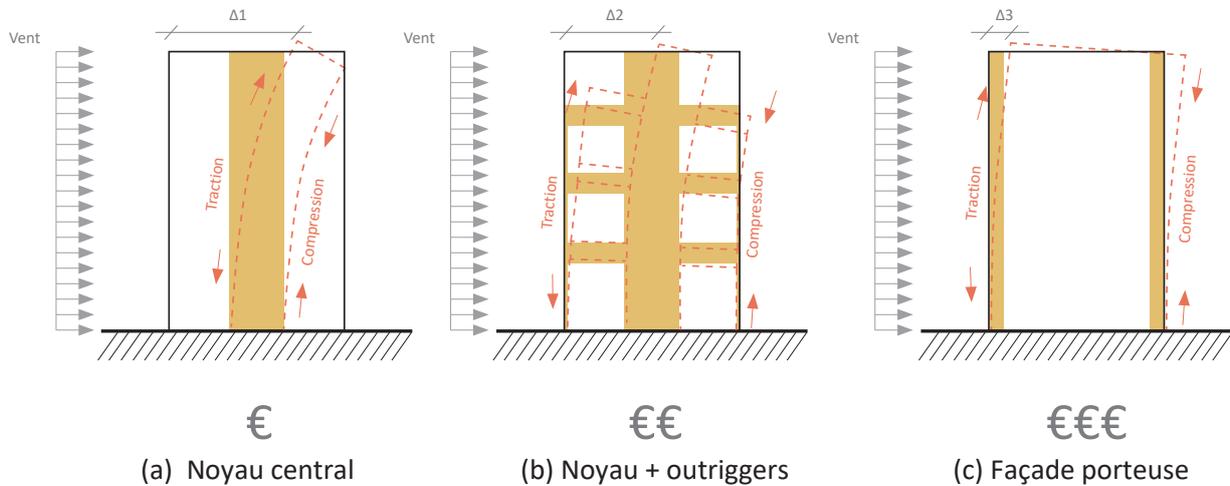


Figure II. 4 : Schématisation de l'importance du déplacement en tête selon la typologie de contreventement choisi et indications économiques de réalisation correspondantes.

2.2.2.4. Disparition du noyau dans les IGH et répercussion sur la réemployabilité

Dans la course à la hauteur des IGH et dans un souci d'économie de matière pour de tels ouvrages, la tendance actuelle est de renvoyer tout ou partie des efforts de vent vers les structures de façade pour profiter de la raideur de cette structure de façade, on vise même dans certains cas à ne plus faire appel au noyau. Le noyau monolithique n'est pas réutilisable⁵ mais consomme une bonne partie de la matière. Par exemple, pour la tour Majunga, le noyau représente 20% du volume total de béton, tandis que les poteaux représentent 8% du total de béton. (On ne prend pas en compte ici les fondations). Reprendre les efforts par une façade que l'on rend plus raide permettrait alors d'économiser la matière et autoriserait une flexibilité de l'aménagement. Sur le plan architectural, les architectes souhaitent parfois maîtriser l'emplacement de la cage d'ascenseur et ne pas subir son emplacement, par défaut, au sein du noyau central. Par exemple, sur la tour Trinity (conçue par Setec et Cro&Co architecture) les ascenseurs sont placés derrière une façade vitrée pour mieux dévoiler l'activité de l'immeuble et bénéficier d'une vue exceptionnelle sur la Défense. On constate actuellement une mouvance globale naissante pour renvoyer les efforts vers la façade via notamment un exosquelette en façade, ce qui permet également d'atteindre des niveaux plus hauts.

Si l'action du vent est reprise par la façade, le bras de levier n'est pas le même que dans une configuration où c'est le noyau qui reprend les actions latérales (Figure II. 5). En contreventant par la façade, on réduit les efforts internes. Le bras de levier est ainsi plus grand

⁵ Des recherches spécifiques sur les noyaux démontables permettraient de proposer une alternative aux noyaux monolithiques. Un noyau reposant sur une structure type « frame » pourrait ainsi autoriser un réemploi possible.

que dans une configuration où c'est le noyau qui reprend les actions latérales. Contreventer par la façade, c'est donc augmenter le bras de levier des réactions internes et *in fine*, consommer moins de matière, comme illustré dans la Figure II. 5.

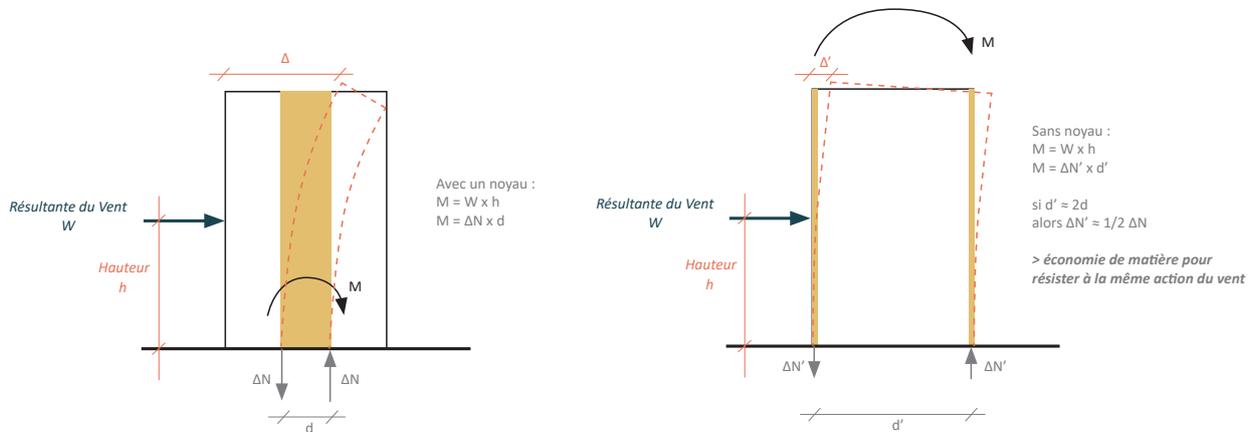


Figure II. 5 : Cas de la reprise du vent par le noyau ou par la façade

Supprimer le noyau c'est donc permettre une économie de matière significative. Cependant cela induit de réintroduire de la raideur dans la façade qui reprend alors les efforts de vent. Cette raideur peut être assurée :

- Par un système triangulé où les diagonales articulées sont multipliées ;
- Par des liaisons encastées, qui sont moins aptes à la démontabilité ;
- Par des liaisons semi-encastées, suffisamment raides et démontables.

Ces trois solutions sont à analyser de façon systémique avec la matière globale pour déterminer dans quels cas il est plus raisonnable d'utiliser le système triangulé ou le système encasté. La raideur peut être améliorée par une augmentation de la quantité de matière mise en œuvre, ce qui pourrait donc être contreproductif pour notre sujet ou, dans le cas du béton, par une augmentation de sa qualité. Comme c'est de toute façon déjà le cas sur les projets d'IGH au sein de Setec, les bétons à hautes performances (BHP) seront donc privilégiés dans notre étude de cas partie 2.2.3.

Le fait d'articuler les éléments porteurs peut donc diminuer la raideur et avoir plusieurs conséquences sur le comportement global de la structure en affectant :

- Le déplacement horizontal et l'accélération en tête ;
- Le type de contreventement ;
- Le taux de travail des poteaux ;
- La taille des poteaux qui augmente avec la longueur de flambement ;
- La flèche de plancher ;
- Le déplacement différentiel inter-étage.

Un ajustement du dimensionnement des éléments pour augmenter la raideur par l'augmentation de matière pour respecter les critères dimensionnants du bâtiment conduira probablement à un surdimensionnement dont il faudra étudier l'impact et la faisabilité.

2.2.2.5. *Analyse des retours d'expérience des immeubles en bois sans noyau et sans diagonale, d'après ADIVBois [22]*

La participation de Setec au projet de recherche ADIVBois en tant que pilote de la commission technique « structure » a permis d'établir un retour d'expérience concernant les structures de grande hauteur en bois. La principale problématique soulevée est le fait d'assembler les éléments porteurs en bois avec des éléments métalliques, au sein d'une structure sans noyau porteur. La problématique des constructions en bois semble très intéressante à décrire puisque la problématique d'assemblage sera la même si l'on souhaite préfabriquer des éléments d'une structure démontable, qui nécessitera des organes d'assemblages complémentaires. Un des objectifs au sein de l'ADIVBois était de trouver la hauteur maximale possible que peut atteindre un bâtiment en bois, en respectant les règles de dimensionnement (Eurocode 5).

Un des principaux facteurs permettant de garantir la viabilité du modèle statique est la correcte modélisation des raideurs d'assemblages (et jeux de montage quand il y en a pour le bois). Les raideurs modélisées doivent correspondre à la rigidité des assemblages qui seront réellement exécutés sur le chantier. Cela induit les assemblages de liaison (poteaux / poutres), les assemblages de continuité, ainsi que les raideurs des appuis si ceux-ci ne sont pas parfaitement rotulés. En considérant des connexions encastrees, le critère dimensionnant pour tous les bâtiments de moyenne hauteur, est la contrainte maximale au niveau des poteaux. Concernant les bâtiments plus hauts, les critères dimensionnants deviennent les déplacements (en tête et inter-étage), ce qui est identique à la conception d'IGH en béton.

En première approche, dans cette étude pour ADIVBois, les assemblages poutre-poteau ou poteau-poteau ont été considérés rigides (encastrement parfait). Dans un second temps, les assemblages ont été dimensionnés suivant les efforts qu'il y a dans les nœuds de liaison du modèle encastree (modèle V0). Puis, un dernier calcul consistait à introduire dans le modèle de calcul les raideurs exactes de deux types d'assemblages (par broches dans le modèle V1, et par tiges métalliques scellées à la résine époxy dans le modèle V2), afin de vérifier leur influence sur la rigidité générale du bâtiment. D'après l'annexe nationale de l'Eurocode 5-1-1, la liaison par broches n'est en réalité, ni considérée comme encastree, ni comme articulée. L'assemblage de cette étude est donc considéré comme semi-encastree du point de vue de l'Eurocode 5.

A noter que les caractéristiques des matériaux (résistance du bois et du métal employés) ont un impact direct sur la résistance et la raideur des assemblages. Mettre en œuvre un bois plus résistant peut permettre, suivant les cas, d'augmenter la rigidité du bâtiment et/ou de diminuer les sections. L'autre possibilité est d'augmenter la rigidité de l'assemblage en utilisant d'autres technologies plus résistantes et plus performantes mais aussi en général plus coûteuses.

L'introduction de raideur, dans le modèle de calculs, est une démarche itérative. La méthode adoptée pour cette étude consistait à utiliser les dimensions du cas V0 ou cas de base (encastree) ; auquel a été progressivement ajoutée la raideur des assemblages, en testant plusieurs valeurs de raideur (V1 et V2). Les résultats des contraintes, déplacements et accélérations entre les différents cas ont ainsi été comparés dans la Figure II. 6.

Il est apparu que moins l'assemblage est raide, plus le déplacement en tête augmente. Lorsque l'on atteint une certaine hauteur, une trop faible raideur ne permet plus de respecter la limite de déplacement en tête. C'est donc le couple raideur/ déplacement en tête qui va limiter la hauteur maximale du bâtiment multi-étages. La Figure II. 6 montre les premiers résultats de déplacements obtenus pour les trois types de connexions et pour les trois hauteurs de bâtiments testées. Pour le modèle encastree (V0) et pour les trois hauteurs de bâtiment, les déplacements sont respectés. En revanche pour les deux autres assemblages (V1 et V2), seul le

R+10 respecte les critères de déplacement. Cela implique que pour le R+15 et le R+20, il faudra redimensionner et augmenter les sections de bois des éléments.

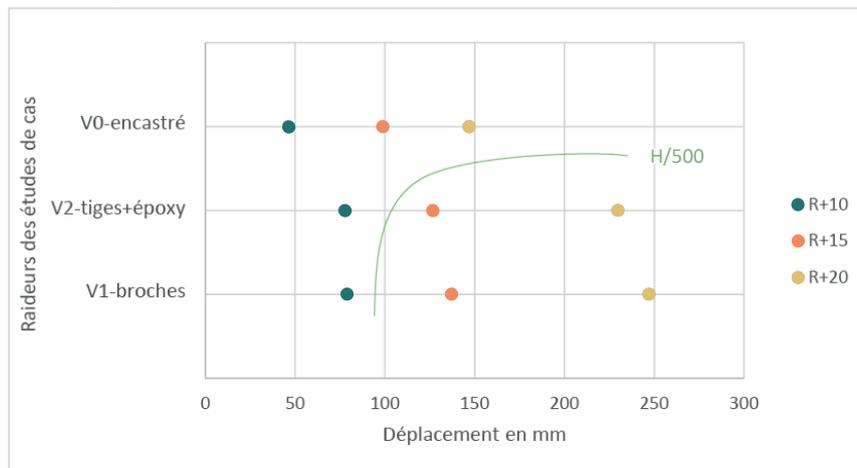


Figure II. 6 : Premiers résultats des différents déplacements selon l'assemblage testé et avant redimensionnement des sections en bois pour respecter le critère H/500.

En conclusion, l'ajout des raideurs des assemblages V1 et V2 dans le modèle assouplit le système structural et augmente d'une façon significative les déplacements en tête, de même que l'accélération en tête. En conséquence le critère des déplacements en tête devient dimensionnant alors que pour un modèle tout encastéré de moyenne hauteur, c'est souvent la contrainte maximale statique dans un poteau qui est dimensionnante. Le fait d'avoir une structure plus souple augmente également les déplacements inter-étages. L'ajout des raideurs dans la modélisation des assemblages a donc comme conséquence d'augmenter les dimensions des éléments structuraux pour respecter les critères de déplacements horizontaux. De ce fait, dans la conception des immeubles en bois, il est nécessaire de prendre en compte cette raideur le plus précisément et le plus en amont possible. Ce sera également le cas pour les autres types de structures présentant des assemblages mécaniques. On peut aussi supposer que pour les structures de grande hauteur de type poteaux-poutres en béton coulé en place, la connaissance fine de la raideur réelle d'encastrement est aussi nécessaire, et ce, d'autant plus dans une situation de réemploi pour laquelle il y aura des réassemblages.

2.2.2.6. Analyse des retours d'expérience - contribution des éléments dans un IGH

Dans la pratique on retrouve principalement le modèle classique poteaux-poutres avec un noyau porteur. Le Tableau II. 3 montre la répartition de reprise du vent et de reprise de la descente de charges verticales (DC) entre le noyau et la façade. Des illustrations de ces projets sont exposées Figure II. 7 à Figure II. 12. Il est intéressant de remarquer que les actions verticales et les actions horizontales ne sont pas réparties dans les mêmes proportions entre le noyau central et la façade.

Type de système	Shear wall system			Tube in tube system	Outrigger-system	
Tours issues de projets Setec tpi	Tour EDF	Majunga	CBX	Tour Montparnasse	Tour Phare	Tour Entisar
Livraison	2001	2014	2005	1973	-	-
Hauteur	165 m	195 m	140 m	210 m	282 m	520 m
Étages	R+40	R+ 45	R+32	R+58	R+70	R+129
Superficie	64 300 m ²	69 500 m ²	43 000 m ²	90 000 m ²	147 000 m ²	300 000 m ²
Répartition vent	90% noyau /10% façade	90% noyau /10% façade	90% noyau /10% façade	100% noyau	50% noyau/ 50% façade	50% noyau/ 50% façade
Répartition DC	60% noyau /40% façade	60% noyau /40% façade	60% noyau /40% façade	70% noyau /30% façade	60% noyau /40% façade	60% noyau /40% façade

Tableau II. 3 : Caractéristiques structurales de quelques tours emblématiques issues du retour d'expérience des ingénieurs de Setec tpi.



Figure II. 7 : Tour EDF, © Pei-Cobb-Freed & Partners / Saubot Rouit Associates



Figure II. 8 : Tour Majunga, © Jean-Paul Viguier/Photograph Takuji Sjhimmura



Figure II. 9 : Tour CBX, © Kohn Pedersen Fox Associates/Saubot Rouit & Associates



Figure II. 10 : Projet pour la Tour Montparnasse, © Nouvelle AOM/Photo RSI Studio/IDA+



Figure II. 11 : Projet pour la Tour Phare, © mOrphosis



Figure II. 12 : Projet pour la Tour Entisar, © AE7 Associates

Dans les systèmes traditionnels des premiers IGH on avait généralement 10% des actions horizontales reprises par la façade le reste par le noyau mais on tend dans les IGH contemporains vers 50% reprises par la façade et 50% par le noyau. La répartition des efforts de vent entre le noyau et la structure de façade dépend directement de la raideur comparée de ces deux éléments. Le noyau reprend également en général de l'ordre de 60% des charges verticales. La structure de façade est traditionnellement constituée de poteaux régulièrement espacés et de poutres reliant les poteaux et supportant les planchers. La structure de façade complète le noyau pour la reprise des charges verticales et reprend de l'ordre de 40% de la descente de charge totale. La structure de façade peut être alors constituée d'une simple « grille structurelle » de type poteaux-poutres, d'un voile percé ou d'un diagrid (triangulation structurelle en façade, cf la Swiss Ray de Londres ou la tour D2 de Paris, Figure II. 13).



Figure II. 13 : Tour D2, © Atelier d'Architecture Anthony BECHU/Tom Sheehan/Photograph Anne-Claude Barbier

La typologie choisie pour la structure influencera donc également le nombre d'éléments démontables. Dans l'optique du réemploi, le développement de structures sans noyau sera, *a priori*, plus intéressant.

En conclusion de cette analyse qualitative, on déduit que les paramètres influents, vis-à-vis du réemploi d'un IGH, seront le type de liaison des assemblages et la présence ou non d'un noyau central. Une étude quantitative a été menée pour valider ces intuitions.

2.2.3. Influence de la typologie et des liaisons sur la quantité de matière réemployable pour les IGH – études de cas

Pour étudier l'influence de la typologie et du mode de liaison sur la quantité de matière mise en œuvre et réemployable, plusieurs variantes déclinées à partir d'un modèle de référence d'une tour IGH conçue par Setec ont été étudiées structurellement. La tour de référence étudiée est la tour Majunga construite à La Défense en 2014. Cette tour est également à l'origine de diverses précédentes études de cas internes à la Setec, notamment celle sur la recherche de dimensionnement de tours sans noyau par Braham [23], qui présentent d'autres potentiels au-delà du réemploi (comme une flexibilité d'aménagement, une surface disponible plus grande ou des coûts réduits). Les modèles de calculs de ces précédentes études ont alors été repris, cette fois pour maximiser l'articulation des éléments porteurs et donc leur possible démontage. Plusieurs typologies structurales, reposant sur différents types de contreventement et liaisons, ont ainsi été dimensionnées pour une même fonction de bureaux et nous ont permis d'élaborer une étude comparative du taux de matière réemployable.

2.2.3.1. Hypothèses pour la modélisation des études de cas

Pour ces études, le cas type de référence correspond à une mise en œuvre selon les méthodes de construction conventionnelles avec un noyau reprenant 80% des actions latérales et des éléments porteurs (poteaux, poutres et contreventement) encastrés. Ce cas-type présente les caractéristiques suivantes :

- 188m de hauteur
- 41 niveaux de superstructures
- Emprise au sol de 52,5m x 31,5m
- Plateaux de bureaux
- Trois batteries structurales de poteaux en superstructure

Les types de béton utilisés dans ce modèle de référence pour les éléments de structure sont :

- C80/95 pour les poteaux
- C60/75 pour les voiles du noyau
- C30/37 pour les horizontaux
- C35/45 pour le radier

Les mesures effectuées sur la tour Majunga réellement construite et le retour d'expérience de Setec ont permis de fixer les valeurs de déplacement en tête et d'accélération en tête mesurées dans l'environnement du quartier d'affaires de La Défense. Ainsi, le déplacement en tête de tour sous charge due au vent s'élève à 13,10 cm (ce qui est bien inférieur

au seuil limité à $1/500^e$ de la hauteur totale) et l'accélération en tête vaut 13,10 mg avec une période propre de 3,97s. Ces valeurs seront donc à respecter comme critères dimensionnants d'accélération et de déplacement en tête dans les études de cas suivantes pour que les comparaisons se fassent bien à service (structural) rendu égal. L'objectif des études de cas est de dimensionner différentes variantes d'une telle structure pour analyser les conséquences des connexions articulées et l'absence de noyau. Afin d'identifier la proportion judicieuse d'éléments pouvant être articulés dans le modèle, les déclinaisons porteront sur :

- L'encastrement des poteaux
- L'articulation des poteaux de façade seuls
- L'articulation des poteaux intérieurs seuls
- L'articulation de tous les poteaux
- La variation du système de contreventement (murs de ceinture, crois, murs transversaux, superpoteaux de façade)

Ainsi 14 modèles, illustrés en Figure II. 14, déclinant ces variantes, peuvent être comparés à la conception traditionnelle du cas-type qui nous sert de modèle de référence. Ces 14 études de cas ont été choisies comme représentatives des grandes familles de choix de typologies possibles sur des IGH courants du quartier de La Défense à Paris. Ces typologies reposent principalement sur le matériau de prédilection dans la pratique courante, le béton, mais la mixité et la charpente métallique sont également apparues intéressantes pour alléger les bâtiments (parfois nécessaire avec un urbanisme sur dalle ou pour franchir des infrastructures existantes) et pour leur caractère plus démontable (possibles assemblages mécaniques en acier). Le modèle de référence correspond à l'IGH que l'on retrouve le plus dans la pratique en France.

La modélisation initiale sur le logiciel Pythagore des modèles qui ont servi à l'analyse réalisée ici, a été produite par Braham [23] dans le cadre d'un travail de recherche annexe au sein de la Setec, sur les IGH sans noyau. Les modèles de calculs déjà existants ont ainsi pu être déclinés en relâchant les nœuds selon les variantes étudiées. En effet, pour créer l'articulation dans le modèle de calcul aux éléments finis sur le logiciel Pythagore, un relâchement est généré aux nœuds des extrémités des poteaux, ce qui induit également une articulation des dalles. Suite à ces relâchements, les dimensions des éléments porteurs ont été ajustées afin de respecter les critères de déplacement (13,10 cm) et d'accélération en tête (13,10 mg) fixés. On considérera que l'on ne récupère que les éléments avec liaisons articulées. On récupérera donc les poteaux mais on ne prendra pas en compte la récupération des dalles, ici toutes conçues monolithiques de la même façon dans toutes les variantes, et qui ne constituent donc pas un paramètre variant dans cette étude. On ne prendra pas non plus les éventuelles pertes de matières lors du démontage car on ne dispose pas des systèmes constructifs, ni des assemblages précis (déterminés en études d'exécution) qui pourraient être mis en œuvre, ni du mode de déconstruction.

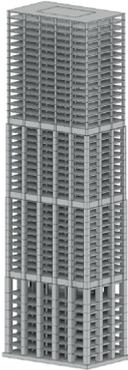
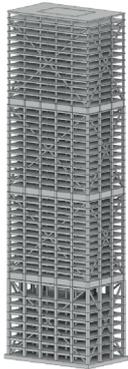
Typologie	Schéma	Nom	Matériau	Liaisons
T1 concrete core		T1a (modèle de référence)	Béton	Poteaux encastrés
		T1b	Béton	Poteaux articulés
T2 Tubed mega frame + outriggers		T2a	Béton	Poteaux encastrés
T3 outriggers + cross bracing		T3a	Béton	Poteaux encastrés
		T3b	Béton	Poteaux de façade articulés et intérieurs encastrés
		T3c	Béton	Poteaux de façade encastrés et intérieurs articulés
		T3d	Béton	Poteaux articulés
		T3e	Mixte acier-béton	Poteaux de façade encastrés et intérieurs articulés
		T3f	Mixte acier-béton	Poteaux articulés
T4 Crosswall + cross bracing		T4a	Béton	Poteaux encastrés
		T4b	Béton	Poteaux de façade articulés et intérieurs encastrés
		T4c	Béton	Poteaux de façade encastrés et intérieurs articulés
		T4d	Béton	Poteaux articulés
		T4e	Acier	Poteaux articulés

Figure II. 14 : Récapitulatif des études de cas testées pour étudier l'influence de la variation de l'articulation des éléments porteurs.

2.2.3.2. Résultats des études de cas

A partir des dimensionnements des 14 modèles décrits, les quantités de matière ont ensuite été analysées dans le cadre du présent travail. L'objectif est de comparer la matière mise en œuvre selon la typologie structurale, mais également selon le nombre d'éléments porteurs articulés, ainsi plus facilement démontables et donc réemployables, selon les principes du DfD. Une variation progressive de l'articulation des éléments porteurs verticaux a été mise en place par typologie, comme indiqué en Figure II. 15. Les modèles présentant le plus d'éléments verticaux articulés, et donc *a priori* les plus démontables, sont :

- T1b : structure béton armé avec noyau mais avec tous les poteaux articulés
- T3d : structure béton armé en outriggers et croix de contreventement avec poteaux articulés
- T3f : structure mixte acier-béton armé en outriggers et croix de contreventement avec poteaux articulés
- T4d : structure béton armé en murs transversaux et croix de contreventement avec poteaux articulés
- T4e : structure métallique en murs transversaux et croix de contreventement avec poteaux articulés

Le modèle T1b présentant un noyau a été réalisé pour le comparer au modèle traditionnel de référence, cependant la présence d'un noyau non réemployable diminue considérablement la matière potentiellement récupérable et on choisira d'approfondir l'étude des modèles sans noyau, en particulier, les modèles en outriggers couplés à des croix de contreventement et les modèles en murs transversaux couplés à des croix de contreventement.

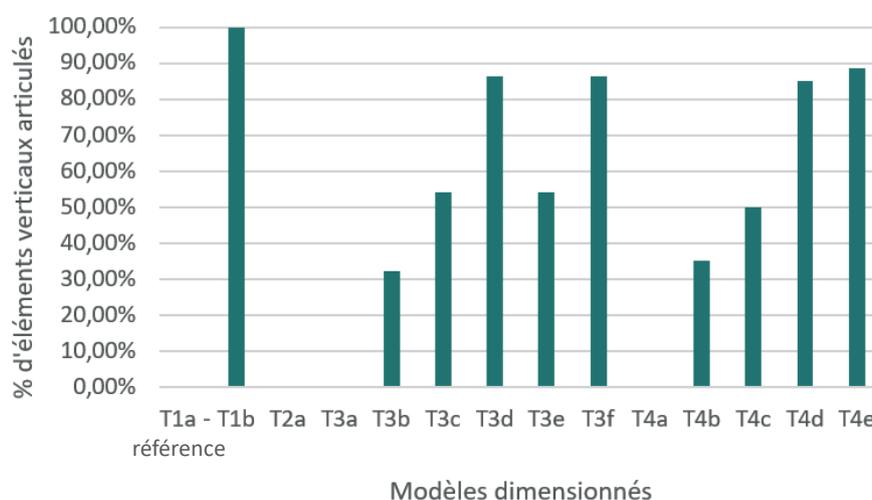


Figure II. 15 : Proportion d'éléments porteurs verticaux articulés selon le type de structure

La quantité de matière de chacun des modèles étudiés a donc été relevée pour permettre une comparaison selon ce critère. Le Tableau II. 4 expose ainsi la lecture croisée des résultats relatifs à la différence de matière (exprimée en pourcentages) par rapport au modèle de référence, mais également le pourcentage d'éléments porteurs verticaux articulés. On cherchera donc à identifier un éventuel surdimensionnement, en relation avec le pourcentage d'éléments articulés plus facilement réemployables. Un code couleur permet une analyse visuelle rapide : dans la colonne concernant la matière, la couleur rouge indique une augmentation de la matière (surdimensionnement) et le vert une économie de matière ; dans la colonne des éléments articulés, le orange indique 0% d'articulation et le vert foncé 100%

d'articulations. Le but est alors d'identifier le ou les modèles dont la couleur tire le plus en direction du vert pour chacune des colonnes.

Les résultats sont affichés dans le Tableau II. 4. On observe pour les modèles en béton armé que les cas T3d et T4d sont les plus performants. Leur surdimensionnement limité à 10-15% par rapport au modèle de base est acceptable en vue des gains possibles en réemploi. Les modèles mixtes acier-béton T3f et tout métallique T4e sont plus légers que les modèles en béton armé (jusqu'à 23% plus léger) et présentent les taux d'articulations les plus élevés, ils semblent donc les plus pertinents en vue d'une démontabilité. Cependant, l'impact environnemental de l'acier par rapport à celui du béton doit être correctement analysé sur plusieurs réemplois afin de ne pas privilégier une matière, certes plus légère, mais qui pourrait avoir un impact environnemental plus négatif que le béton. Par ailleurs, les répercussions géotechniques sur les fondations n'ont pas été prises en compte à ce stade de l'étude.

Modèles	Ecart de matière neuve en tonnes	Taux d'éléments verticaux articulés	Taux de matière réemployable
T1a - référence	-	0%	0%
T1b	8%	100%	7%
T2a	31%	0%	0%
T3a	7%	0%	0%
T3b	8%	32%	9%
T3c	8%	54%	7%
T3d	10%	86%	17%
T3e	-3%	54%	6%
T3f	-5%	86%	17%
T4a	9%	0%	0%
T4b	13%	35%	9%
T4c	13%	50%	7%
T4d	15%	85%	17%
T4e	-23%	89%	8%

Tableau II. 4 : Analyse du modèle le plus favorable en fonction du total de matière mise en œuvre, du taux d'articulation des éléments porteurs verticaux et du taux de matière réemployable par rapport au modèle de référence.

Nous avons ensuite mené une analyse sur plusieurs cycles de vie en prenant comme hypothèse que seuls les éléments porteurs verticaux articulés sont réemployés. On considère que les bâtiments des 14 modèles précédents ont une durée de vie conventionnelle de 50 ans (durée de référence dans les référentiels environnementaux, comme E+C- [24]). Parallèlement, nous considérons que la durabilité du béton armé au sein d'un bâtiment, donc non exposé aux risques de carbonatation par agressions externes, est importante⁶. Sur ce principe nous

⁶ Cette durée peut être raisonnablement envisagée aux vues de la durabilité des édifices en béton armé construits au début du 20^e s., bien que l'Eurocode 0 ne couvre qu'une durée indicative d'utilisation de projet de 100 ans maximum. Le premier immeuble en béton armé de François Hennebique a été construit en 1893, et se situe toujours au 1, rue Danton à Paris, [54]. De plus les progrès réalisés sur les bétons hautes performances (BHP) laissent espérer une durabilité significativement plus grande que pour

adoptons une période totale d'usage de 200 ans qui couvre alors 4 phases d'usage de 50 ans chacune.

On étudie donc, d'une part, l'hypothèse « traditionnelle » d'un scénario où ces bâtiments totalement neufs et construits à t_0 puis démolis à t_0+50 ans, sont ensuite reconstruits, à nouveau pour 50 ans, et on renouvelle l'opération 3 fois pour arriver à t_0+200 ans (scénario sans réemploi). D'autre part on étudie l'hypothèse « réemploi » d'un scénario où les bâtiments sont une première fois construits neufs à t_0 puis déconstruits à t_0+50 ans et dont on récupérera les éléments réemployables qui serviront à reconstruire des bâtiments semblables à t_0+50 ans, t_0+100 ans et t_0+150 ans (scénario avec réemploi), comme repris dans Figure II. 16.

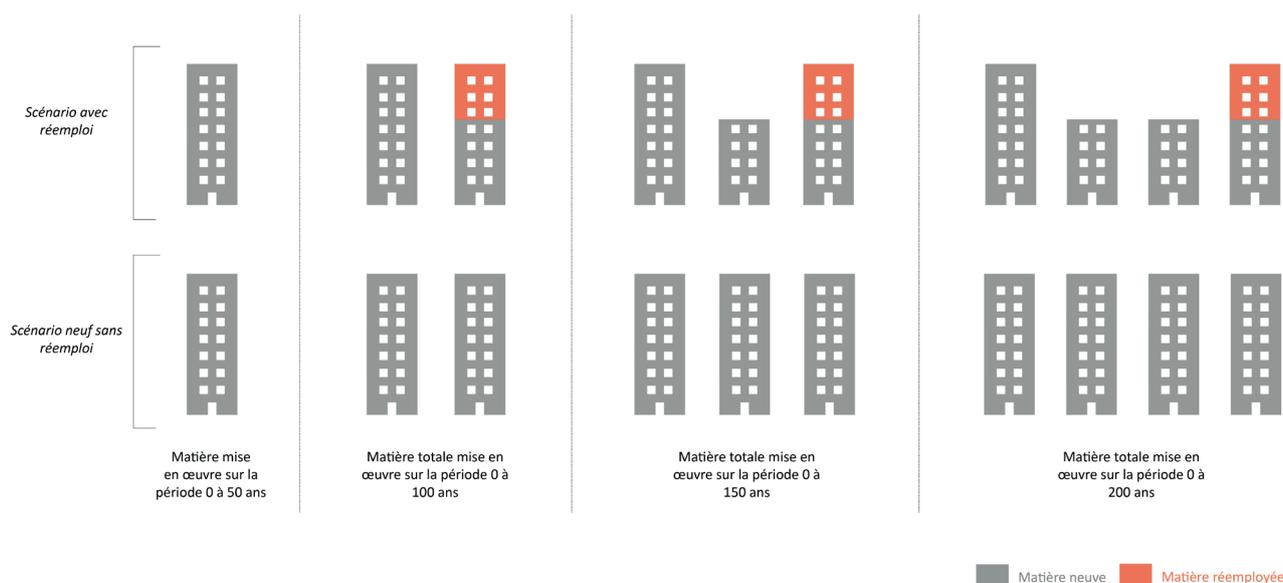


Figure II. 16 : Principe de l'étude comparative de matière mise en œuvre pour un bâtiment.

On obtient ainsi les résultats de la Figure II. 17 et détaillés dans le Tableau II. 5, où l'on peut déterminer la « rentabilité matière » du réemploi. On peut alors distinguer 3 groupes de réponses pour le total de matière cumulé sur la période 0-200 ans : 1. au-delà de 480 000 tonnes, le modèle T2a ; 2. entre 340 000 tonnes et 405 000 tonnes, les modèles T1a, T1b, T3a, T3b, T3c, T3d, T3e, T4a, T4b, T4c, T4d ; 3. en dessous de 310 000 tonnes les modèles T4e et T3f, soient les deux modèles que l'on retiendra comme les plus vertueux pour cette étude. On remarque, pour cette même période, un écart supérieur à 20% entre les groupes de réponse 2 et 1 (20,14% entre T2a et T4a), et un écart de 27,7% entre T3e (groupe 2) et T4e (groupe 3). A noter que l'écart significatif supérieur à 20% entre le groupe 1 et les autres groupes n'apparaît qu'à partir de la période 0-100 ans, c'est-à-dire après un premier réemploi d'éléments.

un béton ordinaire, comme l'affirment plusieurs recherches, Toutlemonde et al. [36], Resplendino et al. [37] notamment grâce à une réduction de la porosité (responsable de dégradations), selon l'AFGC [35]. Au regard des édifices en béton armé du début du 20^{ème}, si la durabilité est de l'ordre de 100 ans pour un béton ordinaire, elle pourrait donc être de l'ordre de 200 ans pour un BHP, voire 300 et plus pour un BFUP.

Les modèles T2a, puis T4a et T4c, apparaissent donc les plus défavorables au bout de 4 cycles de vie. Les modèles T4e (acier poteaux articulés), T3f (mixte acier-béton poteaux articulés) et T3e (mixte acier-béton et certains poteaux articulés), apparaissent les plus favorables au bout de 4 cycles de vie. Ces résultats révèlent que le modèle T3e (mixte acier-béton avec certains éléments articulés), qui n'avait pas été retenu précédemment comme favorable dans les premiers résultats sur un cycle d'usage, est ici très intéressant sur le long terme. Concernant les structures tout béton, le modèle T3d (béton poteaux articulés) en outriggers et croix de contreventement est plus favorable à long terme, privilégiant ainsi cette typologie structurale lorsque l'on choisit le matériau béton armé, en vue d'un réemploi grâce à une démontabilité facilitée.

On peut également noter au sein du groupe 2, une inversion au fur et à mesure que le nombre d'usages augmente. Ainsi sur la période 0-50 ans, la structure T4d est plus consommatrice que le modèle T4a de l'ordre de + 6% de matière mais sur la période 0-200 ans (soit 4 usages), le modèle T4d est finalement plus économe que T4a. On remarque qu'à partir du 3^e usage l'ordre des résultats ne change plus alors que les inversions s'observent entre le 1^{er} usage et le 2^e puis entre le 2^e et le 3^e. A partir du 4^e cycle, les écarts entre les cas continuent de se creuser. Cette étude montre l'intérêt d'un surdimensionnement au moment de la construction initiale pour favoriser le réemploi et ainsi devenir « rentable » sur le plan environnemental.

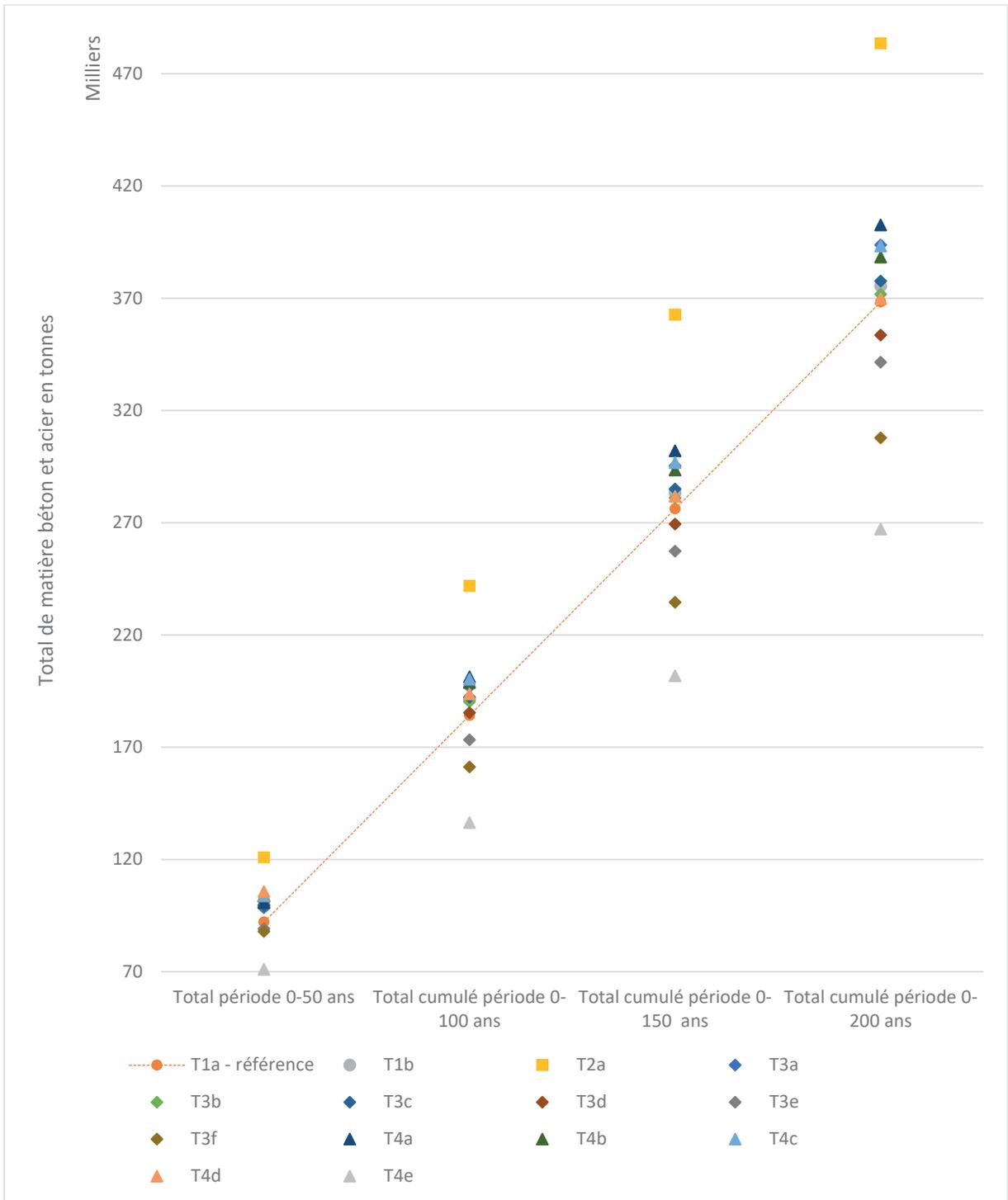


Figure II. 17 : Comparaison de la matière mise en œuvre selon les 14 modèles et leurs éléments réemployés sur plusieurs cycles d'usage.

Modèles	Total période 0-50 ans	Total cumulé période 0-100 ans	Total cumulé période 0-150 ans	Total cumulé période 0-200 ans
T1a - référentiel	92	184	276	368
T1b	99	191	283	375
T2a	121	242	363	484
T3a	98	197	295	394
T3b	100	190	281	372
T3c	100	192	285	378
T3d	101	185	269	354
T3e	89	173	257	341
T3f	88	161	234	308
T4a	101	201	302	403
T4b	104	199	293	388
T4c	104	200	297	393
T4d	106	194	282	370
T4e	71	136	202	267

Tableau II. 5 : Résultats de la quantité de matière acier et béton confondus, et en tonnes, mise en œuvre selon les 14 modèles et leurs éléments réemployés sur plusieurs cycles d'usage.

Le choix de la typologie en conception ne sera pas le même si l'on raisonne sur 1 ou 2 cycles d'usage. Mais il n'y aura pas de différence de choix selon que l'on raisonne ensuite sur 3 cycles ou sur plus de 3 cycles. En revanche, il n'y a quasiment pas de différence entre les résultats selon les typologies sur 2 ou 3 cycles d'usage. La meilleure typologie au bout de 4 cycles d'usages pour cette étude est donc le modèle T4e : structure métallique en murs transversaux et croix de contreventement avec poteaux articulés « *crosswall + crossbracing* ».

Pour les matériaux mixtes acier-béton, c'est la typologie structure mixte acier-béton armé en outriggers et croix de contreventement avec poteaux articulés (T3f et T3e) « *outriggers + cross bracing* » qui est la plus favorable à un réemploi et à un gain de matière. Pour le tout béton, c'est également la structure en outriggers et croix de contreventement avec poteaux articulés qui est la plus favorable (T3d). Le contreventement en diagonale est donc une option structurale pertinente pour le réemploi, car il peut favoriser la démontabilité des articulations. Lorsque l'on l'allie au système *outrigger*, l'IGH peut, en plus, gagner en hauteur.

On voit donc qu'il peut être judicieux d'accepter un surdimensionnement initial si celui-ci permet d'augmenter la réemployabilité d'une structure après plusieurs usages, grâce des assemblages articulés, donc plus facilement démontables. C'est le cas pour le modèle T3d, qui, au moment de la construction, présente 10% de matière de plus que le modèle de référence T1a, mais, qui, au bout de 4 usages cumulés présente 4,18% de matière de moins que T1a. Pour ce modèle, les bénéfices du réemploi ont donc compensé le surdimensionnement initial.

Cependant de nombreux modèles (au-dessus de la ligne de pointillés orange sur la Figure II. 17) ne sont pas rentables du point de vue environnemental puisque le surdimensionnement initial n'est jamais compensé par le réemploi. Il faudra donc éviter les typologies des modèles se situant au-dessus des pointillés sur la Figure II. 17). La plus mauvaise des typologies à éviter, est ici la typologie « *Tubed mega frame + outriggers* » qui est bien plus consommatrice de matière que la construction classique en béton coulé en place et noyau.

Cette étude montre également que les bénéfices apportés par la mise en place d'articulations pour les éléments linéaires sont limités, car les éléments linéaires représentent un faible volume par rapport à l'ensemble du bâtiment. Une méthode pour réemployer les dalles permettrait donc une augmentation très significative des bénéfices du réemploi à l'échelle d'un IGH.

Néanmoins, dans le cas des IGH notamment, les assemblages à sec peuvent apparaître très onéreux et il existe différentes manières d'assembler. Il paraît donc judicieux d'étudier d'autres formes d'assemblages et en particulier ceux coulés en place, technique de prédilection pour les IGH en France. Les assemblages en béton coulé en place ne sont pas démontables comme le sont les liaisons articulées par assemblages à sec, et il faudrait alors les concevoir pour une déconstruction facilitée. C'est ce qui a été étudié dans le chapitre IV.

Il ne faut donc pas négliger de traiter également les bâtiments construits en béton armé qui reste la technique majoritairement utilisée en France, selon l'observatoire E+C- [9]. Comme il nous apparaît primordial d'accompagner la transition progressive de toutes les techniques de construction vers le 100% réemployable, une confrontation entre les principes idéaux théoriques issus du DfD (restrictif sur les possibilités constructives) et les pratiques actuelles du terrain est nécessaire. Cette confrontation est abordée dans la partie 2.4. de ce chapitre.

2.3. Influence de la géométrie et de la trame sur la qualité du stock

2.3.1. Le potentiel de la géométrie pour permettre une réversibilité des éléments porteurs

Comme le dit à juste titre Bignier, G. : « Aujourd'hui, il n'est pas rare non plus que le plan de ferrailage des poutres en béton armé soit calculé pour une seule utilisation, pour des raisons d'optimisation économique qui peuvent sembler évidentes mais qui, écologiquement, semblent toujours avoir des conséquences néfastes. [...] Il semble ordinairement nécessaire d'intégrer le démantèlement de l'ouvrage dès sa conception. Afin d'anticiper ce démantèlement, on peut réfléchir sur le système de fondations du bâtiment et par voie de conséquence sur son poids, sur la démontabilité des assemblages structurels, sur les quantités d'énergie nécessaires à son démantèlement. Toutes considérations qui ont un impact évident sur son architecture. » [25]. En poursuivant cette idée, l'optimisation de matière ne correspond plus forcément à réduire la quantité au maximum mais à anticiper au mieux sa pérennité. La priorité environnementale peut alors mener à un paradoxe apparent où un surdimensionnement des éléments porteurs, par rapport à nos méthodes courantes, peut très bien être bénéfique sur le long terme. En effet, au lieu de produire des éléments optimisés et ultra spécifiques, il paraît judicieux de réinterroger la standardisation des éléments. En d'autres termes, un élément plus courant car simplifié dans son dessin pourrait facilement s'adapter à une multitude d'usages et de bâtiments. Ainsi nous avons évalué, dans cette partie, la pertinence de conception d'un élément standard légèrement surdimensionné dont le but est d'augmenter son nombre d'usages et prolonger sa propre durée de vie.

L'étude des IGH nous a permis de révéler un point bloquant : celui de la spécificité géométrique des éléments porteurs en fonction du programme du bâtiment. Cela induit, aujourd'hui, qu'un élément se trouvant dans un immeuble de bureau ne pourrait pas être réemployé dans un immeuble de logement.

Cette partie a pour but d'analyser les potentiels d'une trame universelle pour tout type de programme, mais aussi, dans cette continuité, de rechercher la possibilité de mettre en

œuvre un élément porteur unique qui pourrait fonctionner à la fois en tant que poutre et en tant que poteau. Ainsi on augmenterait considérablement le stock d'éléments disponibles pour le réemploi, permettant un nombre plus important d'applications pour un même élément.

2.3.2. Recherche d'une trame universelle

Encouragée par la loi ELAN (Chapitre 0, partie 0.1.3.5.), la flexibilité programmatique des bâtiments entraîne un besoin de réversibilité des structures. Patrick Rubin, dans son ouvrage *Construire Réversible* [26], démontre la nécessité de penser les bâtiments différemment en leur attachant des dimensions plus universelles pour correspondre à différents types de programmes : logements, bureaux. Il dénonce au passage le fait que la démolition des bâtiments est préférée à leur transformation, au profit d'un ouvrage neuf répondant plus facilement à une exigence normative actuelle. Ainsi l'ensemble des pratiques usuelles dans la construction a mené à des règles d'usage, que l'on retrouve dans les projets au sein de Setec. Un bureau répond donc la plupart du temps à une trame standard de 1m35 pour ses modules de façade, afin d'implanter un bureau type sur 2 trames de fenêtres (2,70m de large) et sur une profondeur d'environ 5m (5,4m si la façade perpendiculaire respecte la même trame), soit une surface type d'environ 13,5m² et une hauteur sous plafond de 2,7m à 2,8m (soit 3,3 m à 3,7m dalle à dalle). Les portées sont alors calées sur des multiples de la façade : 5,4m ; 8,1m, 10,8m. La profondeur totale d'un bâtiment de bureaux est fixée entre 18m et 20m. Pour les logements, la hauteur sous plafond est généralement de 2,5m (soit 2,8 m à 3,1m dalle à dalle) mais les trames sont plus diverses.

Dans l'optique d'une flexibilité poussée il faut donc à la fois prévoir les bâtiments les plus compatibles possible avec différents programmes (sans affecter la trame porteuse) mais également laisser la liberté d'un réaménagement plus large (en permettant une réversibilité d'une partie ou totalité de la structure porteuse). La réversibilité des éléments permet ainsi une liberté d'aménagement spatial, mais aussi une liberté de rendre les éléments disponibles pour un réemploi lorsqu'ils ne sont plus nécessaires dans une configuration donnée. Réemploi et réversibilité vont donc de pair puisque le réemploi induit une démontabilité facilitée. Un élément réemployable universel permettrait également de démultiplier les usages possibles dans différentes configurations constructives et sera approfondi en partie 2.3.4.

Selon la loi ELAN les nouveaux IMH (Immeubles de Moyenne Hauteur) compatibles bureaux et logements ont une hauteur comprise entre 28 et 50 mètres. Sur la base des recommandations de l'ouvrage « Construire réversible » [26] et des pratiques courantes de l'équipe Setec tpi « structures complexes » dans laquelle la thèse est menée, un bâtiment IGH réversible « type » a été conçu, à des fins de simulations, et illustré Figure II. 18, pour une hauteur de 67,5 m, 18 étages en superstructure, et pourra tout à fait être reproductible à l'échelle d'un IMH. Le système porteur retenu est celui du « *Frame system* » ou « poteaux-poutres », qui correspond le mieux aux contraintes structurales de ces hauteurs, d'après la Figure II. 2 mais aussi aux contraintes de spatialité en libérant les espaces intérieurs.

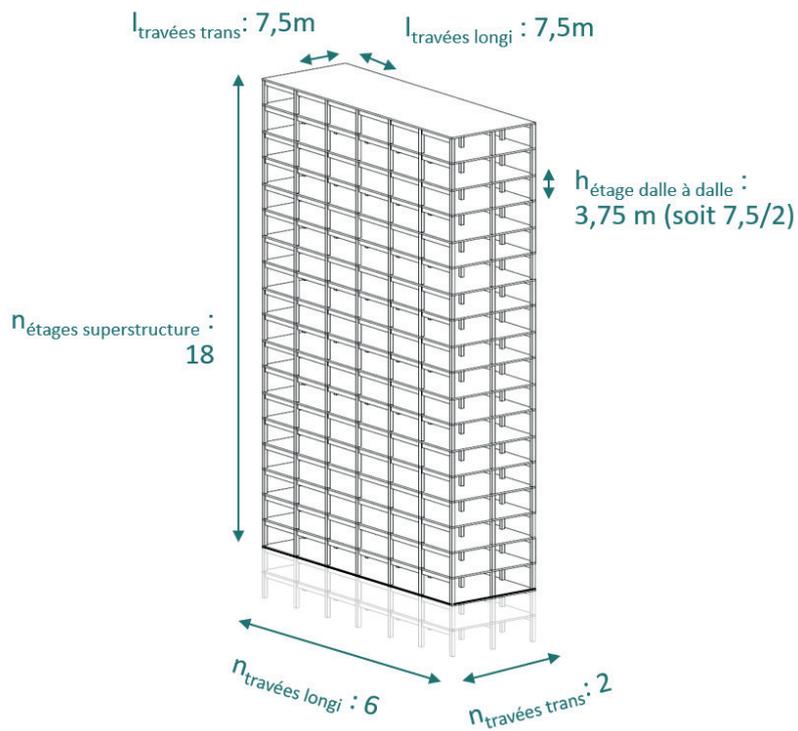


Figure II. 18: Dimensions de l'IGH/IMH "réversible"

Ces dimensions ont également été guidées par la volonté de rationaliser les éléments porteurs à un seul type, c'est-à-dire que les poutres transversales et longitudinales mais aussi les poteaux sont identiques ce qui entraîne une trame carrée, comme on peut le voir en Figure II. 19. Ce compromis trouvé entre bureau et logement permet de répondre aux standards de surface de bureaux et de catégories de logements très aisément, avec peu de différentiel par rapport aux pratiques courantes. Le module traditionnel de façade de bureau de 1m35 passe lui à 1m25, ce qui permettra de le généraliser aux logements alors qu'il n'y avait pas de standard jusqu'à maintenant.

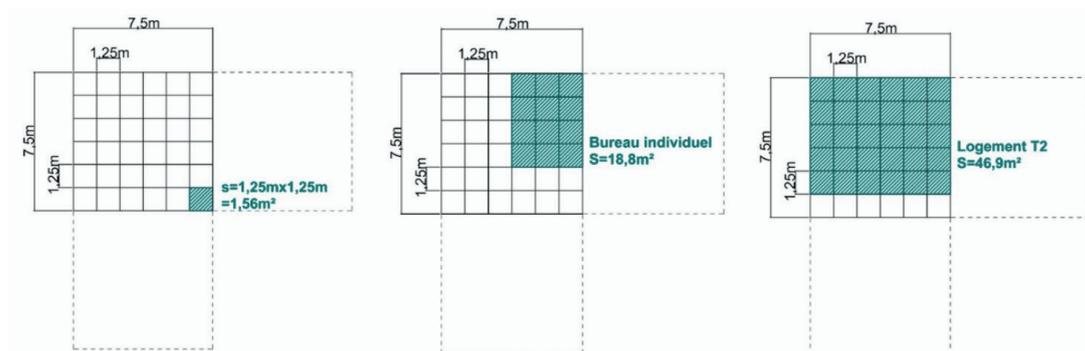


Figure II. 19 : Nouvelle trame carrée et surface équivalente pour bureau ou logement

On obtient ainsi un système basé sur la proportionnalité :

- Une longueur de poutre de 7,5m = une longueur de poteau continu de 7,5m sur deux étages de 3,75 dalle à dalle chacun ;
- Une longueur de poutre de 7,5m = 6 trames de façade de 1,25 m.

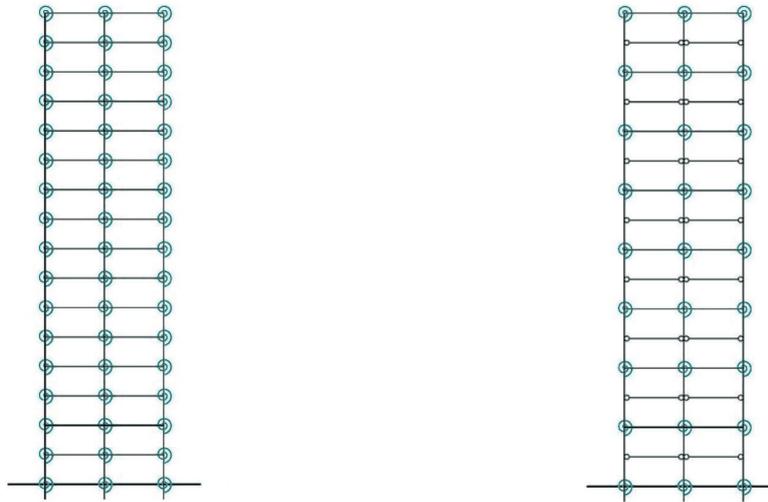
A titre d'exemple, si on considère le bâtiment de la Figure II. 18 réemployable selon un système de portiques en béton armé présentant des liaisons encastrees (dont le dimensionnement sera précisé dans le chapitre IV), on obtiendrait alors 781 m³ de béton de clivage détruit lors du processus d'hydrodémolition, soit 36,4% du volume total de béton pour l'ossature (poteaux et poutres) du bâtiment. Si ce même bâtiment présentait un noyau central, non réemployable, qui permettrait d'articuler tous les poteaux avec les poutres, grâce à des assemblages mécaniques, alors le volume de béton détruit serait de 2088 m³ soit 52,5% du volume de béton de la structure de ce bâtiment (poteaux, poutres et noyau). Le détail de la feuille de calculs ayant permis de prédimensionner le noyau est disponible en annexe. Cet exemple serait à préciser dans le cas d'une situation réelle mais indique une tendance selon laquelle la variante avec noyau n'est pas la meilleure en vue de maximiser le taux de réemployabilité d'une structure. On pourrait également envisager mixer les deux systèmes avec une alternative au noyau, par exemple avec des voiles fusibles, ce qui permettrait de raidir le bâtiment ponctuellement grâce au diaphragme reconstitué, tout en réduisant la quantité de béton non réemployable mobilisé pour le contreventement.

2.3.3. Conséquence de la géométrie et de la trame sur le comportement global – études de cas

Pour pré-dimensionner le bâtiment déterminé en partie 2.3, conformément aux Eurocodes, deux options ont été étudiées : un béton ordinaire de classe C40/50 et un BHP de classe C60/75. Le bâtiment a été décomposé en trois batteries afin d'optimiser les dimensions et de diminuer les sections des éléments porteurs dans les batteries moyennes et hautes par rapport à la batterie basse. Par ailleurs les noyaux centraux assurent traditionnellement le contreventement des tours de moins de 40 étages (comme rappelé dans la Figure II. 2) grâce à leur inertie et leur monolithisme, qui, par définition, n'est pas prédisposé à un démontage ni apte au réemploi. L'hypothèse a donc été faite de ne pas prévoir de noyau dans ce bâtiment réversible de moins de 20 étages, mais d'assurer le contreventement par stabilité des portiques. Sans noyau, la raideur du bâtiment est directement dépendante de la raideur des assemblages entre poutres et poteaux. Cette raideur est cependant difficile à évaluer dans le cas d'un assemblage conçu pour être démonté. Par ailleurs les efforts sollicitant et dimensionnant ces assemblages sont également directement liés à cette raideur. Le calcul de structure devient alors itératif et non linéaire. Il faut disposer d'une hypothèse de raideur pour évaluer les efforts et inversement. Cette étude a donc révélé un point sensible pour le dimensionnement concernant la raideur des assemblages. Ainsi, pour affiner le dimensionnement du bâtiment réversible, une recherche de raideur cible a été effectuée en prenant en compte les critères dimensionnants de déplacement en tête de tour et de déplacement inter-étage, critères déterminants pour les structures d'IGH, d'après Banks et al. [20]. Afin de réduire ces problèmes de raideur, une hypothèse a été testée en considérant des poteaux continus sur 2 étages, ce qui leur donne une dimension de 7,5m, égale à celle des poutres. Le poteau continu sur deux étages diminue donc de moitié le nombre d'assemblages entre les poteaux, mais implique d'articuler les poutres connectées à mi-hauteur des poteaux, comme on peut le distinguer Figure II. 20.

Deux paramètres ont été étudiés pour approcher une raideur cible permettant de respecter les critères dimensionnants de l'IGH : le mode de liaison (encastrement ou articulation poteau-poutre), et la classe du béton (C40/50 ou C60/75). Les modèles aux éléments finis réalisés avec le logiciel Pythagore et les calculs relatifs à l'estimation de la raideur minimale d'assemblage poteau-poutre ont été développés dans le cadre d'un PFE au sein de l'entreprise Setec tpi, par Borrits, C. [27]. Pour déterminer la raideur minimale, une multitude de différentes valeurs de raideur ont été testées une par une dans les modèles (de 0 à 1000 MN.m/rad pour le cas (a) et de 0 à 25 000 MN.m/rad pour le cas (b)), en relevant en parallèle le déplacement

engendré en tête de l'immeuble mais également le déplacement inter étage. Ainsi la valeur de la raideur retenue (la raideur cible) est la valeur testée la plus défavorable permettant de respecter ces deux critères de déplacement.



(a) Recherche de rigidité poteau-poutre à chaque étage

(b) Assemblage poteau-poutre encasté alterné avec un articulation un étage sur deux

Figure II. 20 : Schémas statiques des hypothèses d'assemblages poteaux-poutres testées avec les poteaux continus sur deux étages. Les ressorts en spirale sont une modélisation d'une raideur d'assemblage non infinie.

Les résultats pour les différentes hypothèses testées sont donnés dans le Tableau II. 6. On remarque une valeur supérieure à 20 000 MN.m/rad qui n'est pas atteignable avec une pièce en béton.

Caractéristiques des liaisons poteaux-poutres	Raideur cible (MN.m/rad)
Poteaux C40/50 - Poutres C40/50 cas (a)	150
Poteaux C40/50 - Poutres C40/50 cas (b)	900
Poteaux C60/75 - /Poutres C40/50 cas (a)	175
Poteaux C60/75 - Poutres C40/50 cas (b)	+20 000

Tableau II. 6 : Résultats des raideurs cibles minimales pour chaque hypothèse structurale du bâtiment réversible avec poteaux continus sur deux étages.

Cette étude apporte deux conclusions importantes :

- Chercher à réduire le nombre d'encastres en introduisant une articulation poteau-poutre un étage sur deux n'est pas favorable, car la raideur cible est trop importante (raideur cible > 900 MN.m/rad) ;
- Chercher à augmenter la qualité du béton pour augmenter la raideur n'est pas favorable car c'est la quantité de matière qui prévaut ici (un béton de meilleure qualité diminue les sections ce qui est défavorable en matière de déformations).

La meilleure option structurale pour ce cas-test est de préférer le béton ordinaire C40/50. Cependant l'usage d'un béton de type BHP présente plusieurs avantages notables dans l'optique d'un réemploi : sa plus grande résistance permettra d'être remis en œuvre dans

diverses typologies structurales et sa durabilité, comme évoqué dans la partie précédente, sera meilleure donc sa durée de vie sera plus longue.

2.3.4. Gain de matière en fonction du nombre de cycles de réemploi – études de cas avec éléments porteurs réversibles

Afin de démultiplier les possibilités de réemploi, l'étude de la mise en œuvre d'un élément porteur qui pourrait être fonctionnel indifféremment en poutre ou en poteau est ici envisagée, comme illustré en Figure II. 21. On qualifiera cet élément porteur, utilisable en poteau comme en poutre, de « réversible ». Un tel élément aurait ainsi deux fois plus de chances de retrouver un usage en réemploi, ce qui permettrait également de réduire son temps de stockage en cas de démontage, ou de pallier les manques d'offres en cas d'afflux de demandes d'éléments pour le réemploi. Suite à un prédimensionnement rapide, il s'est avéré que cette démarche n'est pas envisageable pour le bâtiment en R+18 analysé dans la partie précédente, car cela induirait des sections extrêmes, jugées irréalistes, dans la batterie basse. On obtiendrait alors des sections dont la plus petite des dimensions dépasserait le mètre. Pour cette étude de cas, nous avons donc choisi de réduire la hauteur du bâtiment à R+8, qui représente la limite basse de la définition des IMH évoquée précédemment, qui est également plus proche d'un standard de logements résidentiels collectifs en milieu urbain. Le paramètre de raideur pour cette faible hauteur ne sera pas déterminant ici.

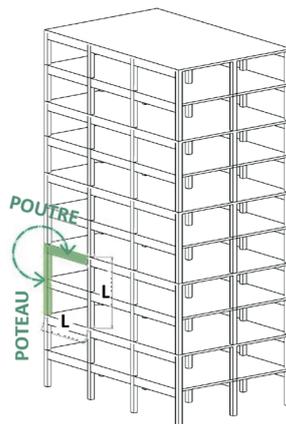


Figure II. 21 : schéma de principe de l'élément universel poteau-poutre

Afin d'étudier les répercussions d'un tel élément, il sera comparé à un élément neuf traditionnel dans les mêmes conditions de fonction mais aussi à un élément réemployable uniquement en poteau et à un élément réemployable uniquement en poutre pour le même cas de figure de structure en R+8. Le poteau sera donc continu sur deux étages. On prévoit ainsi 7 dimensionnements de bâtiments détaillés dans la Figure II. 22, selon une trame de 7,5m x 7,5m sur 10 niveaux (8 en superstructure, 2 en infrastructure).

La durée d'un cycle d'usage est toujours considérée égale à 50 ans comme justifié précédemment. La comparaison des scénarios B2a, B2b et C2, indiqués dans la Figure II. 22, permettra de déterminer le degré de réemployabilité d'une structure qu'il est préférable de mettre en place.

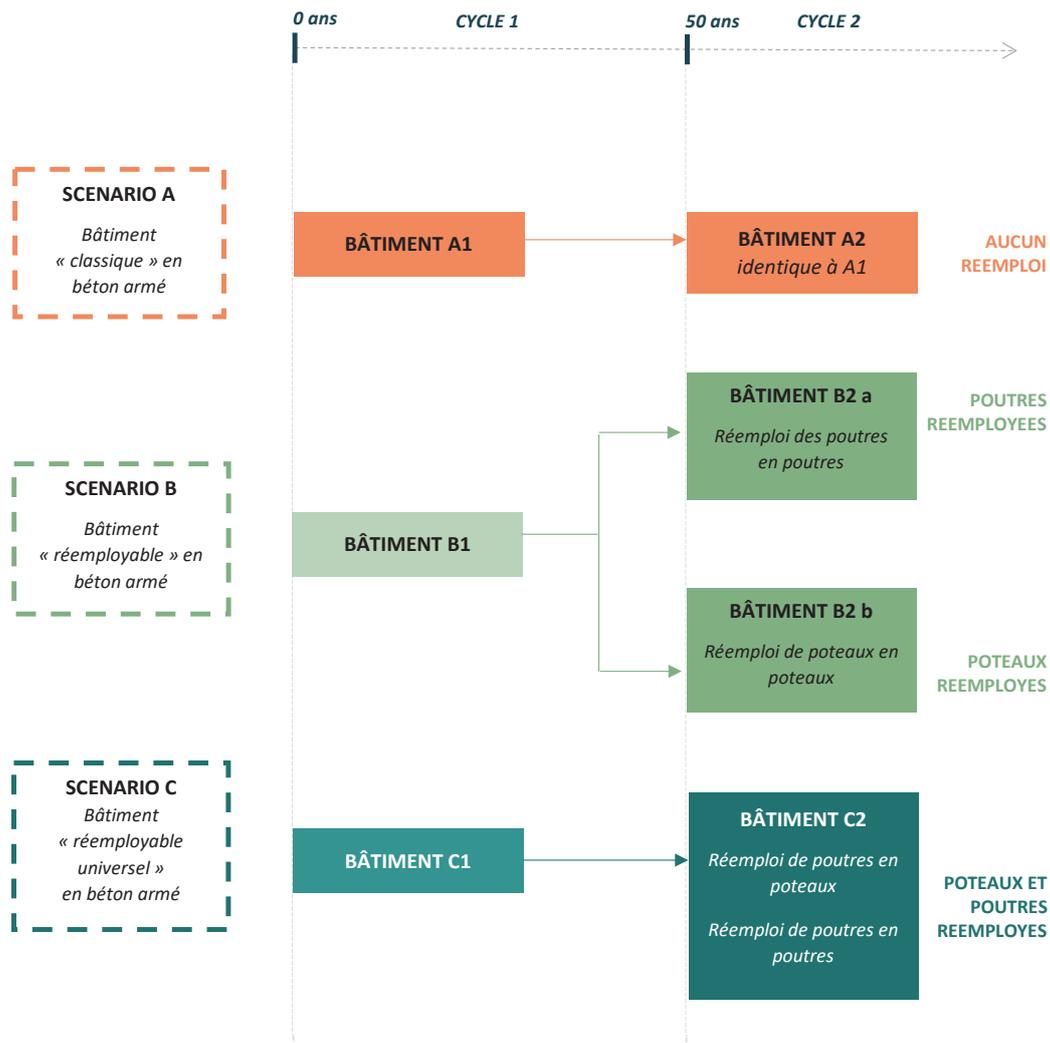


Figure II. 22 : Ensemble des scénarios envisagés pour l'étude de réemploi

Les éléments neufs sont considérés avec un schéma structural hyperstatique (et des poutres continues sur trois travées) alors que les éléments réemployables sont considérés avec un schéma structural isostatique (et des poutres sur une travée). Les précisions pour chacun des sept dimensionnements sont détaillées dans le Tableau II. 7.

Dimensionnements en cycle 1 (sur une durée de vie de 50 ans)	Dimensionnements en cycle 2 (sur une durée de vie de 50 ans à la suite du cycle 1)
Scénario A1 (modèle de base avec système hyperstatique : poutres continues sur trois travées, poteaux continus sur deux étages et dalle continue sur deux travées)	Scénario A2 (Idem à scénario A)
Scénario B1 (schéma isostatique avec poutres à une travée, poteaux continus sur deux étages et dalle continue sur deux travées)	Scénario B2 (idem à scénario B1) avec une variante B2a (réemploi des poutres)
	Scénario B2 (idem à scénario B1) avec une variante B2b (réemploi des poteaux)
Scénario C1 (schéma isostatique avec poutres à une travée, poteaux continus sur deux étages et dalle continue sur deux travées avec éléments « poutres-poteaux » uniques surferrailés)	Scénario C2 (idem à scénario C1) avec réemploi des « poutres-poteaux » uniques surferrailés

Tableau II. 7 : Description des sept variantes de dimensionnements effectuées pour l'étude de cas.

Le bâtiment de l'étude de cas ne sera décomposé qu'en deux batteries appelées « batterie 1 » et « batterie 2 », que l'on peut distinguer sur la Figure II. 23. Les dimensions appliquées aux éléments et aux portées sont bien celles de la trame universelle définie précédemment.

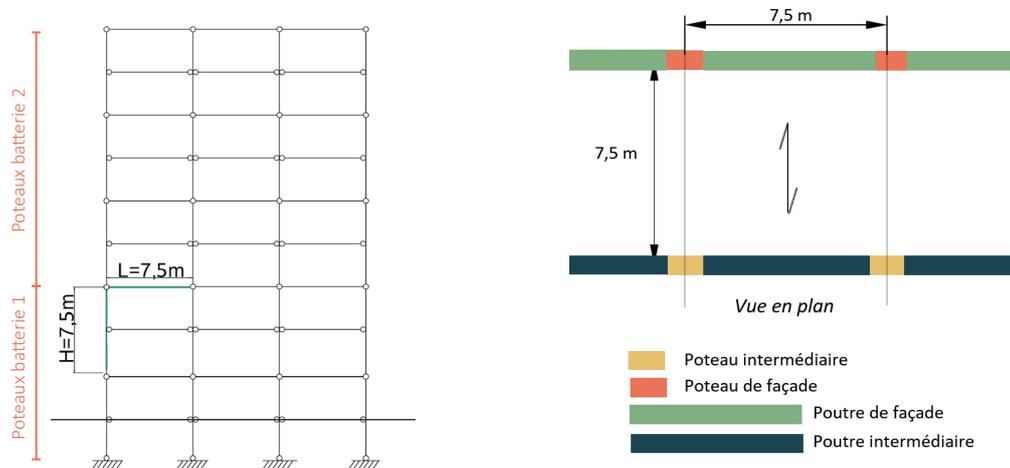


Figure II. 23 : Schéma statique du bâtiment réemployable avec éléments poteaux et poutres réutilisables

Quatre dimensionnements de poteaux sont prévus : 2 par batterie, soit un poteau de façade sous-sol (batterie 1), un poteau intermédiaire sous-sol (batterie 1), un poteau de façade R+3 (batterie 2) et un poteau intermédiaire R+3 (batterie 2). La faisabilité de réemploi n'est étudiée que pour les poutres et les poteaux. Elle est écartée pour les dalles qui sont des éléments plus massifs et plus difficilement démontables, déplaçables et stockables. Les hypothèses de calculs sont disponibles en annexes. Les modèles aux éléments finis ont été réalisés avec le logiciel Pythagore de Setec dans le cadre d'un travail de recherche au sein de Setec tpi, par Borrits [27]. Les dimensionnements ainsi obtenus ont ensuite été analysés dans le cadre du présent travail.

2.3.4.1. Dimensionnement obtenu pour une première durée de vie de 50 ans, appelée « cycle 1 »

On dimensionne dans un premier temps les trois bâtiments A1, B1, C1, correspondants aux trois scénarios, A, B, C pour une durée d'usage de 50 ans.

- Le « scénario A » a permis de dimensionner le bâtiment A1 (Figure II. 22) : les poutres sont hyperstatiques (ici, continues sur trois travées). Par ailleurs le ferrailage des poutres est optimisé sur leur longueur ;
- Le « scénario B » a permis de dimensionner le bâtiment B1 (Figure II. 22) : il s'agit d'un bâtiment dit « réemployable » en béton armé tel que les poutres soient isostatiques. Le ferrailage n'est pas optimisé dans la mesure où ce dernier peut être réutilisé, il semble plus simple de conserver des aciers continus. Pour ce bâtiment B1 "réemployable", les poutres sont démontables et réutilisables à l'identique en poutres ; les poteaux sont démontables et réutilisables à l'identique en poteaux ;
- Le « scénario C » a permis de dimensionner le bâtiment C1 (Figure II. 22) mais pour ce scénario il a fallu vérifier la possibilité de réemployer des poteaux en poutres ou vice-versa puis, en conséquence, d'intégrer un surferrailage des poutres pour qu'elles puissent être utilisées en poteaux. (cf. Tableau II. 8).

Par rapport au bâtiment B1, le bâtiment C1 présente des poutres avec un ferrailage augmenté (de +50% du ratio initial) pour permettre de les utiliser aussi en tant que poteaux (tous les poteaux de façade et seulement les poteaux intermédiaires de la batterie 2). Les poteaux de C1 sont donc les poutres que l'on a dimensionnées également pour répondre à la fonction de poteaux.

En revanche, nous n'avons pas retenu la possibilité de rendre les poteaux intermédiaires de la batterie 1 du bâtiment C1 réversibles en poutres, car l'augmentation du ratio de ferrailage était alors de +226% à +394%, ce que nous avons estimé comme non raisonnable. Ainsi le bâtiment C1 est composé des éléments réversibles à partir des poutres que l'on a adaptées pour fonctionner en poteaux, à l'exception de ses poteaux intermédiaires de la batterie 1 qui ne fonctionnent qu'en poteaux classiques.

Les taux de ferrailage respectifs pour les bâtiments A1, B1 et C1 sont détaillés dans le Tableau II. 8.

Eléments	A1	B1	C1
Poutre de façade	68,00	143,80	215,90
Poutre intermédiaire	140,60	158,00	230,10
Poteau de façade R+3	49,20	41,80	230,10
Poteau de façade sous-sol	37,70	41,70	41,70
Poteau intermédiaire R+3	55,30	37,70	215,90
Poteau intermédiaire sous-sol	52,40	35,30	35,30

Tableau II. 8 : Ratios de ferrailage en kg/m³ par éléments et selon les bâtiments dimensionnés.

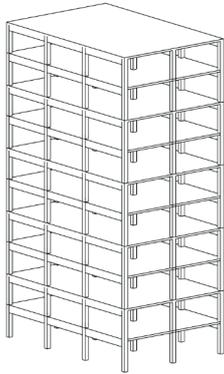
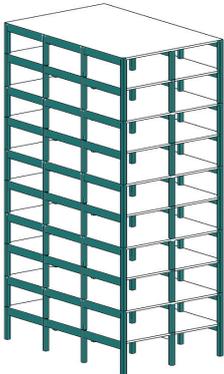
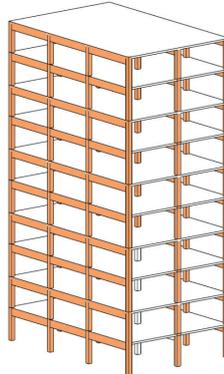
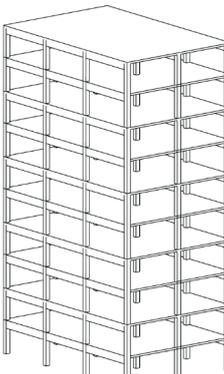
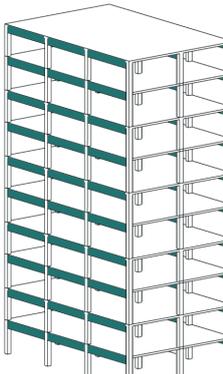
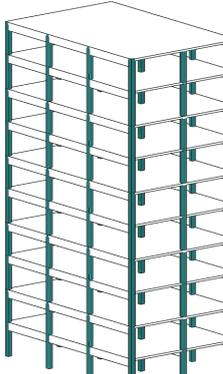
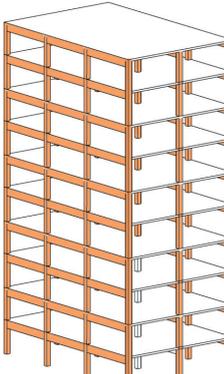
2.3.4.2. Dimensionnement obtenu pour une deuxième durée de vie de 50 ans, appelée « cycle 2 » et successive au cycle 1

On dimensionne maintenant les quatre bâtiments A2, B2a, B2b, C2, correspondant aux déclinaisons des scénarios, A, B, C pour une durée d'usage de 50 ans.

- Par rapport au bâtiment A1 : le bâtiment A2 est identique. Les deux bâtiments A1 et A2 sont deux bâtiments neufs construits respectivement à t 0 et à t + 50 ans ;
- Par rapport au bâtiment B1 : les bâtiment B2a et bâtiment B2b sont identiques mais ils contiennent moins de matière neuve. Ainsi le bâtiment B2a possède ses poutres réemployées que l'on pourra déduire de la matière totale neuve nécessaire à la construction du bâtiment ; le bâtiment B2b possède ses poteaux réemployés que l'on pourra déduire de la matière totale neuve nécessaire à la construction du bâtiment ;
- Par rapport au bâtiment C1 : le bâtiment C2 est identique mais il contient moins de matière neuve. Ainsi le bâtiment C2 possède ses éléments réversibles « poutres-poteaux » réemployés, que l'on pourra déduire de la matière totale neuve nécessaire à la construction du bâtiment.

On ne prendra pas en compte les éventuelles pertes de matières lors du démontage car on ne dispose pas des systèmes constructifs, ni des assemblages précis (déterminés en études d'exécution) qui pourraient être mis en œuvre, ni du mode de déconstruction. Les résultats obtenus sont détaillés ci-après dans le Tableau II. 9. Les résultats sont donnés en tonnes de matière mise en œuvre dans chaque bâtiment.

2.3.4.3. Résultats et synthèse de l'étude

0	<i>Scénario A</i>	<i>Scénario B</i>		<i>Scénario C</i>
	Bâtiment A1 : poutres hyperstatiques, continues sur trois travées	Bâtiment B1 : poutres isostatiques		Bâtiment C1 : poutres isostatiques
				
	Total de béton neuf = 152,6 m ³ soit 335,71 t Total d'acier neuf = 7,05 t Masse totale au bout de 50 ans = 342,7 t	Total de béton neuf = 152,16 m ³ soit 334,75 t Total d'acier neuf = 7,6 t Masse totale au bout de 50 ans = 342,4 t		Total de béton neuf = 152,16 m ³ soit 334,75 t Total d'acier neuf = 9,7 t Masse totale au bout de 50 ans = 344,4 t
	-	+ 8,19 % de matière neuve par rapport à A1 (uniquement acier)		+ 37,28 % de matière neuve par rapport à A1 (uniquement acier)
50 ans	Bâtiment A2 : dimensionnement identique à A1	Bâtiment B2a : dimensionnement identique à B1	Bâtiment B2b : dimensionnement identique à B1	Bâtiment C2 : dimensionnement identique à C1
				
	Total béton neuf = 152,6 m ³ soit 335,71 t Total acier neuf = 7,05 t	Total béton neuf = 136,7 m ³ soit 300,7 t Total acier neuf = 5,3 t	Total béton neuf = 141,40 m ³ soit 311,1 t Total acier neuf = 7,2 t	Total béton neuf = 129,5 m ³ soit 285,0 t Total acier neuf = 5,0 t
	+ 100% de matière neuve par rapport à A1	- 30,68% d'acier neuf et - 10,19% de béton par rapport à B1	- 5,41% d'acier neuf et - 7,07% de béton par rapport à B1	- 48,31% d'acier neuf et - 14,87% de béton par rapport à C1
100 ans	Total sur 100 ans, 2 cycles	Total béton neuf pour 2 bâtiments = 288,82 m ³ soit 635,4 t Total acier neuf pour 2 bâtiments = 12,9 t Masse totale cumulée au bout de 100 ans = 648,3 t	Total béton neuf pour 2 bâtiments = 293,56 m ³ soit 645,8 t Total acier neuf pour 2 bâtiments = 14,8 t Masse totale cumulée au bout de 100 ans = 660,7 t	Total béton neuf pour 2 bâtiments = 281,69 m ³ soit 619,7 t Total acier neuf pour 2 bâtiments = 14,7 t Masse totale cumulée au bout de 100 ans = 634,4 t

 : poutres réemployées dans B2a et poteaux réemployés dans B2b
 : poutres-poteaux uniques réemployés dans C2

Tableau II. 9 : Impact matière des surdimensionnements pour le réemploi pour la trame choisie de 7,5m x 7,5m sur les 10 niveaux / Les éléments colorés indiquent les éléments conçus réemployables pour A1, B1, C1 et les éléments réemployés pour B2a, B2b, C2.

Dans ce Tableau II. 9 figurent les quantités de matière cumulées pour 2 cycles d'usage successifs, soit une durée de 100 ans. Il apparaît déjà une baisse significative lors du 2^e cycle quand on réemploie les poutres dans B2a (- 30,68% d'acier par rapport à B1), et davantage quand on réemploie les poutres et les poteaux dans C2 (-48,31% d'acier et -14,87% de béton par rapport à C1). Cependant ces baisses observées ne sont pas significatives si on compare B2a et C2 à A1. Ces premiers résultats indiquent tout de même qu'il est plus rentable de réemployer les poutres plutôt que les poteaux. Comme nous l'avons vu dans la partie 2.2.5.2., le 3^e cycle d'usage est plus déterminant pour départager les différentes hypothèses.

La Figure II. 24 qui suit propose donc de comparer la matière totale mise en œuvre non plus sur 2 cycles mais sur 4 cycles d'usage, soit 200 ans comme peut le permettre la durabilité précédemment justifiée du béton. En complément, la Figure II. 25 présente uniquement le béton et la Figure II. 26 présente uniquement l'acier.

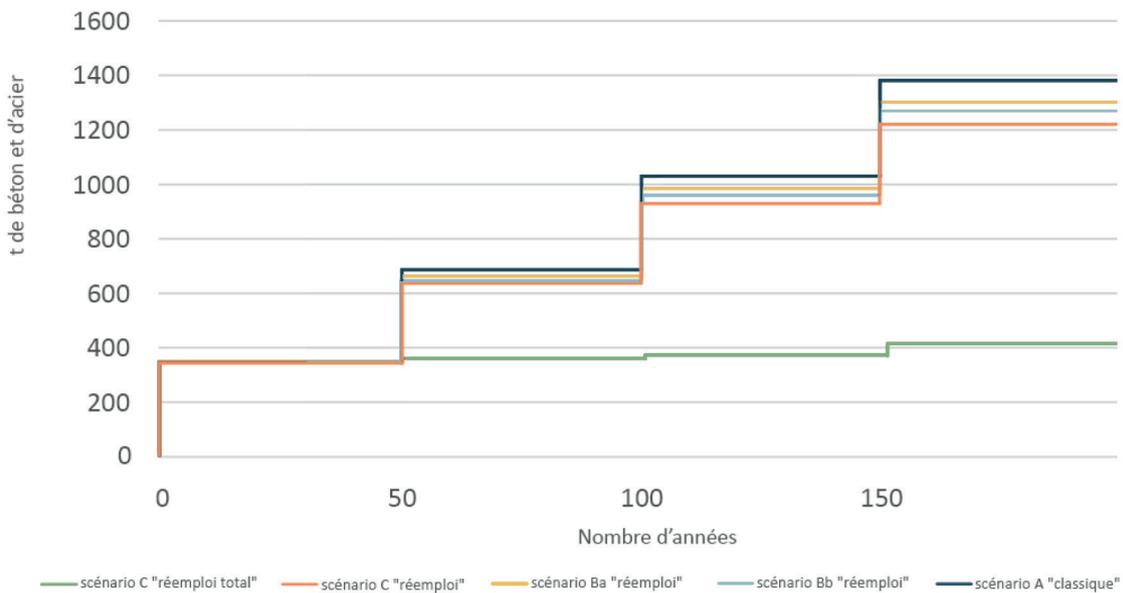


Figure II. 24 : Rentabilité matière (béton et acier cumulés) du réemploi sur plusieurs bâtiments reconstruits par période de 50 ans, pour une période totale de 200 ans (soit quatre cycles de vie de 50 ans).

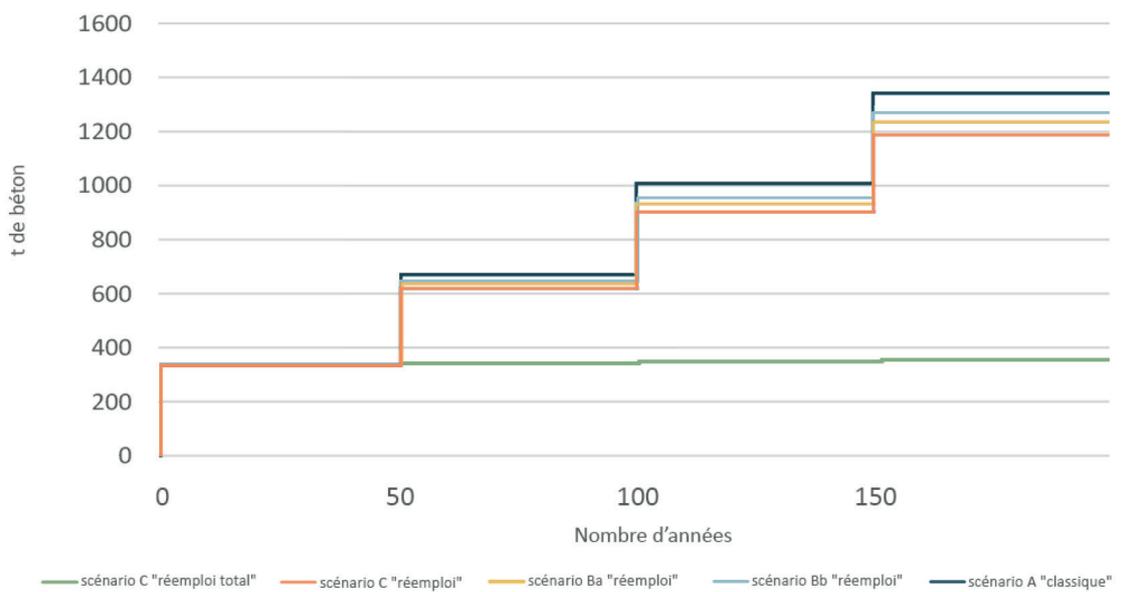


Figure II. 25 : Rentabilité matière (béton) du réemploi sur plusieurs bâtiments reconstruits par période de 50 ans, pour une période totale de 200 ans (soit quatre cycles de vie de 50 ans).

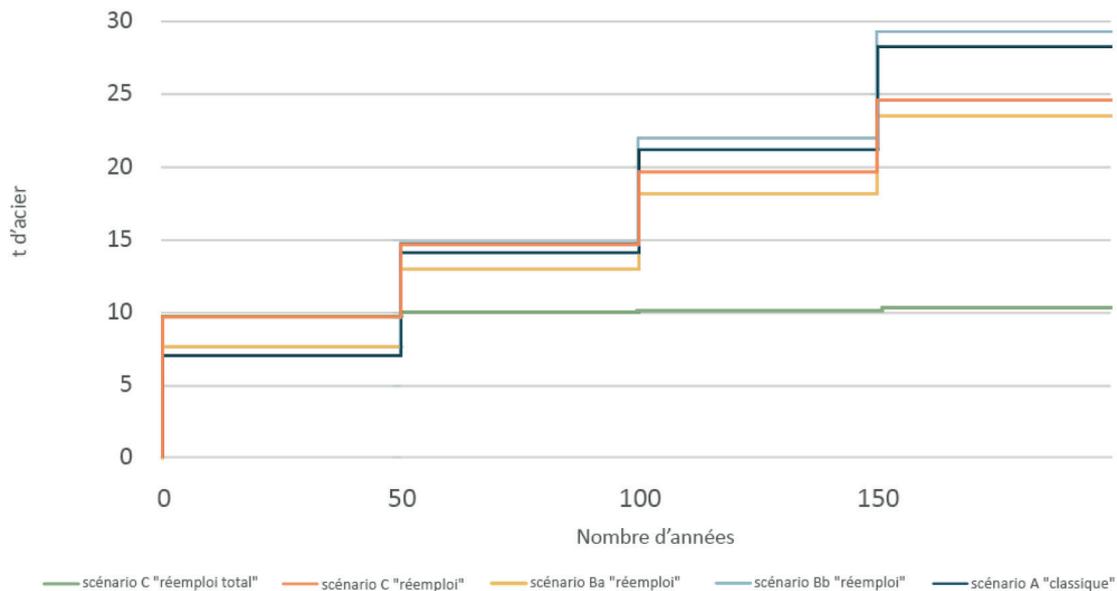


Figure II. 26 : Rentabilité matière (acier) du réemploi sur plusieurs bâtiments reconstruits par période de 50 ans, pour une période totale de 200 ans (soit quatre cycles de vie de 50 ans).

Après 200 ans on aura donc eu 4 phases d'usage de 50 ans chacune. A l'issue de la période de 200 ans on observe une baisse de -11,4% en masse de matière mise en œuvre entre le scénario A « classique » (sans réemploi) et le scénario C « réemploi » si l'on réemploie les poutres et les poteaux, ce qui n'est pas négligeable. Un scénario prospectif supplémentaire C « réemploi total », en vert, a été ajouté si l'on considère qu'un réemploi des dalles serait possible en plus du réemploi des poutres et poteaux. On peut alors observer une baisse de -73,1% de tonnes de matière mise en œuvre entre le scénario A « classique » et le scénario C « réemploi total ». Pour rappel, nous avons vu dans l'état de l'art en Chapitre I, qu'un système constructif de dalle réemployable était proposé par le projet Demodulor mais peut poser question pour la logistique à assurer lors de la déconstruction, du stockage et de la reconstruction de ces dalles.

Ainsi on peut remarquer, pour cette typologie de bâtiment, que la part des dalles dans le volume total est très conséquent, de l'ordre de 70% à 80%, que l'on retrouve bien dans le scénario avec l'économie de matière maximale de 73,1%. Ceci s'explique, dans le cadre de cette étude de cas sur les éléments porteurs réversibles, par l'utilisation d'un béton performant, C40/50 pour tous les éléments alors que traditionnellement pour un bâtiment de cette hauteur on aurait tendance à utiliser un béton plus faible pour les verticaux, ce qui augmenterait la part du volume des verticaux et diminuerait la part du volume des horizontaux.

D'autre part, pour dimensionner les différentes variantes, c'est le ratio de ferrailage qui a été modifié (et non la qualité de béton) ainsi pour le premier cycle d'usage sur la période 0-50 ans on ne distingue pas significativement les différences de matière entre les scénarios (au maximum +0,5% de matière entre le bâtiment initialement conçu dans le scénario C « réemploi » par rapport au scénario A « classique »). Augmenter le taux de ferrailage pour assurer une réversibilité possible des éléments porteurs horizontaux et verticaux, n'a donc quasiment aucune influence sur la matière mise en œuvre mais peut permettre une économie de matière potentiellement jusqu'à 48,6% (ou 7,48% si les dalles ne sont pas réemployées) au bout de 2 usages, et de 73,1% (ou 11,4% si les dalles ne sont pas réemployées) au bout de 4 usages. On voit alors que, pour que l'économie soit maximale, il est primordial de mettre en place la logistique nécessaire au démontage des dalles.

Dans notre travail, on privilégiera le réemploi des éléments linéaires pour lesquels le démontage, le transport, et la remise en œuvre sont plus plausibles d'après les retours d'expérience de chantiers actuels. De plus ces éléments réemployables présentent des tailles proches des éléments préfabriqués en béton (qui, de fait, sont transportables) que l'on trouve aujourd'hui sur le marché. Une étude complémentaire de conception de dalle réemployable anticipant le réemploi d'un système avec pré-dalles permettrait d'apporter des précisions. Une étude prospective prolongeant les recherches du projet Demodulor est indispensable pour permettre de concevoir des dalles réemployables efficacement avec une application concrète sur les chantiers. L'étude présentée ici permet d'affirmer que le réemploi des dalles est le principal levier pour maximiser la remise en œuvre de matière.

On a donc pu voir que l'option d'un seul élément unique poteau-poutre pour l'ensemble du bâtiment R+8 n'est pas réalisable. Dans le meilleur des cas étudiés, notre bâtiment C2 en R+8 contient deux éléments linéaires différents : principalement des éléments réversibles poteaux-poutres uniques, et quelques éléments poteaux intermédiaires spécifiques pour la batterie 1.

Dans une optique de réemploi, la faisabilité de concevoir un unique élément dimensionné pour être indépendamment utilisé en poteau ou en poutre doit donc se faire à l'intérieur d'une même batterie, en limitant au possible le nombre de niveaux par batterie. Cette stratégie peut avoir comme conséquence d'augmenter le nombre de batteries dans les IGH. A contrario, on préférerait diminuer le nombre de batteries pour standardiser au maximum les éléments et réduire le nombre d'éléments différents. Ces différentes options pourraient faire l'objet d'une étude de sensibilité pour décider s'il faut opter pour augmenter ou diminuer le nombre de batteries en comparant leur taux de matière réemployable respectif. Dans tous les cas, pour des bâtiments de grande hauteur, ce principe de regroupement des éléments doit être conservé afin de minimiser les surdimensionnements.

2.4. Nécessité d'un encastrement démontable pour étendre le stock

Les parties 2.2 et 2.3 nous ont permis de rechercher comment maximiser le nombre d'éléments porteurs réemployables. La partie 2.2 était focalisée sur le cas des IGH et IMH en analysant les répercussions de typologies mettant en œuvre des liaisons articulées. La partie 2.3 interrogeait la posture prospective d'une trame universelle avec un élément porteur réversible utilisable en poutre et en poteau. Ces deux développements restent prospectifs car relativement éloignés des pratiques actuelles ou des pratiques à court terme. Pour toucher davantage de projets à court terme, une remise en perspective avec les contraintes économiques dans le contexte actuel de la construction en béton coulé en place, qui est la plus répandue, est nécessaire. En effet, 80% de notre patrimoine est en béton selon l'Ifsttar [4], d'où l'intérêt de regarder en détail le cas du béton. Une revue démontre également l'intérêt du désassemblage des bâtiments en béton grâce au potentiel des éléments préfabriqués dont la conception pourrait être améliorée en vue d'un désassemblage, selon Salama [16]. Notamment, il faut pouvoir augmenter la démontabilité pour des bâtiments conçus couramment avec des liaisons encastrees. Ainsi la proposition d'un assemblage encastree démontable est une piste que nous avons trouvé nécessaire de creuser, afin d'en évaluer le comportement structural et les conséquences de son usage sur le bilan environnemental global sur plusieurs cycles. Cette partie énonce les principes d'un tel assemblage en béton armé qui sera détaillé dans le chapitre IV consacré à l'expérimentation des portiques.

2.4.1. Compatibilité entre hyperstaticité et démontabilité

Comme nous l'avons vu dans les parties précédentes, le réemploi induit une démontabilité qui est largement associée, dans la littérature, à une liaison articulée. Ce raisonnement nous a conduit dans la partie 2.2 à rechercher à maximiser le nombre d'articulations dans une structure, ce qui engendre deux conséquences : la réalisation de ces articulations grâce à des organes d'assemblages métalliques dont il faut maîtriser la raideur, et la génération de systèmes isostatiques redoutés par les ingénieurs. En effet, il est plus rassurant pour un ingénieur structure de proposer un système hyperstatique plutôt qu'un système isostatique que peuvent induire les liaisons articulées. L'hyperstaticité permet en effet de pallier un élément défaillant au sein d'une structure et de se prémunir d'un désordre ou de la ruine d'un bâtiment. Le dilemme consiste à trouver le compromis entre la recherche d'hyperstaticité pour renforcer la robustesse d'un système porteur, et la recherche d'isostaticité engendrée par la multiplication de liaisons articulées que prônent les principes de DfD.

Pendant, dans le cas d'une liaison encastrée qui serait déconstruite puis reconstruite dans un contexte de réemploi, il est nécessaire de s'assurer de la qualité de l'encastrement au cours des différentes opérations de remise en œuvre. Une simulation concrète de ces opérations lors d'une expérimentation permettrait de mieux appréhender ces phénomènes.

2.4.2. Impacts du type de système sur la construction

Pour mieux percevoir les conséquences des modélisations théoriques hyperstatiques ou isostatiques sur les bâtiments construits, un retour d'expérience, au dire d'experts Setec, a permis d'établir quelques préceptes qui font notamment l'objet des échanges avec les architectes sur les projets d'IGH.

Le système réticulé /triangulé qui permet de mettre en œuvre des liaisons articulées peut générer ainsi :

- Une complexité de mise en œuvre (assemblages multipliés augmentant le temps de mise en place, réalisation en préfabrication, nombreux facteurs à gérer et à anticiper) qui augmente également le coût ;
- Une technique précise réservée à des projets exceptionnels (très grande hauteur), car souvent l'investissement pour développer ces assemblages complexes ne peut être rentabilisé que sur des opérations d'envergure ;
- Un impact architectural fort, car l'esthétique engendrée n'est pas toujours simple à assumer, de plus le confort intérieur (luminosité) peut être remis en cause par la forte présence des diagonales.

D'un autre côté, le système encastré majoritairement représenté par le béton coulé en place, mais qui peut aussi être assuré par des assemblages de charpente métallique, présente :

- Une méthode de construction très optimisée dans le cas du béton armé (coût et temps optimisés) ;
- Un système poteaux-poutres traditionnel avec des éléments horizontaux et verticaux qui laisse passer un maximum de lumière et donne une liberté de conception aux architectes ;
- Une polyvalence du système constructif adapté à la petite comme à la moyenne hauteur et déjà appliqué à la majorité des projets de bâtiments sur le marché.

De ce point de vue, les atouts du système encasté sont plus importants que ceux du système triangulé. La volonté, dans cette dernière partie, est donc de se concentrer sur le système encasté pour le rendre davantage démontable et réemployable. S'il est possible de garantir une raideur suffisante tout en proposant un assemblage démontable alors ce système permettrait à la fois de se passer de noyau et de permettre une réemployabilité, tout en conservant les avantages d'un système hyperstatique.

2.4.3. Problématique de la raideur et nécessité d'essais

Dans le principe de « concevoir pour déconstruire », les poutres seront reliées aux poteaux, non pas par un encastrement parfait, mais par un assemblage conçu pour être démonté puis remonté, et qui risque de se dégrader à chaque remise en œuvre. Toute la question est de bien appréhender la raideur de cet assemblage, d'où la proposition d'un protocole d'essais sur des portiques en béton armé, proposé ici.

L'introduction de zones d'assemblage dans la structure pour permettre un démontage puis un remontage crée une complexité supplémentaire d'étude par rapport à une structure traditionnelle continue et monolithique en béton armé. Ainsi dans ces zones d'assemblage le degré d'encastrement des pièces les unes avec les autres n'est pas total mais partiel : il va varier entre encastrement total au sens de la résistance des matériaux (continuité des rotations) et articulation (discontinuité des rotations) en fonction de la raideur et de la qualité de réalisation de l'assemblage. La Figure II. 27 illustre le type de déformation attendu en fonction de la qualité de la liaison poteau-poutre dans le portique.

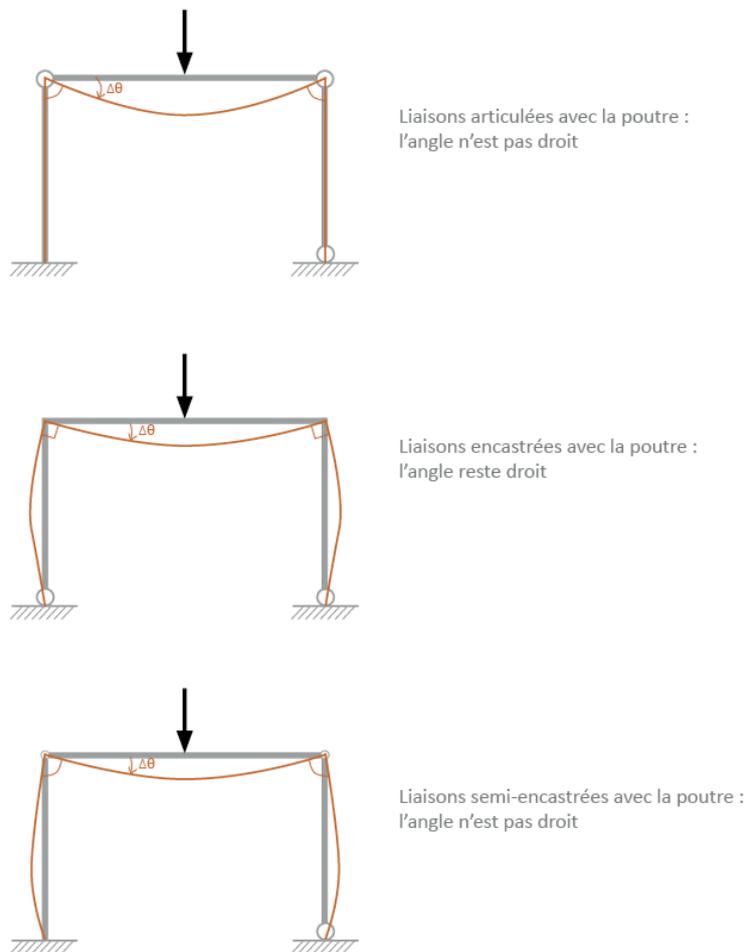


Figure II. 27 : Déformations possibles pour un portique selon le type de liaison entre la poutre et les poteaux.

A noter que même s'il s'agit ici de techniques de béton coulé en place de différentes natures et non d'un ajout d'un organe indépendant de connexion métallique, la difficulté reste de maîtriser le comportement d'une structure en béton armé pour laquelle le comportement sera effectivement dicté par les dispositions pratiques du ferrailage réellement mis en œuvre. Pour le béton armé, pour simplifier, on peut considérer que, s'il y a peu de ferrailage au nœud, il s'agit d'une articulation, et que, s'il y a de nombreuses armatures, il s'agit d'un encastrement. Le passage de la première configuration à la seconde n'est pas évident et les mesures obtenues lors des essais pourront permettre d'observer le comportement précis des portiques testés.

Le comportement global de la structure et en particulier sa déformabilité globale sous action latérale sera alors fortement dépendante de la raideur de ces zones de clavetage. Il en est de même pour le torseur des efforts sollicitant ces assemblages. Cette raideur est donc un paramètre fondamental, qu'il est difficile d'apprécier par le calcul théorique et qu'il convient de pouvoir mesurer avec des essais réels.

Les essais sur les portiques, qui feront l'objet du chapitre IV, permettront de confronter raideur théorique et raideur réelle et de relever les difficultés pratiques de réalisation de ces assemblages pour permettre une meilleure anticipation dans la conception.

2.5. Conclusions - Définition du DfReu et son évaluation

Nous nous sommes basés au début de ce chapitre, sur les principes de DfD (*Design for Deconstruction*) issus de l'état de l'art du chapitre I. En abordant ces principes du point de vue structural, nous avons pu établir certaines limites au DfD, notamment par rapport aux recommandations de connections articulées. Afin d'augmenter le potentiel de réemployabilité des systèmes porteurs, il était nécessaire de s'abstraire du DfD pour explorer d'autres pistes et maximiser ainsi le stock d'éléments porteurs réemployables pour demain.

Ainsi les différentes études de cas nous ont permis de discuter les points suivants :

- Partie 2.2. Les IGH apparaissent comme des stocks d'éléments uniformisés au sein d'un seul bâtiment, ce qui augmente leur réemployabilité. La multiplication des articulations est possible grâce à certaines typologies structurales (*cross bracing*) mais limitée par la nécessité de raideur et par la difficulté (technique mais surtout économique) de la mise en œuvre de telles connections. Le surdimensionnement (de l'ordre +10% de matière) pour compenser le manque de raideur dû aux articulations est acceptable au vu des gains environnementaux permis ;
- Partie 2.3. La volonté d'étendre le stock à tous les bâtiments nouvellement construits nous amène à un changement profond des méthodes actuelles. Ainsi une géométrie plus universelle (trame et éléments standardisés) permettrait de générer un stock idéal généralisé, où le bâtiment présenterait une réversibilité totale des éléments porteurs (verticaux et horizontaux identiques). La trame et les éléments réversibles restent des objets de composition pour les concepteurs (architectes et ingénieurs), laissant une liberté de création. L'élément réversible poutre-poutre est possible au sein d'un sous-ensemble de moyenne hauteur (inférieur à 10 niveaux). Le surdimensionnement (inférieur à +1% de matière)

est acceptable au vu des gains environnementaux permis (- 11,4% de matière sur l'ossature hors plancher, au bout de 4 cycles) ;

- Partie 2.4. La limite structurale de l'usage des articulations d'une part et l'usage massif du béton coulé en place d'autre part nous ont poussé à proposer un encastrement démontable plus en adéquation avec le contexte actuel pour étendre considérablement le stock à court terme. Cette proposition fera l'objet d'un chapitre IV où un encastrement démontable sera soumis à une expérimentation, avec la mise en place d'un protocole de déconstruction/reconstruction.

En complément des articulations qui restent indéniablement plus facilement démontables, la piste d'un encastrement désassemblable permettrait de proposer une solution concrète et applicable à de nombreux projets en cours aujourd'hui. En revanche, le réemploi d'éléments porteurs plans est pour le moment écarté par le DfD. Il semble, en effet, compliqué de gérer (déconstruction, logistique, exutoire) de tels éléments imposants et monolithiques dans le cas du béton armé. Néanmoins si un processus de déconstruction/reconstruction se mettait en place, il apporterait des gains environnementaux significatifs car le volume de ces éléments plans dans les bâtiments est important. Le schéma synthèse de la Figure II. 28 permet de rappeler les différents critères relatifs à la conception d'assemblages articulés ou encastrés.

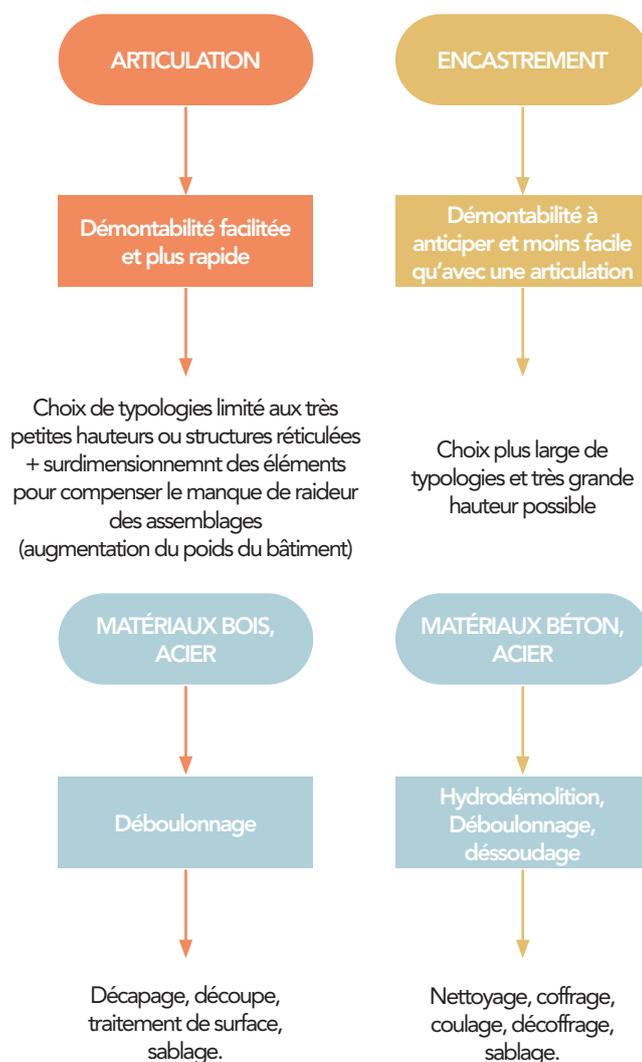


Figure II. 28 : Synthèse des éléments de décision pour concevoir une structure démontable.

Cette réflexion nous a conduit à établir les principes de conception des bâtiments dans le contexte du *DfReu, Design for Reuse*.

Les principes à mettre en place pour le DfReu, que nous avons définis, sont donc :

1. Une conception pour la réemployabilité s'appuyant sur la démontabilité et la déconstruction, incluant des éléments manipulables et facilement transportables, stockables, ainsi que la mise en place d'un réel processus de déconstruction / reconstruction ;
2. Le recours à la préfabrication, procédé maîtrisé permettant une optimisation de coût, de temps de mise en œuvre et de qualité ;
3. Un potentiel d'assemblage et de désassemblage à long terme, en privilégiant les assemblages réversibles et à sec mais étudiant aussi la possibilité d'encastrement démontable ;
4. La mise en place d'une traçabilité des caractéristiques mécaniques de l'élément qui l'accompagneront tout au long de sa vie et de ses réemplois, et d'une méthodologie de capitalisation et de transmission de la donnée tracée à long terme (qui fera l'objet du chapitre III).

Pour mieux évaluer cette conception et sa capacité à rendre les éléments plus réemployables, il nous est apparu nécessaire de proposer des critères quantifiables de réemployabilité.

Les 5 critères de réemployabilité proposés sont :

1. Proportion volumique des éléments réemployables par rapport au volume total du bâtiment ;
2. Taux de standardisation de la géométrie, répétitivité des éléments et de la trame, par rapport aux principes de bâtiment universel défini partie 2.3 ;
3. Taux de réversibilité des éléments (poteau en poutre) ;
4. Énergie et temps nécessaires au désassemblage et réassemblage ;
5. Degré de mise en place d'une traçabilité et instrumentation (objet du chapitre III).

Les points 1 à 3 ont été abordés dans ce chapitre II ; le point 4 sera détaillé dans le chapitre V - Analyse environnementale du réemploi ; le point 5 sera détaillé dans le chapitre III - Traçabilité de la donnée et environnement BIM.

Ces critères de réemployabilité devront être utilisables au-delà du scope de la thèse, puisque la réemployabilité concerne différentes pratiques : la réemployabilité d'un bâtiment que l'on déconstruit (le potentiel de la matière que l'on récupère) ; la réemployabilité entrante dans un bâtiment neuf (le réemploi de la matière entrante mise en œuvre) ; la réemployabilité en fin de vie d'un bâtiment neuf (le potentiel de matière réemployable en fin de vie).

La réemployabilité doit être étudiée en phase de conception et doit être évaluée en phase d'exécution. Les critères de réemployabilité doivent donc aider à la prise de décision sur les phases amont et à la quantification lorsque l'ouvrage est effectivement réalisé.

On cherchera toujours à concevoir un bâtiment : 1. en lui attribuant une raideur et une hyperstaticité pour renforcer la sécurité d'une structure ; 2. en le rendant déconstructible pour améliorer sa réemployabilité. Le rôle de l'équipe de conception sera justement d'étudier les différentes possibilités et d'évaluer les différents paramètres pour prendre la décision la mieux adaptée au projet visé. Le Tableau II. 10, reprend l'ensemble des critères évoqués dans ce chapitre pour permettre aux concepteurs de mettre en place la solution constructive selon une analyse exhaustive des paramètres en vue d'un réemploi.

Paramètre de décisions	Articulation			Encastrement		
	Béton	Bois	Acier	Béton	Bois	Acier
Matériaux structuraux	Béton	Bois	Acier	Béton	Bois	Acier
Difficulté technique en exécution	Technique peu mise en œuvre (préfa)	Temps d'assemblages parfois plus long		Réalisation très aisée	Applications limitées (faibles hauteurs)	-
Difficulté technique en déconstruction	Déconstruction très aisée			Démolition ou hydrodémolition (peut être chronophage et coûteuse et/ou destructive)	Déconstruction relativement aisée	Déconstruction relativement aisée si boulons, mais chronophage et coûteuse si soudures
Impact sécurité structurale	Système isostatique à éviter			Système hyperstatique recherché		
Impacts structuraux	Surdimensionnement des éléments porteurs pour compenser le manque de raideur des assemblages, conséquence du surplus de masse sur les fondations			-		
Impacts architecturaux	Système réticulé impactant esthétiquement et portant atteinte à la qualité des espaces intérieurs (luminosité moindre)			Diversité de formes autorisée	-	Structure légère peu présente
Aspects économiques	Fait appel à des éléments de liaison en acier coûteux		-	Technique très économique	-	-
Conséquence pour le réemploi	Structures facilement et rapidement démontables, intégrité de la matière préservée mais coûts et impacts architecturaux et structuraux non négligeables			Technique très économique, qui alliée à l'hydrodémolition d'une zone réduite de béton permettrait d'appliquer le réemploi à un grand nombre d'éléments porteurs	Structures facilement démontables, intégrité de la matière préservée mais coûts non négligeables	Structures facilement démontables si boulonnées, intégrité de la matière préservée mais coûts non négligeables

Tableau II. 10 : Paramètres de décisions à mobiliser lors de la conception d'une structure démontable

Ces principes permettent de proposer une évaluation technique de la réemployabilité structurale. Cette base d'évaluation technique sera complétée dans le chapitre V avec une évaluation environnementale plus globale de l'acte de déconstruire dans un territoire, et posant les bases de définition de l'indice de réemployabilité.

Références bibliographiques :

- [1] L. Qarout, «Reducing the Environmental Impacts of Building Materials: Embodied Energy Analysis of a High-performance Building,» University of Wisconsin Milwaukee, PhD Thesis, 2017.
- [2] S. Kaethner et J. Burrige, «Embodied CO2 of structural frames,» *The Structural Engineer*, pp. 33-40, 2012.
- [3] J. Benoît, G. Saurel, M. Billet, F. Bougrain et S. Laurenceau, REPAR 2 : Le réemploi passerelle entre architecture et industrie, ADEME, BELLASTOCK, CSTB, avril 2018, 545 p.
- [4] IFSTTAR, «Un béton "vert" est-il possible?,» 5 novembre 2018. [En ligne]. Available: https://www.ifsttar.fr/fileadmin/redaction/dossiers-thematiques/infrastructures/beton-vert/11364_Beton_Vert_FR_interactif.pdf. [Accès le 18 septembre 2019].
- [5] F. Lacas, «Parts de marché : le béton a "tenu son rang" en 2018,» *batiactu*, 9 Juillet 2019. [En ligne]. Available: <https://www.batiactu.com/edito/2018-beton-a-tenu-son-rang-56928.php>. [Accès le 6 Mars 2020].
- [6] UNICEM, «Le béton : moderne et durable,» [En ligne]. Available: <https://www.unicem.fr/accueil/la-federation/syndicats/la-pierre-liquide-moderne-et-durable/>. [Accès le 6 Mars 2020].
- [7] SNBPE, «Béton Prêt à l'Emploi, Des unités de production au cœur de la construction - Dossier de presse,» Novembre 2014. [En ligne]. Available: <https://mediatheque.snbpe.org/userfiles/file/DP%20SNBPE%20%20Process%20de%20fabrication%20du%20BPE.pdf>. [Accès le 6 Mars 2020].
- [8] Infociments, «Infociments 2019 - L'essentiel,» [En ligne]. Available: <https://www.infociments.fr/chiffres-cles>. [Accès le 6 Mars 2020].
- [9] Ministère de la transition écologique et solidaire, Ministère de la cohésion des territoires et Ademe, «Données publiques de l'observatoire E+C-,» 2020. [En ligne]. Available: <http://observatoire.batiment-energiecarbone.fr/console/>. [Accès le 26 Mars 2020].
- [10] ADEME, P. LEONARDON, CSTB, S. LAURENCEAU et M. LOUERAT, «Prospective de consommation de matériaux pour la construction des bâtiments neufs aux horizons 2035 et 2050,» Décembre 2019. [En ligne]. Available: <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/prospectives-2035-2050-consommation-materiaux-construction-neuve-renovation-energetique-bbc.pdf>. [Accès le 16 Janvier 2020].
- [11] C. Escalera, R. Amoêda et P. J. S. Cruz, «Buildings' connections and material recovery: from deductive to inductive approach,» chez *Portugal SB13 - Contribution of Sustainable Building to Meet EU 20-20-20 Targets*, 2013.
- [12] P. Sassi, *Strategies for Sustainable Architecture*, New York: Taylor & Francis, 2006, p. 312.
- [13] R. Messler, *Joining of Materials and Structures From Pragmatic Process to Enabling Technology*, 1st éd., Butterworth-Heinemann, 2006, p. 816.
- [14] N. Hoyet, *Matériaux et Architecture durable, Fabrication et transformations propriétés physiques et architecturales, approche environnementale*, Paris: Dunod, 2013, p. 224.
- [15] M. Brocato, *Statique: De la géométrie à la conception des structures.*, 1ère éd., Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussée, Éd., Paris, 2016, p. 326.
- [16] W. Salama, «Design of concrete buildings for disassembly: An explorative review,» *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 6, pp. 617-635, 2017, doi: 10.1016/j.ijbsbe.2017.03.005.
- [17] UNESCO, «Monuments bouddhiques de la région d'Horyu-ji,» UNESCO, [En ligne]. Available: <https://whc.unesco.org/fr/list/660/>. [Accès le 14 mars 2020].

- [18] Y. Malier, High Performance Concrete. From material to structure, Y. Malier, Éd., London: Chapman & Hall, 1992, p. 542.
- [19] J.-M. Jaeger, *Cours de l'ENPC - Béton armé : Module béton armé et précontraint BAEP*, Champs-sur-Marne: Ecole des Ponts ParisTech, 2020.
- [20] A. Lebert et J.-L. Chevalier, L'analyse du cycle de vie dans le bâtiment, Comprendre et réaliser une ACV, Champs-sur-Marne: CSTB Editions, 2018, p. 202.
- [21] C. Banks, J. Burridge, S. Cammelli, M. Chiorino, T. Ha, J.-M. Jaeger, G. Keleris, S. Marsh, J. Romo, S. McKechnie, A. Truby et J. Wells, Tall Buildings : Structural design of concrete buildings up to 300 m tall, London: fib and The Concrete Centre, 2014.
- [22] ADIVbois, commissions techniques et Codifab, «Vade-mecum des Immeubles à vivre bois,» ADIVbois, 2017.
- [23] J.-M. Jaeger, J. Poulain, O. Castan et Y. Galle, *Cours de l'ESTP - Résistance des matériaux, Immeubles de Grande Hauteur*, Cachan, 2020.
- [24] N. Braham, F. Lebrun et P. Baudet, *Analyse critique de l'évolution des projets IGH dans le monde et validation avec Pythagore. Thèse Professionnelle, Mastère Spécialisé Génie Civil Européen, Entreprise : setec tpi*, Paris: Ecole des Ponts ParisTech, 2018.
- [25] Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire et Ministère de la Cohésion des Territoires, «Référentiel « Énergie - Carbone » - Méthode d'évaluation de la performance énergétique et environnementale des bâtiments neufs,» 4 Janvier 2019. [En ligne]. Available: <http://www.batiment-energiecarbone.fr/IMG/pdf/referentiel-energie-carbone-methode-evaluation-2017-07-01.pdf>. [Accès le 27 Mars 2019].
- [26] G. Bignier, Architecture & écologie, Comment partager le monde habité ?, Paris: Editions Eyrolles, 2015, p. 218.
- [27] V. de Calignon, A.-M. Fèvre, C. Henneguez, A. Giacobelli, C. Muys et P. Rubin, Construire Réversible, Paris: Canal Architecture, 2017, p. 98.
- [28] C. Borrits, «Conception bas carbone et assemblages réversibles,» Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2019.
- [29] G. d. t. B. AFGC, «Bétons fibrés à ultra-hautes performances, Recommandations,» Juin 2013. [En ligne]. Available: <https://www.afgc.asso.fr/app/uploads/2007/10/Recommandations-BFUP-Juin-2013.pdf>. [Accès le 7 Juillet 2020].
- [30] F. Toutlemonde, M. Carcasses et M. Lion, «Durabilité et évolution in-situ des caractéristiques d'un BFUP : retour d'expérience sur poutrelles dans un aéroréfrigérant,» 17 Novembre 2009. [En ligne]. Available: https://www.researchgate.net/publication/281568956_Durabilite_et_evolution_in-situ_des_caracteristiques_d%27un_BFUP_retour_d%27experience_sur_poutrelles_dans_un_aerorefrigerant. [Accès le 28 Juin 2020].
- [31] J. Resplendino, «Introduction : Qu'est ce qu'un BFUP,» 17 Novembre 2009. [En ligne]. Available: https://www.afgc.asso.fr/app/uploads/2009/12/1.1_Resplendino.pdf. [Accès le 7 Juin 2020].
- [32] J.-M. Jaeger, J.-M. Joffres et Y. Galle, *Cours Ponts Formation Conseil - Eurocode 0 et 1 Actions, Eurocode 2 béton méthode des Bielles-Tirants*, Paris, 2020.
- [33] J.-M. Jaeger, *Cours de Centrale Supélec - 3ème année option Aménagement et construction durables : béton armé, béton précontraint*, Paris, 2020.
- [34] F. Lebrun, *Cours de Centrale Supélec - Résistance des matériaux en 3ème année*, Paris, 2020.
- [35] F. Lebrun, *Cours au CHEC - section CHEM - Béton armé*, Paris, 2020.
- [36] G. Delhumeau, L'INVENTION DU BETON ARME. Hennebique, 1890-1914, Norma, Éd., Paris: Institut Français Architecture, 1999, p. 344.

CHAPITRE III

Traçabilité de la donnée et environnement BIM

Comme abordé dans l'état de l'art en chapitre I, la traçabilité des données est primordiale dans le processus de réemploi, comme l'accordent, entre autres, Choppin et al. [1], ou Mc Donough et al. [2]. Dans le chapitre II, nous avons décrit la complexité du processus de conception des structures, notamment pour les IGH quand il s'agit d'anticiper les critères de réemployabilité. Il est primordial pour les concepteurs de connaître parfaitement les matériaux et leurs caractéristiques ainsi que leur mise en œuvre afin de pouvoir engager leur responsabilité, notamment décennale, avec le maximum de confiance.

Dans un contexte de réemploi qui intervient plusieurs dizaines d'années après une première mise en œuvre, l'attente d'une qualification exacte des éléments est encore plus grande, d'autant plus que ces procédés sont encore mal encadrés. La recherche de données concernant un bâtiment en fin de vie et ses matériaux mis en œuvre s'avère souvent chronophage et parfois infructueuse. Il est toutefois possible de caractériser les matériaux *a posteriori*. De nombreuses techniques de reconnaissances ou tests de caractérisation existent mais nécessitent néanmoins des temps et des coûts d'études qui ne sont pas toujours rentables pour un maître d'ouvrage, tant que la réduction de l'impact environnemental de la construction n'a pas plus de poids économique (sanctions financières si les objectifs environnementaux ne sont pas atteints, hausse de la mise en décharge, hausse des prix des matériaux issus de ressources naturelles en épuisement).

Aujourd'hui les sources d'informations se sont démultipliées avec les outils numériques. On doit maintenant pouvoir s'appuyer, entre autres, sur ces outils pour mettre en place une traçabilité infaillible des matériaux mis en œuvre afin de maîtriser ces ressources qui sont également nos matériaux du futur, grâce au réemploi. En vue d'accompagner et d'inciter les processus de réemploi, nous aborderons dans ce chapitre : 1. Les modalités d'échanges de la donnée tout au long de la chaîne d'acteurs de la construction, 2. le renforcement du cadre de l'outil BIM, 3. le développement d'une banque de données des éléments porteurs, 4. les processus de vérification et caractérisation avant une reconception de remise en œuvre.

Ce chapitre a été rédigé à la suite d'une période d'utilisation du logiciel BIM Revit au sein de l'équipe BIM de setec tpi dont l'expérience a été mise à profit dans ce travail.

3.1. Méthodologie d'échanges de la donnée entre les acteurs de la construction

Aujourd'hui la multiplication des données doit faire l'objet d'attentions particulières pour juger de la pertinence de leur génération et, surtout, de leur fiabilité et de leur utilité à long terme. La valorisation par le réemploi nécessite la mise en place d'une traçabilité afin de garantir une sécurité pour la remise en œuvre, et d'assurer la couverture des responsabilités des différents acteurs impliqués dans les différents cycles des éléments de construction.

Dans le but de mettre en place et favoriser une économie circulaire, il est indispensable de penser la traçabilité à très long terme. En effet, les éléments constitutifs d'un bâtiment doivent pouvoir être transmis à un concepteur d'un second cycle, différent du concepteur initial, et ceci en toute indépendance. Pour cela une traçabilité renforcée doit être mise en place, en accord avec les garanties couvertes par les assureurs et les procédures des bureaux de contrôle.

Le processus BIM nous aide également à pérenniser l'information liée au matériau mis en œuvre. Ainsi le matériau pourra être déconstruit et valorisé en gardant avec lui l'information de ses caractéristiques et de ses précédentes mises en œuvre. L'état de l'art et le retour

d'expérience des pratiques actuelles doivent permettre d'identifier les données nécessaires à la mise en place du réemploi.

3.1.1. Enquête auprès des professionnels

Pour le présent travail, une enquête auprès des professionnels a été menée afin de mieux analyser leur rapport à la donnée, en grande partie, numérique. Ainsi une trentaine de professionnels¹, parmi des ingénieurs structure, architectes mais aussi MOA, fabricants ou représentants de centres techniques nationaux, ont pu faire part de leurs pratiques et des limites, notamment dans la transmission de la donnée. Ces manques identifiés, à travers les projets des professionnels, ont permis d'élaborer une proposition méthodologique afin de renforcer la capitalisation de la donnée produite en vue d'un processus de réemploi.

3.1.1.1. Relevés des manques dans la pratique actuelle

a) L'environnement papier : dossier des ouvrages exécutés (DOE) - le risque de perte

Bien que la constitution d'un DOE soit éprouvée ces dernières décennies et que ce DOE soit remis au MOA (Maître d'Ouvrage), il arrive souvent que l'on en perde la trace au cours des années ou que des documents soient perdus ou dégradés. Le papier peut donc constituer une source d'informations précieuses mais le mode de conservation est plus ou moins fiable. Il est courant que les archives soient détruites ce qui est préjudiciable au transfert des données de l'existant.

b) L'environnement numérique : fichiers .PDF, .CAD

Depuis la généralisation des outils numériques et notamment de la CAO (Conception Assistée par Ordinateur), les échanges de données au format numérique et de géométriques au format .PDF se sont démocratisés. Cependant le format papier reste de rigueur pour les pièces contractuelles d'importance. Le passage au tout numérique n'est pas encore assez encadré et le manque de compatibilité des outils métiers et des formats d'échanges ne favorise pas l'interopérabilité. Le .PDF peut être un facilitateur des échanges notamment pour le stockage, mais pas un « fiabilisateur ».

c) Le BIM et son manque d'encadrement

L'apparition, récente, du processus BIM, que l'on a présenté en partie 1.3. du chapitre I, a considérablement ouvert le champ des possibles, autorisant la création quasi infinie de paramètres et de données attachées aux objets de la maquette numérique. Le BIM n'est pas totalement démocratisé et de nombreux acteurs du projet ne maîtrisent pas cet outil, pour autant ces acteurs continuent de produire de la donnée et doivent intégrer un protocole de fiabilisation de la donnée, indépendamment de la maîtrise du processus BIM.

La multiplication des données produites par les acteurs pose le problème de l'harmonisation des échanges et de la standardisation des informations. Que ce soit au niveau

¹ Equipes setec : Jaeger, J.-M. ; Hervoches, G. ; Horsin, N. ; Phothirath, N. ; Zonco, A ; Boudet, C. ; – AMI FBE Economie circulaire : Laurenceau, S. (CSTB) ; Senior, G. (AETIC) ; Laurent, N. (Federec BTP) ; Ferrandi, L. (Suez, Federec BTP) ; Bonaud, P. (CTICM) ; Gordo Gregorio, P. (Alto) ; Lassaingne, C. (Raedificare) ; Decot, V. (Raedificare) ; Landouar, S. (BNP Immobilier) ; Patrice, S. (St Gobain) ; De Chalendar, M. (St Gobain) ; Henrotay, C. (BAMB) ; Lowres, F. (BRE, BAMB) ; Catherine, A. (Covea, Circolab) ; Laquitaine, T. (AEW, Circolab) ; Oury, N. (HQE-GBC) ; Sanchez, M. (AQC) ; Blanchard, N. (CSTB) ; Mandrara, Z. (FCBA) ; Maquenhem, T. (CTICM) ; Kouyoumji, J.-L. (FCBA) ; Blaison, C. (Cycle-up) ; Macé, E. (Artelia) ; Brachet, L. (Artelia) ; Alix, E. (DGALN, DHUP).

national ou international, on retrouve des programmes visant à normaliser les processus de génération des données et les modalités d'échanges (PPBIM, POBIM, Plan BIM2022, ISO, BuildingSmart), mais qui peuvent apporter une grande confusion auprès des professionnels, car la hiérarchie et la prépondérance entre ces programmes n'est pas clairement lisible.

Une autre problématique est celle de la pérennité des fichiers numériques et leur fiabilité à long terme. De plus, dans l'objectif de la mise en place d'un réemploi, on peut difficilement caractériser les données dont on aura besoin dans 50 ans mais il faut d'ores et déjà capitaliser les données que l'on possède aujourd'hui.

3.1.1.2. Identification des générateurs de données

Divers acteurs interviennent à différents stades de transformation/utilisation de la matière. La confrontation et la coordination des multiples intérêts de chacun doivent ici être étudiées sans perdre de vue l'objectif d'un réemploi. Cinq catégories d'acteurs ont ainsi été identifiées et représentées dans la Figure III. 1 :

- les générateurs de la donnée ;
- les utilisateurs de la donnée ;
- les gestionnaires de la donnée ;
- les contrôleurs de la donnée ;
- les exploitants de la donnée.



Figure III. 1 : Les acteurs de la donnée dans la construction

Les acteurs en aval de la filière doivent « boucler la boucle » avec les acteurs en amont de la filière sur une base méthodologique commune. Ainsi, une base commune d'échanges permettrait de délimiter la propriété industrielle privée propre à l'acteur, afin de préserver les données propices et nécessaires au développement global de l'économie circulaire. L'enquête montre qu'il semble plus judicieux d'initier cette caractérisation par filière de matériaux plutôt que par bâtiment fini, car les filières sont mieux organisées et présentent d'ores et déjà des protocoles qualité d'archivage des données. Chaque acteur dans la Figure III. 1, est plus à même de capitaliser la donnée qu'il a produite et qu'il maîtrise en interne. Le bâtiment en lui-même doit également abriter sa propre traçabilité à la fois par des dispositifs spécifiques (puces RFID, QR code, étiquettes) mais aussi par un modèle BIM ou un jeu de plans qui peuvent être stockés physiquement dans le bâtiment. Ce double système permet de renforcer la fiabilité de la donnée en doublant les possibilités de retrouver l'information : dans le bâtiment et chez les acteurs de la construction.

Concernant le BIM, l'enquête révèle, d'une part que les acteurs n'ont pas tous le même niveau de connaissance ou de maîtrise du BIM, et d'autre part que le processus BIM n'est pas, à ce jour, suffisamment encadré ou contrôlé. Ainsi, il n'est pas rare, dans les DOE (dossiers d'ouvrages exécutés), que les niveaux de définition BIM d'un élément structural à un autre soient différents (niveau de détails de modélisation des poteaux différent de celui des poutres). De plus, la sous-traitance sur chantier entre les entreprises engendre des pertes de données. La sous-traitance entreprise ou le manque de compatibilité logiciel métier entraîne une rupture du transfert de la donnée. Les limites logicielles peuvent également provoquer la perte de données. Un projeteur n'a, par exemple, pas toujours la possibilité de renseigner la nuance

d'acier et, en conséquence, l'information n'est pas renseignée et donc perdue. Ainsi, le dossier matériau n'est pas toujours renseigné correctement. La donnée existe mais disparaît au fur et à mesure des passages entre les outils et les entreprises intervenant sur le projet. La multiplication des acteurs et des entités multiplie donc des risques de pertes. Également, si la donnée est conservée par un sous-traitant qui fait faillite, toutes les données en sa possession seront perdues. Il faut donc étudier la possibilité de prévoir une archive, par exemple, au CSTB, (organisme national et jugé plus fiable) ou dans un établissement créé pour ce besoin ou dont l'activité est déjà orientée vers l'archivage (par exemple la Bibliothèque Nationale de France dispose de tous les moyens nécessaires pour pérenniser leurs archives physiques et numériques).

Plusieurs causes de pertes ou de non-génération de données sont identifiées :

- Par manque de maîtrise des logiciels de conception
- Pour cause de dysfonctionnement du support (on ne peut pas tout compiler sur une unique maquette BIM)
- Par manque d'interopérabilité entre les logiciels métiers (l'information est perdue au moment de la création du fichier d'échanges)
- Pour cause de raisons commerciales (on ne garde et on ne communique que sur une partie des données)

Globalement, la donnée a toujours existé chez l'un des acteurs mais n'a pas été conservée car chaque acteur est pour l'instant guidé par le périmètre précis d'une phase de projet issue de la loi MOP : conception, exécution, exploitation, fin de vie et aucun n'intègre pleinement une vision à très long terme incluant la valorisation matière en fin de vie du bâtiment. Par ailleurs, en général, il faut conserver la donnée au maximum car on ne peut pas anticiper les changements de règlements, les exigences sanitaires futures, ou la découverte de la nocivité d'une substance (comme cela a pu être le cas avec le plomb ou l'amiante par le passé).

Les résultats de l'enquête ont été compilés dans un tableau qui liste toutes les catégories d'informations pour un élément de construction et qui permet de déterminer quels acteurs de la Figure III. 1 génèrent une donnée et laquelle ils utilisent. On peut aussi accéder à une donnée dans le but de la transmettre à un autre acteur. Les catégories d'informations sont réparties ainsi :

- Géométrie
- Données structure
- Traitement industriel
- Second œuvre
- Pièces contractuelles
- Supports numériques
- Identification
- Recyclage
- Environnement

Un extrait du tableau général est donné dans le Tableau III. 1, et expose les constats actuels des pratiques entre professionnels. Un tableau sur la même enquête identifie les difficultés par acteur et par donnée pour passer à une transmission totale de la donnée. Les tableaux complets sont disponibles en annexes.

	Données	Industrie / Fabricant			Concepteur/MOE/entreprise			Exploitant/MOA			Déconstructeur/plateforme			ré Industrie/ Valorisation (re					
		Géné	Utilis	Acc	Transmission		Géné	Utilis	Acc	Transmission		Géné	Utilis	Acc	Transmission		Géné	Utilis	Acc
					oui	non				oui	non				oui	non			
Données str	Rayon de congé d'un profil en I	X			X				X	non				X					
	Rayon de courbure	X			X				X					X					
	Résistance à la traction	X			X				X					X					
	Resistance à l'arrachement lame	X			X				X					X					
Traitement industriel	Etat de laminage	X			X				X					X					
	Corrosion	X			X				X					X					
	Rugosité de surface d'un sujet	X			X				X					X					
	Surface développée par unité de	X			X				X					X					
	Type de finition de surface de f	X			X				X					X					
	Date fabrication	X			X				X					X					
	Résilience de l'acier	X			X				X					X					
Pièces contractuelles	Convention BIM																		
	Cahier des charges BIM																		
	Cahier des charges fabricants																		
	Dictionnaire																		
Supports numériques	Maquette BIM DOE																		
	Maquette BIM DEM																		
	Fichier IFC																		
	Puces RFID																		
	Capteurs																		
Identific	Désignation normalisée	X																	
	Désignation symbolique	X																	
	Identifiant de production de l'éle	X																	
Recyclag	Transformation de la matière																		
Enviro	FDES (avec norme afférente)	X			X				X					X					
	Composition chimique complète	X			X														

Tableau III. 1 : Résultats de l'enquête pour la transmission des données entre acteurs de la construction

3.1.2. Besoins de traçabilité et responsabilités

Comme évoqué dans l'état de l'art, les responsabilités sont un enjeu crucial du processus de réemploi des éléments de construction, en particulier lorsqu'ils sont porteurs. L'enjeu de la responsabilité spécifique à la donnée est également important, dans la mesure où le générateur de la donnée transmise s'engage sur la fiabilité de cette donnée. L'utilisateur de la donnée doit alors s'engager à ne pas modifier cette donnée au risque de mettre à mal la responsabilité de chacun.

Un consortium sur l'utilisation des données dans le cadre d'un projet doit être mis en place pour encadrer les différentes transmissions. Une donnée manquante peut également interrompre le processus de réemploi et *in fine* gâcher la matière réemployable. En cas de désordre il faut aussi pouvoir identifier rapidement la faille dans la génération ou la transmission de la donnée.

La traçabilité concerne donc à la fois la production de donnée elle-même mais aussi la valeur de l'information transmise. Les nombreux projets de réhabilitation en cours nécessitent la reconnaissance de la structure existante. Cette méthode de reconnaissance actuelle peut être intégrée dans la méthode pour anticiper la réutilisation dans 30, 50 ans ou plus. Ainsi, les données des éléments porteurs doivent être capitalisées dès la phase de conception. Pour la réutilisation des éléments porteurs, *a minima*, les propriétés physiques et mécaniques des matériaux doivent être connues. Ces données à collecter doivent être spécifiées selon le type de matériau : béton, acier, bois, et selon la fonction structurelle : poteau, poutre, mur porteur, mur transversal, dalle. Dans certains cas, la complexité de la structure à démanteler ou la future classe d'utilisation des éléments porteurs nécessite des études complémentaires par des ingénieurs en structure.

Dans le même temps, nous devons tenir compte du fait que le modèle est utilisé et complété par les différents acteurs de la chaîne en fonction de leurs besoins. À la fin du processus, certaines données sont alors définitivement perdues. C'est pourquoi nous devons accorder une attention particulière à la recherche de modèles de bâtiments numériques et de documents conformes à l'exécution en cas de réutilisation. Pour éviter la suppression des

données et pour assurer un niveau de confidentialité, un accès partiel aux données selon les acteurs, doit être assuré via un système de filtres.

L'ingénieur en structure qui décide de réutiliser un élément porteur doit s'assurer qu'il possède les caractéristiques de cet élément pour des raisons essentielles de responsabilité. Il est également crucial de vérifier les conditions de vie et de fonctionnement de l'ensemble du bâtiment d'où provient l'élément. Il est alors préférable de pouvoir confronter les données théoriques et les données mesurées pendant la vie de l'ouvrage. Un classement des données des éléments porteurs d'un IGH est ici proposé en quatre catégories :

- Les propriétés statiques, telles que la composition, la géométrie, la norme afférente, etc ;
- Les propriétés mécaniques (comportement de l'élément), telles que la position, le type de charges, les conditions d'assemblage, la classe de résistance, la contrainte appliquée, le fluage, les caractéristiques de vieillissement, etc ;
- Les propriétés mécaniques (comportement global de la structure du bâtiment), telles que la classe d'exposition, le raccourcissement différentiel, le tassement du sol, les déplacements différentiels entre les étages, le déplacement en tête, l'accélération en tête, la durée de vie de la structure, etc ;
- Les informations relatives au processus de réutilisation, telles que le phasage de déconstruction, le diagnostic ressources, les essais de performance résiduelle, etc.

Toutes ces mesures peuvent contribuer à une meilleure compréhension de la vie d'une structure, grâce aussi au *monitoring* pour évaluer le vieillissement, au marquage et à la géolocalisation des éléments, à l'enregistrement des alertes de déformation en temps réel et, à l'historique des conditions météorologiques ou environnementales. Ces données sont déjà collectées dans le cadre de la surveillance de la santé des structures (*SHM, Structural Health Monitoring*) et sont adaptables pour le réemploi. Le *SHM* permet la mise à jour des informations sur le comportement des éléments. Le *SHM* peut être directement couplé au modèle de calcul initial pour mettre à jour les conséquences des événements subis par la structure, [3]. On privilégiera les systèmes de traçabilité passifs (RFID, QR Code, marquage) pour stocker les propriétés statiques et les systèmes de traçabilité actifs (centrales d'acquisition, capteurs, *IoT Internet of Things*) pour la collecte de données mécaniques et le *monitoring* du comportement global de la structure.

Pour évaluer le risque de réutilisation d'un élément structurel et de prolongation de sa vie utile pour une "nouvelle vie", un autre niveau de réponse peut être fourni via le principe de l'analyse prédictive, [4]. Le traitement statistique des données numériques enregistrées au cours de la première vie doit permettre de réutiliser un élément structurel avec une compréhension de son comportement bien supérieure à celle fournie par les processus d'analyse traditionnels. Dans le cas d'une structure existante, une analyse prédictive, basée sur l'évaluation et le traitement statistique de données mesurées *in situ* [3], permettrait ainsi d'établir des corrélations entre les données, par exemple entre les déplacements observés et les actions appliquées, et permettrait de prédire le comportement ultérieur de la structure. Il serait ainsi possible de fonder le comportement futur sur la connaissance du comportement réel et d'ajuster de plus en plus finement le modèle prédictif en fonction des données mesurées en réponse à des événements climatiques ou autres. Les données enregistrées par les capteurs seront analysées et interprétées pour fournir un tableau de bord en temps réel du comportement mécanique du bâtiment. Une orchestration précise permettrait de :

- Stocker ces données selon une architecture de données prédéfinie et dans une zone de stockage sécurisée,

- Définir les corrélations recherchées entre les données collectées et construire les processus pour établir ces corrélations (*Data Science*),
- Mettre en place un processus de type « *Machine Learning* » permettant d'apprendre et de maîtriser de manière de plus en plus fine le comportement de l'ouvrage en fonction du temps,
- Aboutir à un modèle prédictif statistique capable de prévoir le comportement futur de l'ouvrage face à des sollicitations extérieures à venir.

Le modèle prédictif est basé sur l'observation et les mesures du comportement réel et, par conséquent, intégrerait directement les éléments incertains dans la modélisation physico-mathématique (loi de vieillissement et taux d'amortissement des matériaux, modélisation des actions appliquées, etc.). Ainsi, il fournirait des informations plus précises sur le comportement futur de la structure (avec des coefficients de sécurité optimisés couvrant les incertitudes) et permettrait également de mieux comprendre sa durée de vie utile. Cependant, toutes les informations requises pour l'analyse structurelle ne sont pas facilement mesurables, par exemple les contraintes internes et les taux de contrainte des matériaux, que l'on peut trouver dans le modèle physique. Par conséquent, une méthode consisterait à coupler les deux approches. Le défi est donc d'adapter ce principe à des éléments isolés de la structure (un poteau, une poutre) afin de connaître les contraintes et déformations locales et de rendre les éléments disponibles pour le réemploi.

3.1.3. Echanges à créer et à renforcer pour le réemploi

3.1.3.1. Enjeux propres à la capitalisation de la donnée

Dans le but de mettre en place et favoriser une généralisation de l'économie circulaire dans son ensemble (allongement du cycle de la matière, réemploi, recyclage), il est indispensable de penser la traçabilité à très long terme. La chaîne linéaire entre les acteurs doit devenir circulaire et s'adapter aux différentes configurations de jeux d'acteurs (illustrées dans la Figure III. 2), aussi bien lorsqu'un gisement reste valorisé par un seul maître d'ouvrage déconstructeur/récupérateur que lorsque l'élément déconstruit passe par un déconstructeur puis un valoriste avant d'être remis en œuvre.

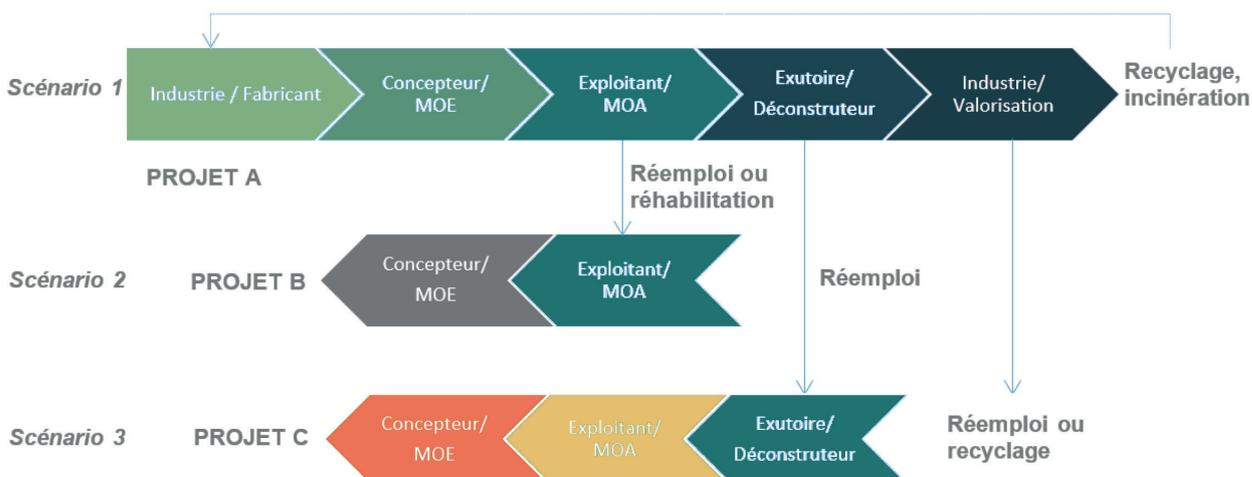


Figure III. 2 : Les acteurs de la donnée et la circularité des projets

Dans les pratiques actuelles, deux systèmes majeurs de gestion des données, illustrés en Figure III. 3, sont déjà en place et encadrés mais ne communiquent pas suffisamment entre eux :

- Le *BIM* issu de la conception et de l'exploitation des bâtiments
- Le *PIM*, *Product Information Management*, issu de la fabrication et de la gestion des produits par les industriels.

Afin de capitaliser les données issues du *PIM*, des plateformes se mettent en place [5], ce qui permet aux industriels de communiquer directement leurs données avec leurs clients prescripteurs. Ce lien direct doit permettre de renforcer la traçabilité et améliorer la gestion d'informations.

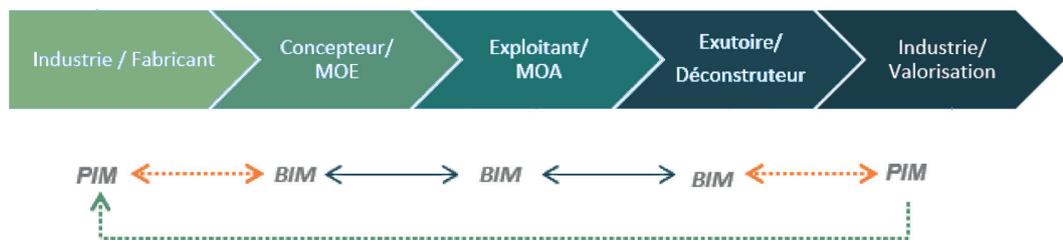


Figure III. 3 : Des transmissions de données à établir

Des passerelles pour fluidifier les communications entre les différents systèmes seraient bénéfiques au transfert de la donnée et pourraient également autoriser le passage au *CIM* (*City Information modeling*) ou d'autres extensions à venir du *BIM*. Le *CIM* concerne un quartier ou une ville et permet de nombreuses applications comme le pilotage d'équipements urbains, la géolocalisation de véhicule et autres données de mobilité [6]. Certains aménageurs, à l'image de l'EPAMarne², se sont déjà lancés dans les projets intégrant le *CIM*. Le *CIM* pourrait donc héberger une banque de matériaux à l'échelle du quartier ou de la ville pour mieux gérer les flux locaux d'éléments de construction.

Le schéma synthèse en Figure III. 4 résume les enjeux de la donnée à tracer entre les acteurs dans un environnement *BIM*. Les acteurs sont assignés à différentes phases du projet et génèrent ou utilisent des données multiples qu'il faudra compiler et tracer pour garantir une circularité *in fine* de la matière. L'enjeu est de conserver et tracer la donnée même lorsqu'elle n'est pas sollicitée à une étape du projet.

² <https://www.epamarne-epafrance.fr/actualites/bim-cim-epamarne-donne-lexemple/>, consulté le 16/09/2019.

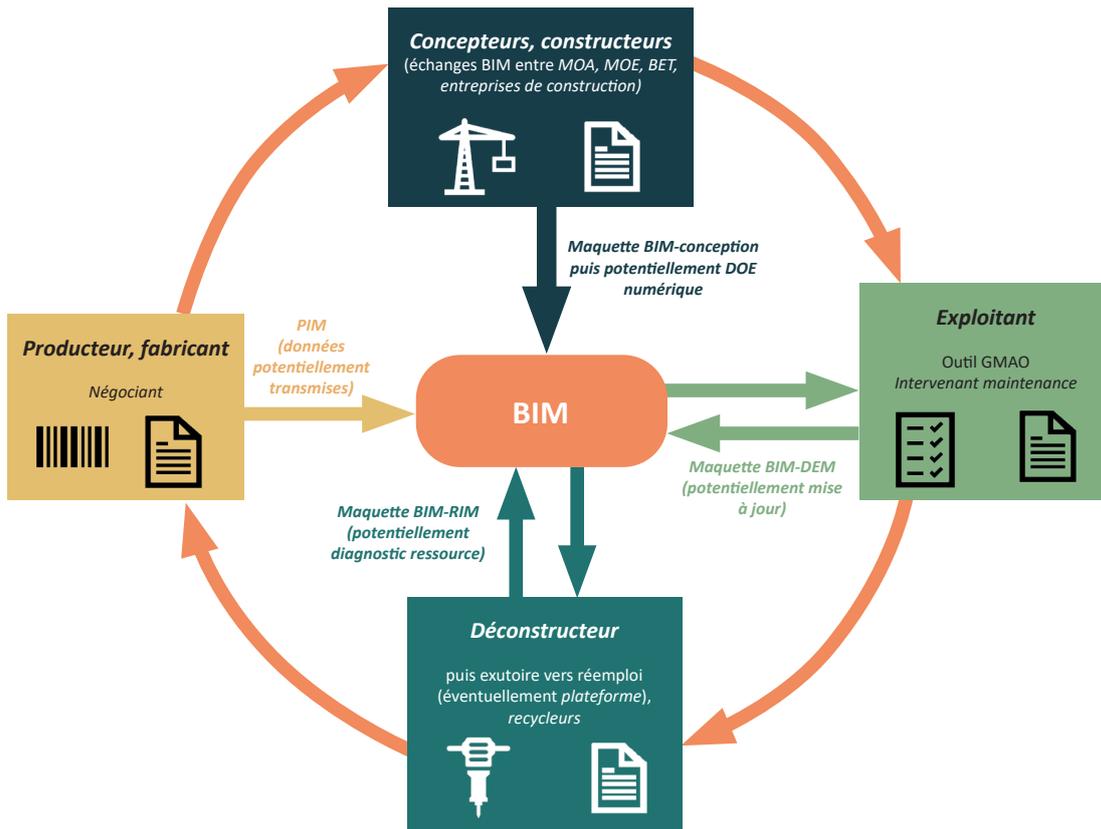


Figure III. 4 : Synthèse de la chaîne des acteurs et contributions à la traçabilité BIM

3.1.3.2. Nouvelles étapes du processus d'échanges

a) Conception et construction

Le BIM permet un travail collaboratif et le partage de maquette. Trois niveaux de collaboration sont définis [7] :

- Niveau 1, process collaboratif au sein d'une entreprise (par ex : l'ingénieur structure et son projeteur mettent au point la maquette structure d'un bâtiment) ;
- Niveau 2, la maquette est partagée avec des partenaires extérieurs. Une confrontation des maquettes est faite par les partenaires. Une méthodologie de synthèse doit être mise en place ;
- Niveau 3, la maquette est unique et tous les partenaires interviennent, potentiellement en temps réel sur cette maquette. Ce niveau n'est pas répandu dans la pratique car il est difficilement compatible avec les responsabilités de chaque intervenant. Il demande également une grande maîtrise de l'outil et du processus collaboratif ainsi qu'un support informatique puissant.

Aujourd'hui les systèmes et les logiciels de modélisation se mettent en place pour encadrer l'échange d'informations et de maquettes numériques entre membres de la maîtrise d'œuvre, avec la maquette collaborative du niveau 2 du *BIM*. Le *BIM Manager* se charge de réunir et de confronter ces modèles pour étudier leur concordance et effectuer la présynthèse (détection de *clashes*).

Le processus de conception du réemploi s'appuie sur la démontabilité des systèmes et la réversibilité des assemblages. Le processus *BIM* permet d'apporter une information pérennisée et liée au matériau grâce également à des dispositifs de traçabilité (puces RFID, QR

code, marquage, étiquette, voire capteurs et IoT). La traçabilité est ainsi améliorée numériquement et physiquement par ces systèmes intégrés à la matière. La maîtrise d'œuvre élabore donc une maquette numérique pour la phase de conception puis l'entreprise de construction réalise la maquette d'exécution qui génère un DOE numérique. La maquette est alors livrée au maître d'ouvrage qui en devient le propriétaire total. Le DOE numérique, est très précieux, puisqu'il est utile à la fois au maître d'ouvrage actuel mais aussi au futur maître d'ouvrage « réemployeur » et aux futurs concepteurs qui utiliseront les éléments de réemploi quand la fin de vie du bâtiment initial sera venue.

b) Exploitation

Parfois une maquette spécifique à l'exploitation, dite Dossier d'Exploitation Maintenance (DEM), est préparée par l'équipe de maîtrise d'œuvre pour être transmise à l'exploitant. Cette maquette DEM doit être généralisée car elle est indispensable pour faire le lien entre la phase de conception et la phase d'exploitation. Il est possible de masquer un certain nombre d'informations issues de la conception qui ne seront pas utiles pendant la phase exploitation mais auxquelles il faudra à nouveau accéder en fin de vie pour préparer le réemploi. Pendant la vie en œuvre du bâtiment, la mise à jour de la maquette peut être confiée au *Facility Manager* pour l'incrémenter de tous les événements et opérations de maintenance intervenant pendant l'exploitation du bâtiment. Pour les éléments structuraux qui seraient instrumentés, un lien doit permettre l'enregistrement des données du suivi de la structure à partir du modèle BIM également.

c) Fin de vie / Déconstruction

La maquette numérique peut, à ce stade, être confiée au déconstructeur, au récupérateur, à la plateforme de réemploi. Un travail devra être fait pour que les informations de la maquette soient attribuées légitimement à chacun des composants désassemblés et ce, en fonction de sa destination : réemploi *in situ*, mise à disposition de réemploi via une plateforme, détournement d'usage, recyclage, incinération, autre valorisation, etc. Le matériau déconstruit et réemployé garde alors avec lui l'information de ses caractéristiques et de ses précédentes mises en œuvre.

d) Conflits d'échanges

On peut alors s'interroger sur la pertinence d'accumuler toutes ces informations superposées au cours des phases du cycle de vie ou de la façon de trier, filtrer voire protéger (rétention de certaines données) une partie des informations à chaque relais d'acteurs. Le choix d'une stratégie doit être fait en concertation avec tous les acteurs qui :

- Soit s'engagent à déployer un système d'archivage pérenne, en interne, pour les données qu'ils ont générées
- Soit mettent en place une réelle maquette collaborative avec la transparence qu'elle demande (ou les filtres nécessaires), et qui contient toutes les informations générées par tous les acteurs.

En l'attente d'une stratégie commune, il est préconisé de développer ces deux stratégies en parallèle pour s'assurer qu'un des deux process soit effectivement opérationnel en fin de vie.

3.1.3.3. Capitalisation de la donnée produite

Comme nous l'avons vu précédemment, la théorie permet donc d'embarquer des informations dans les objets eux-mêmes et de constituer une « carte d'identité » pour les bâtiments, comportant une cartographie, une quantification et une qualification des différents types de matériaux utilisés, afin par exemple de faciliter le tri au moment de la déconstruction. D'autres projets de recherche travaillent également à la définition d'un « passeport matériau », [8], [9].

Cependant, pour les producteurs et fabricants, les données non transmises, telles que les compositions chimiques des aciers par exemple, ont une durée de conservation en interne limitée (à 10 années pour l'acier de construction par exemple), selon le CTICM. Concernant les données géométriques et physiques, les éléments de construction étant tous normalisés (matière, dimensions...), les outils logiciels disposent des informations les caractérisant, à l'exception du béton coulé en place qui présente un autre circuit que celui de la préfabrication, et qui nécessiterait d'enregistrer les bons de pesée de la centrale à béton. La rupture de traçabilité entre le producteur et le bureau d'étude peut donc être compensée par la normalisation, mais il est alors indispensable de bien conserver, avec l'élément de construction, sa norme de construction afférente.

Selon le CTICM, au cours de la production d'une structure métallique, le bureau d'études établit une maquette numérique de la structure incluant les exigences physiques des composants, pour assurer la fonction structurale. Puis c'est au bureau des méthodes de l'industriel aciériste de faire coïncider les matières approvisionnées avec les matières attendues. Le bureau des méthodes va transmettre aux ateliers les détails de chaque composant avec une identification de chacune des pièces. Dans le meilleur des cas, on peut avoir un repère sur chaque partie d'un sous-ensemble (repères de profil, repères de goussets, etc.) permettant l'assemblage du sous-ensemble qui disposera également d'un repère facilitant sa mise en place sur le chantier. Tous ces repères sont des données de la maquette numérique et sont aussi imprimés sur une étiquette (métal ou carton, rarement une gravure). Au cours du chantier, le poseur va probablement éliminer le repère du sous-ensemble après sa pose, (étiquette enlevée). De fait, la traçabilité des composants s'arrêtera à cette opération de pose. La maquette numérique reste alors la seule source permettant d'assurer la traçabilité.

Les moyens dont nous disposons aujourd'hui : BIM data, IoT, systèmes embarqués, peuvent considérablement améliorer cette traçabilité nécessaire, afin de garantir une sécurité pour la remise en œuvre et assurer la couverture des responsabilités des différents acteurs impliqués dans les cycles successifs de réutilisation des éléments. Cependant, en considérant qu'un élément idéalement conçu pour le réemploi pourra enchaîner plusieurs cycles de mise en œuvre, il faut alors miser sur une pérennité des données pour, au minimum, 100 ans. Cette hypothèse reste une difficulté à surmonter sur le plan informatique où nous ne disposons pas d'un tel recul sur la technologie. Il est donc difficile de prétendre produire une donnée utilisable dans 100 ans, au format numérique.

3.2. Renforcement du cadre BIM

Le BIM est un support pour générer et capitaliser la donnée nécessaire au réemploi et, *in extenso*, de l'économie circulaire. Le processus BIM ne s'est pas encore pleinement positionné sur les enjeux de développement durable et en particulier d'économie circulaire mais il existe un champ des possibles à travers la 6D du BIM, cf. partie 1.3.2.1. du chapitre I. La méthodologie et le cadre BIM restent donc à définir dans ces domaines. La partie suivante présente les développements BIM nécessaires pour accompagner le processus de réemploi.

3.2.1. Le BIM, outil du réemploi

La revue de la littérature, réalisée dans le chapitre I, a révélé le besoin de définir des standards BIM et des guides pour les problématiques de fin de vie, comme l'abordent, entre autres, Akinade et al. [10]. Des liens avec d'autres sources de données, comme les FDES/DEP doivent être établis car la maquette numérique ne peut pas être l'unique source d'informations. La revue a aussi souligné le manque d'interopérabilité entre les logiciels et les limites du format *IFC (Industry Foundation Classes)* qui ne permet pas de transmettre tous les paramètres créés

spécifiquement pour le réemploi dans une maquette numérique. Sur le sujet précis des données relatives au comportement structural des matériaux, un manque de précision dans les nomenclatures existantes est observé, comme le dénoncent également Forth et al. [11]. C'est pourquoi, en partie 3.2.3, nous allons préciser les données permettant de disposer de l'ensemble des caractéristiques physico-mécaniques en prévision d'un réemploi d'éléments porteurs. En conséquence et afin d'enrichir le processus BIM des développements nécessaires au réemploi, notre travail définira :

- Les niveaux d'informations BIM souhaitables pour le réemploi
- La création de paramètres appropriés aux éléments porteurs
- Les liens avec d'autres sources de données environnementales
- L'accès à la donnée partageable

3.2.2. Développement des LOI/LOD spécifiques au réemploi

Les informations contenues dans le modèle BIM sont plus ou moins précisées selon les demandes du client, le stade du projet, la complexité du projet. Pour aider à décliner la précision attendue, des niveaux de détails de l'information sont définis comme standards internationaux et notamment dans les normes ISO 29481-1 : 2016 (IDM) et ISO 19650 : 2018 :

- Les LOD, *level of development* ou *level of details* fixés en fonction du stade du projet, classés de 100 à 500 ;
- Les LOX [7], *Level of X* avec X pour signifier une infinité de possibles et qui démontre bien la difficulté de se référer à un unique référentiel ;
- LOI, *Level of Information* ;
- LOIN, *Level of Information Need*, regroupe sous une même entité tous les niveaux, *Levels of*, à définir par un client qui souhaite mettre en place un processus BIM pour la modélisation de son projet.

Les normes ont décrit l'interaction du BIM avec le management de projet à travers les IDM (*Information delivery manual*) – définis par la norme ISO 29481-1 [12], puis la série ISO 19650 [13] actée en janvier 2019. Elle traite de la définition des exigences du client, et de la façon d'organiser le management de l'information pour y répondre. Elle permet de spécifier précisément les informations échangées entre les acteurs, à chaque étape d'un projet sur l'ensemble du cycle de vie d'un ouvrage. Plus la planification avance, plus les acteurs ont besoin d'informations détaillées : il s'agit des LOD (*level of development*) devenus LOX tant il peut y avoir de déclinaisons de niveaux de détails.

Les LOIN (*Level of Information Need*) permettent au client de définir les besoins d'informations. Un projet en BIM doit donc être accompagné d'une convention BIM qui décrit :

- Les exigences d'informations du donneur d'ordre (objectifs de qualité et de performances attendues),
- Les exigences d'informations de l'actif,
- Les exigences d'informations du projet (objectifs à respecter par les acteurs),
- Les exigences d'échanges d'informations (méthodes organisationnelles dans la phase opérationnelle).

Selon la littérature, des outils sont en cours de développement pour optimiser la déconstruction et la fin de vie, mais pas pour les pratiques de conception pour la réutilisation (*DfReu*), d'après Akinade et al. [10]. La méthodologie décrite ici vise à concevoir des éléments structurels en augmentant les paramètres liés au BIM 6D. Le document de référence communément reconnu par les praticiens est la définition de LOD par BIMFORUM [14]. Selon cette référence, les différents LOD de 100 à 400 spécifient les représentations géométriques attendues, par exemple, pour le poteau structurel préfabriqué (béton) au LOD 400 on attend "Modélisation des éléments à inclure : toutes les armatures y compris les éléments de post-tension détaillés et modélisés, et les finitions". Au LOD 500, tous les référentiels considèrent un "modèle structurel tel que construit". Les cinq phases communes utilisées dans ces référentiels sont la planification/conceptualisation du projet (PP), le projet/design préliminaire (P), la demande de permis de construire/développement (BPA), l'appel d'offres/design détaillé (T), et la construction (C) comme décrit par Veselka et al. [15]. Notre travail propose donc également la précision d'un LOD 600 concernant la phase de vie en exploitation, et d'un LOD 700 concernant la phase de déconstruction/réemploi, pour les éléments porteurs, illustrés en Figure III. 5.

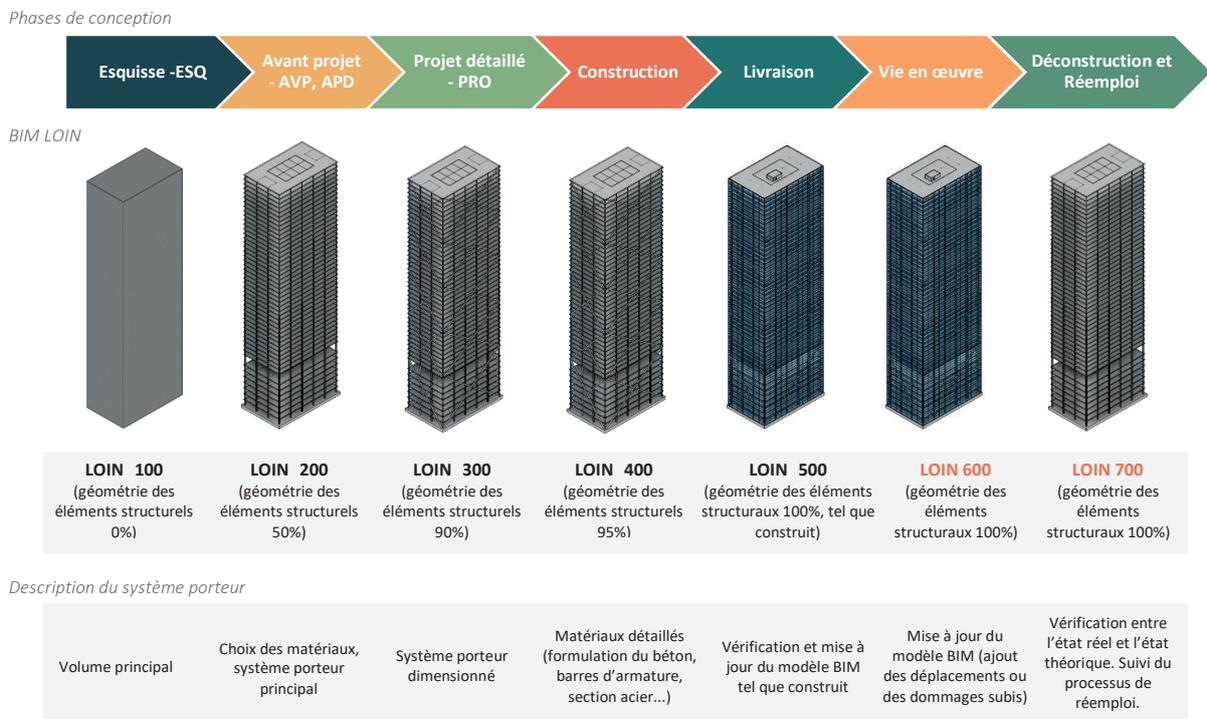


Figure III. 5 : Établissement des niveaux de détail ou de développement (LOD) et proposition d'un LOD 600 et d'un LOD 700 appliqués aux éléments structurels (phases applicables au *RIBA plan of work* [16]).

Deux nouvelles définitions de LOD sont ici proposées afin de préciser les détails que le modèle doit inclure pour un réemploi à long terme. En parallèle, les LOI (les niveaux d'informations) indiquent les attributs attendus. On peut considérer que le LOD/LOI 600 correspond aux informations ajoutées en cours d'exploitation, mais seules les données nécessaires pour anticiper le réemploi seront abordées dans les parties suivantes. Un LOD/LOI 700 supplémentaire pourrait être constitué des données attendues en fin de vie pour le réemploi et doit donc être anticipé dès les phases de conception, puis vérifié et mis à jour en cours d'exécution et enfin repris en fin de vie, tout en ayant la trace des événements survenus lors des maintenances en phase exploitation. À cette fin, les nouveaux LOD/LOI 600 et 700 sont intégrés dans la Figure III. 5, à la suite des LOD/LOI précédemment définis dans la littérature par Iacovidou et al. [17], et Cai et al. [18].

Pour l'instant, les informations du BIM 6D ne sont pas complètes dans la description correcte des LOD, LOI. Par conséquent, ce présent travail identifie le besoin de spécifier les nouveaux LOD/LOI 600 et 700 qui sont décrits dans le Tableau III. 2 pour les éléments structuraux.

LOD/LOI de la 6D BIM	Propriétés des éléments porteurs	Propriétés mécaniques des éléments	Propriétés du comportement global structurel	Propriétés de processus de réutilisation
100: Esquisse	Géométrie, classe de résistance, norme afférente	position, estimation des types de charges	Classe d'exposition	
200: Avant-projet	Géométrie (longueur, section transversale), composition approximative (poids, module de Young, densités, inertie, coefficient de Poisson), classe de résistance, norme afférente	Position, type de charges, charge admissible, contrainte reprise	Classe d'exposition	
300: Projet détaillé	Géométrie (longueur, section transversale), composition détaillée (poids, module de Young, densités, inertie, coefficient de Poisson), classe de résistance, norme afférente	Position, type de charges, charge admissible, contrainte reprise, conditions de liaisons, fluage, effort normal ultime	Classe d'exposition, raccourcissement différentiel approximatif, tassement approximatif du sol, déplacements différentiels entre étages approximatifs, critère de confort	Phasage de déconstruction anticipé, impact environnemental (FDES/DEP), durée de vie théorique
400: Construction	Géométrie (longueur, section transversale), composition détaillée (poids, module de Young, densités, inertie, coefficient de Poisson), classe de résistance, norme afférente	Position, type de charges, charge admissible, contrainte reprise, conditions de liaisons, fluage, effort normal ultime	Classe d'exposition, raccourcissement différentiel détaillé, tassement du sol détaillé, déplacement en tête détaillé, accélération en tête détaillée, déplacements différentiels entre étages détaillés, stabilité au feu	Phasage de déconstruction anticipé, impact environnemental (FDES/DEP), durée de vie théorique, exutoire possible de fin de vie
500: Livraison	Géométrie (longueur, section transversale), composition réelle, classe de résistance, norme afférente	Position réelle, type de charges, charge admissible, contrainte reprise, liaisons détaillées, fluage, effort normal ultime, caractéristiques de vieillissement	Classe d'exposition, raccourcissement différentiel réel, tassement du sol réel, déplacement en tête réel, accélération en tête réelle, déplacements différentiels entre étages réels, stabilité au feu	Vérifications requises en fin de vie, phasage de déconstruction anticipé, hébergement sur la banque numérique de matériaux, impact environnemental (FDES/DEP), durée de vie théorique, exutoire possible de fin de vie, anticipation des probabilités de défaillance
600: Vie en œuvre	Dommages sur l'élément (impacts, attaques chimiques, corrosion, fatigue, formation de rouille et plastification), remplacement des composants	Suivi du vieillissement des matériaux et des données obtenues par l'instrumentation	Classe d'exposition, raccourcissement différentiel, tassement du sol, déplacement et accélération en tête, déplacements différentiels entre étages, stabilité au feu, vie en œuvre de la structure et dommages subis (tempête, incendie, tremblements de terre, neige abondante, températures élevées et basses, environnements côtiers ou marins)	
700: Déconstruction et réemploi	Vérifications entre données théoriques et données physiquement tracées	Vérifications entre les données théoriques et les données physiques tracées de suivi, vérification du vieillissement	Vérifications entre données théoriques et suivi données tracées (fréquence et durée des chargements, déplacements)	Vérifications requises et protocole de caractérisation, tests de performance résiduelle, évaluation des probabilités de défaillance, phasage de déconstruction (scénario de transport et de réemploi, valorisation ou d'élimination), disponibilité des éléments, ACV du processus de déconstruction, estimation de la durée de vie résiduelle

Tableau III. 2 : Propriétés des nouveaux LOD/LOI pour les systèmes porteurs.

3.2.3. Nomenclature et création de paramètres BIM pour le réemploi

L'objectif ici est d'intégrer de la nouvelle donnée au modèle BIM pour le réemploi. Ces données sont attendues pour respecter un LOI 700, précédemment défini. Ainsi il va falloir créer un certain nombre de paramètres sur le logiciel de modélisation BIM pour créer cette nouvelle donnée. L'intérêt est de concevoir une véritable base de données par l'intermédiaire d'une maquette numérique. Cela passe par la création de paramètres partagés, qui peuvent être utilisés pour l'ensemble des maquettes numériques, et qui viennent compléter les données géométriques. Pour le réemploi, la majorité des données à créer sera utile lors de la phase de déconstruction. Le terme de paramètre partagé est ici détaillé avec l'utilisation du logiciel Revit utilisé par setec tpi. L'organisation du logiciel Revit permet de classer les objets d'une maquette numérique avec des caractéristiques prévues par défaut par le logiciel et des caractéristiques que l'utilisateur peut créer. Ainsi une hiérarchie, synthétisée en Figure III. 6, qui classe les paramètres de famille, de type, et d'occurrence, est couplée à une possibilité d'adaptations des paramètres selon qu'ils sont qualifiés : système (créés par le logiciel), partagés (créés par l'entreprise utilisatrice), ou projet (créés spécifiquement pour un seul projet).

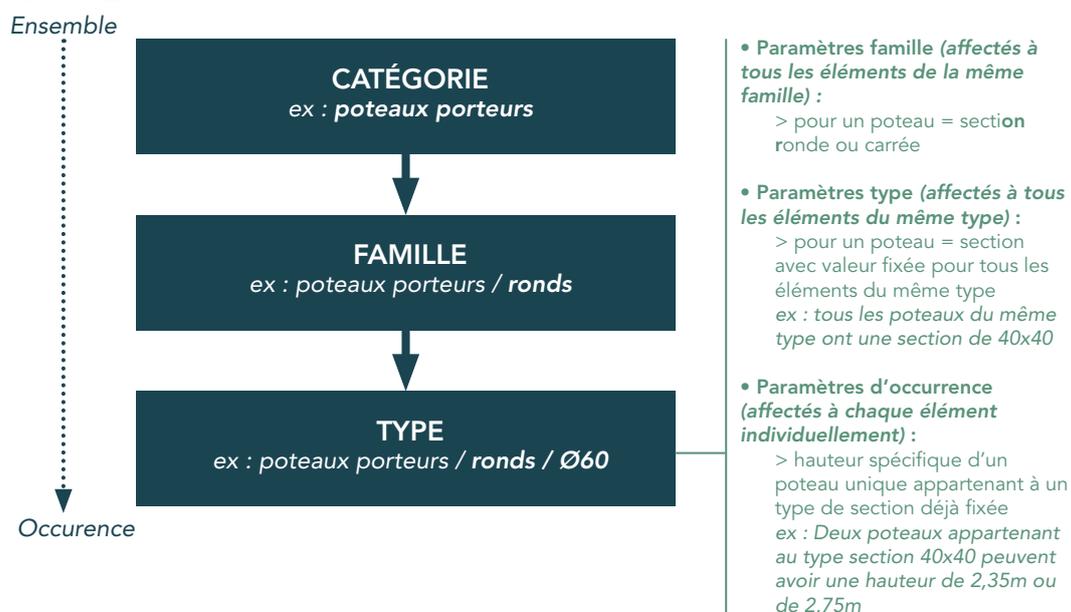


Figure III. 6 : Fonctionnement de la classification des objets avec le logiciel BIM

Le raisonnement et la méthodologie proposés ici sont néanmoins reproductibles avec d'autres logiciels BIM. Les paramètres partagés à créer sont regroupés sous 6 thématiques :

- La géométrie : longueur, largeur, hauteur, ...
- La composition : nuance de l'acier, désignation de l'acier, procédé de laminage, type de produits laminés, module d'Young, formulation du béton...
- L'emploi : classe d'exposition des structures, classe structurale, durée d'utilisation, contrainte de reprise, taux de travail à l'ELS, coefficient d'élanement, ...
- Le comportement des matériaux : protection contre la corrosion ou état de corrosion, état de carbonatation, ...

- Le comportement global de la structure : raccourcissement différentiel, tassement du sol, déplacement en tête, accélération en tête, répartition de la descente de charges, répartition efforts horizontaux, ...
- Réemploi : impact environnemental, FDES/DEP, données de kg eq CO₂, ...

Une liste exhaustive des paramètres attendus par matériau, par type d'éléments porteurs et par phase de conception est disponible en annexes.

Au final, ce ne sont pas moins de 60 paramètres partagés qui sont à créer pour enrichir le modèle 3D en vue du réemploi. Au même titre qu'une base de données, il est nécessaire de fixer si la donnée renseignée est une longueur, du texte, un URL, un nombre, etc. selon le vocabulaire propre au logiciel BIM utilisé, ici les « types de paramètre ». Ce type de renseignement va être utile car, par la suite, ces valeurs vont être utilisées pour calculer l'élançement d'un poteau par exemple. Or, si les valeurs possèdent une mauvaise unité, alors la formule de calcul ne pourra pas fonctionner. La Figure III. 7 montre la méthodologie à suivre depuis le logiciel Revit pour la création du paramètre partagé.

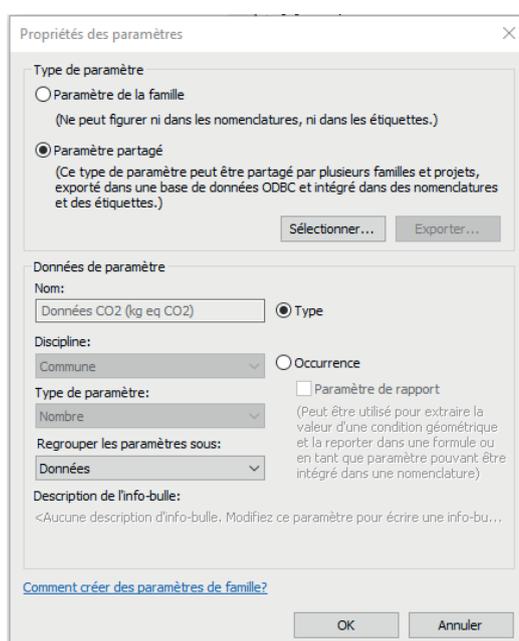


Figure III. 7 : Paramètres partagés

Par ailleurs, comme abordé précédemment, il est important de définir les paramètres dont les informations renseignées vont être communes à l'ensemble d'un même type d'objet BIM ou si celles-ci vont être « uniques » à l'objet. Un exemple de ces paramètres que nous avons déterminés pour une poutre est donné en Figure III. 8. Ainsi, le paramètre « Module d'Young E (MPa) » est un paramètre de type, signifiant que la donnée renseignée sera la même pour l'ensemble des types de la famille. Ce paramètre dépend donc uniquement du matériau utilisé. Cela signifie que tous les types de poteaux en acier, quelles que soient leurs dimensions, possèdent bien un module d'Young égal à 210 000 MPa. *A contrario*, la liaison structurale d'un poteau peut différer d'un poteau à l'autre, bien que tous deux soient complètement identiques en termes de dimensions, de matériaux etc. Un poteau peut très bien être encasté, tandis que celui d'à côté peut, en théorie, être articulé dans le modèle structural. On parle alors de paramètres d'occurrence. Les paramètres partagés ici créés sont donc intégrés directement dans les familles. En parallèle, il peut être utile de créer un tableau de suivi sur Excel avec l'ensemble des paramètres partagés créés. Ce tableau de suivi permet, pour chaque objet BIM, de lister chacun des paramètres partagés qui lui est attribué. Ce tableau permet de lister les

attributs BIM utiles, mais surtout permet aussi de déterminer le type de données à intégrer. Ce tableau permet de tracer les paramètres. Il est donc possible de connaître :

- Le nom du paramètre partagé ;
- La discipline ;
- Le type de paramètres ;
- Le regroupement ;
- Le paramètre de type / d'occurrence ;
- La formule utilisée ;
- Les remarques et/ou commentaires.

POUTRES - STR_POU_HEM				
Paramètres partagés	Discipline	Type de paramètres	Regroupement	Occurrence
Section :				
POU_Largeur	Commune	Longueur	Cotes	Type
POU_Hauteur	Commune	Longueur	Cotes	Type
Aire de l'âme	Structure	Aire sectionnelle	Analyse structurelle	Type
Composition de l'acier (dont soudabilité)	Commune	Texte	Matériaux et finitions	Type
Désignation de l'acier (nuance et qualité dont Re et Rr)	Commune	Texte	Matériaux et finitions	Type
Procédé de laminage	Commune	Texte	Matériaux et finitions	Type
Type de produits laminés	Commune	Texte	Données	
Données environnementales eq CO ₂ /lien vers FDES :				
Impact environnemental (kg eq CO ₂)	Structure	Masse	Données	Occurrence
Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire	Commune	URL	Données	Occurrence
Module d'Young E (MPa)	Structure	Contrainte	Matériaux et finitions	Type
Classe d'exposition des structures	Commune	Texte	Données	Occurrence
Résistance fy (MPa)	Structure	Contrainte	Analyse structurelle	Occurrence
Classe structurale	Commune	Texte	Données	Occurrence
Contrainte reprise	Structure	Contrainte	Analyse structurelle	Occurrence
Taux de travail ELS (MPa)	Structure	Contrainte	Analyse structurelle	Occurrence
Flèche	Structure	Déplacement/déflexion	Analyse structurelle	Occurrence
Contreflèche	Commune	Texte	Analyse structurelle	Occurrence
Moment fléchissant ELS et ELU ou contrainte critique de déversement	Structure	Moment	Analyse structurelle	Occurrence
Conditions de liaisons	Commune	Texte	Structure	Occurrence
Protection corrosion ou état de corrosion	Commune	Texte	Données	Occurrence
Position relative de l'élément (repère local x, y, z)	-	-	-	
Procédure qualité déconstruction	Commune	Oui/Non	Données	Occurrence
Procédure qualité déconstruction - Fiche	Commune	URL	Données	Occurrence
Prix par kg (euro)	Commune	Devise	Données	Type
Masse volumique	Commune	Densité de la masse	Données	Type

Figure III. 8 : Exemple d'un tableau indiquant les paramètres partagés au sein d'une famille de poutres.

D'autre part, le logiciel Revit possède une bibliothèque de matériaux de base pouvant être associés aux objets BIM de la maquette numérique. D'autres matériaux peuvent être créés par l'utilisateur. L'ensemble de ces matériaux possède des propriétés par défaut, telles que le module de Young, le coefficient de Poisson, le module de cisaillement ou encore la densité. La Figure III. 9 illustre les paramètres matériaux pour un béton avec les différents détails physiques, entre autres.

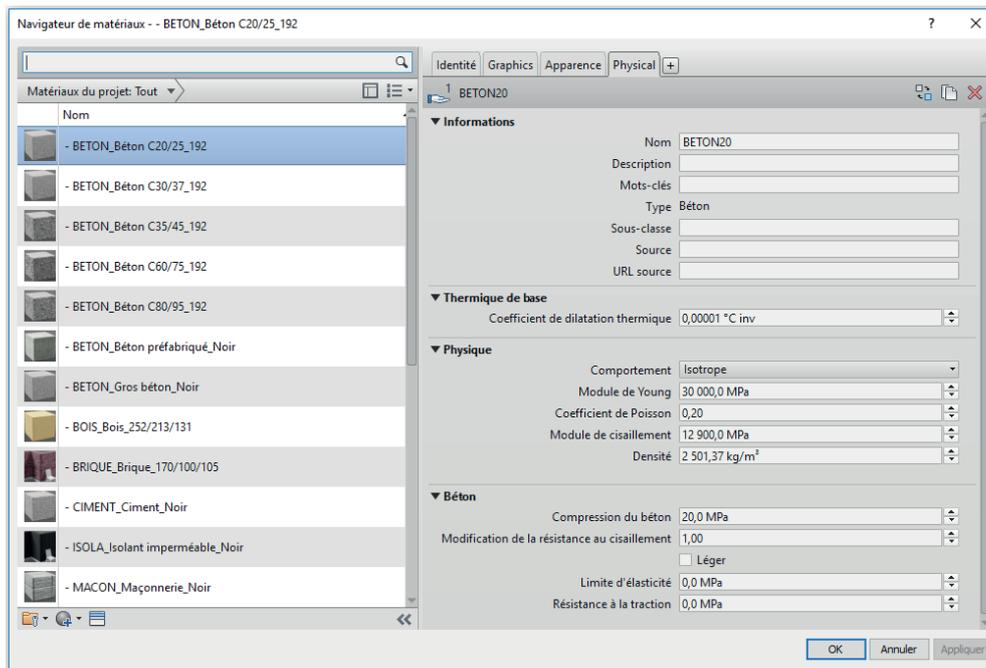


Figure III. 9 : Paramètres issus des matériaux ne pouvant être exportés depuis Revit

Afin de garantir l'*OpenBIM*³ et donc l'interopérabilité, il faut obtenir une maquette IFC où s'entremêlent géométrie 3D et données, illustrées dans la Figure III. 10. Or, les propriétés des matériaux ne peuvent être exportées (hormis un export de nomenclature vers un tableau EXCEL). C'est pourquoi la création de paramètres partagés est inévitable, au risque de dupliquer les données BIM dans le format natif (.rvt) de la maquette. A noter également que dans les dictionnaires on ne peut pas inventer une nouvelle propriété (non transmissible en .ifc). Néanmoins, de cette manière, les propriétés des matériaux sont directement associées aux objets BIM, grâce aux paramètres partagés. D'ailleurs, cela permet de créer d'autres paramètres qui ne sont pas présents initialement, et de s'affranchir des contraintes des dictionnaires. La donnée est donc conditionnée à la lecture ultérieure de la maquette, et, par conséquent, sujette à disparaître avec le logiciel qui l'a créée. L'enregistrement des projets au format IFC pourrait être une exigence pour permettre de rendre plus pérenne cette donnée, à noter que les prochaines révisions internationales de ce format pourraient prendre en compte plus de paramètres que ce n'est le cas à l'heure actuelle.

³ L'*Open BIM* est un programme de coopération universel, reposant sur des standards et des processus de travail ouverts, et destiné au domaine de la conception, de la construction et de l'utilisation de bâtiments. Grâce à l'*Open BIM* et aux IFC, tous les acteurs du projet sont capables de travailler autour d'une même maquette numérique, quel que soit le logiciel qu'ils utilisent, <https://openbim.fr/openbim/>, consulté le 15/03/2019.

Types de familles

Nom du type: SHS750x90

Paramètres de recherche

Paramètre	Valeur	Formule	Verrouiller
Matériaux et finitions			
Matériau structurel (par défaut)	- METAL_Charpente métallique_Noir	=	
Module d'Young E (MPa)	210000.000000 MPa	=	
Composition de l'acier (dont soudabilité)		=	
Désignation de l'acier (nuance et qualité)		=	
Procédé de laminage		=	



Propriété	Valeur
Composition de l'acier (dont soudabilité)	
Désignation de l'acier (nuance et qualité dont Re et Rr)	
Matériau structurel	- METAL_Charpente métallique_Noir
Module d'Young E (MPa)	210000000000
Procédé de laminage	

Figure III. 10 : Extraits des données BIM concernant les matériaux après export IFC de la maquette

Sur la Figure III. 11 qui suit, les paramètres créés spécifiquement pour le suivi des éléments à long terme apparaissent ainsi dans la catégorie « Matériaux et finitions » pour la composition/soudabilité, la désignation de l'acier, le procédé de laminage et dans la catégorie « Données » pour le type de produits laminés, la classe d'exposition des structures, la classe structurale, l'impact environnemental basé sur les données d'une fiche FDES liée par son URL. Ils constituent les paramètres attribués à un objet BIM, au sein d'une famille. Les formules directement calculées dans Revit donnent des résultats approximatifs, ce qui peut produire un écart significatif avec la valeur réelle en cumulant les résultats approximatifs d'un grand nombre d'éléments. Les formules dans Revit sont donc à éviter, voire à proscrire, afin de ne pas impacter l'étude. Il est préférable d'exporter de la donnée brute pour, ensuite, l'exploiter dans un autre outil de type Power BI par exemple.

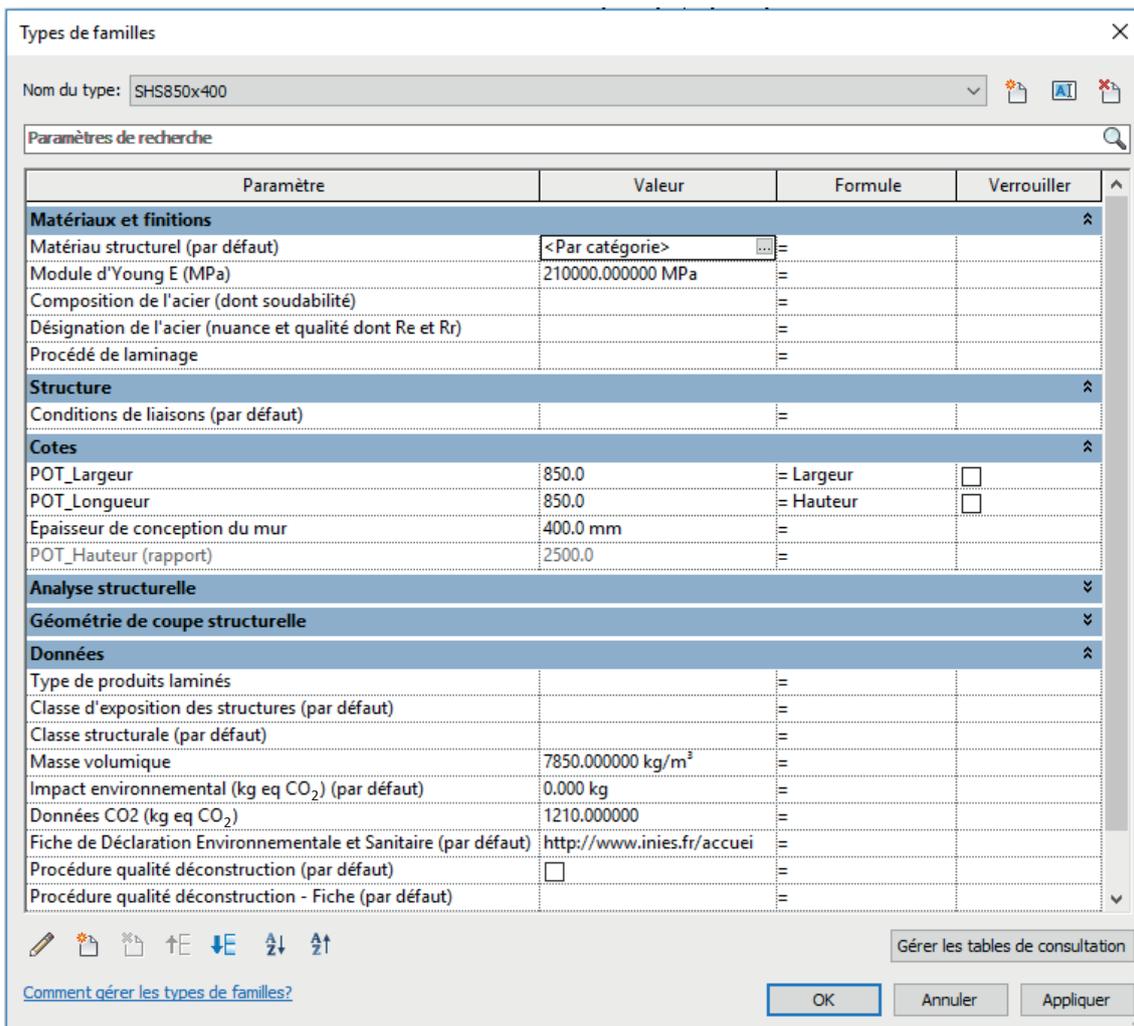


Figure III. 11 : Exemple de paramètres issus d'une famille de poteaux

Certaines données concernent l'ouvrage en général. Elles ne peuvent donc pas être uniquement assimilées à un objet en particulier mais doivent être attachées à chacun des objets de cet ouvrage. Ainsi, il a été créé ici une catégorie spécifique « Informations du projet » qui rend possible de retrouver ces informations propres à l'ouvrage dans un export IFC, à condition que ces paramètres contiennent une valeur. Si le paramètre ne figure pas dans le fichier IFC, il est probable que le paramètre Revit ne comporte pas de valeur. Cela permet d'optimiser la taille du fichier, car les champs de données vides ne sont pas exportés. Il faut donc veiller à remplir chacun des paramètres avec une valeur par défaut, à savoir « 0 » ou « - », lorsque l'on ne connaît pas encore la valeur de ce champ (pendant les phases amont du projet par exemple). La Figure III. 12 détaille ces paramètres partagés créés pour les informations communes à un bâtiment et à son comportement structural global.

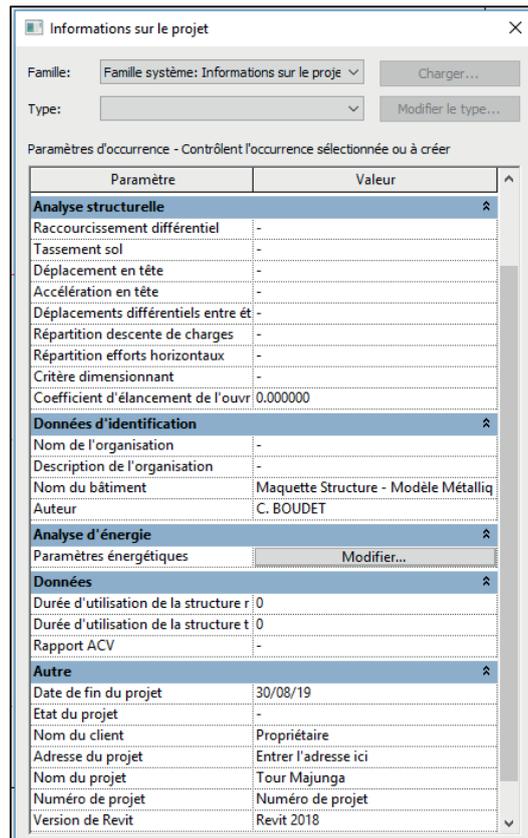


Figure III. 12 : Paramètres partagés dans "Information sur le projet".

Grâce à cette méthodologie, on retrouve bien les paramètres créés dans le fichier format .ifc généré lors de l'export de la maquette BIM issue de Revit, comme on peut le constater dans la Figure III. 13.

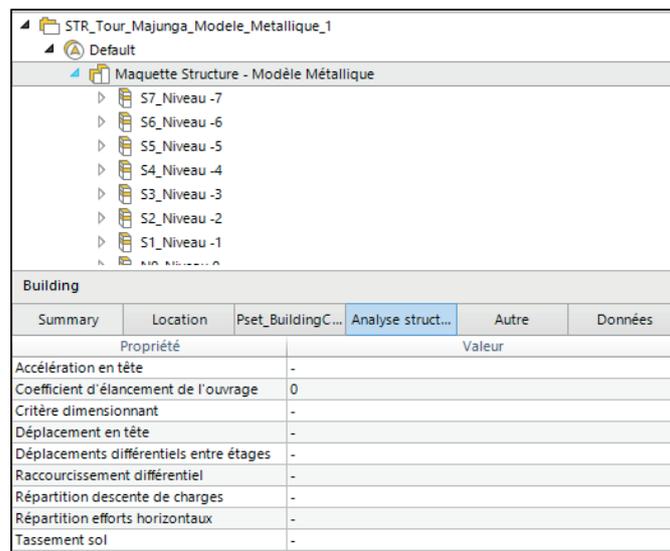


Figure III. 13 : Aperçu des paramètres exportés qui apparaissent dans le fichier .IFC

Enfin, on retrouve concrètement dans le modèle BIM toutes les informations contenues dans les paramètres créés pour le réemploi avec ici en Figure III. 14, un exemple de comparaison entre les paramètres « occurrence » et les paramètres « type » présents lorsque l'on clique sur un objet BIM au sein de la maquette d'un projet.

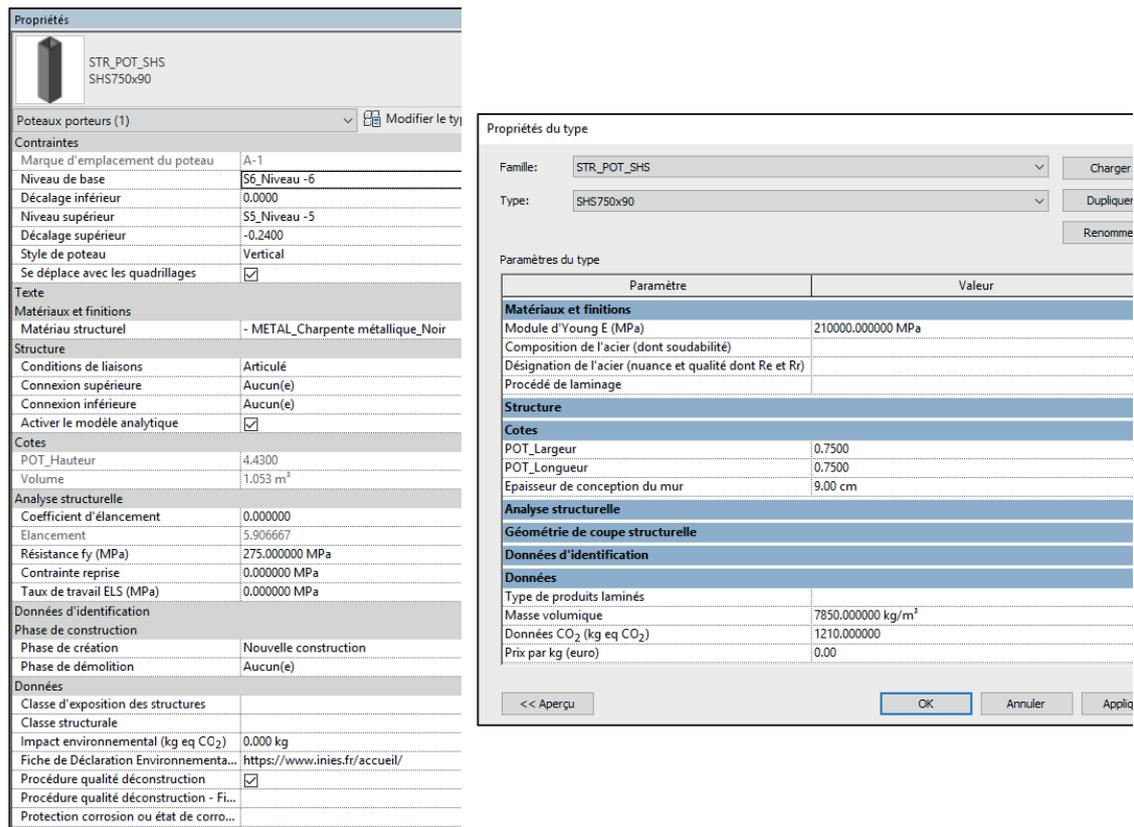


Figure III. 14 : Paramètres d'occurrence / Paramètres de type

En parallèle, il faut également donner accès à la visualisation de la donnée, notamment pour les non-initiés aux logiciels BIM. Afin de tirer profit des données BIM des modèles, l'utilisation d'un outil d'aide à la visualisation de la donnée s'avère judicieuse. L'outil Power BI de Microsoft, par exemple, permet de valoriser et d'exploiter les données BIM à travers des rapports dynamiques, facilitant la prise de décision. De ce fait, l'accès à la base de données issue des paramètres créés dans la maquette numérique est rendu possible. Pour cela, il est nécessaire d'exporter les données présentes au sein de la maquette vers Power BI, par le biais de nomenclatures exportées (feuilles Excel par exemple). Ensuite, un cadre est ici proposé en Figure III. 15 pour sélectionner les données à mettre en évidence en termes de réemploi.

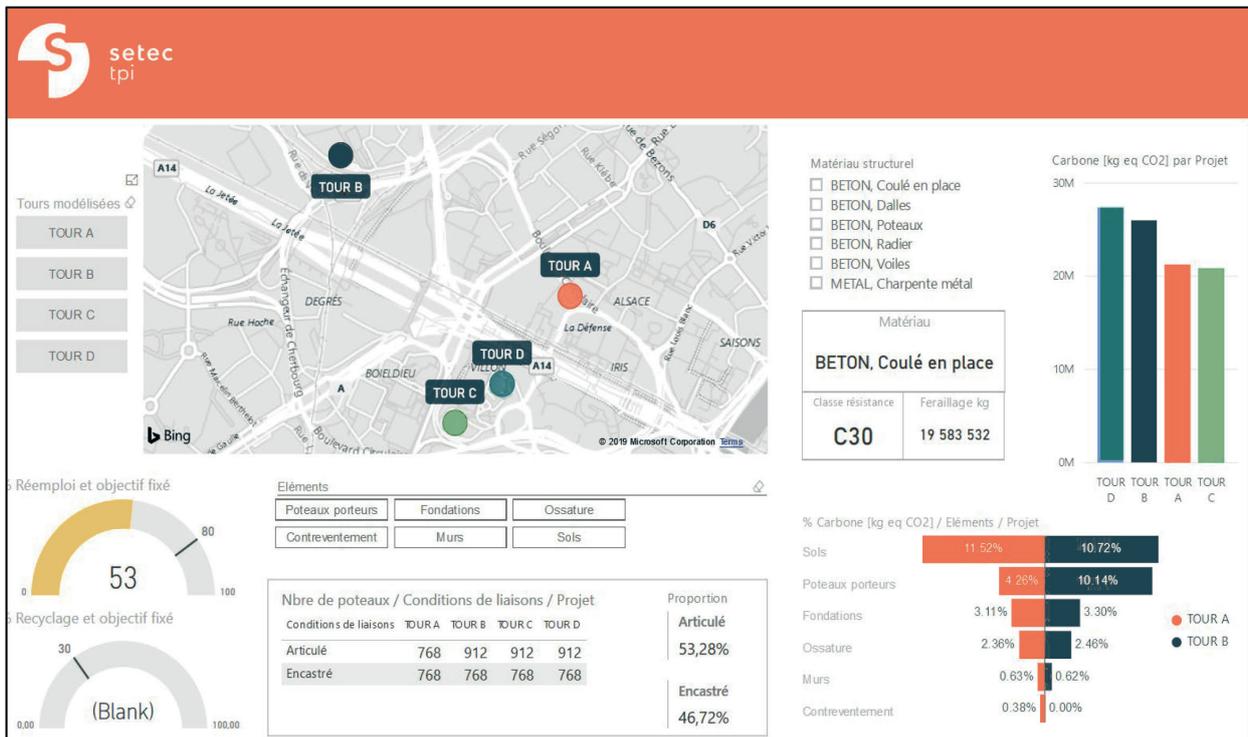


Figure III. 15 : Exemple d'un rapport Power BI sur la réemployabilité des éléments de structure

3.2.4. Phase de déconstruction : nouvelle phase 4D en BIM

Les experts en phasage de construction peuvent lier les informations temporelles qu'ils étudient à la maquette numérique dans la catégorie 4D du BIM relative à la dimension temporelle. Dans le cadre du développement de cette dimension, il est primordial d'anticiper le phasage de déconstruction, comme l'affirment Sanchez et al. [19]. Grâce à la modélisation BIM, il sera possible de procéder à des simulations de chantier de déconstruction, en insérant des modèles virtuels d'engins spécifiques (grues, pelles mécaniques...). Par exemple, Sanchez et al. [19] expliquent d'abord dans leur article qu'il est pertinent d'illustrer les séquences de désassemblage et détaillent ensuite comment ils ont procédé avec le modèle BIM de leur structure. Ainsi les différentes options permettront de comparer et de choisir les méthodes à employer, par rapport à la résistance structurelle du bâtiment, et ainsi optimiser le phasage et la planification des travaux de déconstruction. Cette modélisation de chantier permettra également d'analyser les impacts environnementaux des différents process étudiés. Pour les chantiers en cours, le BIM peut être un support à une modélisation massive de l'existant, en se rattachant à des techniques de relevés : référentiel géoréférencé, scans laser ou drones, nuages de points ou photogrammétrie.

Comme nous venons de le voir, le BIM est un outil quasi sans limite pour créer la donnée et l'héberger pour partie. Toutes ces données ne doivent pas être contenues uniquement dans une maquette BIM mais doivent pouvoir être hébergées sur des bases de données qui pourraient, pour l'occasion, constituer de véritables banques de matériaux proposées à un réemploi futur. La procédure de mise en place d'une telle banque est proposée dans la partie 3.3 qui suit.

3.3. Développement d'une banque de matériaux

3.3.1. Théorie pour la mise en place d'une banque de matériaux en flux tendu

Face au besoin constaté de la mise en place d'une banque de données, aussi bien dans la pratique professionnelle que dans la littérature, comme l'expliquent Ilhan et al. [20] et Brütting et al. [21], notre travail déploie une banque de matériaux sous la forme d'une base de données d'éléments de construction réemployables. Deux possibilités s'offrent à cette banque de matériaux : à la fois proposer d'héberger un énorme catalogue des éléments mis en œuvre dans les bâtiments neufs que l'on construit actuellement et à la fois d'héberger les anciens éléments de construction présents dans les bâtiments qui nous entourent, et qui seront déconstruits à court terme. Dans le premier cas, cela demande que les bâtiments en projet soient modélisés en BIM pour disposer d'une maquette numérique la plus fidèle à la construction réelle. Dans le deuxième cas, il s'agit de procéder à un relevé massif du gisement existant, via les technologies dont certaines sont en plein développement : relevés laser, drone, photogrammétrie, nuage de points, diagnostic ressource numérique *RIM (Resource Information modeling)*, ...

L'objet de ce travail est bien de se focaliser sur la conception en vue d'un réemploi, c'est pourquoi le premier cas sera développé. L'hypothèse de départ est donc d'alimenter une toute nouvelle base de données à partir des bâtiments construits aujourd'hui. Le processus décrit est donc prospectif, car les éléments effectivement réemployables ne seront réellement réemployés que dans 30, 50 ans ou plus. Ces nouveaux bâtiments devront, en effet, atteindre la fin de leur vie pour rendre disponibles des éléments pour un réemploi sur la base de données. Il est donc essentiel, en parallèle, d'alimenter cette base de données avec des données provenant de bâtiments existants, ce qui signifie qu'une numérisation massive serait nécessaire. La synthèse des scénarios est résumée en Figure III. 16.

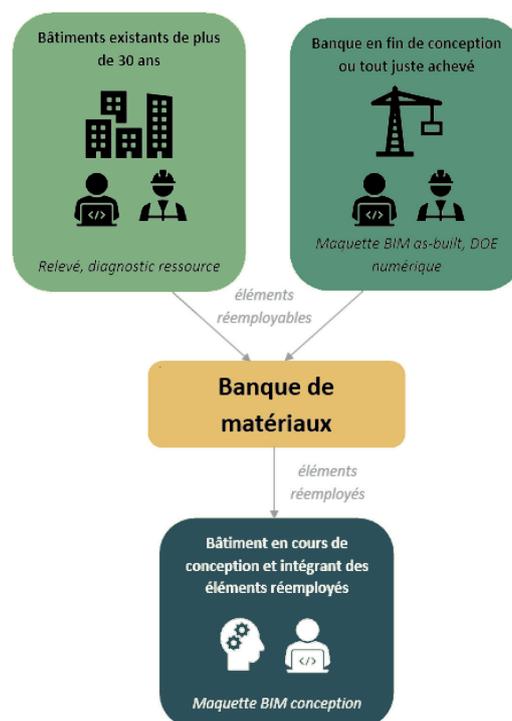


Figure III. 16 : Schéma méthodologique pour alimenter la banque de matériaux

Il est à noter que des villes entières sont actuellement en cours de numérisation, comme Singapour, selon le journal « Le Monde » [22]. De la même manière, on peut donc espérer que la numérisation des éléments porteurs sera possible. Une banque de matériaux semble indispensable pour généraliser le réemploi et assurer la disponibilité d'éléments prêts à être réutilisés. La banque de matériaux concerne donc également les futurs bâtiments à construire pouvant intégrer des matériaux réemployables. Comme défini dans la Figure III. 17, une chaîne d'outils a donc été développée, permettant de mettre en place la banque de matériaux sous la forme d'une base de données. Une partie des données permettra de faciliter une ACV qui sera le cœur du chapitre V.

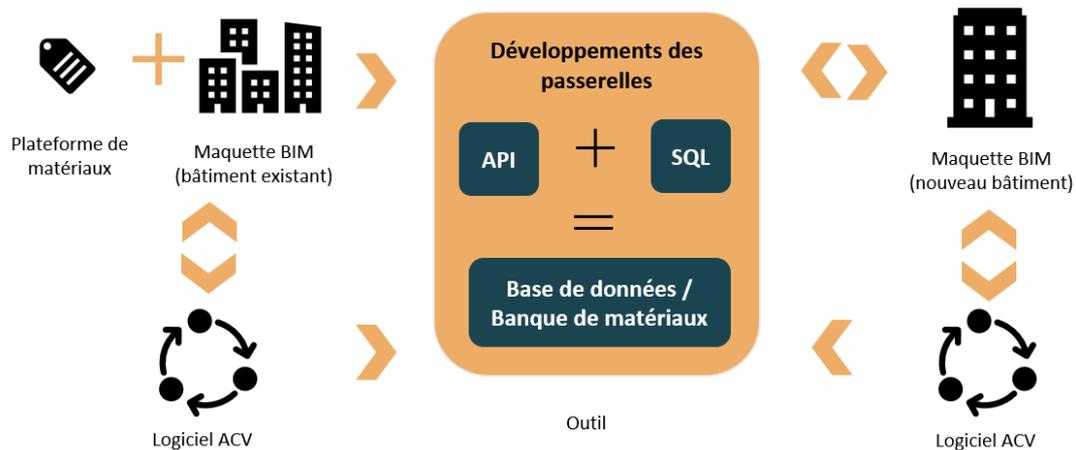


Figure III. 17 : Chaîne d'outils utilisée pour mettre en œuvre la banque de matériaux, à partir des modèles BIM, des plateformes de matériaux et des données environnementales.

Lorsque le bâtiment existant, dont les éléments se trouvent dans cette base de données, doit être déconstruit, les éléments apparaissent libres pour être réutilisés dans un nouveau projet. De leur côté, les ingénieurs structure créent un modèle de calcul lors de la conception d'un nouveau projet. À partir de ce modèle de calcul, les ingénieurs peuvent ensuite envoyer des requêtes à la base de données pour trouver un élément porteur qui pourrait remplir une nouvelle fonction, une fois réutilisé. Ce système de base de données gagnerait à fonctionner en flux tendu pour éviter les problèmes de stockage, notamment dans les zones du territoire où l'espace disponible est limité, comme les métropoles. De nouvelles données sont ajoutées à chaque fois qu'un nouveau bâtiment est construit et que ses éléments sont modélisés. Cependant, comme nous l'avons vu dans la revue de la littérature en chapitre I, l'impact environnemental des données numériques n'est pas négligeable, [23], [24]. En outre, plus un modèle contient de données, moins il sera fluide lors de son ouverture, de sa gestion et de sa modification. C'est pourquoi la quantité de données doit être optimisée et limitée aux données pertinentes. Il est donc question de traiter des données structurales nécessaires à l'ingénieur en structure pour engager sa responsabilité en cas de réemploi des éléments. La réduction de la quantité de données permettra, entre autres, d'économiser à la fois du temps de calcul et de recherche dans les bases de données, ainsi que de l'énergie sur les serveurs.

Pour ce travail, les paramètres ont été décomposés dans le modèle BIM par matériaux et par phase selon les différentes étapes du projet, expliquées dans le développement de la partie 3.2.2. Les informations sont liées directement aux objets du modèle BIM. L'approche consiste à exporter, à chaque fin de phase, ces paramètres sur la base de données. Les passerelles nécessaires, d'abord entre le modèle BIM et la base de données puis avec le logiciel de calcul des structures réemployées, ont été développées en conséquence.

La base de données créée permet d'effectuer les calculs structuraux nécessaires, grâce à des requêtes en temps réel. Selon l'étape du projet, les requêtes sont plus ou moins

complexes, en fonction du champ de contrainte appliqué à l'élément considéré. Pour un poteau soumis à la compression, par exemple, le premier problème peut être de trouver dans la base de données un poteau qui permet de supporter la charge suffisante. Pour une poutre, la demande devient plus compliquée car, en plus d'une charge admissible, il faut pouvoir sélectionner un élément en fonction de la flèche admissible. Dans ce cas, il faut ajouter des informations supplémentaires sur le moment de flexion ultime et l'inertie suffisante. Pour cette raison, l'étude présentée s'est concentrée sur les dimensions et les capacités des poteaux, mais a exclu le cas de la flexion composée, qui peut donner lieu à des développements futurs. De plus, dans un deuxième temps, une vérification approfondie de la compatibilité du dessin de l'armature existante avec la nouvelle utilisation devrait être effectuée. Ainsi, une poutre qui était encastree dans son emploi initial pourrait être réutilisée en considérant des liaisons articulées. Dans ce cas, si on a connaissance du moment fléchissant lors de son emploi initial (hyperstatique), on pourra recalculer le moment fléchissant dans son nouvel usage avec les articulations (isostatique).

Ce processus d'interrogation de la base de données est itératif car il faut examiner une série d'hypothèses et d'incertitudes. Si la modélisation de la nouvelle structure nécessite l'utilisation d'une poutre de section 50 x 50 cm et que, dans la base de données, la poutre répondant le mieux aux contraintes du modèle a une section de 60 x 60 cm, bien que surdimensionnée, il peut tout de même être intéressant de la réemployer. Une analyse du bénéfice environnemental de ce réemploi pourrait alors être menée pour fixer la limite d'un surdimensionnement acceptable sur l'ensemble du bâtiment. Ces surdimensionnements, subis à cause de l'offre réduite d'un stock, peuvent mener ensuite à l'augmentation du poids global de la structure qui sera modifié. En conséquence, une nouvelle descente de charges devrait être effectuée afin de vérifier que les autres éléments déjà intégrés à la structure supportent une telle surcharge ; si ce n'est pas le cas cela engendrerait une nouvelle itération et ainsi de suite. La méthodologie de conception est résumée dans la Figure III. 18 en trois étapes essentielles, avec la chaîne de logiciels exigée :

- 1ère étape : des bâtiments existants alimentent une base de données qui constitue la banque des matériaux réemployables ;
- 2ème étape : un nouveau projet est en cours de conception et met en place les itérations avec les modèles de calcul et le stock d'éléments de la base de données (cf partie 3.4.5) ;
- 3ème étape : les éléments constituant le nouveau projet construit sont également hébergés sur la base de données pour anticiper un réemploi en fin de vie.

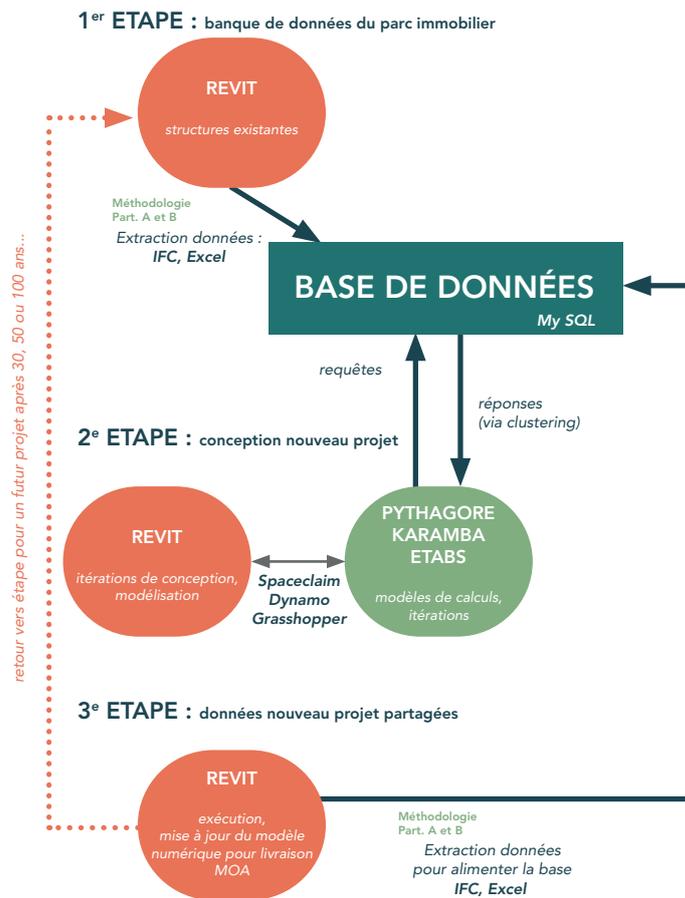


Figure III. 18 : Synthèse du processus de conception avec la base de données

3.3.2. Proposition de protocole d'échanges

Dans cette partie nous proposons un protocole d'échanges des données en vue d'un réemploi, avec la chaîne d'outils utilisés. L'étude de cas développée dans la partie 3.4.5. permettra de tester la chaîne d'outils mise en place pour l'utilisation de la banque de matériaux. Il s'agit d'un bâtiment IGH en structure métallique qui alimente un stock duquel seront prélevés des éléments réemployés pour les intégrer dans d'autres bâtiments en structure métallique et de tailles différentes.

3.3.2.1. Nouveaux paramètres BIM et cadre LOD pour les éléments porteurs

Les informations préalablement identifiées et nécessaires au réemploi ont été incorporées dans le modèle BIM sous la forme de paramètres partagés (termes spécifiques au logiciel Revit) créés spécialement et pour permettre une généralisation. Une liste de matériaux a également été établie pour nommer ces attributs. Le Tableau III. 3 donne un aperçu des paramètres créés pour une poutre en acier.

Paramètres partagés	Type de paramètres	Regroupement	Application
Section: POU_Largeur	Longueur	Cotes	Type
Section: POU_Hauteur	Longueur	Cotes	Type
Aire de l'âme	Aire	Analyse structurelle	Type
Composition de l'acier (dont soudabilité)	Texte	Matériaux et finitions	Type
Désignation de l'acier (nuance et qualité dont Re et Rr)	Texte	Matériaux et finitions	Type
Procédé de laminage	Texte	Matériaux et finitions	Type
Type de produits laminés	Texte	Données	Type
Impacts environnementaux (ex : kg eq CO ₂)	Masse	Données	Occurrence
FDES / DEP	URL	Données	Occurrence
Module d'Young E (MPa)	Contrainte	Matériaux et finitions	Type
Classe d'exposition des structures	Texte	Données	Occurrence
Résistance fy (MPa)	Contrainte	Analyse structurelle	Occurrence
Classe structurale	Texte	Données	Occurrence
Contrainte reprise	Contrainte	Analyse structurelle	Occurrence
Taux de travail ELS (MPa)	Contrainte	Analyse structurelle	Occurrence
Flèche	Déplacement/déflexion	Analyse structurelle	Occurrence
Contreflèche	Texte	Analyse structurelle	Occurrence
Moment fléchissant ELS ou contrainte critique de déversement	Moment	Analyse structurelle	Occurrence
Conditions de liaisons	Texte	Analyse structurelle	Occurrence
Protection corrosion ou état de corrosion	Texte	Données	Occurrence
Position relative de l'élément (repère local x, y, z)	-	-	-
Procédure qualité déconstruction	Oui/Non	Données	Occurrence
Procédure qualité déconstruction - Fiche	URL	Données	Occurrence
Prix par kg (euro)	Devise	Données	Type
Masse volumique	Densité de la masse	Données	Type
Données GES (kg eq CO ₂)	Nombre	Données	Type
Dénomination du modèle aux éléments finis	Texte	Données	Type
		d'identification	

Tableau III. 3 : Application de la nomenclature à une poutre en acier nommée " POUTRES - STR_POU_HEM ".

Ces paramètres nouvellement créés permettraient de pérenniser des caractéristiques physiques et mécaniques exhaustives.

3.3.2.2. Exportation vers la banque de matériaux et flux tendu

Après avoir créé les paramètres nécessaires au réemploi, les informations doivent être transférées dans une base de données. L'exportation des paramètres structuraux et environnementaux contenus dans la maquette numérique vers la base de données choisie, Microsoft SQL, est donc ensuite effectuée. Une extension du logiciel BIM a été développée dans Visual Studio, dans le cadre du travail de PFE de Alexan, C. [25], pour exporter les paramètres et créer la première passerelle entre la maquette et la base de données. La réalisation d'une telle extension est possible grâce à l'existence de l'interface de programmation (*API, Application Programming Interface*) du logiciel BIM. L'ensemble des développements est détaillé dans la Figure III. 19. Pour récupérer toutes les informations saisies, l'extension, entièrement développée en C#, réalise un filtre en fonction de la catégorie existante dans le logiciel BIM : `BuiltInCategory.OST_StructuralColumns`, `BuiltInCategory.OST_StructuralFraming`, etc. En pratique, des boutons sont créés et intégrés dans le ruban du logiciel BIM, de sorte que le fait de cliquer dessus produit ce que l'on appelle, une commande externe. La connexion à Microsoft SQL se fait directement dans l'extension logicielle BIM, en écrivant les paramètres dans la base de données. Une division en plusieurs tableaux selon le type d'élément (poteau, poutre, voile ou plaque) est mise en œuvre lors de l'écriture dans la base de données.

Cette chaîne d'outils pourrait être généralisée à tous les projets d'un territoire dans le cadre d'incitations politiques comme celles relatives à la feuille de route du Gouvernement français pour une économie circulaire.

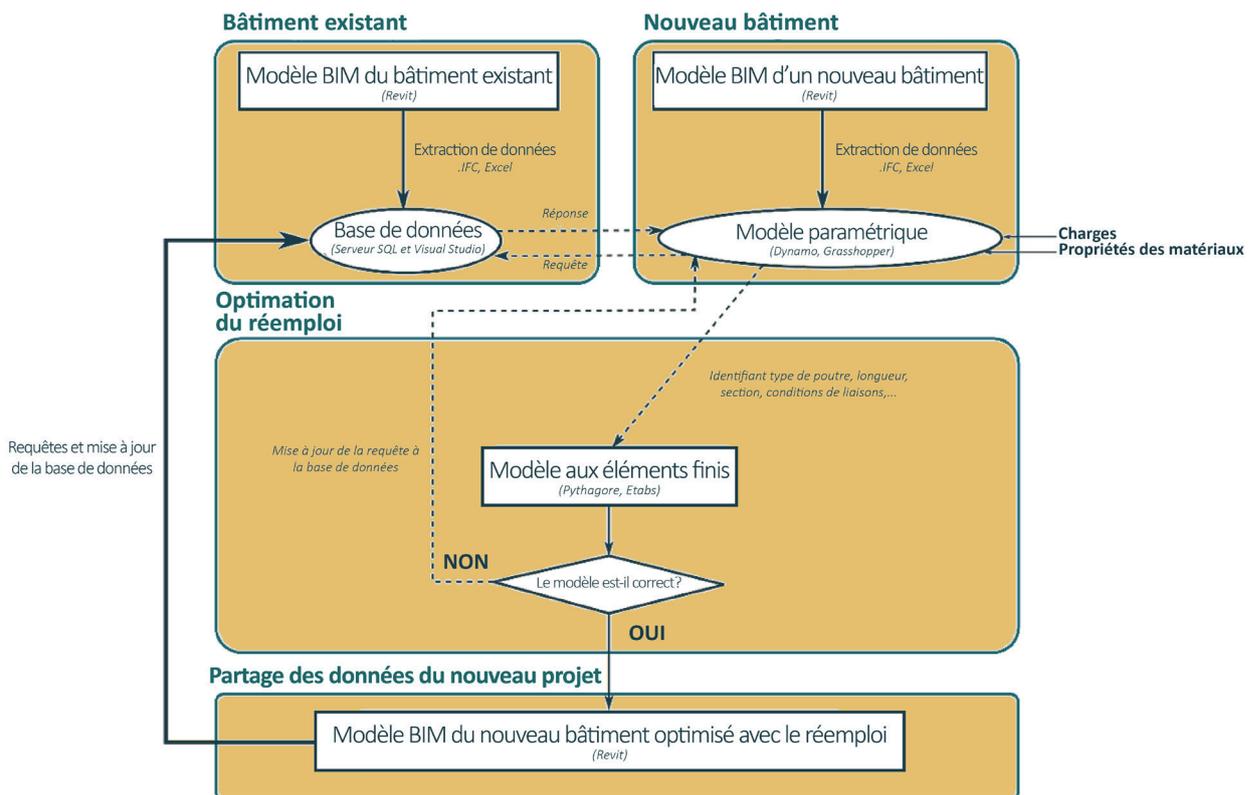


Figure III. 19 : Synthèse des passerelles avec le modèle de calcul.

L'objectif est de produire une chaîne d'outils fonctionnelle qui permette ensuite une généralisation exhaustive. Avec cette méthodologie, le logiciel d'éléments finis utilisé par l'ingénieur structure est ensuite employé pour interroger la base de données afin de trouver un élément porteur réemployable et de l'incorporer dans le modèle. La base de données héberge les éléments réemployables qui composent la banque de matériaux. De cette façon, le modèle peut maintenant inclure des éléments réemployés en remplacement d'éléments neufs.

3.3.2.3. Maintenance de la base de données

Notre travail présente un *workflow* (flux opérationnel) et une base de données BIM qui devraient être accessibles et interopérables pendant toute la durée de vie des bâtiments, jusqu'à des centaines d'années. La maintenance des logiciels pendant une période aussi longue est une question cruciale, car il y a peu de retours d'expérience sur ce sujet dans l'industrie de la construction. Cependant, certains secteurs sont déjà confrontés à ces défis. Par exemple, les logiciels embarqués dans un vaisseau spatial ou un rover extra-terrestre doivent rester opérationnels à tout moment, ce qui entraîne l'obligation de constituer une équipe dédiée à la maintenance des logiciels, selon Shell et al. [26]. Le coût de cette maintenance ne peut être évité dans le réemploi des bâtiments et peut être très élevé à long terme. A ce titre, deux options principales sont envisageables : le modèle BIM et sa base de données sont fondés sur un noyau *open-source*, la maintenance peut alors être assurée dans un cadre ouvert et collaboratif ; le modèle BIM et la base de données reposent fondamentalement sur un logiciel propriétaire, la maintenance peut être assurée par des acteurs privés.

Les deux options ont leurs avantages et les risques associés. Pour les solutions à source ouverte, l'apparition de différentes branches est très probable pour un projet à long terme, ce qui signifie que l'interopérabilité dans la pratique devient de plus en plus difficile à réaliser. Pour les solutions propriétaires, cette question est moins problématique, mais l'apparition d'un éditeur de logiciels privé monopolistique prenant en charge la maintenance est un risque qui ne

peut être négligé, notamment par exemple en cas de défaillance de cet éditeur. Le recueil de données et la gestion d'un gisement de matériaux mis en œuvre peut également faire l'objet d'une centralisation par les services publics, de la même façon qu'un certain nombre de renseignements sont obtenus lors d'un dépôt de permis de construire. On peut ainsi imaginer que le permis de construire de demain s'accompagnera d'un répertoire numérique des éléments de construction mis en œuvre et qu'il sera sauvegardé par les services de l'Etat.

Enfin, le principal enseignement de cette réflexion est que le workflow et la base de données BIM doivent rester aussi simples que possible, pour faciliter la maintenance. L'inflation de la complexité du processus BIM doit être considérée avec inquiétude, car elle a également un impact environnemental qui n'est pas encore évalué. En substance, les données nécessaires à la mise en œuvre d'un schéma de déconstruction devraient être stockées en toute sécurité, éventuellement sur des serveurs situés à différents endroits, et rester accessibles aux équipes de projet dans un avenir lointain.

3.4. Données complémentaires pour assurer la reconception après déconstruction

Une fois que le bâtiment a été idéalement conçu réemployable et qu'il arrive en fin de vie, il faut maintenant prendre les précautions nécessaires pour que l'ingénieur structure qui récupère l'élément porteur puisse à son tour engager sa responsabilité et le remettre en œuvre dans un nouveau bâtiment. A cette fin, il faudrait *a minima* prévoir un diagnostic ressource et, pour certains éléments, une caractérisation plus approfondie. Bien qu'une traçabilité renforcée permette de faciliter le diagnostic ressource et de diminuer le recours aux essais de caractérisation, comme on l'a vu dans la partie 3.1.2., il faudrait néanmoins procéder à certains tests. En effet les instrumentations via les puces RFID ou les capteurs constituent des technologies récentes qu'il faudrait confronter au retour d'expérience mais également à l'acceptation des assureurs. Aujourd'hui l'instrumentation, seule, ne semble pas suffisante pour assurer la caractérisation d'un matériau. Il serait donc nécessaire de vérifier les informations transmises par les puces et les capteurs, par précaution. A terme, une partie des informations transmises par la capitalisation permettrait d'alléger, d'accélérer, voire de supprimer en partie les protocoles de caractérisation. Dans le cadre du présent travail, les protocoles permettant de caractériser les éléments porteurs sont donc repris dans l'optique de proposer une sécurisation d'un processus de réemploi. Pour cela, les essais non destructifs seraient à développer et à privilégier pour sauvegarder au maximum la matière. De plus, on pourrait également revoir les méthodes de calculs en ajustant certains coefficients de sécurité, en fonction du degré de connaissance effective du matériau réemployé. Les méthodes actuellement définies dans les projets de réhabilitation notamment peuvent enrichir les protocoles à mettre en place pour le réemploi. De même, une compétence historique existe déjà, en termes de diagnostic ressource, dans le domaine des ouvrages d'art, dont on peut rappeler la grande expérience du Cerema. Le réemploi des éléments de structures de bâtiment gagnerait donc à s'inspirer du savoir-faire des ouvrages d'art. Nous proposons alors de mettre en perspective ces connaissances spécialisées en vue d'améliorer le processus de réemploi.

3.4.1. Diagnostic ressource structural

Certains matériaux sont plus aptes à un réemploi que d'autres, notamment car ils sont mis en œuvre avec des assemblages mécaniques comme les éléments linéaires en acier ou en bois, comme l'affirment certains auteurs du DfD, Guy et al. [27], ou encore Akanbi et al. [28], Brütting et al. [29]. Ainsi un élément métallique, issu d'une charpente métallique abritée par

exemple, a de grandes chances d'être préservé et en bon état. A dire d'experts du LERM⁴, plusieurs qualités sont attribuées à l'acier dans les constructions car l'acier subit peu de dégâts dans des conditions normales d'utilisation (absence de fatigue) et la plupart des détériorations sont directement visibles par contrôle visuel. Les charpentes métalliques sont souvent décomposées en une multitude d'éléments répétitifs ce qui laisse entrevoir la possibilité d'échantillonnage pour des essais de caractérisation. De plus, les systèmes d'assemblages métalliques réversibles sont bien ancrés dans les pratiques avec l'utilisation de boulons.

Le béton armé quant à lui, présente davantage d'inconvénients puisqu'il accumule à la fois les dégradations des constituants du béton mais aussi celles des armatures corrodées, comme exposé dans le cours de pathologie du béton de Godart et al. [30]. Dans le domaine des bâtiments, le béton est peu exposé (classe XC1 de l'Eurocode) et n'est pas soumis à un environnement agressif (contrairement à certains ouvrages d'art par exemple). Les éléments en béton armé sont souvent spécifiques et seuls quelques rares cas, comme dans les IGH notamment, permettraient d'autoriser un échantillonnage pour les tests.

Le diagnostic doit vérifier les quantités et la nature théoriques des éléments en place, puisqu'il est courant que les éléments réellement construits soient différents des informations contenues dans les documents d'exécution, que le dossier des ouvrages exécutés soit incomplet, ou qu'un remplacement d'élément pendant la vie en œuvre n'ait pas été signalé. Ensuite il peut être utile, selon la concordance du suivi des matériaux par la traçabilité, la nature de l'environnement (signe d'agressivité) et les constatations visuelles *in situ*, de déterminer si certains éléments doivent faire l'objet d'une caractérisation.

Cependant un diagnostic ne pourra être complet que si l'usage futur (classe d'emploi) est déterminé, [31]. L'expert pourra alors spécifier la caractérisation adéquate, en accord avec le bureau de contrôle et les assureurs de l'opération de réemploi. Concernant le réemploi d'éléments structuraux les principales aptitudes à vérifier seront les caractéristiques mécaniques résiduelles. La présentation du protocole d'essais sera déterminante pour continuer le processus de réemploi ou l'abandonner. Parmi les caractéristiques mécaniques à vérifier, on retrouve :

- La résistance à la traction ;
- La limite d'élasticité ;
- L'allongement à la rupture ;
- Le module de Young.

Pour le béton des recherches de pathologies spécifiques sont à prévoir.

A la suite du protocole d'essais, l'ingénieur structure pourra décider de remettre en œuvre l'élément tel quel, de le déclasser vers un emploi moins exigeant ou de demander une réparation avant remise en œuvre.

3.4.2. Protocole de déconstruction

La déconstruction doit être étudiée dans un phasage de déconstruction qui prend toutes les précautions nécessaires à l'image d'une construction. Déconstruire ne signifie pas forcément répéter exactement les mêmes opérations que la construction dans un ordre chronologique

⁴ Intervention du LERM lors du Design Sprint d'Europengineers à Paris, en février 2020 sur l'étude d'un réemploi de l'ancienne usine Thalès conçue par Renzo Piano, <https://www.setec.fr/actualites/avec-europengineers-setec-lance-un-design-sprint-consacre-au-reemploi-des-structures-dune-usine>, consulté le 25 mars 2020.

inversé, mais cela représente le même niveau d'études préalables. Comme tout phasage, la déconstruction doit, entre autres, intégrer les mesures de précaution et de prévention vis-à-vis des opérateurs *in situ*, notamment si des échafaudages pour des travaux en hauteur sont exigés, mais aussi les moyens de levage nécessaires, les moyens et rythme d'évacuation des matériaux.

Les éléments en acier boulonnés sont ceux qui poseront le moins de problème à la déconstruction avec des outils simples, suppléés éventuellement par des engins de levage. Les éléments soudés demanderont beaucoup plus de temps et de technicité. Le béton armé, quant à lui, exige des techniques plus complexes dans l'objectif de perdre le minimum de matière béton et de prélever au maximum les armatures. Les techniques dynamiques ou thermiques de démolition seraient donc à proscrire. Parmi les techniques de démolition plus appropriées, on retiendra :

- Le marteau piqueur léger
- L'hydrodémolition (ou lances manuelles)
- Le sciage (découpage-perçage)

Le rendement de ces techniques varie beaucoup en fonction de la qualité du béton, de la présence d'armatures et de l'opérateur. La technique la plus respectueuse des armatures sera l'hydrodémolition, technique de démolition sélective, qui utilise un ou plusieurs jets d'eau à très haute pression (138 à 276 MPa), d'après les cours de l'Université de Sherbrooke, [32]. La pression hydraulique peut être réglée en fonction de la résistance du béton ou de la profondeur de démolition souhaitée. L'hydrodémolition présente un inconvénient majeur, qui est celui de générer beaucoup de résidus liquides (qui peuvent boucher les conduites et souiller les surfaces), et demande une grande consommation d'eau qu'il faut pouvoir évacuer au fur et à mesure de l'avancement. Il s'agit donc d'une technique précise et sérieuse pour le réemploi mais très lourde de mise en œuvre.

3.4.3. Caractérisation par essais non destructifs

Pour le réemploi, on cherchera à caractériser les éléments dont on veut vérifier que la capacité est suffisante pour leur futur usage. A cette fin on souhaitera procéder à des contrôles qui n'abîment pas la matière pour pouvoir la réutiliser dans son intégralité. On ne pourra donc pas procéder à un prélèvement important et on privilégiera davantage les contrôles non destructifs (CND) ou les essais non destructifs (END). Comme l'indiquent Corneloup, G. et al. dans leur ouvrage « Le Contrôle Non Destructif » [33], ces techniques non destructives ont été développées particulièrement pour les domaines du nucléaire ou de l'aéronautique. Néanmoins, une large partie des contrôles présentés dans cet ouvrage est applicable au bâtiment et pourrait aider à améliorer la caractérisation en vue d'un réemploi. Dans ce domaine différents contrôles existent :

- L'examen visuel (pour tous types de défauts apparents) ;
- L'émission acoustique (détection d'endommagement dans un matériau) ;
- Les courants de Foucault (pour les matériaux conduisant l'électricité, permet l'identification de défaut dans le matériau, son épaisseur) ;
- Le contrôle d'étanchéité (concerne des emballages ou les installations de stockage sous pression atmosphérique et non des matériaux de construction traditionnels) ;
- La magnétoscopie (identification de défauts dans les matériaux ferromagnétiques) ;
- Le contrôle par ressuage pour l'acier (pour tous les matériaux sauf poreux, permet d'évaluer une fissure à la surface de l'acier par exemple)

- La radiographie (pour tous les matériaux avec rayons X, RT gamma, qui permettent d'inspecter l'intérieur d'un matériau et d'identifier ses défauts, sous certaines conditions de sécurité et de non-exposition aux rayons pour les personnes) ;
- Les ultrasons ou échographie (pour tous les matériaux, cela permet de qualifier la composition d'un matériau, son épaisseur) ;
- La shearographie ;
- La thermographie (identification de propriétés thermophysiques des matériaux et d'éventuels défauts).

Auxquels on peut ajouter dans le domaine du génie civil : le radar.

Toutes ces méthodes font, pour la plupart, l'objet de recherches dans des domaines industriels variés. On peut signaler également que des méthodes couplées se développent comme les méthodes électromagnétiques acoustiques, électromagnétiques ultrasonores ou magnéto-optiques. Certaines de ces méthodes ne sont pas encore adaptées au domaine de la construction ou difficilement opérationnelles *in situ* (rayons gamma). Dans le domaine du bâtiment et des ouvrages le LERM setec a accumulé une grande expertise, en particulier pour le diagnostic d'ouvrages existants. Les ingénieurs du LERM proposent ainsi de réaliser une échographie des bâtiments et sont régulièrement sollicités pour vérifier le ferrailage d'éléments porteurs en béton armé, avec leurs unités de mesures radar miniaturisées par exemple. En complément, « le diagnostic de corrosion et de sa vitesse demandent avant tout de traiter simultanément un ensemble de données que fournissent les méthodes électrochimiques complémentaires : potentiel d'électrodes, courant de corrosion (vitesse de corrosion), résistivité, en plus des analyses physico-chimiques du béton »⁵. Un grand champ d'expertise existe donc déjà, et doit permettre d'accompagner les processus de caractérisation autour du réemploi. Il n'est pas à douter que de nouvelles méthodes seront adaptées aux pratiques de réemploi si celui-ci se généralise.

Les propriétés mécaniques des éléments structurels en acier pourront par exemple être estimées à travers la réalisation de mesures *in situ* de dureté au moyen d'un duromètre portable. La dureté est calculée à partir de la mesure de la différence entre les vitesses d'impact et de rebond d'un petit corps percuteur projeté par un mécanisme à ressort à la surface du matériau à tester. La norme NF EN ISO 18265 permet d'obtenir une estimation des valeurs de résistance mécanique à partir des valeurs de dureté obtenues pour les aciers non alliés ou faiblement alliés et les aciers moulés.

Pour les spécificités du béton, les tests ont pour but principalement de détecter des problèmes de corrosion des armatures par carbonatation, et d'alcali-réaction. Dans le cadre du réemploi, on traitera des structures âgées qui ont déjà fait la preuve de leur résistance et d'une mise en œuvre dans les règles de l'art ; et d'éléments structuraux conservés en milieu abrité (bureaux, logements) donc non exposés aux pathologies de lessivage, attaque d'ions chlorures, réaction sulfatique interne, gel/dégel. La carbonatation n'est pas détectable à l'œil mais se manifeste par une baisse du pH du béton de 13 à 9. Il s'agit d'une réaction de la portlandite du ciment avec le CO₂ de l'air qui se fait progressivement de la surface vers les armatures qui se corrodent alors, et font éclater le béton. Le phénomène est rare pour les éléments visés par le réemploi, néanmoins un test à la phénolphthaléine peut être réalisé pour déterminer le pH (réaction rose, pas de pathologie ; réaction incolore, le pH est inférieur à 9 et il y a pathologie). Pour la vérification du ferrailage du béton armé, plusieurs méthodes non destructives existent

⁵ Jean-Luc Garciaz, expert au LERM, disponible sur <http://doc.lerm.fr/controle-non-destructif-des-ouvrages-et-des-batiments/>, consulté le 07/04/2020.

comme la bobine électrique avec le courant de Foucault qui peut détecter l'armature, positionner les aciers, leurs orientations, l'épaisseur d'enrobage et estimer le diamètre des barres à 2 mm près. Le pachomètre est l'appareil que l'on passe à la surface du béton pour détecter ces armatures mais il faut également retrouver les plans d'exécution pour savoir quels types d'armatures ont été utilisés (si l'appareil trouve un diamètre de 30, il peut s'agir en fait de 3 barres de 10 accolées). En cas de doute, il est nécessaire de passer par une méthode destructive ou semi-destructive car il faudra creuser le béton pour procéder à une vérification. Les électrodes peuvent aussi permettre de détecter l'enrouillement d'armatures. Les Ferroskan sont des appareils capables de générer des cartographies d'armature et présentent l'intérêt de ne pas interagir, ni dégrader la matière en place, ce qui permet de conserver l'intégrité totale de la matière pour un réemploi. Pour obtenir les résistances de béton, un ausculteur sonique peut évaluer la résistance du béton de façon non destructive ; sinon une campagne de carottages (NF EN 13791), sera nécessaire (avec destruction partielle de l'élément au niveau de la carotte que l'on pourra reboucher sans problème). Un scléromètre (normes d'essai NF EN 12504-2 et NF EN 13791) pourra mesurer la dureté superficielle du béton et estimer sa résistance à la compression (Rc).

Au-delà de l'essai non destructif lui-même, il faut également déterminer, quand cela est pertinent, la conformité d'un lot d'éléments, à la suite d'un diagnostic ressource. Pour rappel, la conformité de la résistance à compression du béton est vérifiée en application de la loi de Gauss et du fractile 5% pour les bétons neufs, comme expliqué par Jacques [34]. Il persiste donc un faible risque pour qu'un des éléments du lot présente une résistance inférieure à celle prescrite pour le lot. Cependant il est à redéfinir en cas de réemploi puisque l'élément a déjà été en usage, donc *a fortiori* le matériau a déjà passé le test de conformité du béton à l'époque de sa fabrication et a prouvé sa résistance une première fois pendant plusieurs dizaines d'années. On peut alors émettre l'hypothèse que le lot d'éléments de réemploi en béton fonctionnera sur le même modèle de loi de Gauss auquel on pourrait appliquer un fractile inférieur à 5%, à la condition que l'élément ne soit pas dégradé au moment de sa déconstruction. Ceci est d'autant plus vrai, que la résistance du béton augmente dans le temps, ce qui n'est pas négligeable après une très longue période d'un premier usage, à dire d'experts setec. On prendrait alors moins de risques à réemployer un vieux béton dont on connaît l'usage passé, qu'à mettre en œuvre un béton neuf. Il faudra alors distinguer la valeur de prescription de résistance pour un béton neuf (où il y a un risque que le béton soit dans le fractile 5%), de la valeur de caractérisation d'un élément en béton réemployé (où on est sûr que ce béton déjà mis en œuvre pendant plusieurs décennies possède réellement cette résistance, et non une probable résistance).

3.4.4. Vers une réadaptation des règles de calculs et approche probabiliste

Les règles de calculs des structures sont regroupées dans les Eurocodes qui sont souvent rendus obligatoires à travers des spécifications dans les pièces du marché. Les Eurocodes reposent sur une approche semi probabiliste. En dehors des actions qui sont codifiées, chaque matériau est défini selon une résistance caractéristique. A partir de celle-ci est calculée la résistance de calcul par application de coefficients de sécurité. Ceux-ci, synthétisés en Figure III. 20, ont été ajustés à travers les années selon les fiabilités des constructions passées. Alors que l'on construisait de manière empirique jusqu'au XIX^e siècle selon Calgaro [35], on a peu à peu amélioré la sécurité des constructions pour réduire le risque de détérioration à zéro. Le principe fondamental reposait alors sur la certitude que les contraintes maximales dans les éléments restent inférieures à une contrainte admissible. Pour cela des coefficients de sécurité ont été fixés par type de matériau, et divisent sa contrainte de ruine. Ainsi les retours d'expérience, et une meilleure connaissance des matériaux, ont permis

d'affiner les valeurs de ces coefficients de sécurité pour les diminuer peu à peu en toute sécurité. L'approche par contrainte admissible ayant montré des limites, notamment sur l'occurrence probabiliste de combinaison de charge, sur la variabilité des actions appliquées, l'approche semi-probabiliste s'est alors développée dans le but de rendre encore plus fiable le calcul des structures. Ainsi des coefficients partiels de sécurité ont été déterminés pour prendre en compte les incertitudes liées à la détermination des actions (vent, séisme, effets thermiques) mais également liées à la variabilité des résistances des matériaux ou encore des modèles ou des modélisations elles-mêmes. Le risque zéro n'existant pas dans le monde réel, la probabilité de ruine est faible mais tout de même existante et évaluée à 10^{-6} , selon Calgaro [35], c'est-à-dire un risque sur 1 000 000 qu'un bâtiment subisse un désordre structurel.

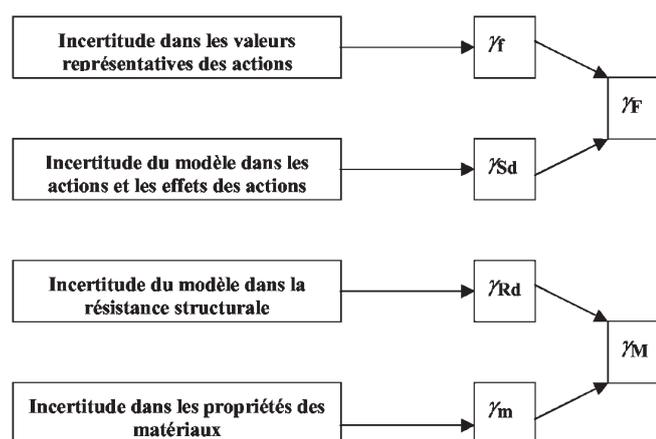


Figure III. 20 : Coefficients partiels dans l'EN 1990, Figure C.3 – Relations entre les coefficients partiels individuels, NF EN 1990 Mars 2003 : Eurocodes structuraux. Bases de calcul des structures.

La réalisation d'un bâtiment réemployant des éléments structuraux (poteaux, poutres, ...) provenant de la déconstruction d'un autre bâtiment plus ancien présente un intérêt du point de vue environnemental (jusqu'à -35% de GES pour une structure en portiques selon Brütting [36]), mais pose la question de l'évaluation du risque à réemployer un élément structural et à reconduire sa durée d'utilisation pour une « nouvelle vie ». Dans le cas d'un réemploi anticipé, il paraît donc judicieux de considérer qu'une nouvelle incertitude est à prendre en compte du fait des vies successives d'un élément de structure. Pour prendre en compte cette incertitude, un coefficient de sécurité supplémentaire, permettrait de viabiliser cette pratique, notamment auprès des bureaux de contrôle et des assureurs, mais également des concepteurs et constructeurs engagés par leur responsabilité décennale, comme évoqué dans le Chapitre 0.

Ce coefficient partiel de réemploi pourrait reposer sur une probabilité de défaillance plus forte, qui dépendra du niveau de caractérisation des éléments à réemployer. En effet, des informations majeures comme l'accès à tout l'historique de l'élément, à des relevés de capteurs tout au long du cycle de vie passé, mais aussi une maîtrise du processus de déconstruction et de la logistique associée permettront d'ajuster ce coefficient partiel de réemploi. Cette probabilité entraînerait d'après l'Eurocode, une nouvelle estimation des coefficients de sécurité. Calgaro, J.-A. propose une application, dans son ouvrage [35], où le passage d'une probabilité de 10^{-6} à 10^{-12} , fait passer le coefficient de sécurité sur G de 1.35 à 1.47. Ainsi, de la même manière, le bâtiment réemployable pourrait présenter un léger surdimensionnement (au maximum +0,5% de matière entre le bâtiment initialement conçu dans le scénario C « réemploi » par rapport au scénario A « classique » dans l'étude de cas du chapitre 2) qui permettrait d'anticiper ce coefficient nécessaire dans le scénario de réemploi en fin de vie.

A *contrario*, selon la philosophie des Eurocodes, si l'on connaît parfaitement les caractéristiques d'un matériau déjà mis en œuvre et qui a fait ses preuves alors on pourrait diminuer le coefficient de sécurité car on a diminué les incertitudes liées au matériau (dans le cas d'une instrumentation fiable par exemple). La Figure III. 21 illustre donc cette dualité entre une prise en compte d'une incertitude supplémentaire due au réemploi (approche réservée sécuritaire) et une suppression du coefficient d'incertitude des propriétés du matériau que l'on l'on aura pu confirmer pendant toutes ses années de mise en œuvre passée (approche scrutatrice éprouvée).

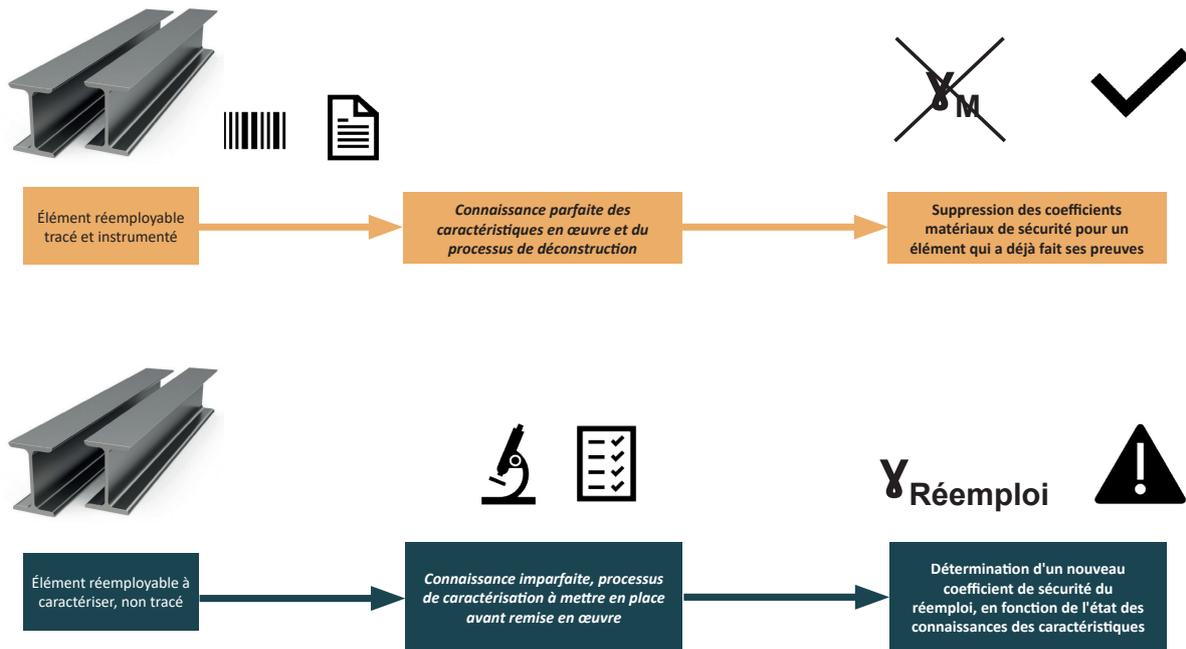


Figure III. 21 : Stratégie sécuritaire selon la connaissance des éléments structuraux à réemployer.

3.4.5. Algorithme pour optimiser le stock et son taux de réemploi

Cette partie est une exploration visant à étudier comment résoudre la question de gestion d'un stock de composants et de prélèvement dans ce stock pour de nouveaux projets. Un exemple d'algorithme à créer pour optimiser le réemploi d'éléments structuraux est présenté. Cet algorithme permet la recherche d'éléments existants réemployables à partir d'un modèle de calculs aux éléments finis pour un nouveau bâtiment. Cette partie théorique est ensuite illustrée par une étude de cas reposant sur une structure en acier testée dans le cadre d'un PFE à la setec, Alexan [25]. Ce travail de PFE a permis d'une part, d'améliorer le code de programmation adapté aux outils propres à l'entreprise setec (Revit et Pythagore) et d'autre part de se confronter à un cas structural simple (compression dans les poteaux métalliques). Cet exercice a permis de constituer une première « preuve de concept » et les parties qui suivent mettront en évidence les développements à réaliser pour s'adapter au réemploi d'autres éléments de structure (par exemple avec la prise en compte de la flexion composée par l'algorithme ou du taux de ferrailage).

3.4.5.1. Fonctionnement de l'algorithme

Contrairement à une construction neuve où l'on cherchera à trouver les éléments porteurs (voire à les faire réaliser sur-mesure) correspondant au design d'une structure, le réemploi induit que l'on adapte le design d'une structure à un stock préétabli d'éléments porteurs « prêt-au-réemploi ». Dans ce but, il est nécessaire d'optimiser la recherche des éléments appropriés parmi un nombre conséquent d'éléments réemployables d'un stock. Dans les deux cas, on s'accordera à fixer un taux de travail en pré-dimensionnement. Pour le réemploi, il faudra ensuite faire converger le modèle de pré-dimensionnement avec des éléments présents dans le stock, soit en recherchant, une géométrie, une contrainte admissible et un taux de surdimensionnement sécuritaire. Il faut ainsi vérifier si :

- La section mise en place est suffisante pour reprendre la sollicitation afférente ($N_{max} \leq \text{Capacité}$). Sinon, le poteau sera redimensionné, en proposant une section plus grande, si elle existe.
- Dans le cas où $N_{max} \leq \text{Capacité}$ est vérifié, si l'écart entre la capacité et la sollicitation ne dépasse pas le taux de surdimensionnement fixé. Sinon, le poteau sera redimensionné, en proposant une section plus petite, si elle existe.

De la même manière, pour la géométrie, il faudra vérifier si :

- La longueur d'un élément du stock correspond à la longueur nécessaire dans le modèle pré-dimensionné ($L_{modèle} \leq L_{stock}$). Sinon, le poteau sera redimensionné, en proposant une longueur plus grande, si elle existe.
- Dans le cas où $L_{modèle} \leq L_{stock}$ est vérifié, si l'écart entre la longueur stock et la longueur modèle ne dépasse pas l'écart max fixé. Sinon, le poteau sera redimensionné, en proposant une longueur plus petite, si elle existe.

L'ingénieur garde la main sur deux critères : le taux de surdimensionnement sécuritaire et l'écart géométrique max qu'il doit fixer.

Pour optimiser et automatiser cette recherche dans un stock qui peut être conséquent, la mise au point d'un algorithme est nécessaire. Cet algorithme se chargera des itérations nécessaires, car à chacune d'elles il faudra également vérifier la nouvelle descente de charges (et les nouvelles sollicitations induites) qui sera modifiée, d'autant plus si le taux de surdimensionnement sécuritaire est élevé pour les éléments identifiés dans le stock. Il faut également prévoir de fermer la boucle des itérations qui pourraient être infinies. Les codes en C# correspondant à ces algorithmes ont été développés du PFE, précédemment cité, [25]. Ainsi on dispose d'un outil permettant :

- La recherche d'éléments dans un stock selon un critère de contrainte admissible (A)
- La recherche d'éléments dans le stock restreint suite aux résultats (A) selon un critère géométrique (de longueur pour l'exemple d'un poteau) (B)

A cela s'ajoutent comme critères additionnels que l'on peut rechercher : le type de profilés (notamment dans le cas du matériau acier), le carbone gris associé à l'élément (et autres indicateurs d'impact d'une fiche FDES ou DE par exemple), le coût, etc. Au fur et à mesure que l'algorithme retient un élément en fonction des critères fixés, il va retirer les éléments retenus des autres éléments restant dans le stock en s'assurant à chaque fois de retenir le meilleur candidat avec la marge de tolérance la plus pertinente, pour permettre à un maximum d'éléments d'être réemployés.

Concernant la géométrie d'un élément, si l'algorithme retient un élément plus grand que la dimension imposée par le modèle, il faudra alors faire le choix soit :

- Redimensionner l'élément pour le raccourcir et donc générer des déchets
- Réadapter la géométrie du modèle ce qui entraîne un nouveau nombre infini d'itérations pour recomposer un modèle complet à partir des éléments d'un stock

Les deux options doivent tout de même être considérées et l'impact environnemental doit être approché sous un angle global à long terme pour orienter la décision du concepteur. La Figure III. 22 reprend donc toutes les étapes d'itérations à prendre en compte simultanément entre les différents objets (le stock d'éléments réemployables, le modèle de calcul du nouveau bâtiment, l'utilisateur) lors de la recherche d'un élément de réemploi dans un stock.

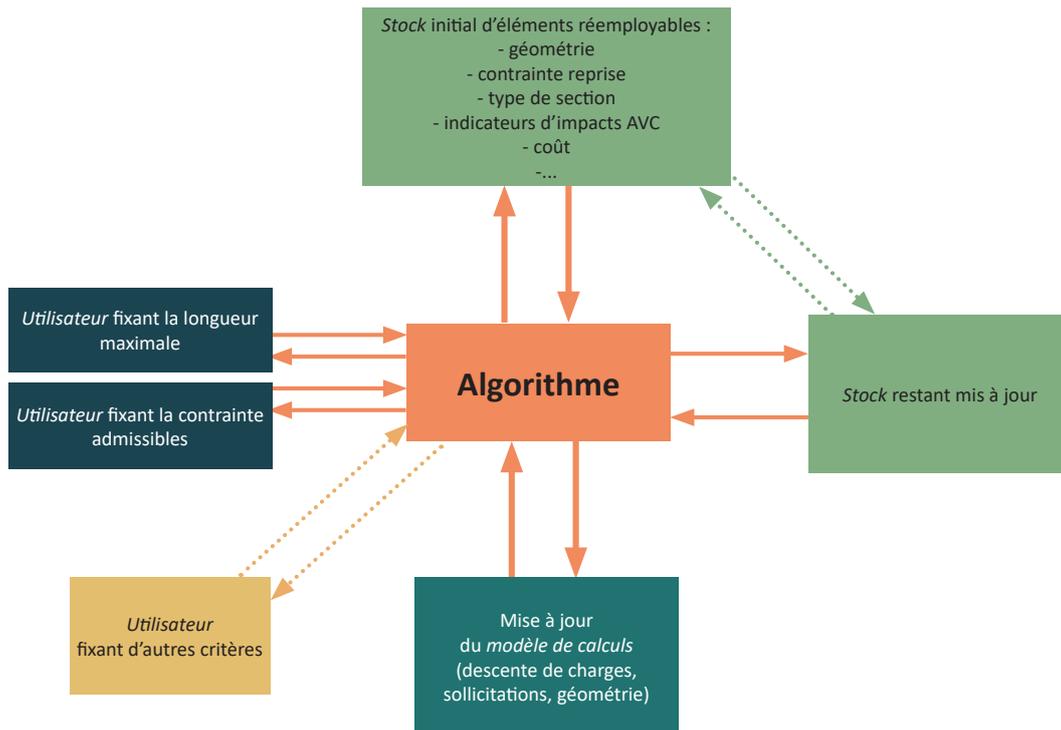


Figure III. 22 : Synthèse des opérations de l'algorithme et itérations induites

3.4.5.2. Application de l'algorithme selon deux scénarios : "conception à partir d'un stock" et "conception avec un stock"

Ce premier aperçu de l'approche de l'algorithme a été éprouvé par une application concernant des éléments en acier verticaux. L'algorithme n'intègre pas de vérification au flambement dans cette version et doit être adapté par la suite aux spécificités d'éléments en béton (e.g. flexion composée). L'application qui suit permet d'illustrer l'utilisation de l'algorithme mais aussi les résultats espérés selon les stratégies de conceptions choisies.

Deux scénarios de conception pour le réemploi :

- Un scénario de "conception à partir d'un stock", qui conduit à la réutilisation de 100% des éléments, en utilisant uniquement des éléments du stock.
- Un scénario de "conception avec un stock", qui cherche à intégrer le plus grand nombre possible d'éléments réutilisés disponibles dans le stock.

Un premier bâtiment a été conçu réutilisable (bâtiment A dans la Figure III. 23) pour alimenter un stock en vue d'un réemploi futur. Le bâtiment type choisi (A) est un IGH de 41 étages avec structure poteaux-poutres acier, dont le dimensionnement correspond à un

programme bureaux type rencontré dans la pratique actuelle et qui tente d'articuler le plus grand nombre d'éléments possibles. Le scénario "conception à partir d'un stock" a permis de reconstituer différents types de bâtiments, par exemple, A1, ou A2 ou A3 dans la Figure III. 24, en utilisant l'ensemble du stock d'éléments.

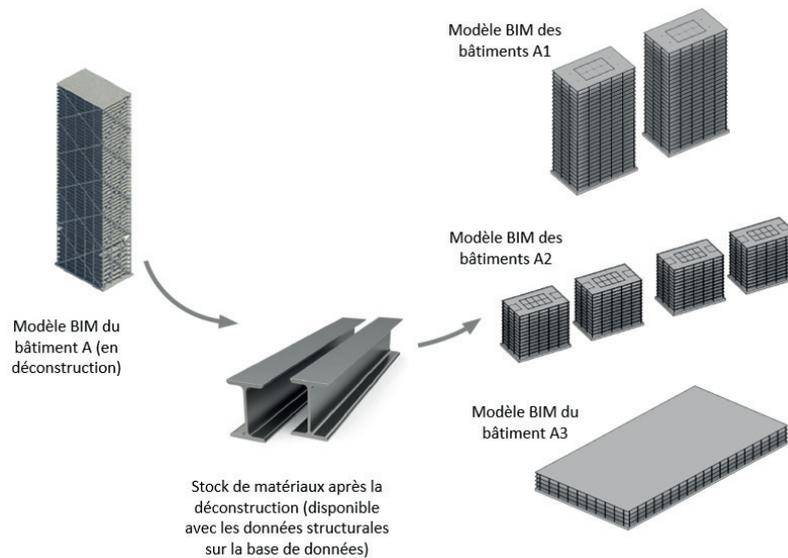


Figure III. 23 : Scénario « conception à partir d'un stock » avec reconstruction appliquée à partir d'un stock initial d'un IGH, pour lequel nous avons développé les flux d'échanges à l'aide de notre chaîne d'outils.

Un autre bâtiment (bâtiment B dans la Figure III. 24) a été conçu avec le scénario "conception avec un stock" en essayant d'incorporer des éléments réemployables du stock. Ce deuxième bâtiment (B) intégrant des éléments en acier réemployés est un bâtiment de moyenne hauteur (18 étages), qui pourrait correspondre à un IMH défini dans le chapitre 0, d'après la loi ELAN [37] permettant une flexibilité (à la fois pour des bureaux et pour des logements). Cette première approche a permis d'identifier toutes les étapes pour assurer le réemploi et, en ce sens, permet une généralisation plus large.

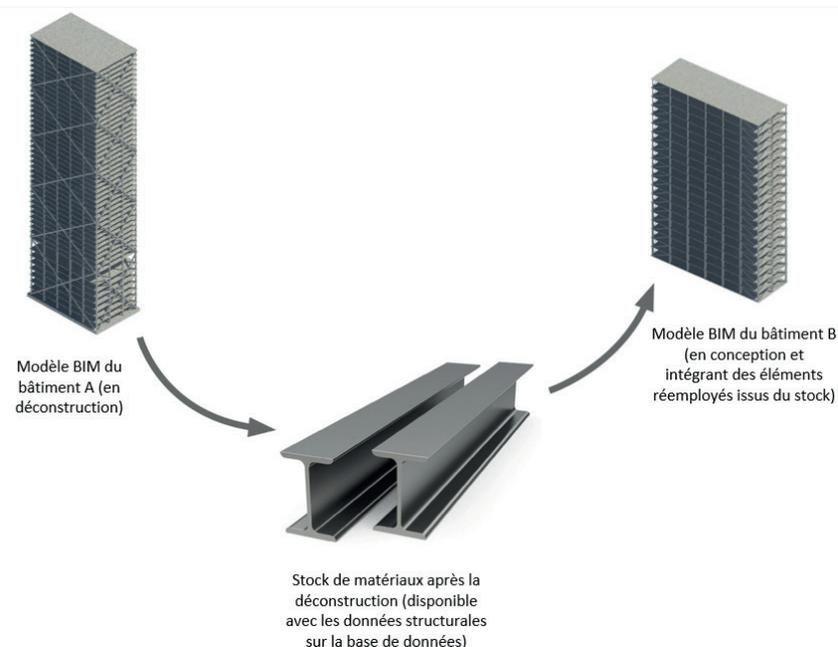


Figure III. 24 : Scénario « conception avec un stock » avec reconstruction appliquée à partir d'un IGH initial vers un nouveau bâtiment de moyenne hauteur, pour lequel nous avons développé les flux d'échanges à l'aide de notre chaîne d'outils.

L'algorithme est ici testé pour prouver que l'approche proposée est réalisable, ainsi le dimensionnement est réalisé à l'ELU pour les forces axiales (traction et compression pures). Cette méthode fournit des résultats pour les deux scénarios présentés ci-dessus. Le scénario "conception à partir d'un stock" permet de réemployer 100% des éléments en adaptant la conception au stock disponible. Les variantes possibles présentent les caractéristiques suivantes dans le Tableau III. 4.

Bâtiment A existant et ses variantes créées	Nombre de niveaux par variante	Superficie par variante	Surface de plancher par variante	Utilisation du stock d'éléments réemployables
Bâtiment A (constituant le stock)	48	1791 m ²	85,968 m ²	100% (avec un seul bâtiment)
Variante A1	24	3582 m ²	85,968 m ²	100% (avec deux bâtiments)
Variante A2	12	7164 m ²	85,968 m ²	100% (avec quatre bâtiments)
Variante A3	4	2149 m ²	85,968 m ²	100% (avec un seul bâtiment)

Tableau III. 4 : Scénario « conception à partir d'un stock » : variantes à partir du bâtiment A.

Pour le scénario "conception avec un stock", l'algorithme permet d'effectuer une recherche dans le stock et de comparer le tableau des caractéristiques (contrainte, géométrie) des éléments stockés avec le tableau des sollicitations (contraintes et géométries) déterminées dans le modèle de calculs du bâtiment en cours de conception. L'algorithme a ainsi permis d'obtenir les meilleurs choix pour remplacer les poteaux du modèle (du bâtiment en cours de conception) par des éléments réemployés issus du stock. Comme attendu, la plupart des éléments réemployés sont légèrement surdimensionnés par rapport à la résistance demandée dans le calcul théorique du bâtiment en cours de conception. En raison du faible stock de cette application, il a fallu augmenter progressivement la marge acceptable pour la capacité des éléments réemployés, afin de maximiser le nombre de poteaux réemployés (à partir de l'IGH A, déconstruit). La valeur finale acceptable est de + 110 % pour la différence de capacité autorisée des éléments réemployés. Les résultats finaux sont présentés dans le Tableau III. 5 et le Tableau III. 6.

Éléments	Nouveau projet à neuf	Alternative réemploi	Différence réemploi-neuf
Nombre de poteaux	420	412 (neufs) +8 réemployés	2% d'éléments réemployés
Masse (tonnes)	298	333	+12%

Tableau III. 5 : Scénario « conception avec un stock » : bâtiment final B

Unités	Nouveau projet à neuf	Alternative réemploi	Différence neuf-réemploi
Masse/ml (tonnes/ml)	4.8	11.5	- 6.6
Longueur (m)	3.75	4.67	- 0.92
Masse (tonnes)	18.1	53.5	- 35.4

Tableau III. 6 : Détails sur les poteaux réemployés avec le scénario « conception avec un stock ».

Dans cette application, le stock de poteaux à réemployer de l'IGH est très limité mais il est possible de réemployer 8 poteaux parmi les 420 poteaux constituant le bâtiment B. Le surdimensionnement a été limité pour conserver des éléments de taille raisonnable pour cette étude de cas, mais ce critère est discutable. Cependant, le stock limité relatif à un seul bâtiment d'origine ne convient pas à un nouveau scénario "Conception avec un stock". De plus, l'immeuble de moyenne hauteur réversible a des portées et des hauteurs sous plafond qui nécessitent des éléments porteurs particuliers. Un bâtiment plus classique ayant la même fonction de bureaux pourrait intégrer davantage d'éléments réemployés. Toutefois, un stock élargi et généralisé à un territoire plus étendu (e.g. national), permettrait un choix plus large et plus pertinent parmi les éléments stockés, et éviterait un surdimensionnement aussi important. Malgré ce surdimensionnement de + 12% en masse, il y a tout de même un gain sur les impacts environnementaux, par rapport à une variante en neuf du bâtiment B.

Cette preuve de concept montre qu'une politique de réemploi généralisée devrait s'accompagner de nouvelles recommandations de conception telles que la hauteur dalle à dalle et la portée identiques pour des bureaux et des logements (partie 2.3. du chapitre II). Ainsi, un élément porteur pourra correspondre à plusieurs types de programmes (bureaux, logements) et sera plus facilement réemployable dans un grand nombre de bâtiments futurs. Sans ces nouveaux paradigmes de conception, la réutilisation ne peut concerner qu'une petite partie du stock (scénario "conception avec un stock"). C'est pourquoi il est hautement préférable de généraliser le concept de "conception à partir d'un stock" pour atteindre 100% des éléments porteurs réemployés.

3.5. Conclusion

La traçabilité des matériaux de construction et des composants est un élément fort de l'économie circulaire, comme on a pu l'entendre directement de la part du Gouvernement français présentant sa feuille de route pour une économie 100% circulaire : « L'horizon d'une approche pleinement circulaire pour ce secteur est de faire du parc des bâtiments la banque de matériaux des constructions futures » précisant ensuite « la reconnaissance des performances des matériaux réutilisés et réemployés », d'après les propos recueillis pour Le Moniteur, par Ibelaidene [38]. Bien que de nombreuses normes existent autour de l'environnement de la donnée et de la façon de l'organiser, ce domaine semble encore éloigné des acteurs de la construction. De même, l'outil numérique BIM qui présente un potentiel à différentes échelles du réemploi, peine à se démocratiser chez les concepteurs dans les pratiques actuelles. A cela s'ajoute l'univers des systèmes de traçabilité ou d'instrumentation, également récent et en pleine innovation, rejoignant les domaines de la *big data*. Il n'est donc pas simple d'aborder cette thématique qui plus est dans le domaine du réemploi, lui aussi encore relativement confidentiel. C'est pourquoi il est indispensable de préciser le cadre autour de cette donnée pour le réemploi, à plusieurs niveaux, principalement sur les sujets, d'une part de la responsabilité liée à la capitalisation :

- la donnée tracée peut aider à distinguer les responsabilités de chacun, développées dans le chapitre 0 ;
- le potentiel du BIM doit être exploité avec des incitations à fournir les informations au moment de la conception, selon les LOD 600/700 proposés en partie 3.2.2. qui peuvent guider les bureaux d'études dans leur production ;
- une donnée fiable et capitalisée peut permettre d'adapter les coefficients d'incertitudes en faveur d'un réemploi ;
- la donnée numérique peut pallier les absences observées actuellement avec les archives papier ;
- l'organisation de la donnée peut inciter l'ensemble de la chaîne d'acteurs à transmettre les informations et faciliter leur capitalisation.

et d'autre part de la conception :

- la donnée des caractéristiques physico-mécaniques est indispensable pour interférer avec des éléments porteurs existants et réemployables, ces données doivent être identifiées et exigées selon la nomenclature évoquée en partie 3.2.3 ;
- les outils d'optimisation numérique peuvent aider à optimiser le processus du réemploi, e.g. avec l'algorithme de recherche d'éléments dans un stock (partie 3.4.5) ;

- une donnée numérique organisée peut autoriser la création d'une banque de matériaux à grande échelle, permettant d'augmenter l'offre de réemploi et de réduire la logistique de stockage (grâce au flux tendu).

Il est en revanche important de signaler que la traçabilité numérique, qui est une technologie récente, ne doit pas se substituer aux autres formes de traçabilités existantes mais qu'elle apporte un progrès supplémentaire.

Références bibliographiques :

- [1] J. Choppin et N. Delon, *Matière grise, Matériau, Réemploi, Architecture*, Paris: Editions du Pavillon de l’Arsenal, 2014, p. 370.
- [2] W. Mc Donough et M. Braungart, *Cradle to cradle : Créer et recycler à l’infini*, 4e éd., vol. Manifestô, Paris: Editions Alternatives, 2011, p. 240.
- [3] O. Anterrieu, «DÉVELOPPEMENT D’UN SYSTÈME D’EXPLOITATION POUR L’AIDE AU DIAGNOSTIC DES OUVRAGES DU GÉNIE CIVIL,» Université du Québec, Université de recherche INRS, Sciences de la Terre, Thèse de Doctorat, Québec.
- [4] C. Cremona, «DUREE DE VIE DES OUVRAGES : APPROCHE PREDICTIVE PERFORMANTIELLE ET PROBABILISTE: LE PROJET APPLLET,» chez *GC’2009, Performance technique, environnementale et économique*, Cachan, 2009.
- [5] S. Obadia, «PIM et BIM tombent dans le cloud,» *Les Cahiers Techniques du Bâtiment*, 6 Avril 2018.
- [6] J. Rolland, «Le CIM modélise la ville,» *Les Cahiers Techniques du Bâtiment*, 4 Mars 2020.
- [7] BS France- Mediaconstruct, building SMART France, «Notions clés du BIM,» [En ligne]. Available: <https://www.buildingsmartfrance-mediaconstruct.fr/definition-notions-bim/>. [Accès le 20 Septembre 2019].
- [8] EPEA, L. Luscuere, R. Zanatta, D. Mulhall, SundaHus, J. Boström et L. Elfström, «BAMB, Deliverable 7, Operational Materials Passports,» 24 Janvier 2019. [En ligne]. Available: <https://www.bamb2020.eu/wp-content/uploads/2019/02/D7-Operational-materials-passports.pdf>. [Accès le 24 Février 2020].
- [9] M. Heinrich et L. Werner, «Materials Passports - Best Practice. Innovative Solutions for a Transition to a Circular Economy in the Built Environment,» Horizon2020 buildings as materials banks program (BAMB), 2019. [En ligne]. Available: https://www.bamb2020.eu/wp-content/uploads/2019/02/BAMB_MaterialsPassports_BestPractice.pdf. [Accès le 12 Janvier 2020].
- [10] O. O. Akinade, L. O. Oyedele, K. Omoteso, S. O. Ajayi, M. Bilal, H. A. Owolabi, H. A. Alaka, L. Ayris et J. H. Looney, «BIM-based deconstruction tool: Towards essential functionalities,» *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 6, pp. 260-271, 2017.
- [11] K. Forth, A. Braun et A. Borrmann, «BIM-integrated LCA - model analysis and implementation for practice,» *SBE D-A-CH 19 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 323*, n° 1012100, p. 9, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/323/1/012100.
- [12] International Standardisation Organisation, *ISO 29481-1:2016, Building information models — Information delivery manual — Part 1: Methodology and format*, ISO, 2016.
- [13] International Standardisation Organisation, *ISO 19650:2018, Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling*, ISO, 2018.
- [14] F. Shadram, T. D. Johansson, W. Lu, J. Schade et T. Olofsson, «An integrated BIM-based framework for minimizing embodied energy during building design,» *Energy and Buildings*, vol. 128, pp. 592-604, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.07.007.
- [15] J. Veselka, J. Růžička, A. Lupíšek, P. Hájek, S. Mančík, V. Žďára et M. Široký, «Connecting BIM and LCA: The Case Study of an Experimental Residential Building,» *SBE D-A-CH 19 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 323*, n° 1012106, p. 6, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/323/1/012106.
- [16] RIBA, «The RIBA Plan of Work 2013,» [En ligne]. Available: <https://www.ribaplanofwork.com/About/Concept.aspx>. [Accès le 17 Décembre 2019].

- [17] E. Iacovidou et P. Purnell, «Mining the physical infrastructure: Opportunities, barriers and interventions in promoting structural components reuse,» *Science of the Total Environment*, n° 1557-558, pp. 791-807, 2016, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.098.
- [18] G. Cai et D. Waldmann, «A material and component bank to facilitate material recycling and component reuse for a sustainable construction: concept and preliminary study,» *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 21, pp. 2015-2032, 2019, doi: 10.1007/s10098-019-01758-1.
- [19] B. Sanchez et C. Haas, «A novel selective disassembly sequence planning method for adaptive reuse of buildings,» *Journal of Cleaner Production*, n° 1183, pp. 998-1010, 20 Février 2018, DOI:10.1016/j.jclepro.2018.02.201.
- [20] B. Ilhan et H. Yaman, «Green building assessment tool (GBAT) for integrated BIM-based design decisions,» *Automation in Construction*, vol. 70, pp. 26-37, 2016, doi: 10.1016/j.autcon.2016.05.001.
- [21] J. Brütting, J. Desruelle, G. Senatore et C. Fivet, «Design of Truss Structures Through Reuse,» *Structures*, vol. 18, pp. 128-137, 2019, doi: 10.1016/j.istruc.2018.11.006.
- [22] Le Monde, «Singapour, banc d'essai de la ville digitale,» [En ligne]. Available: https://www.lemonde.fr/smart-cities/article/2016/11/23/singapour-banc-d-essai-de-la-ville-digitale_5036699_4811534.html. [Accès le 13 Novembre 2019].
- [23] J. Wong et J. Zhou, «Enhancing environmental sustainability over building life cycles through green BIM: A review,» *Automation in Construction*, vol. 57, pp. 156-165, 2015.
- [24] ADEME, «La face cachée du numérique, Réduire les impacts du numérique sur l'environnement,» Ademe, Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, Angers, 2019.
- [25] C. Alexan, F. Lebrun et R. Mesnil, *Éco-construction – Réemploi d'éléments structurels. Projet de Fin d'Etudes, Département Génie Civil et Construction. Entreprise : setec tpi.*, Paris: Ecole des Ponts ParisTech, 2019.
- [26] E. Shell, Y. Lue et M. Chu, «Spacecraft Onboard Software Maintenance - An Effective Approach which Reduces Costs and Increases Science return.,» *Reducing the Cost of Spacecraft Ground Systems and Operations*, vol. 3, 2000.
- [27] B. Guy et N. Ciarimboli, «DfD, Design for Disassembly in the built environment: a guide to closed-loop design and building,» 2005. [En ligne]. Available: <https://www.lifecyclebuilding.org/docs/DfDseattle.pdf>. [Accès le 23 Mars 2020].
- [28] L. A. Akanbi, L. O. Oyedele, O. O. Akinade, A. O. Ajayi, M. Davila Delgado, M. Bilal et S. A. Bello, «Salvaging building materials in a circular economy: A BIM-based whole-life performance estimator,» *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 129, pp. 175-186, 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.10.026.
- [29] J. Brütting, C. De Wolf et C. Fivet, «The reuse of load-bearing components,» *SBE19 Brussels BAMB-CIRCPATH IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 225*, n° 1012025, p. 8, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/225/1/012025.
- [30] B. Godart, C. Cremona, J.-M. Lacombe et P. Le Delliou, *Maintenance, pathologie & réparation des ouvrages - Cours de Génie Civil et Construction / Mastère Génie Civil Européen*, Champs-sur-Marne: Ecole des Ponts ParisTech, 2017.
- [31] J. Benoît, G. Saurel, M. Billet, F. Bougrain et S. Laurenceau, REPAR 2 : Le réemploi passerelle entre architecture et industrie, ADEME, BELLASTOCK, CSTB, avril 2018, 545 p.
- [32] Université de Sherbrooke, «GCI 714 - Durabilité et réparations du béton, techniques de démolition du béton,» [En ligne]. Available: https://cours-examens.org/images/Etudes_superieures/Ingeniorat_Genie_civil/4_annee/Beton_arme_et_precontraint/Durabilite/Chap3_5.pdf.
- [33] G. Corneloup et C. Gueudré, *Le Contrôle Non Destructif et la contrôlabilité des matériaux et structures*, 1ère éd., Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, 2016, p. 320.

- [34] P. Jacques, «Contrôle de conformité des bétons,» *Bulletin de liaison du laboratoire des ponts et chaussées*, n° 1105, Janvier-Février 1980.
- [35] J.-A. Calgaro, *Introduction aux Eurocodes, Sécurité des constructions et bases de la théorie de la fiabilité*, Paris: Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 1996.
- [36] J. Brütting, G. Senatore, M. Schevenels et C. Fivet, «Optimum Design of Frame Structures From a Stock of Reclaimed Elements,» *Frontiers in Built Environment*, vol. 6, n° 157, 27 Mai 2020, DOI:10.3389/fbuil.2020.00057.
- [37] Legifrance, «LOI n° 2018-1021 du 23 novembre 2018 portant évolution du logement, de l'aménagement et du numérique (1),» 23 Novembre 2018. [En ligne]. Available: <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000037639478&categorieLien=cid>. [Accès le 25 Novembre 2019].
- [38] J. Ibelaidene, «Economie circulaire : les 5 mesures qui impacteront le BTP,» *Le Moniteur*, 23 Avril 2018. [En ligne]. Available: <https://www.lemoniteur.fr/article/economie-circulaire-les-5-mesures-qui-impacteront-le-btp.1966709>. [Accès le 30 Avril 2018].

CHAPITRE IV

Comportement structural d'éléments réemployés, partie expérimentale

Dans la continuité des chapitres précédents, la recherche d'augmentation du stock d'éléments, conçus pour un réemploi en fin de vie, passe forcément par le cas du béton qui représente 80 % du patrimoine bâti en France, d'après l'UGE (ex Ifsttar), [1]. Par ailleurs, nous avons évoqué, dans les chapitres I et II, la recommandation issue du DfD d'utiliser des assemblages démontables, s'apparentant à des liaisons articulées. De tels assemblages existent sur le marché (sans intention envisagée de réemploi), mais principalement pour les structures en bois ou en acier et peu compatibles avec la technique du béton coulé en place. De plus, comme nous l'avons vu dans le chapitre II, la multiplication de ces articulations pose des problèmes de raideur structurale, surtout lorsque l'on atteint de grandes hauteurs. Ainsi la proposition d'un « encastrement démontable », proposé dans le chapitre II, permettrait de compléter l'offre d'assemblages réversibles, lesquels ne seraient pas exclusivement des assemblages à sec, ce qui permettrait de répondre à de nombreuses configurations structurales où la continuité en béton -considérée comme un encastrement dans la théorie- reste la technique à privilégier. Etant donné que nous n'avons pas trouvé de données dans la littérature, nous proposons donc, dans ce chapitre, de concevoir et de tester un assemblage démontable en béton armé. Nous étudierons plus particulièrement la liaison entre la poutre et le poteau au sein du portique, représentatif d'éléments d'un bâtiment réversible et de sa trame universelle définis dans la partie 2.3.2. du chapitre II. L'objectif est de confirmer la bonne démontabilité de l'assemblage, ainsi que sa raideur et sa résistance ultime après reconstruction. L'analyse environnementale de ces portiques sera réalisée dans le chapitre V qui suivra.

4.1. Enjeux structuraux des essais

4.1.1. Choix de l'assemblage en béton armé, une solution applicable à court terme

L'objectif de généraliser le réemploi doit aussi s'accorder avec les contraintes des pratiques actuelles et trouver les compromis pour une transition des méthodologies actuelles vers le 100% réemployable. Aujourd'hui, en France, comme nous l'avons rappelé précédemment, l'industrie de la construction est marquée par le recours massif au béton armé dont les méthodes ont été optimisées aussi bien techniquement qu'économiquement au point qu'il est compliqué pour les autres matériaux de rivaliser. Toute nouvelle technique innovante pâtit systématiquement de la concurrence du béton et ne peut pas l'égaliser économiquement. De plus, toute la chaîne d'acteurs de la construction s'est adaptée spécifiquement au matériau béton en développant des compétences poussées. Pour s'engager dans un changement de paradigme, afin d'atteindre les objectifs ambitieux de réduction de GES dans le secteur de la construction, c'est toute une filière qui doit se réinventer.

Le présent travail s'applique donc, aussi, à trouver les solutions concrètes pour une application à court terme sur les chantiers. Pour cela, le choix du matériau pour notre expérimentation est celui du béton armé, et la conception proposée est compatible avec les méthodologies déjà en place dans les entreprises de construction. Cette stratégie présente également l'avantage de minimiser les surcoûts liés à la conception pour le réemploi (*Design for Reuse*) en s'adaptant au mieux aux process existants.

4.1.2. L'assemblage réversible

Dans le chapitre II, nous avons défini la géométrie d'une trame universelle permettant de concevoir un bâtiment réversible et adaptable à différents programmes : logements, bureaux. Dans cette lignée, l'expérimentation porte sur la mise en œuvre d'un système porteur de type poteaux-poutres correspondant à la structure de ce bâtiment réversible. Pour établir les éléments à construire en vue des essais, le dimensionnement repose sur le fonctionnement structural d'un portique (deux poteaux et une poutre). La partie étudiée est la zone de clavetage, qui relie la poutre au poteau, et qu'il faudra démolir pour récupérer la poutre et les deux poteaux à réemployer. Ensuite, il sera possible de réassembler un portique et de n'utiliser du béton neuf que pour reconstituer la zone de clavetage. Deux principales orientations sont explorées :

- Un assemblage rudimentaire à partir d'un béton C25/30, peu cher, disponible, facile à déconstruire mais qui demande une longueur importante pour le clavetage,
- Un assemblage élaboré avec un béton de hautes performances (BHP) en C60/75 afin de réduire la longueur de clavetage et d'optimiser le comportement structural, mais qui pourrait s'avérer plus compliqué à démonter et plus coûteux.

L'assemblage ainsi réversible doit pouvoir remplir son rôle fonctionnel. Cependant, il n'est *a priori*, pas aisé de définir la raideur d'un tel assemblage. L'enjeu de cet essai est de confronter l'estimation par la modélisation, avec le comportement réel sous charge du portique, et de savoir si l'assemblage se comporte comme un encastrement ou un semi-encastrement, voire une articulation. A cette fin l'essai portera sur un test de flexion du portique qui simulera la mise en situation de ce portique avec des charges équivalentes à un usage en bureaux (plus défavorables que des charges d'exploitation pour des logements que notre trame universelle serait également susceptible de reprendre). La longueur de clavetage va aussi influencer la raideur de l'assemblage : plus la longueur est importante, moins l'assemblage est raide. On cherchera à limiter la longueur de clavetage également pour maximiser la quantité de béton non détruite et réemployable. Par ailleurs, pour assurer la continuité des efforts au nœud d'assemblage, les ferrillages respectivement de la poutre et du poteau devront se recouvrir convenablement au niveau de la connexion.

Les paramètres principaux à déterminer lors des essais sont donc :

- La raideur par rapport à la longueur de clavetage
- La raideur par rapport au type de recouvrement (crosses ou droits)
- La raideur par rapport à la qualité de béton du clavetage (C25/30, C40/50, C60/75)

Les différents types de recouvrement sont illustrés en Figure IV. 1.

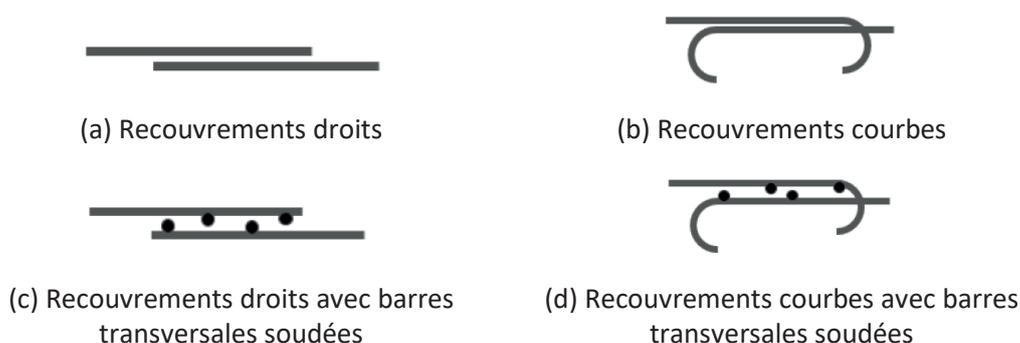


Figure IV. 1 : Les différents types de recouvrement de ferrillage pour assurer la transmission des charges

4.1.3. Le choix des matériaux

La question de la qualité du béton des éléments courants reste ouverte. Au dire d'experts de l'équipe structures complexes de setec tpi, la recherche d'un béton de haute qualité n'est pas pertinente partout. Ainsi dans une poutre, à la différence d'un poteau, le facteur limitant n'est pas la résistance du béton mais celle des armatures. Autrement dit, avec une poutre en C60/75 nous aurons toujours à peu près les mêmes quantités de béton et d'armatures qu'une poutre en C30 ou C40/50. Ce n'est donc pas intéressant d'utiliser un BHP à la fois du point de vue économique (un m³ de C60/75 coûte plus cher qu'un m³ de C40/50) ni du point de vue environnemental si on utilise la même quantité de béton dans la poutre (un m³ de C60/75 possède un facteur d'émissions plus élevé qu'un m³ de C40/50). Par ailleurs, les BHP ne sont pas des bétons très standards : toutes les centrales à béton ne savent pas les produire couramment. Dans la pratique cela peut être difficile de disposer de C60/75 et c'est encore plus difficile pour les C80 car l'offre n'est pas très développée sur le territoire.

Néanmoins, pour les éléments porteurs verticaux, l'usage d'un BHP est beaucoup plus justifié. Dans les projets d'IGH (Immeubles de Grande Hauteur) que l'on rencontre au sein de setec tpi, augmenter la qualité de béton permet de plus, de réduire la taille des poteaux, et donc de libérer de la place au sol. Diminuer l'emprise au sol permettra ainsi de disposer d'une plus grande surface exploitable. Le gain économique immobilier justifie alors la rentabilité de l'utilisation d'un BHP, pourtant plus cher qu'un béton courant. De plus, pour les verticaux, c'est bien le béton qui sera le facteur limitant, il y a donc un grand intérêt à augmenter sa qualité. Pour reprendre une même contrainte, la quantité de BHP nécessaire sera plus faible que pour un béton courant et vient compenser le dosage plus élevé en ciment. Ainsi, le facteur d'émission de GES (gaz à effet de serre) d'un poteau d'IGH en BHP sera plus faible qu'en béton ordinaire.

Enfin, dans l'optique d'un réemploi, un paramètre déterminant peut être celui de la durabilité. Or les bétons à hautes performances présentent une meilleure durabilité que les bétons ordinaires, comme nous l'avons expliqué dans le chapitre II, partie 2.1.4.2. d'après Malier et al. [3]. Augmenter la qualité d'un béton, c'est donc également augmenter sa durée de vie et son nombre de cycles d'usages de réemploi.

Dans le cadre particulier des essais sur les portiques, il sera cependant intéressant de raidir l'élément horizontal de la poutre afin que l'on observe bien la différence avec le béton de l'assemblage lorsqu'il sera de qualité inférieure. L'utilisation d'un C60/75, en poteau comme en poutre, permettra donc pendant les essais, de réellement tester la résistance de l'assemblage et de minimiser le risque d'une éventuelle rupture en milieu de travée de poutre du portique.

4.1.4. Choix des zones d'assemblages

Compte tenu du schéma statique du portique, une hypothèse aurait été de mieux tenir compte du lieu des moments faibles dans la poutre pour y situer les assemblages. Pour rappel, sur la Figure IV. 2, on peut observer deux points de moments nuls dans la poutre. Cependant, cette disposition aurait présenté l'inconvénient de décomposer la poutre en trois morceaux de courtes longueurs, complexifiant les manipulations pour l'étape de déconstruction et de reconstruction.

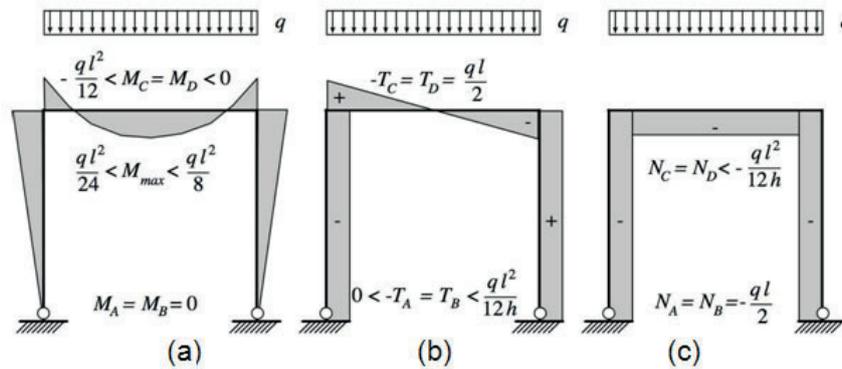


Figure IV. 2 : Portique à deux montants rotulés sous chargement uniforme de la poutre :
 (a) diagramme du moment, (b) diagramme de l'effort tranchant, (c) diagramme de l'effort normal,
 d'après explorations architecturales ¹.

En parallèle, le choix de positionner l'assemblage en bout de poutre permet de sauvegarder l'intégrité du poteau que l'on souhaite continu sur deux étages (cf Chapitre II). De plus les efforts repris par les poteaux des niveaux inférieurs sont très importants et il aurait été plus difficile d'y prévoir un assemblage réversible. La Figure IV. 3 illustre ce principe. Dans la réalité, le positionnement de l'assemblage sera également conditionné par des considérations de méthode de construction.

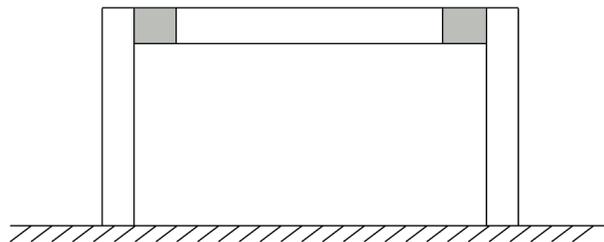


Figure IV. 3 : Principe du portique avec les zones de clavetage en gris.

4.1.5. Difficulté de modélisation théorique

Le moment de flexion est dépendant de la raideur, et la raideur est elle-même directement liée aux dispositions des armatures. Or le positionnement des armatures découle également du moment, ce qui induit un processus itératif. Dans notre cas la longueur de clavetage et la longueur de recouvrement vont varier en fonction du type de béton et du type de recouvrement. La méthode consiste alors pour tous ces paramètres à tester différentes valeurs afin de les confronter entre elles. L'introduction de crochets ou de barres transversales soudées (visibles sur la Figure IV. 1), au lieu de simples barres droites, permet de réduire l'ancrage et donc de diminuer la longueur de clavetage. La combinaison des recouvrements courbes avec les barres transversales soudées est celle qui permet de réduire le plus la longueur de clavetage.

¹ http://explorations-architecturales.com/data/new/ficheSimple_95.htm, consulté le 13/03/2020.

4.2. Définition des paramètres expérimentaux

Comme évoqué précédemment, un tel assemblage (clavage béton) peut être considéré comme un assemblage semi-rigide. Il convient donc d'interroger les paramètres suivants par des essais :

- L'observation d'une différence de raideur d'assemblage selon les portiques et son évolution
- L'influence de la longueur pratique de recouvrement et le type de ce recouvrement
- L'influence de la qualité du béton de cette zone de clavetage
- Le comportement du portique après démolition de la zone de clavetage et reconstruction de cette zone

Pour ce faire, les portiques seront testés en reconstituant une sollicitation proche de la fonction structurale des portiques dans un bâtiment, c'est-à-dire supporter une charge d'exploitation (bureaux, logements, etc.) au niveau de la poutre du portique qui la transmettra aux deux poteaux du portique. Lors des essais nous allons donc appliquer une force sur cette poutre qui fonctionnera alors en flexion. Nous pourrions également, de fait, vérifier la bonne mise en œuvre du portique.

4.2.1. Formulation des bétons

Ainsi, quatre portiques en U inversé avec des zones de clavage, en gris sur la Figure IV. 3, ont été dimensionnés en concertation avec les contraintes techniques de l'usine (notamment disponibilité de béton) puis réalisés en usine de préfabrication :

- Un portique 1 : béton courant en C60/75, béton de clavetage en C25/30, recouvrements avec crosses
- Un portique 2 : béton courant en C60/75, béton de clavetage en C60/75, recouvrements droits
- Un portique 3 : béton courant en C60/75, béton de clavetage en C60/75, recouvrements avec crosses
- Un portique 4 : béton courant en C60/75, béton de clavetage en C40/50, recouvrements avec crosses

On considérera des armatures de type B500B. La zone de clavage, où les armatures se recouvrent, sera détruite puis reconstruite selon une technique qu'il faudra spécifiquement mettre au point lors du protocole expérimental puisqu'il s'agit d'une opération inédite en vue d'un réemploi.

4.2.2. Définition de l'essai de flexion

Le laboratoire Navier dispose d'une presse, illustrée en partie 4.3.2 avec un vérin d'une capacité de 450 kN max qui travaille à déplacement contrôlé. Celui-ci permettra de réaliser des essais dans l'objectif d'orienter et de valider la modélisation et la méthode de calcul introduite pour l'évaluation de la raideur et la résistance de l'assemblage béton. Une force sera donc appliquée par le vérin sur la poutre à mi-travée pour générer la sollicitation recherchée : la flexion. Un contreventement latéral du portique est appliqué.

Lors de la réalisation de ces deux phases d'essais, il faut pouvoir enregistrer des informations concernant : les déplacements, les déformations et les raideurs. Ces données seront obtenues par mesure de déplacements de capteurs et de déformations de jauges. Ainsi les données mesurées lors de l'essai pourront être comparées aux données des modèles théoriques pour les points suivants :

- Vérification du comportement en encastrement de l'assemblage poteau-poutre selon : les déplacements et la flèche à mi-travée, le moment de fissuration, la rotation du nœud, ce qui nous indiquera également si les portiques ont été correctement réalisés.

- Vérification du comportement de l'assemblage entre la 1^{ère} phase d'essais (avant déconstruction/ reconstruction) et la 2^{ème} phase d'essais (après déconstruction/ reconstruction) en comparant les valeurs respectives, afin de savoir si la déconstruction a engendré des dommages structuraux ou non.

4.2.3. Dimensions des corps d'épreuve

Afin de coïncider avec les dimensions de la presse du laboratoire, il convient de réaliser les portiques à échelle réduite de rapport 1/3, car la hauteur maximale du corps d'épreuve est de 1,5m pour pouvoir être testé dans ces installations. Une première étape consistait à estimer l'effort F à l'ELU et l'ELS à appliquer sur le modèle à l'échelle 1/3. Un recalibrage est réalisé à partir de la contrainte dans le portique du bâtiment réversible déterminé dans la partie 2.3.2. du chapitre II, dans l'objectif d'obtenir le même niveau de fissuration qu'à l'échelle 1. On obtient alors avec les règles de RDM : $F = 156 \text{ kN}$ à l'ELU et $F = 113 \text{ kN}$ à l'ELS (un modèle numérique réalisé avec le logiciel de calculs Pythagore donne les mêmes résultats) pour retrouver le même niveau de sollicitation que dans le portique à l'échelle 1. A partir de cet effort, un dimensionnement est alors réalisé.

Il faut également prendre en compte les aciers d'effort tranchant qu'il faudra ligaturer lors de la construction et démonter lors de la déconstruction.

Quatre portiques sont donc à tester et présentent chacun les dimensions suivantes : 2m85 en longueur ; 1m40 de haut ; 0m35 d'épaisseur, comme indiqué sur la Figure IV. 4. Les plans détaillés des 4 portiques sont disponibles en annexes.

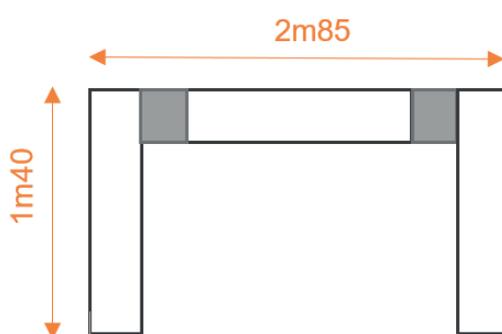


Figure IV. 4 : Encombrement du portique.

Le principe est donc de prévoir des armatures sortant des extrémités de la poutre mais aussi sortant du poteau, puis d'assembler ces armatures longitudinales avec des armatures transversales afin de procéder au coulage du béton de clavetage. L'enjeu est bien de récupérer, après démolition partielle, les éléments poutres et poteaux indépendamment, visibles sur la droite de la Figure IV. 5.

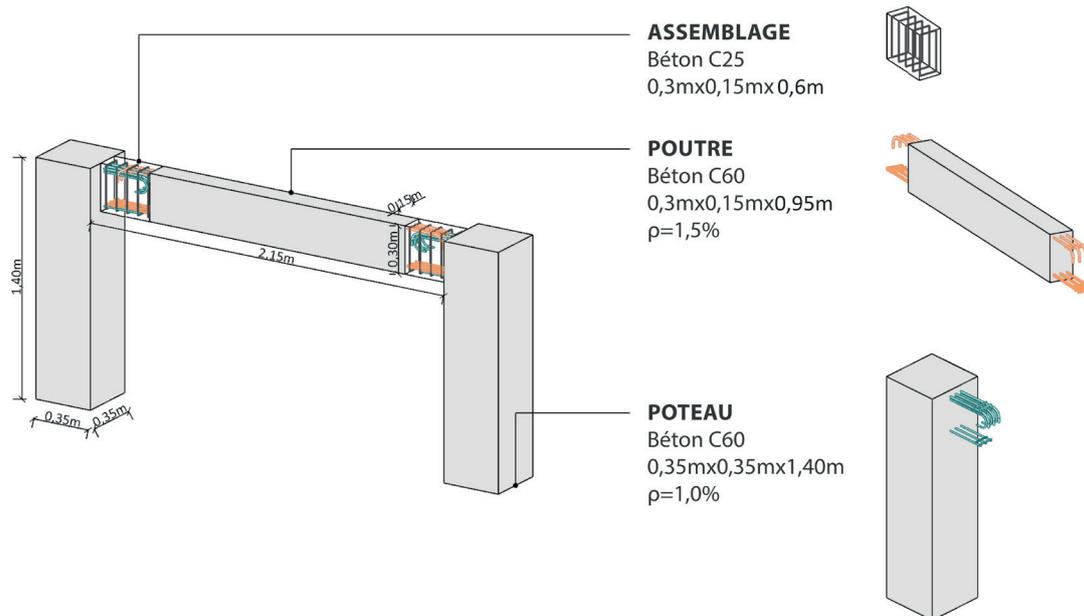


Figure IV. 5 : 3D du portique assemblé et des éléments récupérés après déconstruction.

4.2.4. Ferrailage et plans d'exécution

Le dimensionnement à l'échelle 1/3 a été réalisé selon les paramètres propres à chacun des portiques. Les longueurs de recouvrement et de clavetage retenues pour la fabrication en fonction du type d'assemblage sont reprises dans le Tableau IV. 1:

Portiques	Longueur de clavetage	Longueur de recouvrement
Portique 1, clavetage en C25/30, recouvrements avec crosses	0,6 m	0,562 m
Portique 2, clavetage en C60/75, recouvrements droit	0,69 m	0,65 m
Portique 3, clavetage en C60/75, recouvrements avec crosses	0,45 m	0,41 m
Portique 4 : clavetage en C40/50, recouvrements avec crosses	0,49 m	0,452 m

Tableau IV. 1 : Longueur de clavetage et de recouvrement des armatures pour chacun des portiques

Un exemple de détails pour l'exécution est donné pour le portique 1 en Figure IV. 6, et les autres géométraux sont disponibles en annexes.

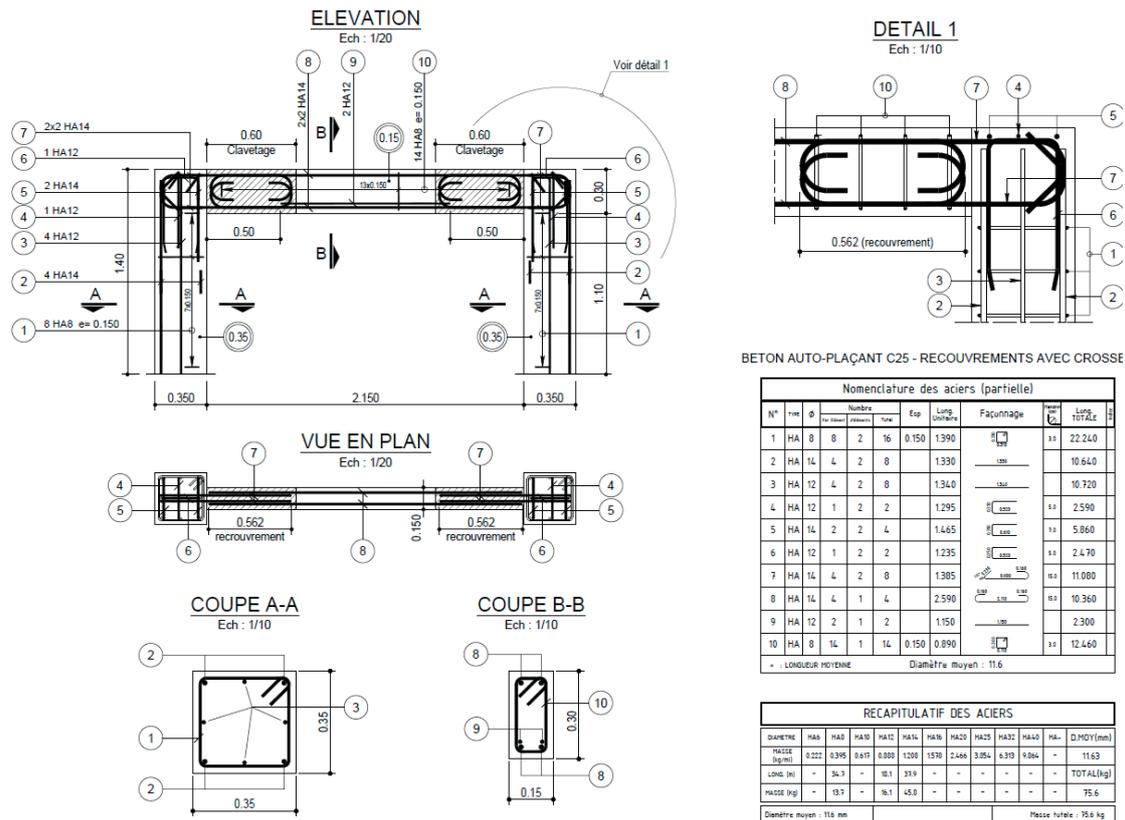


Figure IV. 6 : Plans d'exécution du portique 1.

4.2.5. Réalisation des corps d'épreuve

4.2.5.1. Informations pour l'exécution

Un point d'attention est à apporter dans le cadre du réemploi, donc de la déconstruction puis reconstruction, en ce qui concerne la gêne entre les lits d'armatures et les crochets, notamment lors des assemblages et désassemblages. Un plan de séquences de montage/démontage, en 3D, doit accompagner les dessins de détails pour la fabrication, comme illustré en Figure IV. 7 et Figure IV. 8. Cette séquence d'assemblage pourrait également faire l'objet d'une modélisation avec un logiciel BIM au titre du phasage de construction/déconstruction, avec une animation permettant d'illustrer la mise en œuvre.

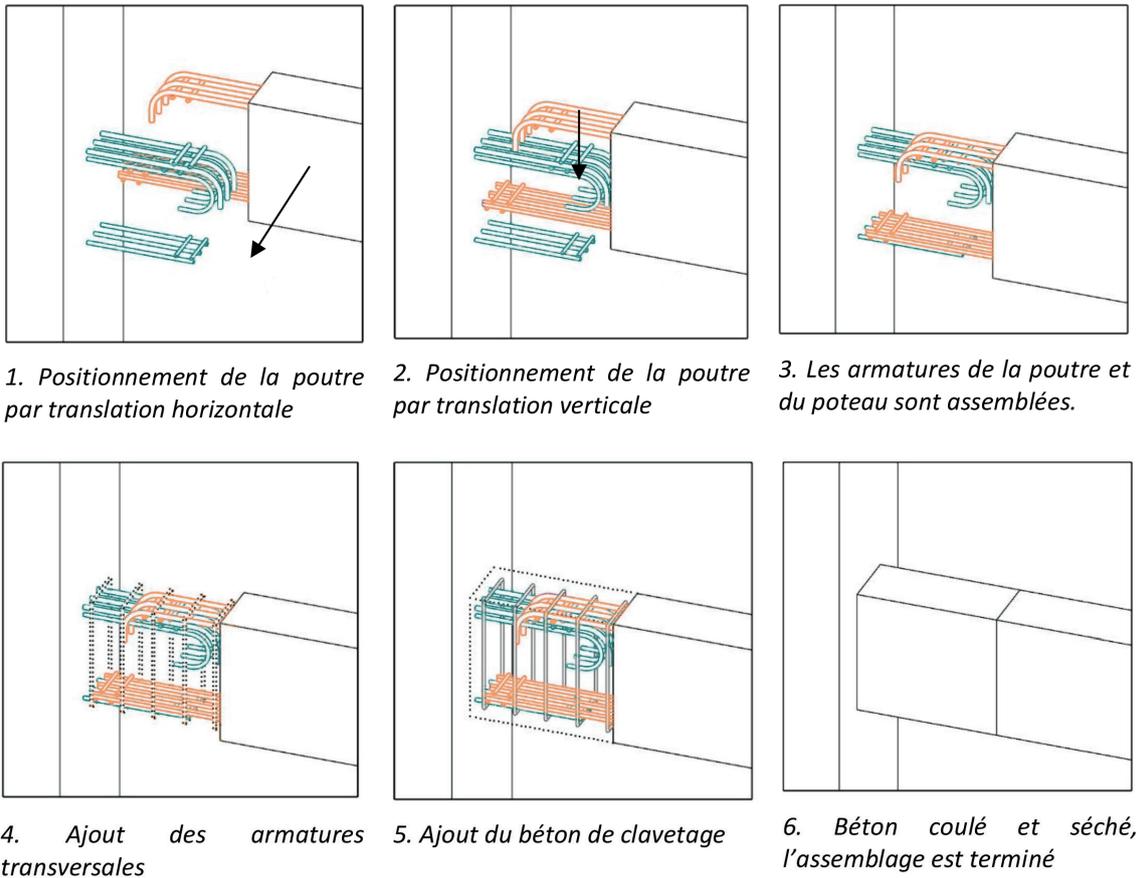


Figure IV. 7 : Séquence d'assemblage proposée pour éviter les gênes entre les armatures (3D).

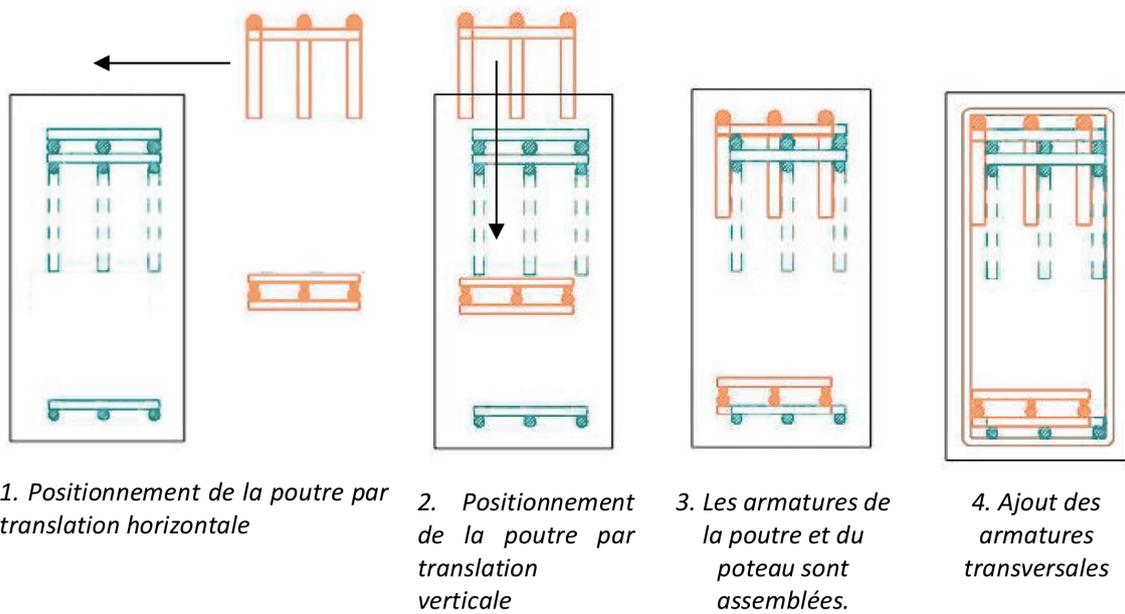


Figure IV. 8 : Séquence d'assemblage proposée pour éviter les gênes entre les armatures (2D, coupe dans la section de l'assemblage).

4.2.5.2. Contrôle de l'exécution

L'usine de préfabrication, où ont été fabriqués les portiques pour les essais, dispose de plusieurs sites dont l'un dédié au façonnage des armatures. Toutes les cages d'armatures ont ainsi été préparées sur site, comme on peut le voir Figure IV. 9 et Figure IV. 10.

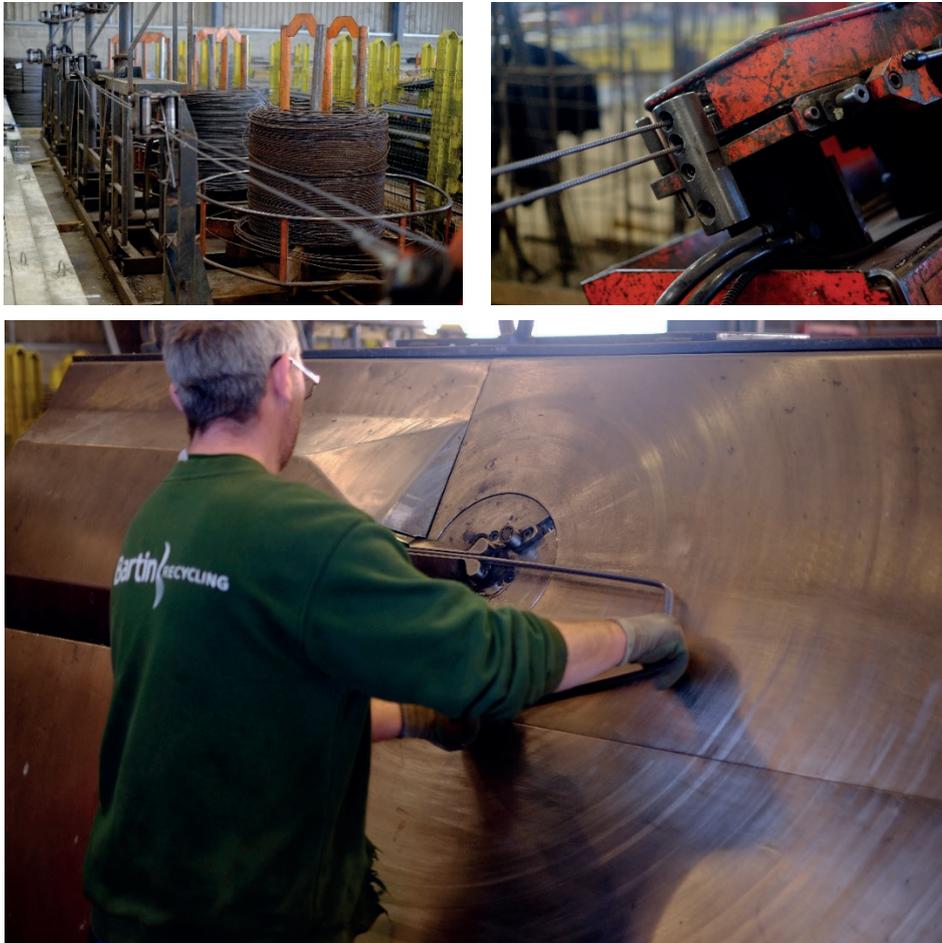


Figure IV. 9 : Façonnage des armatures à l'usine « ABPC préfa ».

Les ferrailages des éléments courants en béton ont ensuite pu être contrôlés avant l'arrivée de la toupie à béton. Les principaux points de contrôles sont rappelés ici :

- L'indice de plan doit être le dernier émis
- Le type de barre doit correspondre aux indications du plan
- L'enrobage doit être suffisant avec une distance entre la barre et le bord du moule d'environ 2cm.
- Les dimensions générales du coffrage doivent être mesurées
- Les barres centrées doivent être effectivement au centre
- Les types de recouvrement doivent être corrects mais surtout la longueur de recouvrement doit être la bonne

Il est donc nécessaire d'être bien vigilant lors de la fabrication et de pouvoir prendre les mesures pour vérifier la conformité avec des plans préalablement annotés.

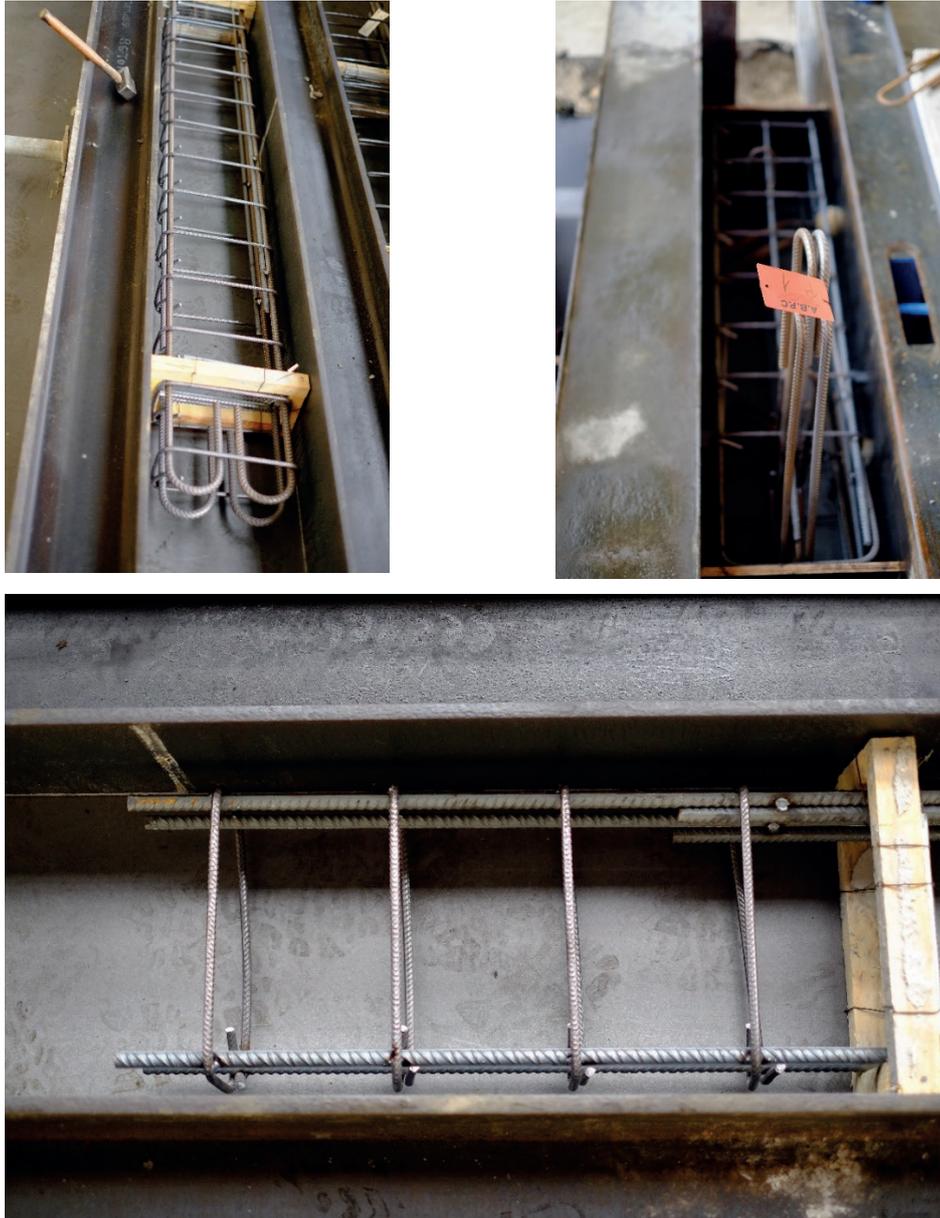


Figure IV. 10 : Contrôle du ferrailage et de l'arrêt du béton aux zones de clavetage.

4.2.5.3. Traçabilité des éléments

Les recommandations émises dans le Chapitre III ont été appliquées dans le cadre de ce protocole expérimental. Les portiques ont fait l'objet d'une modélisation 3D avec le logiciel BIM Revit et les caractéristiques mécaniques ont pu être attachées aux objets BIM selon les LOD/LOI 700 définis dans le Chapitre III. Un partenariat avec la start-up 360 SmartConnect a permis d'équiper chacun des éléments de structure (chaque poutre et chaque poteau) d'une puce RFID contenant les informations structurales indispensables à leur traçabilité à long terme. La puce RFID, en vert fluo sur la Figure IV. 11, est attachée à un marqueur blanc qui affleure à la surface du béton une fois décoffré. Ce marqueur permet de repérer facilement l'emplacement de la puce et de la maintenir à une distance proche de la surface pour être détectée via un smartphone et la technologie NFC.

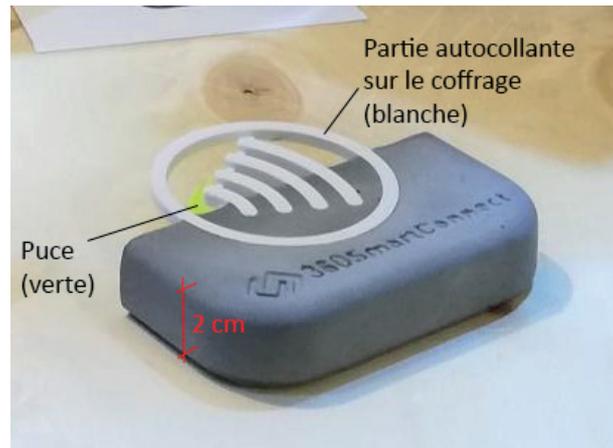


Figure IV. 11 : Puce RFID développée par "360 Smart Connect".

Ces puces RFID ont été collées en fond de moule avant le coulage du béton. Ces puces sont bon marché et il est possible de les incorporer facilement sans gêner le protocole de préfabrication. Sur la Figure IV. 12, on peut distinguer la puce disposée en fond de coffrage avant l'arrivée du béton.



Figure IV. 12 : Puce RFID préparée en fond de coffrage avant le coulage du béton.

SmartConnect propose d'héberger un grand nombre de données sur le cloud dont l'accès se fait en scannant la puce directement avec le smartphone. Il est alors possible d'organiser les données comme on le souhaite et de renvoyer vers une infinité de documents, comme des vidéos, une maquette 3D, une localisation. Un exemple des données attachées pour le portique 1 est présenté en Figure IV. 13. La démarche a été reproduite pour chacun des portiques. Ainsi, lorsque l'on scanne la puce du poteau droit du portique on peut accéder, par exemple, à la nomenclature complète des données relatives au rôle structural de l'élément, au modèle BIM du portique via un *viewer* permettant de mesurer, annoter, etc., au plan de ferrailage et aux détails techniques, ...

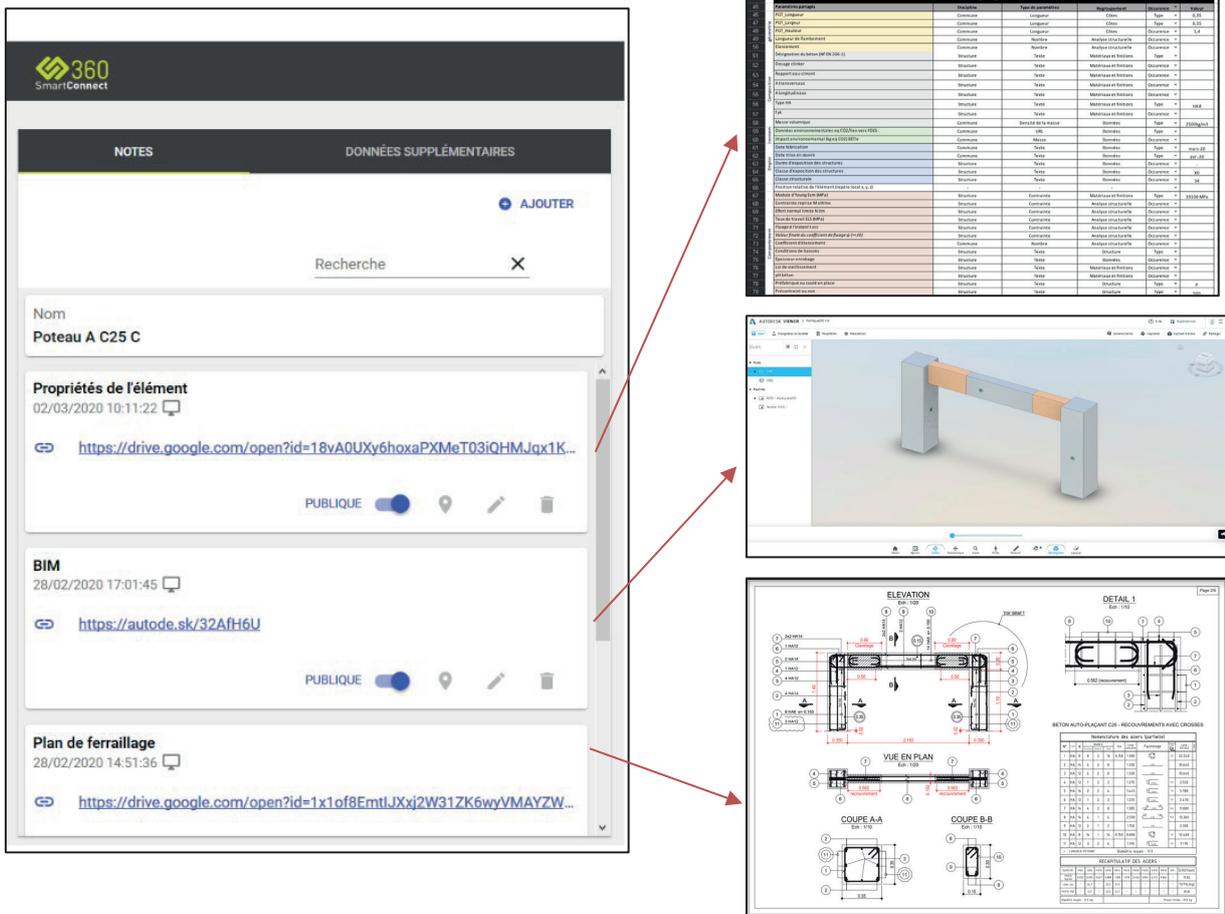


Figure IV. 13 : Extrait des données attachées à la puce contenue dans le poteau gauche du portique 1.

Comme évoqué précédemment, les données numériques sont relativement incertaines à très long terme puisqu'il s'agit d'une technologie encore récente et que l'on cherche à pérenniser la donnée à très long terme (au moins 20 ans mais jusqu'à plus de 100 ans). On ne peut pas garantir aujourd'hui que l'on sera encore en mesure d'ouvrir un fichier issu du BIM dans 20 ans, c'est pourquoi il est nécessaire de doubler ou de tripler les supports de données par sécurité. Ainsi la puce possède également la possibilité d'être gravée de manière irréversible en propre mais pour une très petite quantité de caractères. Ces données propres ne seront pas accessibles via le cloud, il faudra un lecteur spécifique pour lire les *tags* RFID.

Pour les données à graver il faut donc prévoir une nomenclature très efficace pour réduire le nombre de caractères (100) en maximisant le nombre d'informations. Seules les données « critiques » pour un réemploi structural sont ici retenues. Un exemple, que nous proposons, est donc donné dans le Tableau IV. 2, toujours pour ce portique 1 à partir du code suivant de 96 caractères :

L0.35I0.35H3_C60/75_XF1_22,4_S4_C10,40_SPHRE_CEM152.5N_XC1_S4_CO13_TT15_L
IA_LF2_PRO_MO22.04.2020

Les « _ » séparent les différents types d'informations.

Nomenclature pour données à graver

Dimensions de l'élément	L0.35	Longueur de la section
	I0.35	largeur de la section
	H3	Hauteur du poteau
Caractéristiques du béton	C60/75	Classe de résistance à la compression
	XF1	Classe d'exposition
	22,4	Granularité
	S4	Classe de consistance
	Cl0,40	Classe de teneur en chlorures
	SPHRE	Type d'adjuvant
Caractéristiques du ciment	CEMI	Type de ciment
	52.5	Classe de résistance normalisée
	N	Sous-classe normale
Caractéristiques du bâtiment	XC1	Classe d'exposition
	S4	Classe structurale
Comportement structural de l'élément	CO13	Contrainte reprise en MPa
	TT15	Taux de travail ELS en MPa
	LIA	Type de liaison (A pour articulé ou E pour encastré)
	LF2	Longueur de flambement (LF suivi de la valeur en mètres)
	PRO	Précontrainte (0= pas de précontrainte et 1= précontraint)
Durée de vie	MO22.04.2020	Date de mise en œuvre (MO suivi de la date)

Tableau IV. 2 : Proposition de nomenclature pour le code à graver sur *tags* RFID pour un poteau en béton armé.

Ce type de nomenclature doit bien sûr être compris de l'ensemble des acteurs, en particulier de l'ingénieur génie civil et doit faire l'objet d'un consensus. Cependant une grande partie des informations provient de la désignation normalisée du béton de la norme NF EN 206/CN, ce qui permet d'utiliser un langage déjà commun et répandu.

4.2.5.4. Conformité du béton mis en œuvre

Les bétons mis en œuvre ont été contrôlés conformément aux normes d'essais dans un laboratoire. Il faut noter que la réalisation des portiques a été interrompue par la crise covid-19, c'est pourquoi la durée entre les dates de coulage des différents bétons de portiques et les essais est parfois importante, ce qui n'est pas le cas pour un chantier classique. Le Tableau IV. 3, qui suit, indique les résultats pour chaque béton :

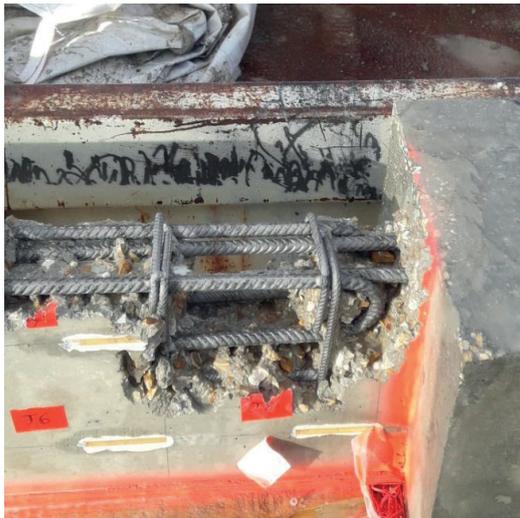
Emplacement béton	Clavetage portique 1	Clavetage portique 4	Eléments courants portique 1 et 2	Clavetage portique 2 et 3
Type de béton	BPS XF1 C25/30 CEMII/A42,5 22.4 GG S3 CI040 Liant équivalent	BPS XF1 C40/50 CEMII/A42,5 22,4 GG S3 CI040 Liant équivalent	BPS XF1 C60/75 CEM I 52,5 22.4 Gros S4 CI 0.40 Liant équivalent	BPS XF1 C60/75 CEM I 52,5 22.4 Gros S4 CI 0.40 Liant équivalent
Date coulage	24/04/2020	13/05/2020	13/03/2020	15/05/2020
Type moule	Carton	Carton	Carton	Carton
Mise en place	Vibration	Vibration	Vibration	Vibration
Date essai	25/05/2020	10/06/2020	18/05/2020	12/06/2020
Age	31j	28j	66j	28j
Type essai	Compression	Compression	Compression	Compression
Type éprouvette	Cylindre 16x32	Cylindre 16x32	Cylindre 16x32	Cylindre 16x32
Masse (kg)	14,35	14,71	15,05	15,12
Masse volumique (kg/m3)	2230	2290	2340	2350
Rupture (kN)	594	854	1257	1149
Résistance (MPa)	29,7	42,7	62,8	57,4

Tableau IV. 3 : Synthèse des rapports d'essais du béton utilisé pour la fabrication des portiques

4.2.5.5. Processus de déconstruction

Afin de conserver au mieux les armatures qui seront réemployées, la technique de l'hydrodémolition a été préférée à celle d'une action mécanique telle celle d'un marteau-piqueur. En effet après avoir consulté les entreprises de démolition, elles nous ont confirmé que la technique du marteau-piqueur pouvait détériorer plus ou moins réversiblement les armatures (plus ou moins tordues). Bien qu'il soit possible de les redresser une fois, il n'est pas recommandé, en vue du réemploi sur plusieurs cycles, de remettre en œuvre des armatures qui auront été pliées et redressées précédemment. L'hydrodémolition, quant à elle, permet de détruire le béton en laissant les armatures intactes. Cette adaptation d'une technique de démolition en une technique de déconstruction en vue d'un réemploi, est inédite.

L'expérimentation permet donc de formuler un premier retour d'expérience en la matière. Ainsi sur la Figure IV. 14, on peut apercevoir l'assemblage du portique, avant et après, ce que l'on pourrait qualifier d'« hydrodéconstruction ». On constate que les armatures n'ont subi aucun dommage.



Assemblage en cours d'hydrodémolition



Assemblage hydrodémoli

Figure IV. 14 : Photos du processus d'hydrodéconstruction

4.3. Dispositifs des essais de flexions

4.3.1. Dispositif de mise en charge

Chacun des portiques a été placé sur la dalle d'essai, qui dispose de perçages pour l'installation d'une platine d'ancrage. Les appuis du portique seront articulés pour limiter la concentration de contraintes dans cette zone. Les dispositions de la presse nous permettent d'envisager un contreventement latéral du portique par l'intermédiaire de butons placés dans les réservations de la plate-forme.

Des boîtes à sable ont été réalisées et fixées à la dalle pour accueillir les pieds du portique, selon la Figure IV. 15. Il faut que le pied de portique entre bien dans la boîte en tenant compte des tolérances de fabrication du béton. Ces boîtes à sable sont donc constituées de 4 cornières de 50 mm soudées à une plaque, avec une marge de 5 mm pour accueillir le pied de portique et sont remplies de 3 cm de sable de Fontainebleau. Ainsi les pieds des portiques sont protégés et les défauts d'irrégularité de réalisation du béton sont rattrapés avec le tassement du sable. Ces boîtes à sable reconstitueront les conditions d'une articulation en pied et assurent la rotation en pied. Une fois le portique en place, la boîte est « refermée » avec du silicone pour confiner le sable (Figure IV. 16).

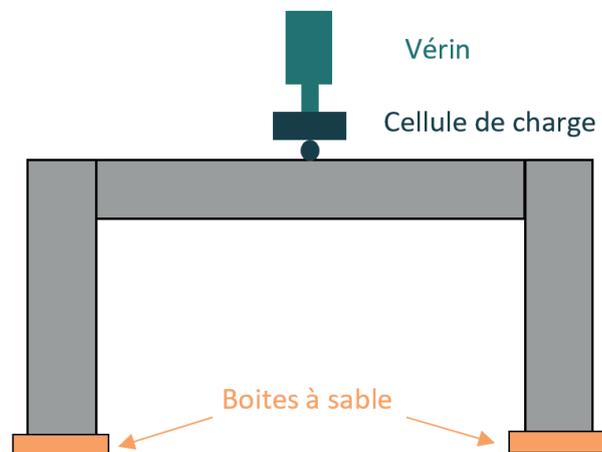


Figure IV. 15 : Dispositif de chargement et boîtes à sable en pieds de portique.



Figure IV. 16 : Confinement du sable avec du silicone, après la mise en place du portique.

Pour compléter le dispositif, les déplacements horizontaux des pieds de portiques doivent être bloqués. En effet pour réellement fonctionner statiquement comme en portique, il faut que les pieds soient rotulés (grâce aux boîtes à sable) mais aussi bloqués à l'horizontale, comme on peut le voir sur le schéma de RDM en Figure IV. 17.

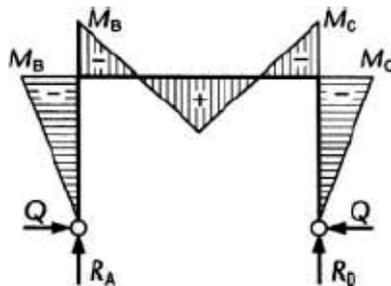
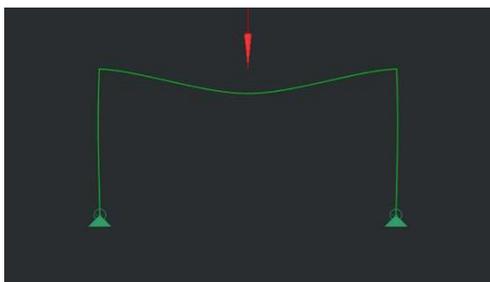
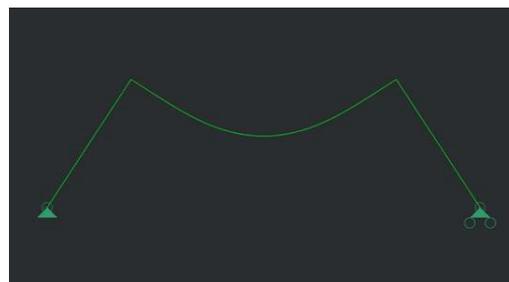


Figure IV. 17 : Schéma RDM des moments et des réactions pour un portique articulé en pied

Si le déplacement horizontal n'est pas correctement bloqué en pied le schéma statique risque de s'apparenter à une poutre sur deux appuis simples et les assemblages ne seraient pas suffisamment mobilisés (ce qui est pourtant l'objectif de l'essai). Ci-après en Figure IV. 18, l'allure des déformées avec et sans blocage.



Allure de la déformée avec blocage en pied



Allure de la déformée sans blocage en pied

Figure IV. 18 : Allure de la déformée en fonction de liaison en pied, logiciel Pythagore

Selon la formule de RDM, rappelée ci-après (Equation IV. 1), on obtient la valeur suivante pour l'effort horizontal :

$$Q = \frac{3Pl}{8Nh}$$

Equation IV. 1 : Formule de calcul de l'effort horizontal en pied du portique, selon le tab.30 du formulaire [4].

Dans le cas de notre essai, l'effort horizontal à bloquer en pied a donc pour valeur 16kN. Pour bloquer cet effort un renforcement au niveau de la platine d'ancrage a été prévu, comme on peut le voir Figure IV. 19.

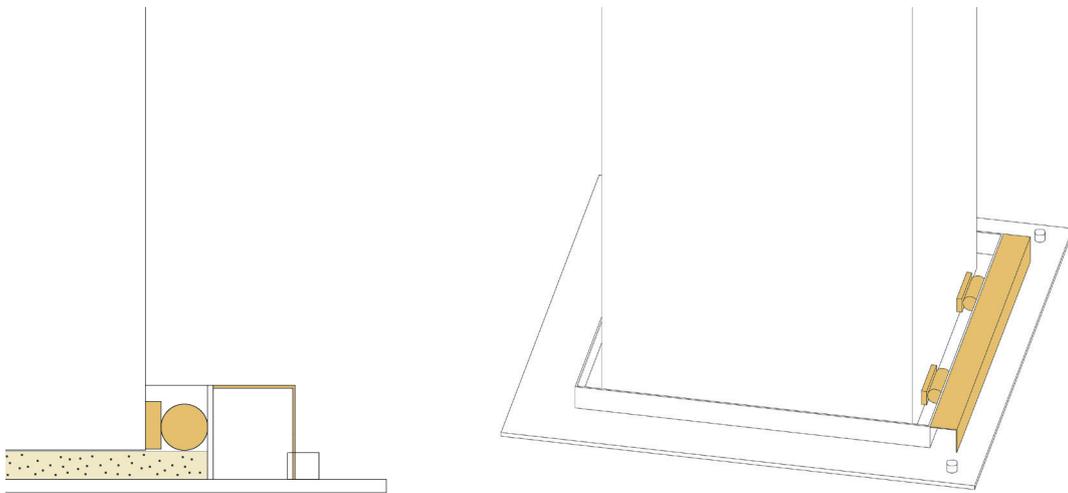


Figure IV. 19 : Dispositif de reprise de l'effort horizontal en pied de portique, sur la dalle d'essai

La force de chargement est fournie par un vérin d'une capacité de 450 kN max qui est piloté en vitesse de déplacement contrôlé. Lors du chargement, ce déplacement est contrôlé par un capteur extérieur et non par le capteur interne au vérin. Un bloc métallique accueillant un cylindre appuyant sur une plaque métallique posée sur la poutre permet de transmettre la force du vérin sur le portique, à mi-travée. Le détail du dispositif est visible en Figure IV. 20.



Figure IV. 20 : Détail d'appui du vérin

4.3.2. Dispositif de mesures

La zone d'étude peut être analysée par techniques d'imageries et de mesures. La force et la course du vérin, sont données en continu par le poste de commande (Figure IV. 21).

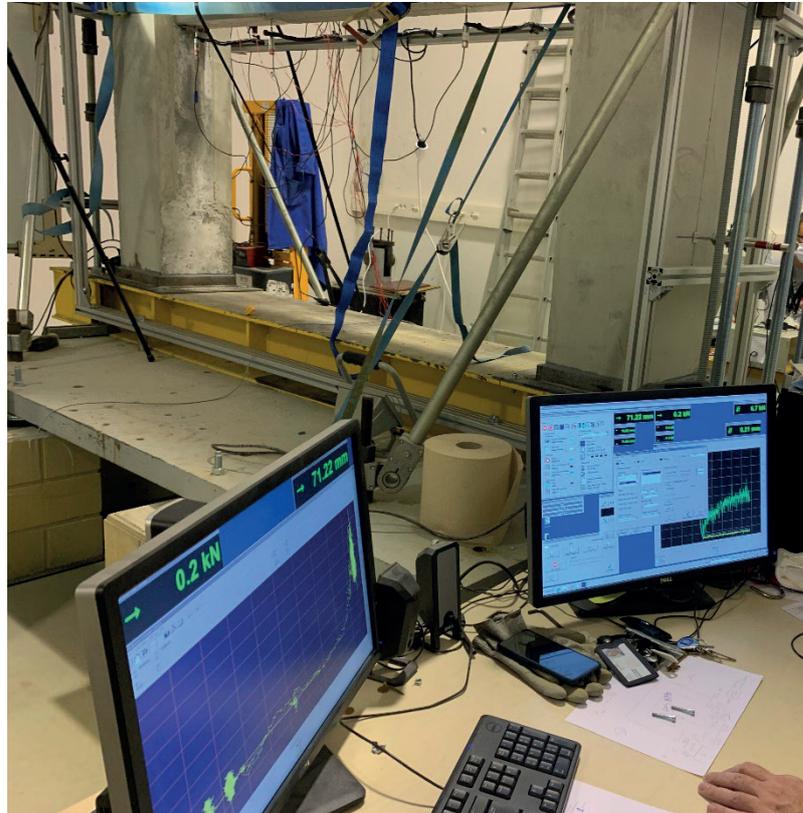
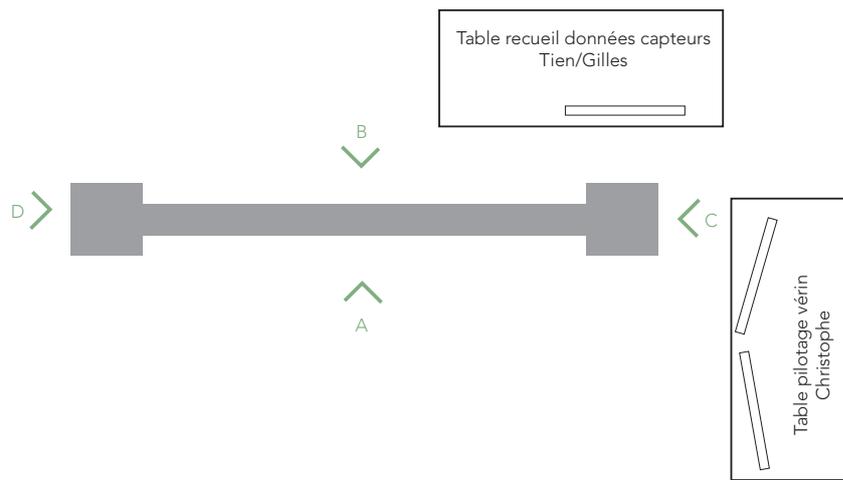


Figure IV. 21 : Poste de commande du vérin

Les déplacements sont mesurés par des capteurs disposés selon le plan indiqué en Figure IV. 22. Ces capteurs de type LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) ou transformateurs différentiels linéaires variables sont fixés sur une traverse. Pour obtenir des déplacements précis verticaux, il suffit de déduire la moyenne des déplacements des capteurs C10 et C11 de la valeur mesurée pour obtenir des mesures non entachées de déplacements parasites. Il sera ainsi possible de mesurer les déplacements verticaux à mi-travée, au niveau des assemblages, en haut des poteaux et horizontaux pour les déplacements latéraux.



Plan d'installation

Zone analyse
d'image

Plan d'instrumentation

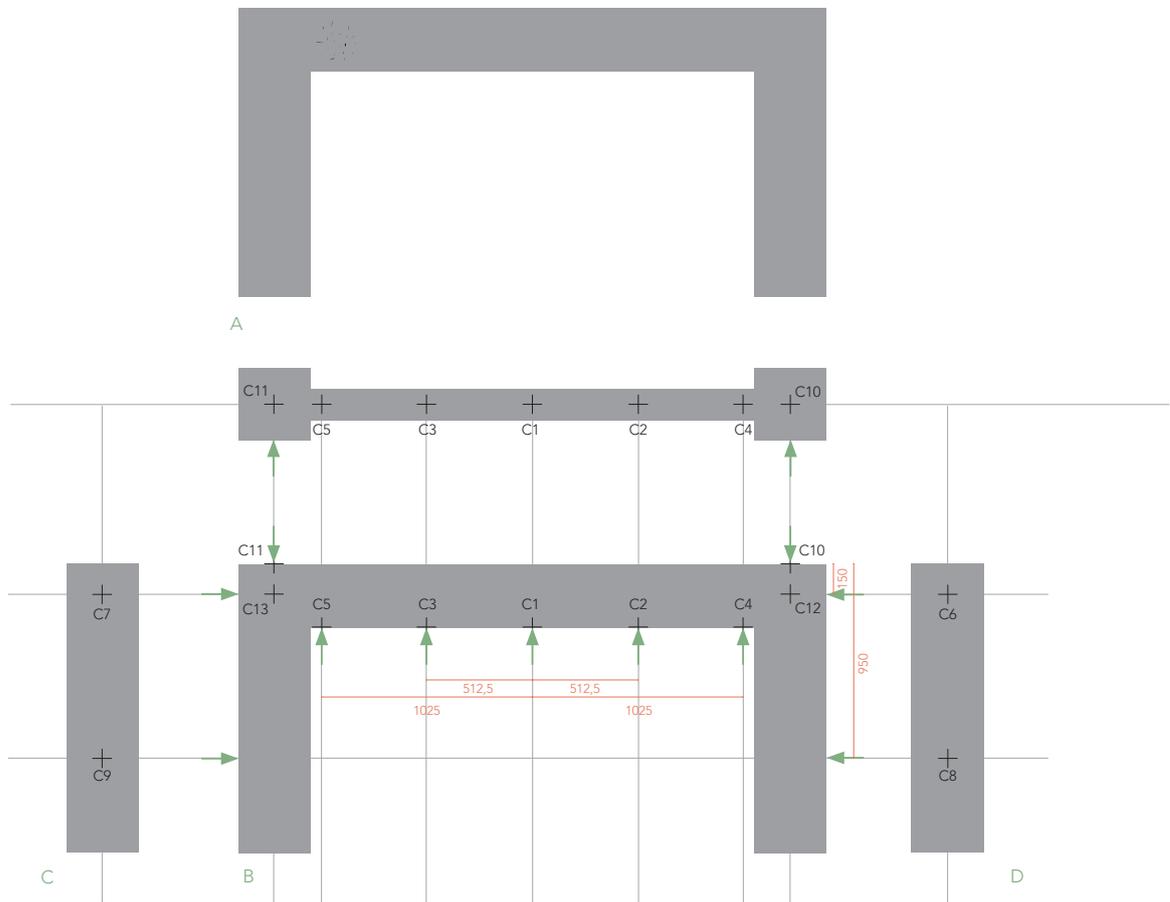


Figure IV. 22 : Plan de repérage de l'installation et d'implantation des 13 capteurs sur le portique.

Un détail du placement d'un de ces capteurs est visible en Figure IV. 23. Le détail du dispositif d'acquisition des voies de chaque capteur est disponible en annexes (fichier excel des voies d'acquisition capteur et jauges).

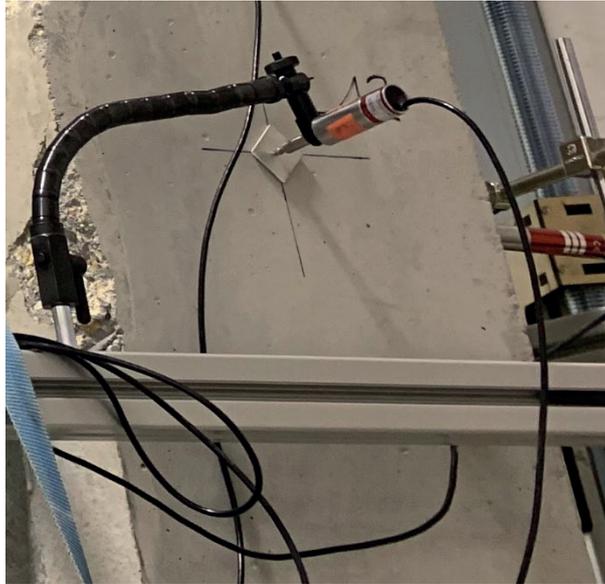


Figure IV. 23 : Détail d'un capteur permettant de mesurer le déplacement relatif.

Huit jauges permettront d'enregistrer les déformations au niveau d'une des deux zones d'assemblage, comme on peut le distinguer sur le plan en Figure IV. 24. Les différentes reprises de bétonnage au niveau des assemblages sont marquées par les traits verticaux jaune foncé pour chacun des quatre portiques. Les jauges sont collées sur le béton comme on peut le voir en Figure IV. 25. Il s'agit de jauges de 67 mm avec un facteur de déformation de 2,07 donné par le fabricant.

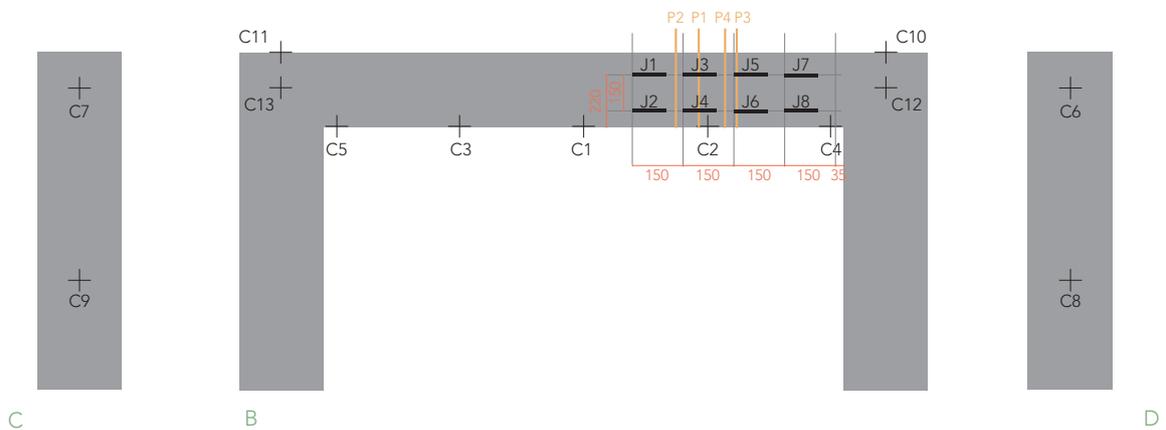


Figure IV. 24 : Plan d'implantation des 8 jauges sur le portique

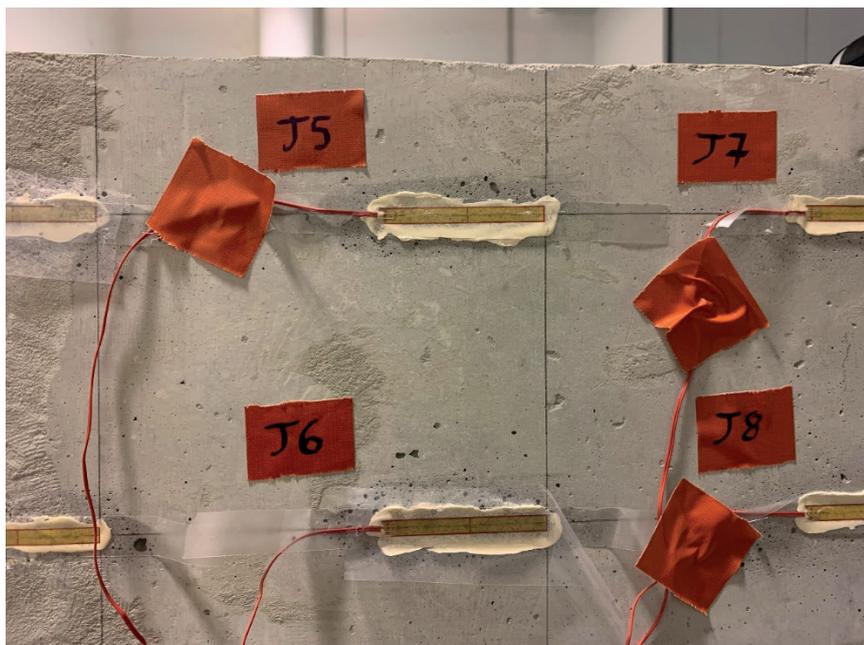


Figure IV. 25 : Détail des jauges

Les mesures par jauges et capteurs de déplacement relatifs sont accessibles instantanément pendant l'essai. Il sera donc possible d'analyser les déformations en post-traitement.

Enfin les fissures seront repérées visuellement par des traits de couleur, comme sur la Figure IV. 26, tout au long des différents chargements puisque l'information principale recherchée est le moment où le béton commencera à fissurer.



Figure IV. 26 : Repérage des fissures

Concernant la chaîne d'acquisition, au total huit jauges et 13 capteurs, soit 21 voies de signaux, auxquels s'ajoute le signal de la force du vérin et du déplacement du vérin, sont relevées via quatre centrales d'acquisition de signaux. On voit l'écran d'ordinateur avec l'interface du logiciel d'acquisition avant le début du chargement en Figure IV. 27.

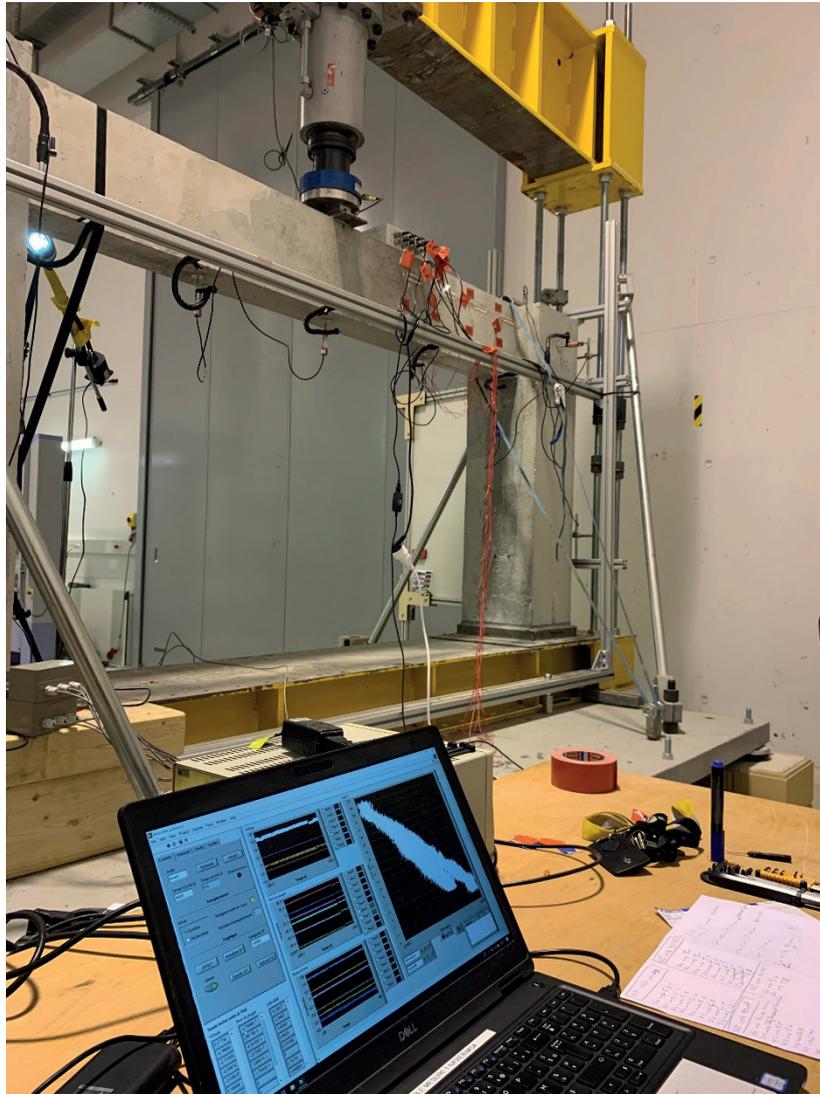


Figure IV. 27 : Logiciel d'acquisition pour l'enregistrement des valeurs de l'essai

Sur la Figure IV. 28 et Figure IV. 29 on distingue l'ensemble du dispositif d'instrumentation juste avant le commencement du chargement.

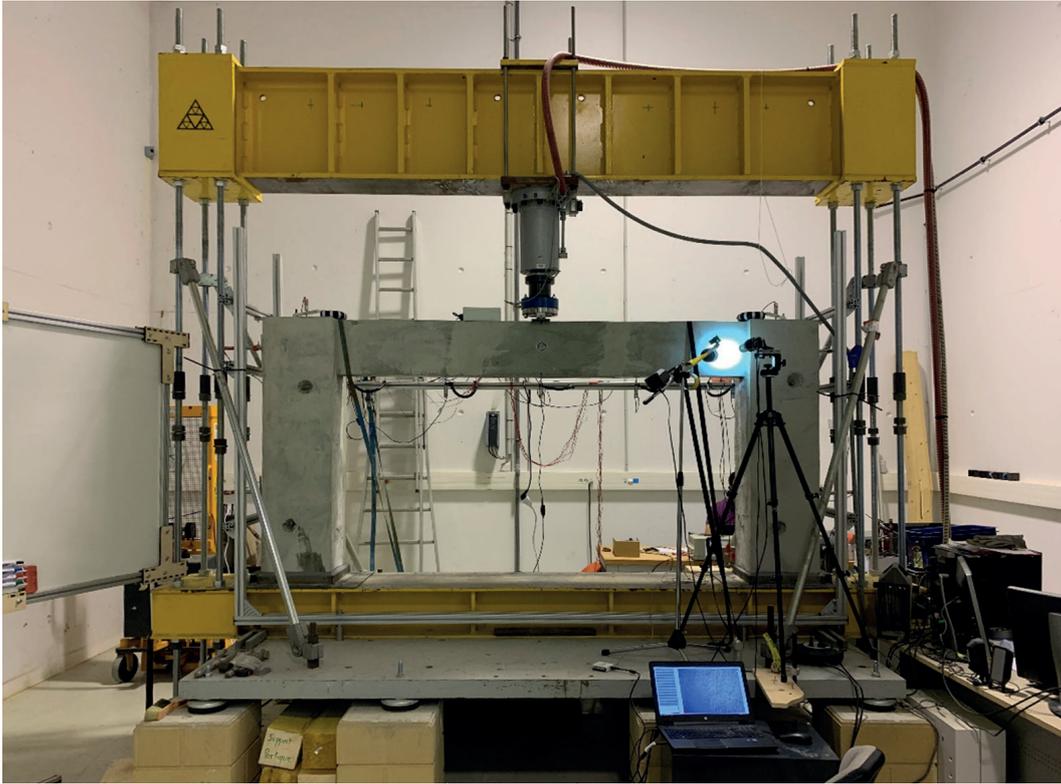


Figure IV. 28 : Portique mis en place et instrumenté au laboratoire Navier avant le démarrage du chargement.



Figure IV. 29 : Portique mis en place et instrumenté au laboratoire Navier avant le démarrage du chargement.

4.3.3. Procédure expérimentale des deux phases d'essais

4.3.3.1. L'organisation des phases d'essais

Deux phases d'essais auront lieu à plus d'un mois d'intervalle, pour permettre de tester un béton à +28 jours :

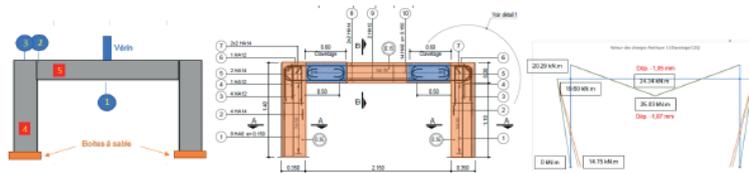
- **Une première phase d'essais** (non-destructifs), évaluant la rotation de l'assemblage sous un chargement limité (pour un usage bureau) afin de ne pas endommager les portiques. Ce chargement est défini suivant le moment de flexion déduit dans l'étude (cf Annexes). Cette première étape consiste donc à charger le portique jusqu'à la limite élastique du portique.
- **Une deuxième phase d'essais** (jusqu'à rupture), après démolition des zones de clavetage (technique d'hydrodémolition) et reconstruction de l'assemblage, testant le comportement puis allant jusqu'à la rupture totale de l'assemblage.

Les résultats de la modélisation préalable sur le logiciel Pythagore, qui sera décrite dans la partie suivante 4.4.6, aboutissent aux déplacements attendus suivants :

- 1^{ère} phase d'essais : la charge pour simuler l'usage en bureaux est de 73 kN, et on limitera la charge d'essai à 70kN par précaution, ce qui devrait générer un déplacement vertical de 1 à 2 mm selon les portiques,
- 2^{ème} phase d'essais : la charge sera d'abord la même que pour la 1^{ère} phase d'essais afin de détecter un éventuel changement de comportement, puis une charge de rupture calculée a été estimée à 156 kN et la déformée à mi-travée pour la rupture est de l'ordre de 4mm.

Des fiches de suivi permettront de rapporter les déplacements observés et de les comparer aux déplacements attendus théoriquement. La Figure IV. 30 montre l'exemple de cette fiche pour le portique 1. Les autres fiches sont disponibles en annexes.

Portique 1 (Clavetage C25)



Phase 1 (essais non-destructifs) :

Charge de 70KN en mi-travée

	Valeur mesurée	Valeur attendue	Borne inf.	Borne sup.
Déplacement mi-travée (1)		1,13 mm	1,05 mm	1,87 mm
Déplacement en haut du poteau (3)		0,02 mm	0,10 mm	0,13 mm
Déplacement des assemblages (2)		0,11 mm	0,05 mm	0,02 mm
Rotation des assemblages		0,36 °	0,34 °	0,63 °
Contrainte dans le poteau (4)		286 kPa	-	-
Ouverture de fissures		-	-	-

Phase 2 (essais à la rupture) :

Charge de 70KN en mi-travée

	Valeur mesurée	Valeur attendue	Borne inf.	Borne sup.
Déplacement mi-travée (1)		1,130 mm	1,050 mm	1,870 mm
Déplacement en haut du poteau (3)		0,020 mm	0,100 mm	0,130 mm
Déplacement des assemblages (2)		0,110 mm	0,050 mm	0,020 mm
Rotation des assemblages		0,36 °	0,34 °	0,63 °
Contrainte dans le poteau (4)		286 kPa	-	-
Contrainte dans les aciers du clavetage (5)		-	-	-
Ouverture de fissures		-	-	-

Essai de rupture	Valeur attendue	ELU
Charge de rupture	155 kN	121 kN
Déformation à la rupture	4,35 mm	-

Les valeurs attendues sont les valeurs prévues par le modèle Pythagore, avec la prise en compte de la traction du béton et rotules pour les appuis
 Les Borne inf. et sup. sont calculées en variant les paramètres Pythagore (loi du béton et conditions dans les appuis)

Figure IV. 30 : Fiche de suivi des déplacements pendant les essais.

4.3.3.2. Protocole de l'essai

Dès la mise en route du chargement, on débute le relevé des signaux de tous les capteurs du dispositif de mesure, précédemment décrit, selon une fréquence d'acquisition de 100 Hz. Le chargement pour atteindre les 70 kN fixés se fera progressivement selon 3 cycles de charges et décharges, comme illustré en Figure IV. 31.

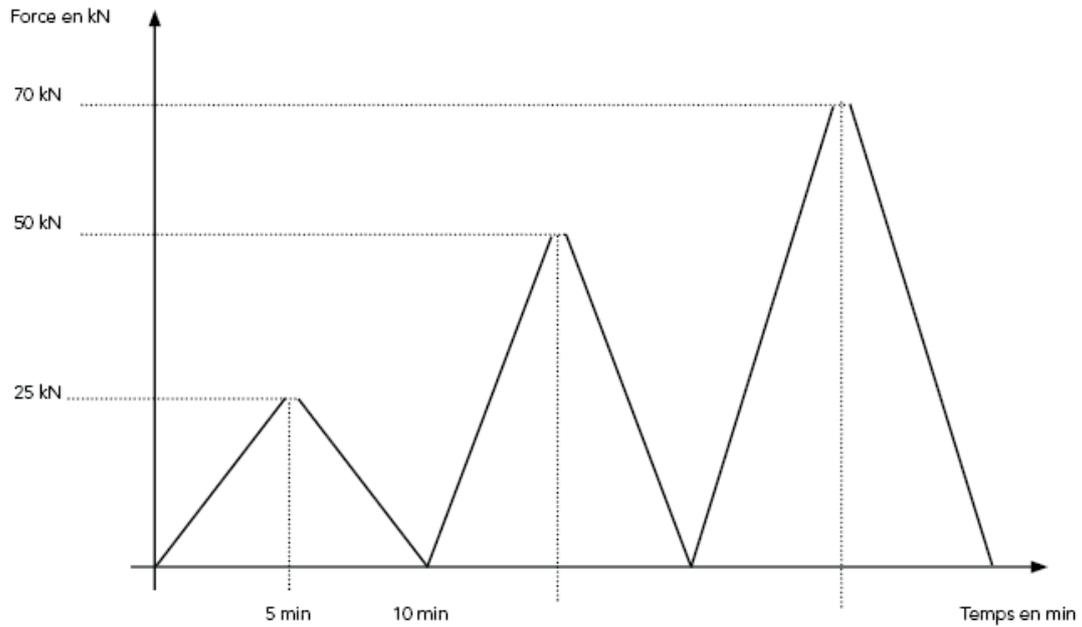


Figure IV. 31 : Cycles de chargement du vérin pour l'expérimentation

Entre chaque cycle, les différents paliers de charge sont effectués en immobilisant le vérin dans une position fixe pendant quelques instants, afin notamment de marquer les fissures apparues. A l'issue du palier de chargement, on pourra constater qu'un éventuel phénomène de relaxation a donné lieu à une diminution de la force appliquée par le vérin nécessaire à maintenir la valeur de sa course. On prendra en compte ce phénomène dans l'analyse des résultats.

4.3.3.3. Schéma synthèse de l'expérimentation

L'ensemble du protocole de l'expérimentation est schématisé en Figure IV. 32.

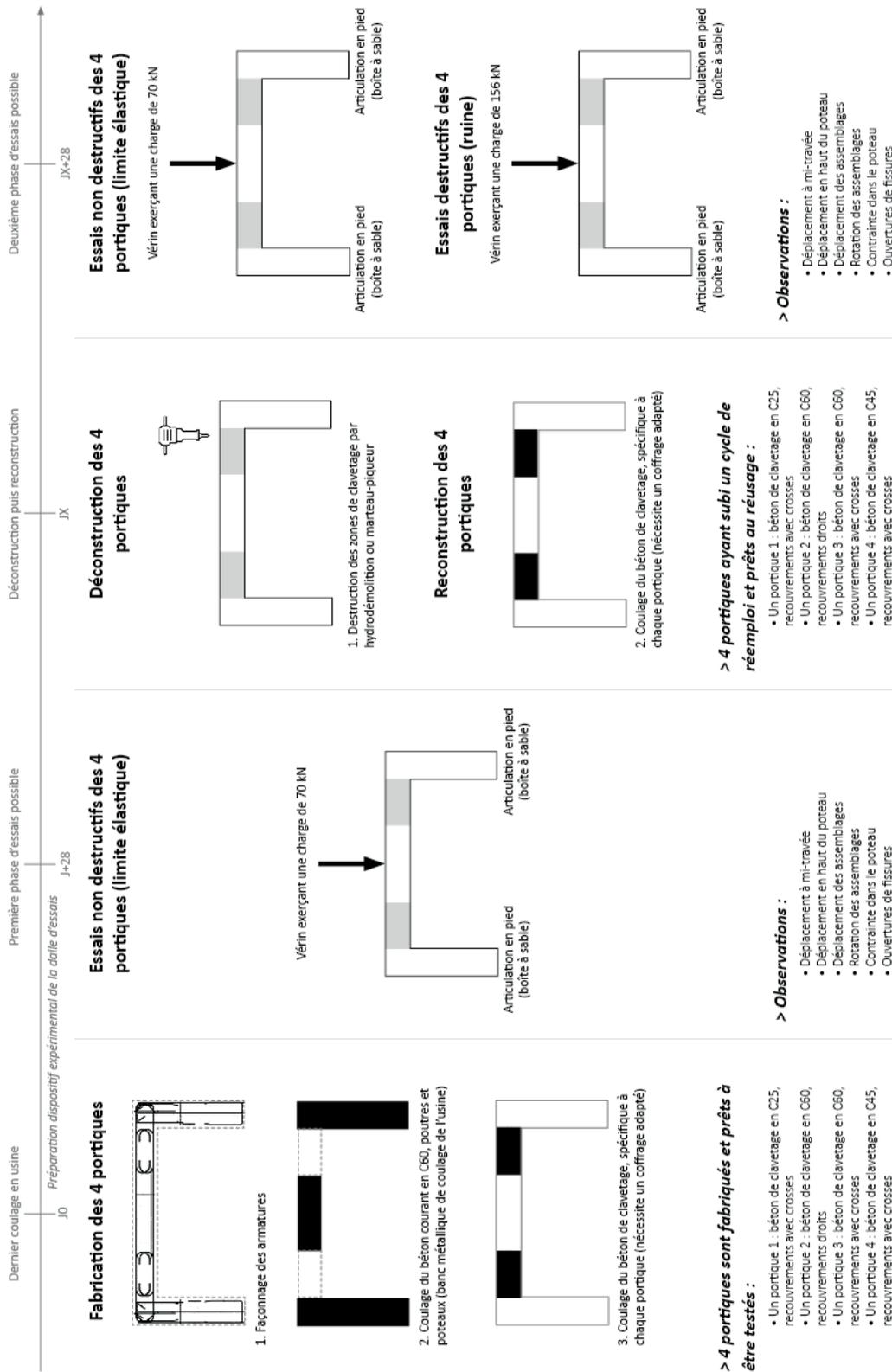


Figure IV. 32 : Synthèse du protocole expérimental des essais sur les 4 portiques.

4.4. Attendus théoriques des essais

Pour rappel, l'enjeu principal de ces essais est de vérifier :

- le comportement de l'assemblage proposé, pour savoir s'il est plus proche d'un encastrement ou d'une articulation, d'un semi-encastrement ou d'une semi-articulation (1^{ère} phase d'essais).
- le comportement de l'assemblage après sa déconstruction puis reconstruction (2^{ème} phase d'essais).

4.4.1. Schéma statique du portique

Le schéma statique va dépendre du type de liaisons entre la poutre et les poteaux du portique, mais également du type de liaisons en pieds de portique. En fonction du schéma statique, comme illustré à Figure IV. 33, les formules de résistance des matériaux (RdM) nous permettront de calculer les efforts de réactions, les déformations et déplacements que l'on devrait observer quand le portique sera chargé. Ainsi, d'un point de vue qualitatif, en comparant ces déplacements calculés grâce à la RdM avec les déplacements mesurés pendant les essais, on pourra déjà apprécier le type de liaison réellement mis en œuvre. Une comparaison avec un calcul numérique confortera ces conclusions.

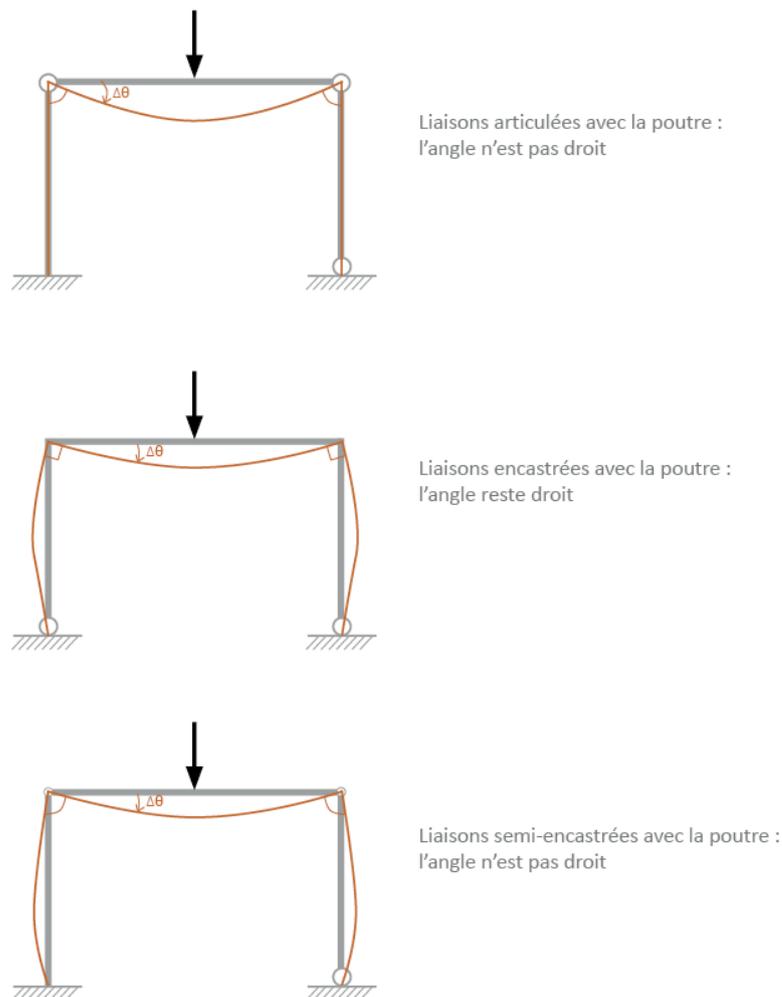


Figure IV. 33 : Les différents schémas statiques correspondant au possible comportement réel des portiques

Le calcul numérique a été réalisé sur le logiciel Pythagore, avec lequel on peut visualiser la déformée (Figure IV. 34) ici amplifiée 60 fois.

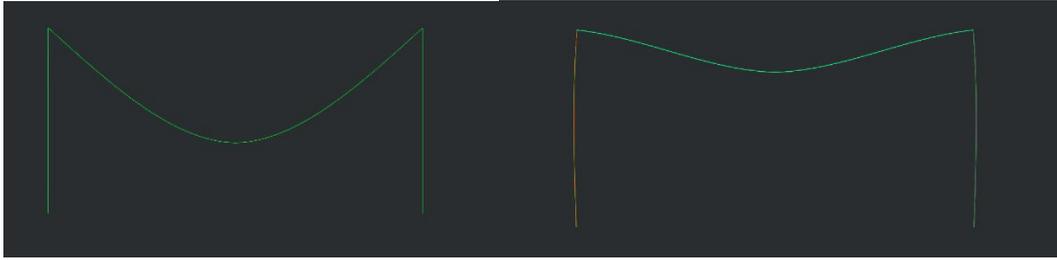


Figure IV. 34 : Déformées obtenues avec le modèle Pythagore, à gauche pour une articulation, à droite pour un semi-encastrement, entre la poutre et le poteau.

On s'attend fortement à observer un comportement proche de l'encastrement. Dans ce cas, nous pourrions nous baser sur le schéma statique d'un portique encastré en tête de poteaux, et articulé en pieds, comme schématisé sur la Figure IV. 35 d'après un formulaire de RDM, par Courbon et al. [4].

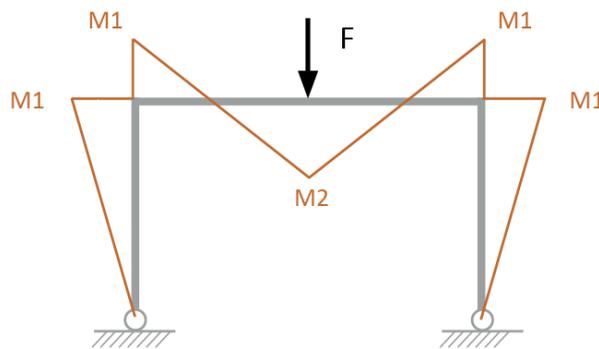


Figure IV. 35 : Schéma des moments pour un assemblage poutre-poteau encastré

Si les assemblages poteau-poutre se comportent davantage comme une articulation nous pourrions considérer le schéma statique suivant, Figure IV. 36.

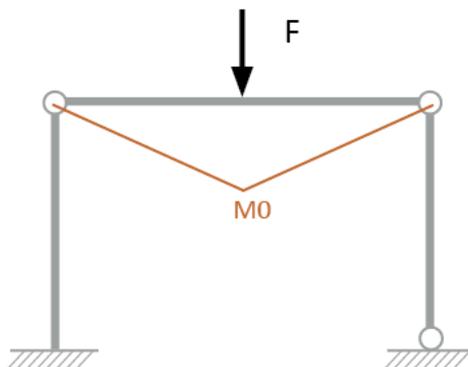


Figure IV. 36 : Schéma du moment pour un assemblage poutre-poteau articulé

Dans la réalité, nous observerons sûrement un comportement intermédiaire, certainement avec un moment à mi-travée qui sera compris entre M_2 et M_0 .

4.4.2. Calcul des moments à mi-travée

Les caractéristiques du portique pour les calculs sont les suivantes, comme illustré à la Figure IV. 37, avec un module d'élasticité sécant du béton $E_{cm} = 39\,100$ MPa pour un béton C60/75, d'après l'Eurocode 2. Nous allons tout d'abord calculer les valeurs du moment par des calculs manuels.

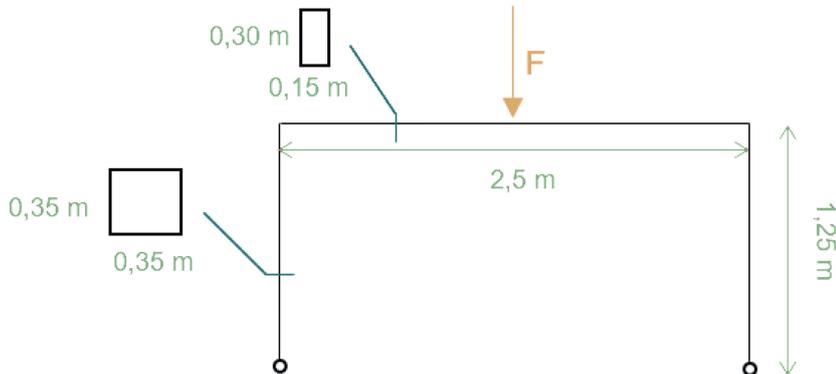
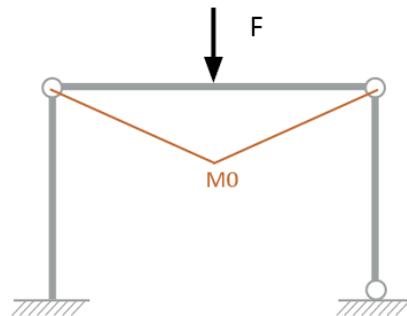


Figure IV. 37 : Caractéristiques du portique pour la modélisation

4.4.2.1. Moment isostatique

Pour rappel, les formules de RDM nous donnent les moments maximaux suivants sur la Figure IV. 38, selon le schéma statique, d'après le formulaire de Courbon et al. [4] :



$$M_0 = \frac{Fl}{4} = \frac{70 \times 2,5}{4} = 43,75 \text{ kN.m}$$

Figure IV. 38 : Formule du moment maximal en fonction du schéma statique (portique isostatique).

4.4.2.2. Moment hyperstatique

On va utiliser la méthode des travaux virtuels pour lever l'hyperstaticité et calculer la valeur de la réaction horizontale H , à droite, et en déduire la valeur du moment à mi-travée dans le portique hyperstatique, selon la Figure IV. 39. Le portique est une fois hyperstatique avec ses deux articulations en pieds. On lui associe donc un portique rendu isostatique en remplaçant l'articulation de droite par un appui à roulette. On libère ainsi le déplacement horizontal du support à droite. Cela va nous permettre de trouver la réaction d'appui en exprimant que ce déplacement est en fait nul.

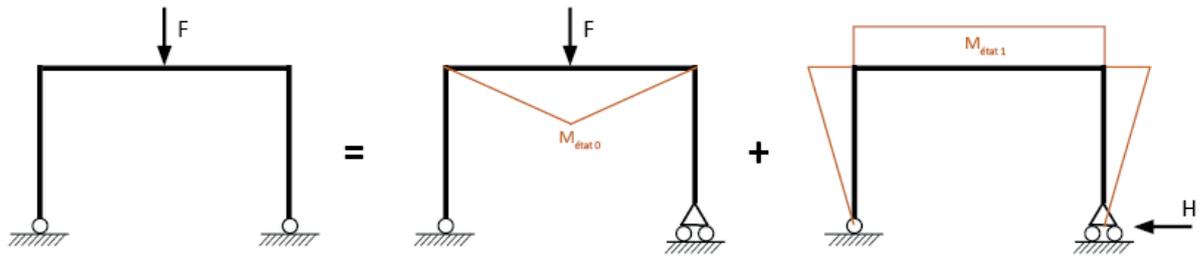


Figure IV. 39 : Méthode de calcul pour obtenir le moment à mi-travée dans le portique hyperstatique.

Sur la Figure IV. 40, u_0 représente le déplacement horizontal dans le portique rendu isostatique et u_1 représente le déplacement horizontal sous une réaction unitaire. On obtient ainsi par décomposition, deux déplacements qui doivent s'annuler :

$$u_0 + Hu_1 = 0,$$

avec l , la longueur de la poutre, et h la hauteur du poteau.

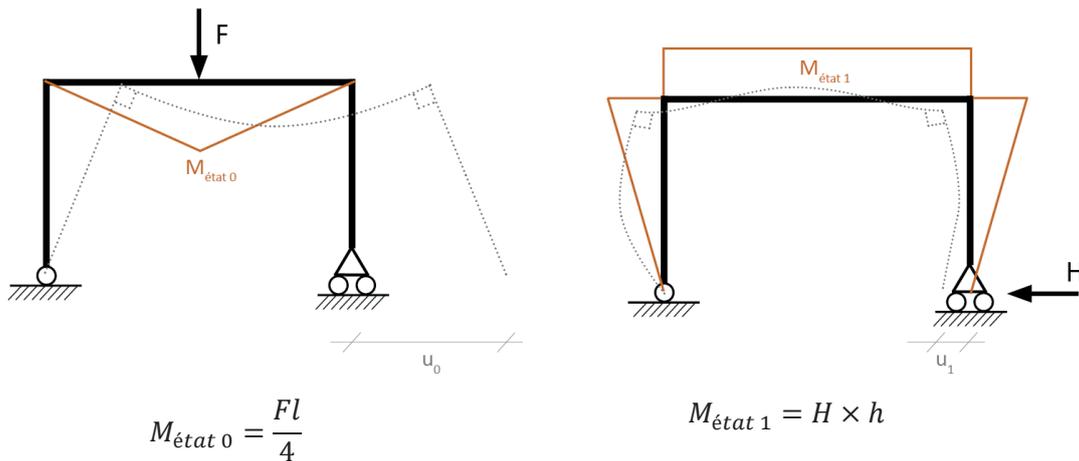


Figure IV. 40 : Décomposition du portique selon la méthode des travaux virtuels et allures des déformations.

On utilisera ensuite les valeurs des intégrales de Mohr d'après notre cas géométrique des moments, et le Tableau IV. 4, selon $\frac{1}{l} = \int_0^l f(x)g(x)dx$:

$f(x) \backslash g(x)$		
	ac	1/2 ac
	1/2 ac	1/6 ac
	1/2 ac	1/3 ac

Tableau IV. 4 : Correspondance avec les intégrales de Mohr

On obtient alors les équations suivantes, où on appellera I_t , l'inertie de la poutre et I_p , l'inertie du poteau :

$$u_0 + Hu_1 = 0 = \delta_{10} + H\delta_{11}$$

$$\delta_{10} = \int \frac{M_0 M_1}{EI} ds = \frac{1}{2} \frac{M_0 M_1 \times l}{EI_t} = \frac{1}{2} \times \frac{43,75 \times 1,25 \times 1 \times 2,5}{39100 \times 0,0003375} = 5,18 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \delta_{11} &= \int \frac{M_1 M_1}{EI} ds = \frac{1}{3} \frac{M_1 M_1 \times h}{EI_p} \times 2 + 1 \times M_1 M_1 \times \frac{l}{EI_t} \\ &= \frac{1}{3} \frac{(1 \times 1,25)^2 \times 1,25}{39100 \times 0,00125052} \times 2 + 1 \times \frac{(1 \times 1,25)^2 \times 2,5}{39100 \times 0,0003375} = 0,32 \text{ mm} \end{aligned}$$

On retrouve ensuite :

$$H = \frac{-\delta_{10}}{\delta_{11}} = 16,06 \text{ kN}$$

Puis les moments :

$$M_1 = H \times h = 20,07 \text{ kN.m}$$

$$M_2 = M_0 - M_1 = 43,75 - 20,07 = 23,68 \text{ kN.m}$$

4.4.3. Calcul de la flèche

En première approche nous allons réaliser un calcul élastique, en considérant la section de béton non fissurée et les charges appliquées par le vérin.

4.4.3.1. Flèche isostatique

Nous allons donc pouvoir calculer la valeur de la flèche iso, non fissurée (Equation IV. 2) à mi-travée du portique n°2 par exemple, pour une force appliquée de 70 kN, selon la RDM :

$$\delta_{bi\text{-appuyée}} = \frac{fl^3}{48EI} = \frac{fl^3}{48E \times \frac{bh^3}{12}} = \frac{70 \times 2,5^3}{48 \times 39100 \times \frac{0,15 \times 0,3^3}{12}} = 1,73 \text{ mm}$$

Equation IV. 2 : Calcul de la flèche isostatique

4.4.3.2. Flèche hyperstatique

Ensuite nous calculons la flèche hyper non fissurée à mi-travée du portique, pour une force appliquée de 70 kN. Selon la RDM, dans le cas d'une poutre encastree aux pieds des portiques (Figure IV. 35), les réactions, les sollicitations et les déplacements sont déterminés par superposition des résultats des cas suivants, en Figure IV. 41, d'après un formulaire de RDM, par Courbon et al. [4].

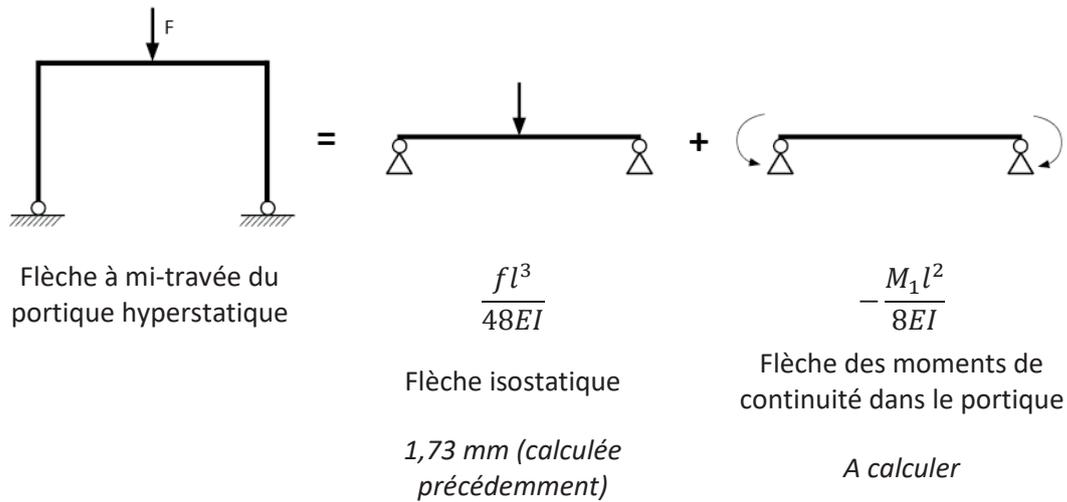


Figure IV. 41 : Méthode de calcul de la flèche hyperstatique

$$\frac{M_1l^2}{8EI} = \frac{20,07 \times 2,5^2}{8 \times 39100 \times \frac{0,15 \times 0,3^3}{12}} = 1,19 \text{ mm}$$

$$\delta_{portique\ encast\ r\ e} = \frac{fl^3}{48EI} - \frac{M_1l^2}{8EI} = 1,73 - 1,19 = 0,54 \text{ mm}$$

Equation IV. 3 : Calcul de la flèche hyperstatique

Ainsi, quand le béton n'est pas fissuré, pour une force de 70 kN, si la poutre du portique est encastée avec le poteau, on attend une flèche à mi-travée de 0,54 mm. En revanche si elle est articulée, on attend une flèche à mi-travée de 1,73 mm (Equation IV. 3).

Nous ne tenons pas compte ici des effets de fluage (réduction du module d'élasticité à long terme), du fait du caractère instantané de la charge pendant les essais.

Il faut maintenant calculer les flèches quand le béton est fissuré, iso et hyper, afin de pouvoir les comparer aux mesures de l'essai.

4.4.4. Calcul de la fissuration, avec une contrainte normale de flexion pure

Nous allons calculer la charge pour laquelle la poutre de notre portique doit fissurer. Pour cette estimation nous allons considérer le cas des portiques n°2 et n°3 entièrement en C60/75. En supposant que l'on fissure dès que la contrainte de traction dépasse 4,4MPa (soit la résistance moyenne à la traction du béton, f_{ctm} pour le C60/75), on obtient, selon les formules de RDM, la valeur du moment de fissuration, dans l'Equation IV. 4 :

$$M = \frac{\sigma I}{v} = \frac{\sigma \times \left(\frac{bh^3}{12}\right)}{\frac{h}{2}} = \sigma \frac{bh^2}{6} = 4,4. 10^3 \times \frac{0,15 \times 0,3^2}{6} = 9,9 \text{ kNm}$$

Equation IV. 4 : Calcul de la sollicitation de fissuration

avec M : Moment de flexion ; σ : Contrainte normale en flexion ; v : Distance de l'axe neutre à l'extrémité la plus éloignée de la section ; I : Moment d'inertie par rapport à l'axe neutre.

A partir de ce moment de fissuration, on va retrouver la force ponctuelle que le vérin doit exercer pour provoquer la fissuration. Comme on sait que pour une force exercée de 70 kN, le moment est de 23,68 kN.m, on en déduit alors pour un moment de 9,9 kN.m, que la force exercée est de :

$$P = \frac{70 \times 9,9}{23,68} = 29,26 \text{ kN}$$

Equation IV. 5 : Calcul de la force de fissuration

Ainsi, théoriquement, dès que le vérin exercera une force $\geq 29,26$ kN, la poutre de notre portique sera fissurée, Equation IV. 5.

On en déduit que notre béton va fissurer lors du 2^e cycle de chargement du vérin, puisque le 1^{er} cycle atteint 25 kN et le 2^e cycle atteint 50 kN.

4.4.5. Calcul de la flèche par intégration de courbure prenant en compte la fissuration

Nous avons réalisé en partie 4.4.3 un calcul élastique. Cependant, ce calcul sous-estime la flèche réelle si l'on se trouve dans le cas d'une contrainte dépassant la résistance en traction du béton, comme le rappellent Parmentier et al. [5]. Or nous venons de voir en partie 4.4.4 que la contrainte de traction est dépassée lorsque l'on applique une force ponctuelle supérieure à 31,68 kN, alors que le dernier cycle de chargement doit atteindre 70 kN. Nous allons donc dans cette partie, réaliser un calcul non linéaire, en considérant des sections du béton fissurées sur la longueur de la poutre. En effet, les fissures du béton diminuent l'inertie des sections.

Cependant, entre les sections fissurées, le béton peut reprendre certains efforts de traction. On cherche alors à affiner la valeur théorique précédente en prenant en compte le béton tendu non fissuré. Ainsi, il serait intéressant d'utiliser la méthode de calcul de flèche par intégration des courbures, afin de prendre en compte, plus rigoureusement, les sections fissurées et non fissurées tout le long de la poutre, que l'on va discréditer en un certain nombre de sections (plus il y aura de sections, plus le calcul de flèche sera précis). La direction scientifique de setec tpi, dirigée par M. Bué a développé la feuille Excel permettant de réaliser ce calcul sur les projets de l'entreprise. Un exemple de cette feuille utilisée pour le portique de l'essai est donné Figure IV. 42 et sera disponible dans son intégralité en annexes.

CALCUL DE FLECHES BETON ARME PAR INTEGRATION DES COURBURES
selon règles Eurocodes 2-1-1 et Recommandations professionnelles de la F.F.B.

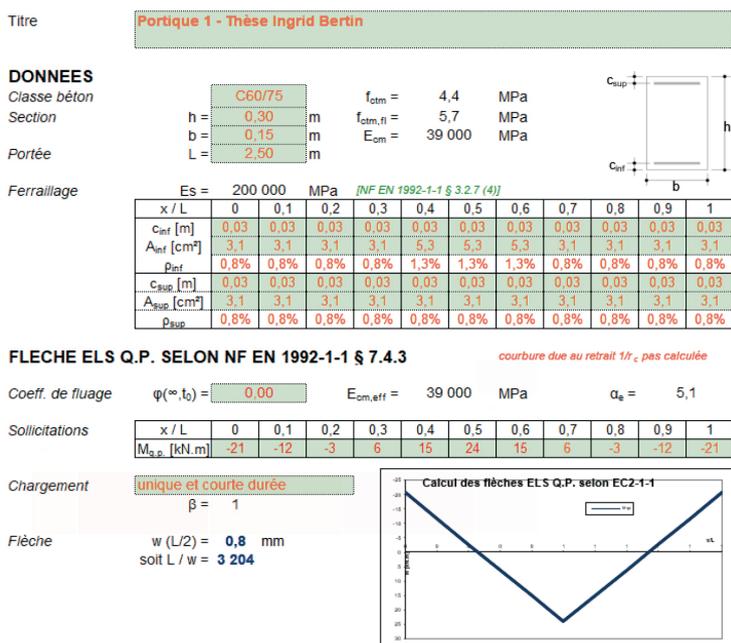


Figure IV. 42 : Extrait de la feuille de calcul de flèche par intégration des courbures de setec tpi.

On peut ainsi en déduire les valeurs des sollicitations, dans le Tableau IV. 5, tout au long de la courbe conformément à la feuille de calcul.

Calcul de la flèche	Fissurée (méthode des courbures)	Non fissurée (calcul élastique RDM)
Iso	4,43 mm	1,73 mm
hyper	0,78 mm	0,54 mm

Tableau IV. 5 : Valeurs des flèches selon le schéma statique et la fissuration ou non de la section

On peut ainsi en déduire un coefficient de fissuration, dans l'Equation IV. 6:

$$\text{Coeff de fissuration} = \frac{\text{flèche hyper fissurée}}{\text{flèche hyper non fissurée}} = \frac{0,78}{0,54} = 1,4$$

Equation IV. 6 : Calcul du coefficient de fissuration

4.4.6. Modélisation aux éléments finis

4.4.6.1. Ajustement de loi de comportement du béton

Après cette approche par calculs manuels il est possible de recouper avec un calcul aux éléments finis tenant compte de la présence des zones d'assemblage. Afin d'anticiper au mieux les résultats des essais, il est également nécessaire de réaliser un modèle aux éléments finis pour estimer plus finement les déplacements lors du chargement et de déterminer les charges limites à imposer à chacun des portiques. La modélisation permet également de faire varier les paramètres plus rapidement et pour chacun des portiques. La fonction des portiques est de reprendre les chargements définis du poids propre, des charges permanentes complémentaires et d'exploitation, et l'action du vent pour le programme défini soit :

- charges permanentes complémentaires de 0,7 kN/m² correspondant à un faux plafond, à des réseaux suspendus et un faux-plancher,

- charges d'exploitation correspondant à la destination de bureaux (Catégorie B), soit $2,5 \text{ kN/m}^2$ avec les surcharges d'exploitation fixées par la NF EN 1991-1-1 et son Annexe Nationale, donc au total : $Q_k = 2,5 + 0,87 = 3,3 \text{ kN/m}^2$.

Pour l'échelle 1/3, l'effort à appliquer a été recalibré ce qui amène à une charge de 73kN à l'ELS pour simuler la charge d'usage pour le bureau. La modélisation a pour rôle d'approcher le plus fidèlement possible le comportement réel du portique sous chargement. A cette fin, un calcul non-linéaire a été réalisé sur Pythagore pour reproduire le comportement du portique, selon le schéma statique de la Figure IV. 43. Les appuis des pieds de portique sont modélisés comme des rotules parfaites. Les calculs sont faits en considérant les sections homogénéisées fissurées. Afin de rendre compte du béton de clavetage qui est différent du béton des éléments courants, la poutre du portique a été décomposée en différentes sections comme indiqué sur la Figure IV. 43. Les zones 2 et 4 sont en C60/75 et les zones 1 et 3 modélisent les zones de clavetages (les zones 3 correspondent aux zones de recouvrement des armatures) dont le béton diffère selon les portiques. Cette modélisation a été réalisée dans le cadre d'un PFE au sein de setec tpi, par Bezerra [6].

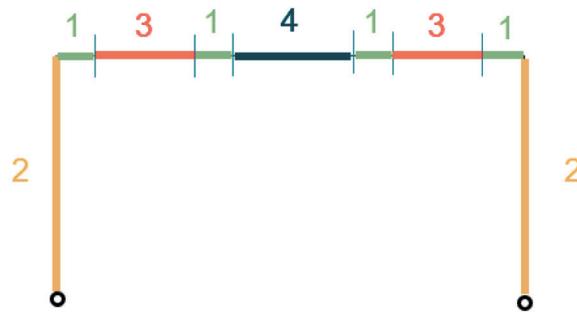


Figure IV. 43 : Modélisation du portique et de ses zones de clavetages sur le logiciel Pythagore.

Les effets de fluage du béton ne sont pas pris en compte vu le caractère rapide et instantané des chargements.

Afin d'étudier les déplacements de la manière la plus réaliste, le modèle ainsi réalisé va notamment permettre de prendre en compte les efforts de traction du béton. C'est-à-dire, que l'on souhaite ici prendre en compte la contribution du béton tendu mais non fissuré pour résister en traction, illustré en Figure IV. 44 et en Figure IV. 45, alors que normalement on ne la prend pas en compte pour vérifier la résistance des sections dans les règles usuelles de béton armé.

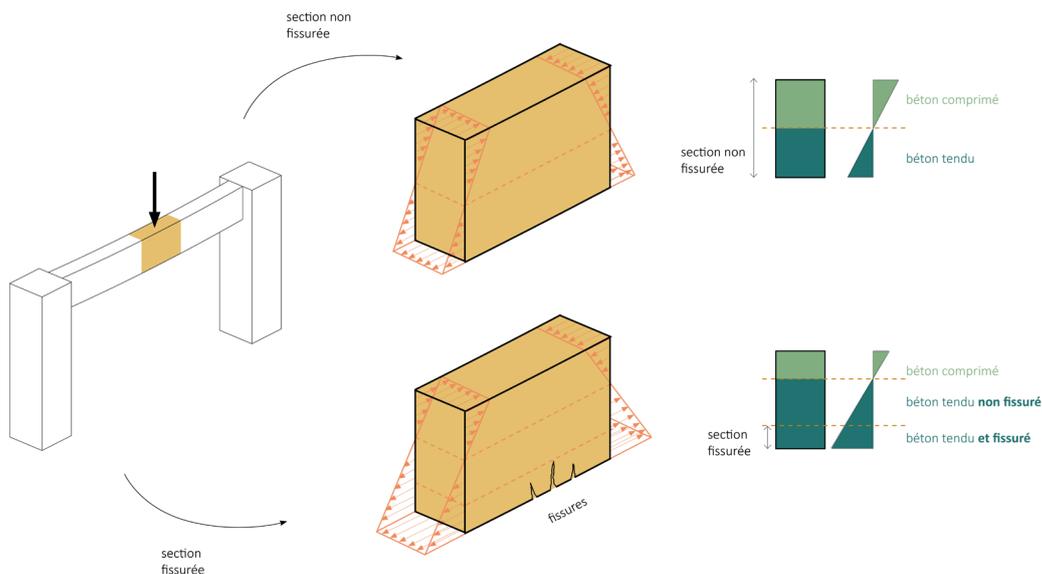


Figure IV. 44 : Phénomène de fissuration et conséquence sur la contribution du béton tendu pour résister en traction.

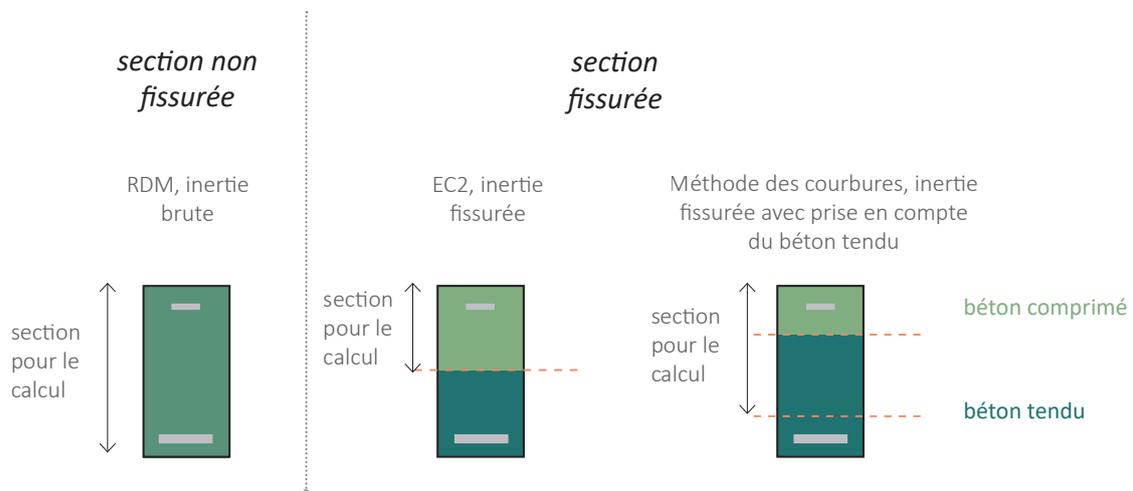


Figure IV. 45 : Schématisation des sections prises en compte selon la méthode de calcul.

La prise en compte de la contribution du béton tendu non fissuré pour résister en traction va influencer les valeurs de la flèche à mi-travée. Nous rappelons que nous cherchons ici à approcher une finesse de modélisation, avec les outils à disposition, qui s'approche le mieux possible du comportement réel du matériau béton. On parle ici de différence de l'ordre du centième de mm pour la flèche à mi-travée.

4.4.6.2. Simulation de la rupture des portiques

Pour la vérification de la résistance des sections à l'état limite ultime on ne prendra pas en compte la contribution du béton tendu, selon les règles usuelles de béton armé.

Le Tableau IV. 6, montre les résultats obtenus avec le logiciel Pythagore, en conservant les coefficients de sécurité sur les matériaux.

	Charge ultime (kN)
Portique 1	155
Portique 2	156
Portique 3	156
Portique 4	155

Tableau IV. 6 : Valeurs attendues pour la rupture selon les portiques.

Lors de la simulation de la rupture, il apparaît qu'elle se produira à la jonction de l'extrémité de la poutre et du début du clavetage, d'après le logiciel Pythagore. L'image, en Figure IV. 46, extraite de la modélisation Pythagore montre la déformation amplifiée qui risque de se produire dans la poutre en C60/75.

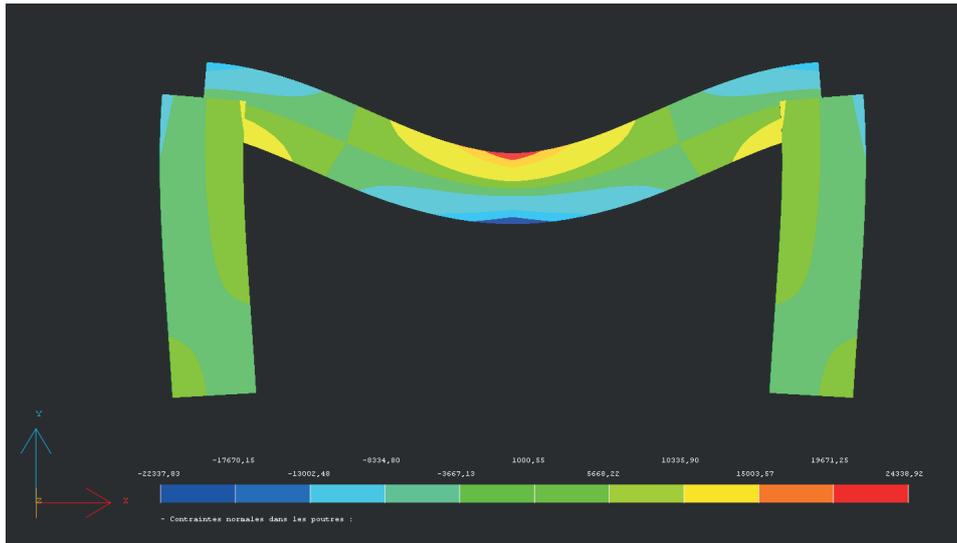


Figure IV. 46 : Extrait du logiciel Pythagore avec déformée amplifiée d'un facteur 100 avec iso couleurs des contraintes.

La charge ultime calculée avec le modèle Pythagore est donc d'environ 156 kN.

4.4.7. Synthèse des déplacements théoriques attendus

Pour un chargement ponctuel de 70 kN, nous attendons donc les résultats suivants, compilés dans le Tableau IV. 7.

Calcul de la flèche avec F= 70kN				Fissurée	Non fissurée	
Iso	RDM			4,43 mm	1,73 mm	
hyper	Modèle Pythagore	RDM			0,78 mm	0,54 mm
		Sans contribution du béton tendu pour résister en traction	Portique 1	1,87 mm	-	
			Portique 2	1,84 mm	-	
			Portique 3	1,84 mm	-	
			Portique 4	1,85 mm	-	
		Avec contribution du béton tendu pour résister en traction	Portique 1	1,05 mm	-	
			Portique 2	0,99 mm	-	
			Portique 3	0,99 mm	-	
Portique 4	1,01 mm		-			

Tableau IV. 7 : Récapitulatif des valeurs de flèches attendues selon le comportement des portiques

A noter que, d'après Parmentier et al. [5] « On estime que la part d'erreur du calcul théorique tourne autour de 20 % dans des conditions maîtrisées (essais en laboratoire). Etant donné la variabilité importante de la résistance en traction expérimentale du béton (pouvant atteindre 30 %) et l'incertitude sur la valeur réelle de celle-ci dans l'ouvrage réalisé, l'impact sur les flèches calculées peut être important. » On pourra donc s'attendre à trouver des différences significatives entre les calculs théoriques et les mesures pratiques.

4.5. Résultats des essais

4.5.1. 1^{ère} phase d'essais

Un fichier brut contenant tous les relevés des capteurs et des jauges, avec une fréquence d'acquisition de 100 Hz, est récupéré en fin d'expérimentation. Un post-traitement est effectué pour retrouver les valeurs de déformées et éliminer les données parasites (bruit). Le Tableau IV. 8 reprend les déplacements du capteur C1 situé à mi-travée du portique, les tassements des poteaux déduits à partir des deux capteurs en tête de poteaux pour en déduire la valeur réelle de la flèche à mi-travée. L'ensemble des résultats traités est disponible en annexes.

		Déplacement capteur C1	Tassement moyen des deux poteaux (capteurs C10, C11)	Valeur de la flèche à mi-travée
Force appliquée de 25 kN	Portique 1	0,40 mm	0,13 mm	0,27 mm
	Portique 2	0,49 mm	0,21 mm	0,28 mm
	Portique 3	0,57 mm	0,20 mm	0,38 mm
	Portique 4	0,52 mm	0,25 mm	0,28 mm
Force appliquée de 50 kN	Portique 1	0,92 mm	0,17 mm	0,75 mm
	Portique 2	0,89 mm	0,26 mm	0,63 mm
	Portique 3	1,26 mm	0,29 mm	0,98 mm
	Portique 4	0,92 mm	0,31 mm	0,61 mm
Force appliquée de 70 kN	Portique 1	1,07 mm	0,17 mm	0,90 mm
	Portique 2	1,21 mm	0,30 mm	0,91 mm
	Portique 3	1,78 mm	0,34 mm	1,44 mm
	Portique 4	1,11 mm	0,33 mm	0,78 mm

Tableau IV. 8 : Résultats de mesures de tassements et de flèches des portiques testés (1^{ère} phase d'essais).

Ces résultats nous montrent une certaine logique dans l'observation de la flèche qui augmente bien avec les chargements, et qui finalement, est la plus faible avec le portique dont l'assemblage est en C40/50, recouvrements croisés (portique 4), alors que l'on s'attendait à ce qu'elle soit la plus faible avec le portique dont l'assemblage est en C60/75, recouvrements croisés (portique 3). Les tassements augmentent également, logiquement, avec la charge appliquée. Cependant, on n'observe pas de logique dans la valeur de ces tassements selon les portiques. Les tassements semblent aléatoires et peuvent dépendre de la façon dont le sable s'est tassé pendant les différents essais, bien que le protocole (tassement, vibration) de préparation du sable ait été respecté et répété à l'identique pour chaque portique. Il apparaît clairement que le portique n°3 présente un comportement anormal par rapport aux trois autres portiques, avec une valeur de flèche bien plus importante, d'environ + 67%.

Nous présentons dans le Tableau IV. 9 les valeurs de déformation des jauges pour le cycle de 25kN car au-delà, des fissures se créent et les jauges, très sensibles, ne peuvent plus fonctionner normalement, particulièrement lorsqu'une fissure traverse une jauge. Nous restons donc dans le domaine élastique que nous comparons aux valeurs théoriques obtenues selon la RDM.

	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8
Théorique (RDM)-Portique 1	16	-18	4	-4	-9	10	-21	24
Portique 1	21	-16	14	-5	-1	8	-18	16
Théorique (RDM)-Portique 2	13	-15	3	-3	-7	8	-17	19
Portique 2	34	-23	6	-0,9	-0,9	5	-13	17
Théorique (RDM)-Portique 3	13	-15	3	-3	-7	8	-17	19
Portique 3	14	-17	10	-4	-1	4	-3	8
Théorique (RDM)-Portique 4	14	-16	3	-4	-8	9	-18	21
Portique 4	23	-11	41	0,4	18	6	-9	12

Tableau IV. 9 : Déformations dans les jauges pour une force exercée de 25kN en $\mu\text{m}/\text{m}$.

Les jauges pour lesquelles la case a été colorée en rouge ont présenté des variations très importantes visibles sur les courbes en annexes et sont écartées pour l'interprétation des résultats. Les jauges J4 et J5 sont notamment situées à l'endroit où le moment passe de négatif à positif, ce qui peut expliquer que cette zone crée des perturbations au niveau des mesures. Pour les autres jauges on constate la cohérence avec un allongement pour les jauges 1,3, 6 et 8 et un raccourcissement pour les jauges 2,4,5 et 7, correspondant à la position des jauges et à la variation entre un moment positif et négatif, comme indiqué dans le Tableau IV. 10.

Ordre des jauges de la partie supérieure de la poutre	Moment positif		Moment négatif	
	Allongement		Raccourcissement	
	1	3	5	7
Ordre des jauges de la partie inférieure de la poutre	Raccourcissement		Allongement	
	2	4	6	8

Tableau IV. 10 : Moments et déformations théoriques selon les jauges pour une charge de 25 kN.

Le détail en Figure IV. 47 montre la position des jauges sur le portique ainsi que les lieux de jonctions entre le béton C60/75 de la poutre et le béton de clavetage selon les quatre portiques testés.

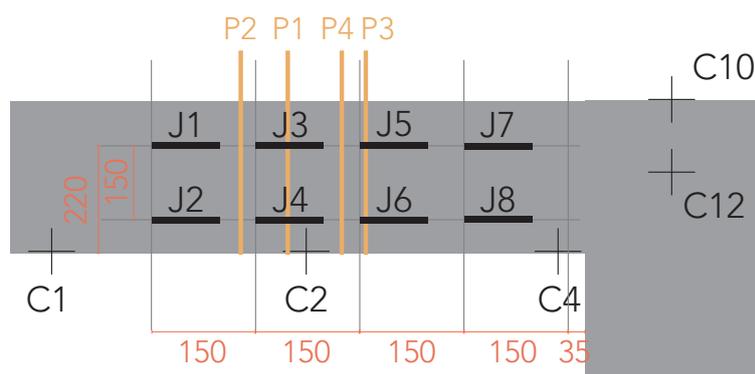


Figure IV. 47 : Position des jauges sur le portique (en noir) et limite entre le béton de la poutre et le béton de clavetage selon le portique (en marron).

Ainsi les déformées obtenues en Figure IV. 48 et en Figure IV. 49 montrent un comportement de liaison encastree entre le poteau et la poutre (en éliminant les valeurs précédemment citées), où l'on distingue bien le changement de signe du moment dans le portique hyperstatique.

Jauges en zone supérieure des portiques

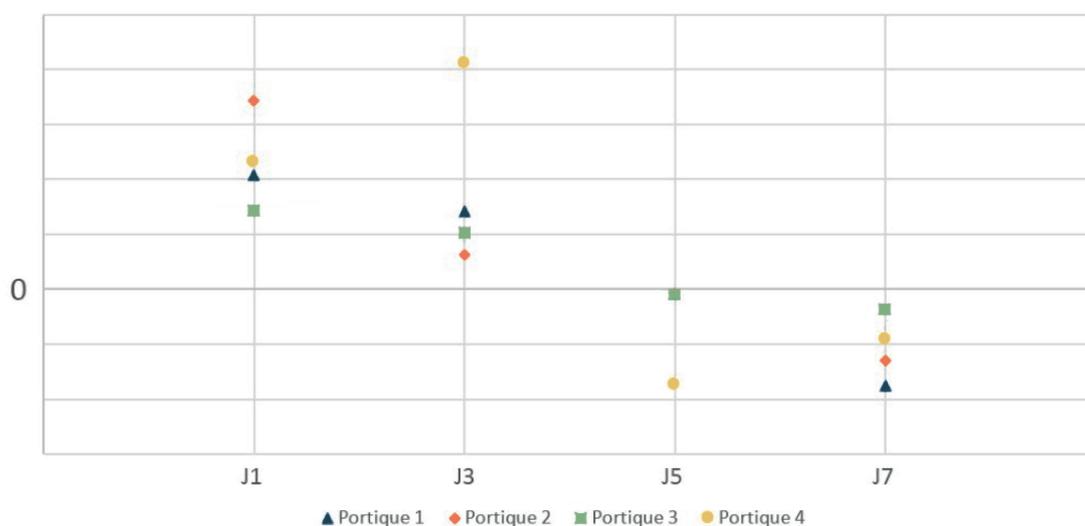


Figure IV. 48 : Déformations des jauges de la zone supérieure pour une charge de 25 kN.

Jauges en zone inférieure portiques

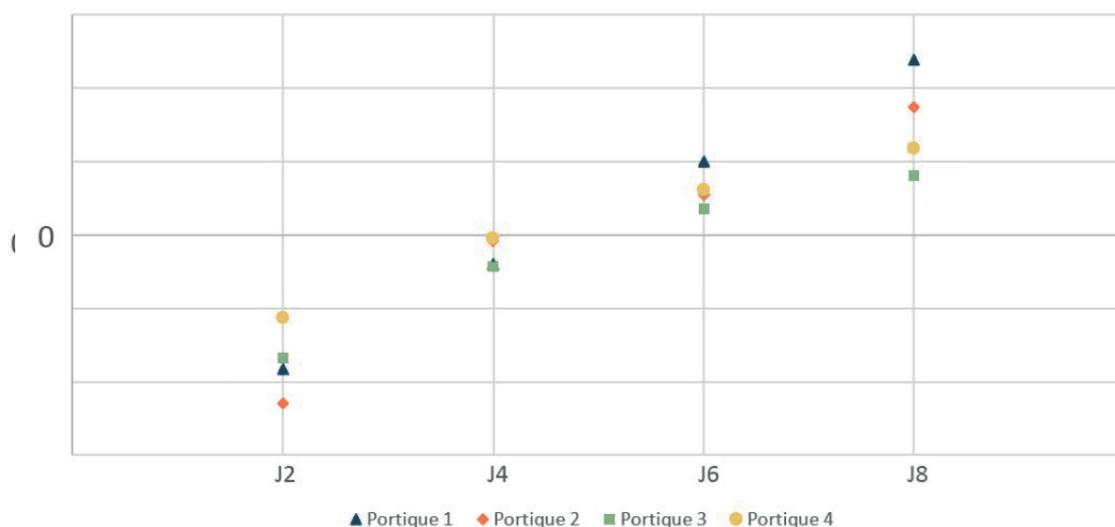


Figure IV. 49 : Déformations des jauges de la zone inférieure pour une charge de 25 kN.

Nous allons ensuite déterminer l'angle entre le poteau et la poutre à partir des données des capteurs mesurées et répertoriées dans le Tableau IV. 11 pour une charge de 70 kN. Ces données permettent de retracer les déformations dont une représentation est donnée à la Figure IV. 50 et de mesurer les angles synthétisés dans le Tableau IV. 12.

	C3	C2	C7	C9	C6	C8
Portique 1	-0,72 mm	-0,90 mm	-0,22 mm	-0,27mm	-0,10mm	-0,32mm
Portique 2	-0,61 mm	- 0,77 mm	-0,31 mm	-0,11mm	-0,14 mm	-0,22mm
Portique 3	-0,90 mm	-1,24 mm	-0,63mm	-0,54mm	-0,14 mm	-0,14mm
Portique 4	-0,70 mm	-1,03 mm	-0,39mm	-0,42mm	-0,07mm	-0,15mm

Tableau IV. 11 : Déplacements absolus des capteurs pour une charge de 70 kN, voir figure IV. 22 pour l'implantation des capteurs.

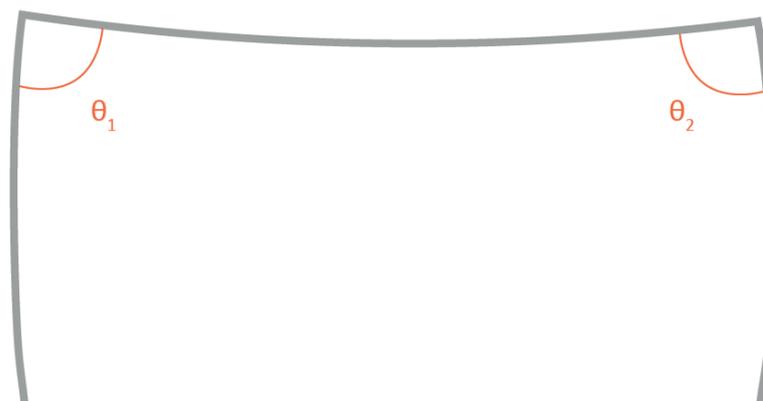


Figure IV. 50 : Déformée x100 pour le portique 1, à partir des déplacements absolus des capteurs, pour une charge de 70 kN.

	θ_1	θ_2
Portique 1	90,045°	90,069°
Portique 2	89,867°	89,965°
Portique 3	89,911°	89,818°
Portique 4	90,149°	90,120°

Tableau IV. 12 : Angles mesurés à partir du dessin des déformées avec le logiciel Rhinoceros, pour une charge de 70 kN.

Ces angles confirment une nouvelle fois que la liaison entre le poteau et la poutre est un encastrement (ou en est très proche), grâce à l'angle droit mesuré.

Nous avons ensuite superposé les courbes correspondant à la valeur de la flèche au cours des différents chargements, avec les courbes des valeurs de flèches calculées via le modèle Pythagore pour chaque portique, selon la Figure IV. 51. C'est bien le cas théorique où les liaisons sont considérées comme encastrees et où la section pour le calcul de la flèche est fissurée avec une contribution du béton tendu pour résister en traction qui s'apparente le plus aux résultats des essais. On peut en déduire que les portiques réemployables avant déconstruction, sont proches d'un comportement de liaisons encastrees.

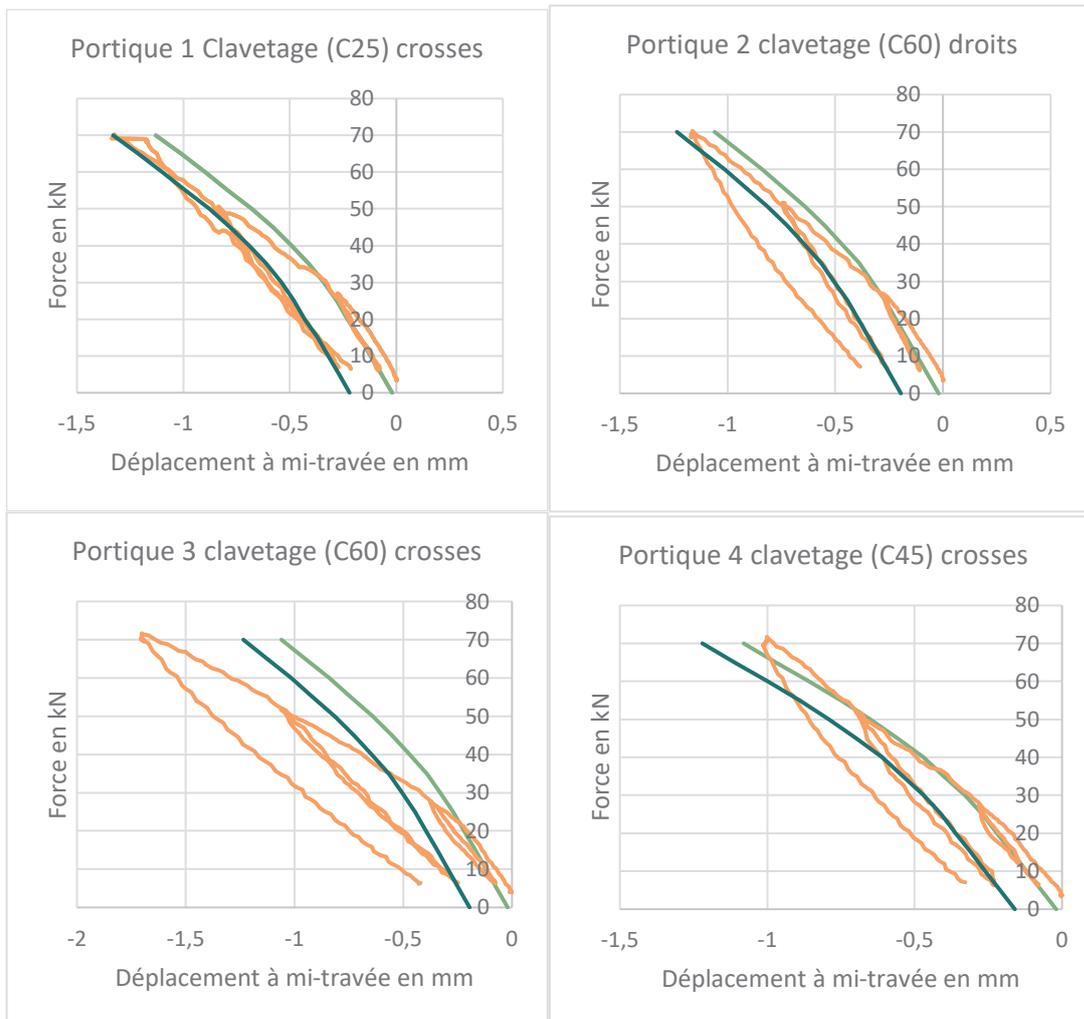


Figure IV. 51 : Superpositions des flèches théoriques du modèle Pythagore (non fissuré en vert, fissuré en bleu) et de flèches enregistrées (en orange) durant les trois chargements.

Les portiques n°1,2 et 4 présentent bien les mêmes comportements attendus selon la théorie alors que les valeurs mesurées du portique n°3 sont supérieures. On soupçonne donc un défaut de réalisation du portique n°3, que l'on pourra certainement vérifier lors de la déconstruction (mise en place des armatures de la poutre).

Les flèches obtenues, en théorie et en pratique, à la fin des cycles de chargements pour une force ponctuelle de 70 kN, sont synthétisées dans le Tableau IV. 13, où l'on remarque bien la différence significative du portique n°3 :

Calcul de flèches	Portique 1	Portique 2	Portique 3	Portique 4
Modèle Pythagore (avec contribution du béton tendu)	1,05 mm	0,99 mm	0,99 mm	1,01 mm
Mesures lors de l'essai (avec déduction des tassements)	0,9 mm	0,91 mm	1,44 mm	0,78 mm

Tableau IV. 13 : Synthèse des valeurs de flèches théoriques et mesurées correspondant au comportement observé pour le portique lors de la 1^{ère} phase d'essais (avec fissuration et contribution du béton tendu pour résister en traction).

On distingue bien le comportement anormal du portique n°3, alors que le portique n°4 avec l'assemblage en C40/50 recouvrements croisés, présente, lui, des performances plus élevées qu'attendues. En effet, d'après les prérequis, on aurait dû obtenir le classement suivant selon les performances :

C60/75 croisés > C60/75 droits > C40/50 croisés > C25/30 croisés,

Or, on obtient donc :

C40/50 croisés > C25/30 croisés > C60/75 droits > C60/75 croisés

On va ainsi éliminer le C60/75 croisés des conclusions de l'essai pour la 1^{ère} phase. Les recouvrements croisés semblent donc plus performants que les recouvrements droits, au point de compenser et surpasser une qualité de béton pourtant plus élevée, puisque le C40/50 et le C25/30 croisés sont plus performants qu'un C60/75 droits. La différence de comportement entre les portiques 1,2 et 4 n'est pas significative. La différence de longueur de clavetage, de type de recouvrements, de qualité de béton n'est donc pas significative pour cette première phase d'essais. Le module du béton a également son importance et comme on l'a détaillé dans le Tableau IV. 3, les rapports d'essais ont montré une meilleure qualité du béton C25/30 avec une résistance de 29,7MPa, alors que l'on obtenait 42,7 MPa pour le C40/50 et une moyenne de 60,1 MPa pour le C60/75, ce qui laisse présager une meilleure performance de l'assemblage en C25/30 par rapport à la théorie.

4.5.2. 2^{ème} phase d'essais

Dans un premier temps, cette phase d'essais reproduit la 1^{ère} phase d'essais afin d'observer un éventuel changement de comportement structural après la déconstruction/reconstruction des portiques. Dans un deuxième temps, un cycle de chargement pour s'approcher de la rupture doit permettre de comprendre le mode de ruine du portique avec son assemblage spécifique démontable.

Le Tableau IV. 14 reprend les déplacements du capteur C1 situé à mi-travée du portique, les tassements des poteaux déduits à partir des deux capteurs en tête de poteaux pour en déduire la valeur réelle de la flèche à mi-travée. L'ensemble des résultats traités est disponible en annexes.

		Déplacement capteur C1	Tassement moyen des deux poteaux (capteurs C10, C11)	Valeur de la flèche à mi-travée
Force appliquée de 25 kN	Portique 1	0,82 mm	0,39 mm	0,44 mm
	Portique 2	0,87 mm	0,5 mm	0,37 mm
	Portique 4	0,51 mm	0,25 mm	0,26 mm
Force appliquée de 50 kN	Portique 1	1,2 mm	0,44 mm	0,76 mm
	Portique 2	1,22 mm	0,49 mm	0,74 mm
	Portique 4	1,11 mm	0,46 mm	0,65 mm
Force appliquée de 70 kN	Portique 1	1,61 mm	0,47 mm	1,14 mm
	Portique 2	1,59 mm	0,5 mm	1,09 mm
	Portique 4	1,72 mm	0,51mm	1,21 mm

Tableau IV. 14 : Résultats de mesures de tassements et de flèches des portiques testés (2^{ème} phase d'essais).

Nous présentons à nouveau les valeurs de déformation des jauges pour le cycle de 25kN dans le Tableau IV. 15.

	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8
Portique 1	8	-36	15	-6	-3	4	-11	7
Portique 2	28	-28	128	-11	-1	4	-30	4
Portique 4	19	-18	12	-30	-6	2	-13	1

Tableau IV. 15 : Déformations dans les jauges pour une force exercée de 25kN en $\mu\text{m/m}$.

Nous avons ensuite, à nouveau, déterminé l'angle entre le poteau et la poutre à partir des données des capteurs mesurées et répertoriées dans le Tableau IV. 16. Ces données permettent de retracer les déformations dont une représentation est donnée à la Figure IV. 52 et de mesurer les angles synthétisés dans le Tableau IV. 17.

	C3	C2	C7	C9	C6	C8
Portique 1	-0,73 mm	-0,85 mm	-0,43 mm	-0,31 mm	0,12 mm	-0,11 mm
Portique 2	-0,65 mm	-0,73 mm	-0,51 mm	-0,70 mm	-	-
Portique 4	-0,54 mm	-0,88 mm	-0,07 mm	-0,26 mm	-0,16 mm	-0,09 mm

Tableau IV. 16 : Déplacements absolus des capteurs.

Suite à un dysfonctionnement technique les déplacements des capteurs C6 et C8 n'ont pas pu être enregistrés.



Figure IV. 52 : Déformée x100 pour le portique 1, à partir des déplacements absolus des capteurs, pour une charge de 70 kN.

	θ_1	θ_2
Portique 1	89,867°	89,845°
Portique 2	89,804°	-
Portique 4	89,815°	90,184°

Tableau IV. 17 : Angles mesurés à partir du dessin des déformées avec le logiciel Rhinoceros.

Les angles trouvés sont, à nouveau, très proches de l'angle droit, c'est-à-dire d'une liaison encastree.

Les flèches obtenues, en théorie et en pratique, à la fin des cycles de chargements pour une force ponctuelle de 70 kN, sont synthétisées dans le Tableau IV. 18 :

Calcul de flèches	Portique 1	Portique 2	Portique 3	Portique 4
Modèle Pythagore (avec contribution du béton tendu)	1,05 mm	0,99 mm	0,99 mm	1,01 mm
Mesures lors de l'essai (avec déduction des tassements)	1,14 mm	1,09 mm	-	1,21 mm

Tableau IV. 18 : Synthèse des valeurs de flèches théoriques et mesurées correspondant au comportement observé pour le portique lors de la 2^{ème} phase d'essais (avec fissuration et contribution du béton tendu pour résister en traction).

Nous constatons une augmentation de la flèche entre la 1^{ère} phase d'essais (avant réemploi) et la 2^{ème} phase d'essais (après réemploi) de 27% pour le portique 1, de 20% pour le portique 2 et de 55% pour le portique 4. Lors du premier essai l'ordre de performance des portiques était le suivant :

C40/50 crosses (portique 4) > C25/30 crosses (portique 1) > C60/75 droits (portique 2) > C60/75 crosses (portique 3),

alors que lors de ce deuxième essai il est ainsi :

C60/75 droits (portique 2) > C25/30 crosses (portique 1) > C40/50 crosses (portique 4).

Ces évolutions ne sont donc pas liées à la différence de qualité des matériaux mais probablement à la qualité de l'exécution (notamment du processus de déconstruction puis reconstruction) qui diffère selon les portiques. Nous avons d'ailleurs remarqué que la géométrie des portiques présentait des défauts lors de la 2^{ème} phase d'essais, non visibles lors de la 1^{ère} phase d'essais.

Un cycle de chargement pour approcher la rupture a ensuite été effectué. Pour des raisons de sécurité le chargement a été arrêté lorsque le déversement des portiques devenait trop important. La fissure la plus importante a été observée au niveau de la jonction entre le clavetage et le poteau, sur la face supérieure du portique, comme on peut le voir sur la Figure IV. 53 qui suit pour l'exemple du portique 1.



Figure IV. 53 : Ouverture progressive de la fissure au niveau de la jonction clavetage-poteau, lors du chargement à la rupture.

Ce mode de fissuration pourrait révéler une faiblesse d'adhérence entre le béton de clavetage et le béton du poteau. Cette adhérence pourrait être renforcée par la réalisation d'indentations, comme schématisées sur la Figure IV. 54 ou d'une clé de clavetage.

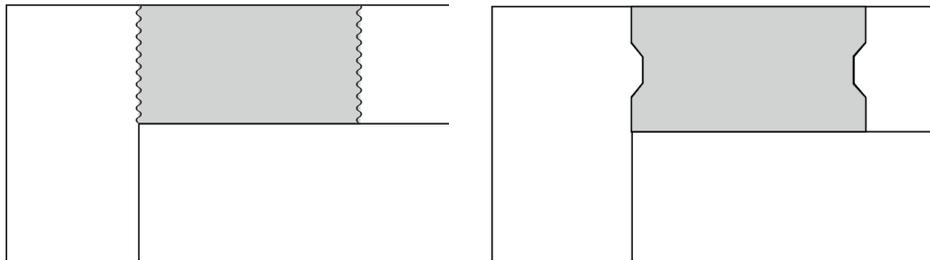


Figure IV. 54 : Proposition d'indentation et de clé de clavetage pour augmenter l'adhérence entre le béton de clavetage et le béton du poteau.

Le Tableau IV. 19 indique les valeurs maximales atteintes pour le chargement du vérin et les flèches correspondantes.

	Flèche à mi-travée (mm)	Charge max. (kN)
Portique 1	1,83 mm	200,3 kN
Portique 1	1,74 mm	203,9 kN
Portique 2	1,76 mm	200,5 kN
Portique 2	2,18 mm	223,1 kN
Portique 4	1,48 mm	200,9 kN

Tableau IV. 19 : Valeurs maximales atteintes lors de la 2^{ème} phase des essais, selon les portiques.

4.6. Conclusion

Une campagne d'essais sur portiques en béton armé a été réalisée au laboratoire Navier dans le but de connaître la performance d'un assemblage reconstitué dans le cadre d'une simulation de réemploi d'éléments structuraux en béton armé. L'objectif était de savoir si l'assemblage prévu se comporte bien comme un encastrement, un semi-encastrement voire une semi-articulation. Deux phases d'essais ont été conduites. Une première sur portiques neufs (1^{ère} phase), une seconde sur des portiques dont les liaisons ont été hydro démolies et reconstituées (2^{ème} phase).

Les résultats de la 1^{ère} phase des essais sont proches des simulations numériques avec comme hypothèses que les liaisons sont encastrees et qu'une contribution du béton tendu, tenant compte de la fissuration, est considérée. On peut en déduire que le comportement des portiques réemployables avant déconstruction est proche d'un comportement de liaisons encastrees.

De plus, pour cette première phase d'essais, on ne note quasiment pas de différence de raideur entre les quatre portiques testés. Par conséquent, la nature de l'assemblage (type de béton C25/30, C40/50, C60/75), la longueur de clavetage ou le recouvrement d'armatures (droits ou croisés) n'ont pas eu d'impact significatif sur le comportement.

La deuxième phase d'essais a montré des résultats très proches par rapport à la première phase et a surtout confirmé que les liaisons étaient assimilables à un encastrement. Nous avons constaté une légère augmentation de la flèche à mi-travée et un changement dans l'ordre des portiques vis-à-vis des performances entre la 1^{ère} et la 2^{ème} phase d'essais. Ceci ne s'explique donc pas par rapport aux différentes qualités du béton mais aux différences de soins dans l'exécution, en particulier lors de la déconstruction et la reconstruction. L'augmentation de la flèche après réemploi peut indiquer qu'une attention particulière et renforcée doit être mise en place lors de la remise en œuvre des portiques (reconstitution des clavetages), avec un contrôle géométrique plus précis.

Le processus de déconstruction par hydrodémolition n'a donc pas endommagé le portique du point de vue structural. Le processus de reconstruction a permis de reconstituer un portique robuste, résistant aussi bien que le portique initial lors des cycles identiques de chargements. La recherche de la rupture du portique a démontré que le portique résistait au-delà des estimations théoriques par le calcul. De plus la rupture s'est localisée à la jonction de l'assemblage et du poteau, ce qui pourrait être amélioré par la mise en place d'un crénelage. Ces résultats sont donc très encourageants pour le réemploi du béton armé qui, avec le protocole proposé ici, n'altère pas les propriétés de résistance des éléments de structure, et ce, même avec un assemblage constitué du béton C25/30, le plus faible testé dans cette étude.

Références bibliographiques :

- [1] IFSTTAR, «Un béton "vert" est-il possible?,» 5 novembre 2018. [En ligne]. Available: https://www.ifsttar.fr/fileadmin/redaction/dossiers-thematiques/infrastructures/beton-vert/11364_Beton_Vert_FR_interactif.pdf. [Accès le 18 septembre 2019].
- [2] M. Brocato, *Statique: De la géométrie à la conception des structures.*, 1ère éd., Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussée, Éd., Paris, 2016, p. 326.
- [3] Y. Malier, *High Performance Concrete. From material to structure*, Y. Malier, Éd., London: Chapman & Hall, 1992, p. 542.
- [4] J. Courbon et J.-N. Theillout, «Résistance des matériaux Formulaire,» [En ligne]. Available: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewjtuZOyjprAhUFzhoKHfCCGkQFjABegQIBBAB&url=https%3A%2F%2Feducnet.enpc.fr%2Fpluginfile.php%2F23817%2Fmod_folder%2Fcontent%2F0%2FFormulaire.pdf%3Fforcedownload%3D1&usg=AOvVaw1wWPhZ6me. [Accès le 12 Février 2020].
- [5] B. Parmentier et G. Zarmati, «Etats limites de service du béton armé. Partie 1 - Contrôle des flèches suivant l'Eurocode 2,» *Les Dossiers du CSTC*, vol. 4, n° 12, p. 14, 11 août 2011.
- [6] J. Bezerra Da Silva Neto, «Conception des bâtiments en vue de leur déconstruction - Approche théorique et expérimentale,» Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, setec tpi, 2020.

CHAPITRE V

Analyse environnementale du réemploi

Pour répondre à la mise en pratique du réemploi, nous avons abordé plusieurs objectifs : la conception en vue du réemploi (DfReu) dans le Chapitre II et la mise en place d'une traçabilité renforcée et d'une banque de matériaux en Chapitre III. Nous avons évoqué à plusieurs reprises la problématique des impacts environnementaux du process de réemploi. D'une part dans le chapitre II, nous constatons que les bâtiments réemployables s'accompagnent d'un léger surdimensionnement (inférieur à +1% de matière, selon ch. II, partie 2.3.4.3.) par rapport à un bâtiment classique. D'autre part comme évoqué dans le chapitre I, nous manquons d'ACV sur les process de construction et de déconstruction pour le réemploi, qui pourraient s'avérer plus impactants que pour une pratique traditionnelle, en termes énergétiques notamment. L'objectif de ce chapitre est donc d'analyser l'impact du réemploi afin de justifier cette pratique d'un point de vue environnemental, par rapport à une conception traditionnelle à neuf.

Dans ce chapitre nous allons donc aborder dans une première partie, la façon de prendre en compte le réemploi dans l'analyse environnementale, puis nous utiliserons la méthode ACV. Celle-ci s'appuiera sur une expérimentation de construction/ déconstruction/ reconstruction de portiques en béton armé afin de disposer de données réelles de tels processus et d'évaluer l'impact de chacun de ces process. Pour réaliser les ACV, le logiciel OpenLCA 1.8.0 ainsi que les bases Ecoinvent 3_2_cutoff seront utilisés. Les process Ecoinvent sont notés en italique et en anglais (langue d'origine) dans le texte. La méthode d'évaluation environnementale est celle de la méthode de la norme NF 15804+A1 et la norme complémentaire NF EN 15804/CN dont la compatibilité avec OpenLCA a été établie par Tiffany Desbois¹. A signaler que nous utiliserons l'appellation « changement climatique » pour l'indicateur d'impact conforme à la norme NF 15804+A2, alors qu'il était nommé « réchauffement climatique » dans la norme NF 15804+A1 et la norme complémentaire NF EN 15804/CN. Enfin nous nous appuierons sur les travaux récents proposant un indice de circularité pour proposer, en complément de l'ACV, une évaluation quantitative des principes du DfReu pour un bâtiment.

5.1. Evaluer les impacts environnementaux du réemploi en utilisant la méthode ACV

La méthode ACV a été créée pour évaluer le cycle de vie d'un produit fabriqué industriellement. L'adaptation de cette méthode au réemploi des matériaux de construction n'est pas évidente. L'ACV présente l'avantage d'être une méthode normalisée et consensuelle qui permet de quantifier les impacts environnementaux du réemploi afin de discerner les situations pour lesquelles cette pratique est vertueuse. Nous allons voir dans cette partie, les particularités de la prise en compte du réemploi dans la méthode ACV.

¹ Méthode créée par Tiffany Desbois - Cerema / DTerOuest / Laboratoire de Saint-Brieuc, Septembre 2016 pour les catégories d'impacts, Janvier 2017 pour les paramètres. Document associé : Rapport du Cerema intitulé "Méthode d'évaluation environnementale sous OpenLCA Selon la norme NF EN 15804+A1 et la norme complémentaire NF EN 15804/CN", en date du 4 décembre 2017.

5.1.1. Les process

Le réemploi peut intervenir à deux moments du cycle de vie d'un bâtiment, illustré Figure V. 1 et Figure V. 2 :

- soit en utilisant des matières entrantes réemployées, dans ce cas, on considère que les matériaux réemployés n'ont pas d'impact dans les étapes de production. C'est le cas pour un bâtiment neuf que l'on construit en y intégrant des matériaux réemployés (substitution d'un matériau neuf).
- soit en considérant le réemploi des matières sortantes, dans ce cas les matériaux à réemployer n'ont pas d'impact pour le traitement des déchets et l'élimination.

L'enjeu de notre travail, illustré dans la Figure V. 2, est donc bien, à terme, de permettre, pour un même bâtiment, à la fois de mettre en œuvre des éléments porteurs réemployés, mais aussi et surtout, de faire en sorte, en fin de vie, de rendre réemployable un maximum d'éléments porteurs.

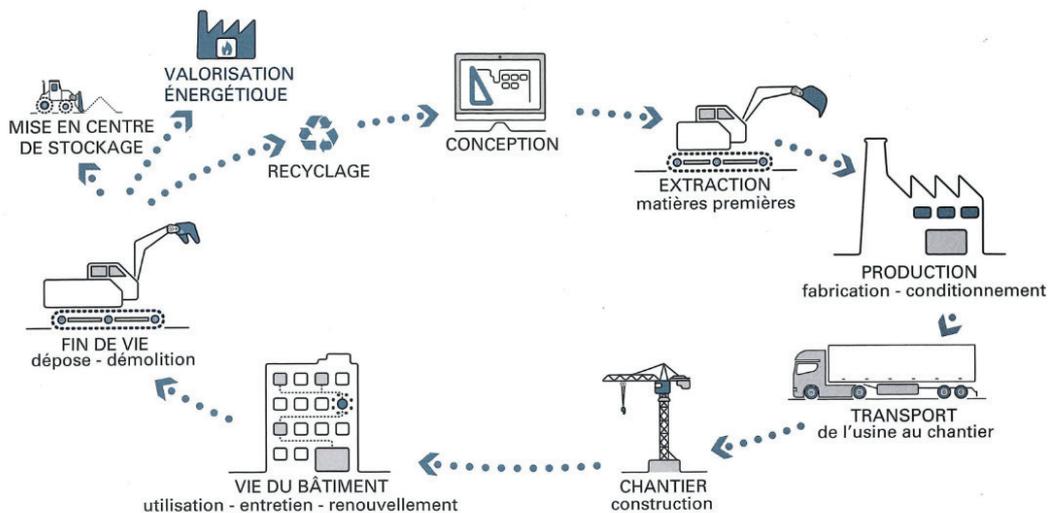


Figure V. 1 : Les grandes étapes du cycle de vie d'un produit de construction au sein du cycle de vie d'un bâtiment dit « traditionnel », sans réemploi, Lebert et al. [1].

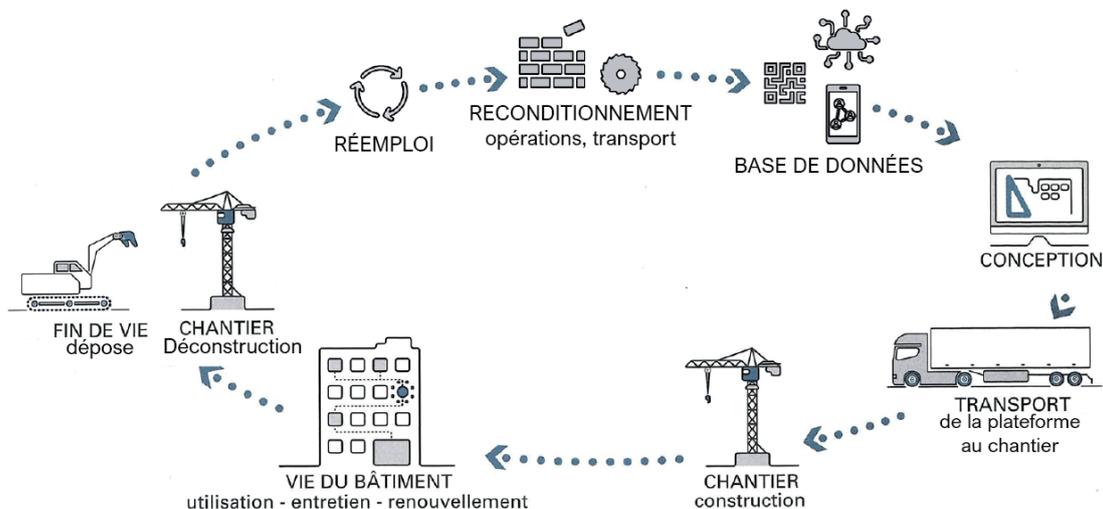


Figure V. 2 : Les grandes étapes du cycle de vie d'un produit de construction de réemploi au sein du cycle de vie d'un bâtiment dit « réemployable », adapté d'après Lebert et al. [1].

La plupart des données environnementales du bâtiment se trouvent dans les fiches FDES / DEP des produits, puisque les politiques actuelles incitent fortement les industriels à communiquer ces données pour l'évaluation de la contribution « produits et équipements » d'un bâtiment, notamment pour le calcul selon le référentiel E+C-, [2], puis dans la future RE2020. Cependant ces FDES/DEP comportent parfois un module non renseigné notamment pour le processus de construction (A4-A5), ou pour la déconstruction (C1-C2). La principale voie de fin de vie prise en compte est la décharge dans les données disponibles, voire le recyclage et plus rarement un réemploi (filière tuiles par exemple). Par ailleurs, les ACV complètes de bâtiment prenant en compte, au-delà des FDES, les données de process de construction sont bien plus rares. Les données globales disponibles sont reprises dans le Tableau V. 1 et permettent de hiérarchiser les priorités d'actions pour diminuer les impacts environnementaux du secteur de la construction. En ce qui concerne les émissions de GES, le principal levier concerne le poste matériaux qui représente en moyenne une large majorité des impacts pour l'indicateur « changement climatique », (environ 54%, d'après le Tableau V. 1). L'impact chantier, lui, ne semble pas significatif. Enfin les consommations d'énergie forment également un poste majeur, bien qu'elles diminuent fortement lorsque l'on se trouve dans le cas de bâtiments basses consommations ou passifs.

Le périmètre de ce travail sur le réemploi concerne bien les postes matériaux (54%) et chantier (3%), d'après le Tableau V. 1 sur l'ensemble du cycle de vie d'un bâtiment.

Etudes	Matériaux (produits et équipements)	Chantier (construction / démolition)	Consommations d'énergie	Consommations et rejets eau	Consommations totales (énergie et rejets d'eau confondus)
HQE Performance [3]	56%	3%	40%	1%	
Observatoire E+C- [4]	63%	1%	32%	3%	
LETI, bâtiments réglementation actuelle [5]	31%	3%			66%
LETI, bâtiment basses consommations [5]	67%	6%			27%

Tableau V. 1 : Répartition moyenne des contributeurs pour l'indicateur "changement climatique" pour un bâtiment sur son cycle de vie, selon différentes études.

Un des intérêts de l'ACV est d'évaluer plusieurs indicateurs d'impacts environnementaux afin d'éviter tout risque de déplacement de pollution. Les données suffisantes, pour permettre de réaliser l'ACV complète d'un processus de réemploi, n'existant pas dans la littérature, il est nécessaire de passer par l'expérimentation pour les produire. Ce chapitre est donc fondé sur le protocole d'essais du chapitre IV qui nous permet de générer les données utiles pour réaliser une évaluation environnementale du réemploi.

Parmi les particularités du réemploi, une différence pour l'étape de conception entre un bâtiment traditionnel et un bâtiment réemployé est signalée par les retours d'expérience des acteurs du réemploi. En effet, ces derniers indiquent qu'un temps d'études légèrement plus long est à prévoir avec le réemploi qui demande des recherches de matériaux, une adaptabilité du projet selon les stocks disponibles ou encore un travail supplémentaire de calepinage, rappelé par Benoît et al. [6], et d'après des échanges avec les architectes « Encore Heureux » [7]. Selon l'élément réemployé il faudra également prévoir un processus de caractérisation des performances résiduelles avec des essais en laboratoire qui peuvent également augmenter significativement les temps d'études. Enfin, même pour un bâtiment totalement neuf mais que l'on souhaite concevoir réemployable en fin de vie, des études complémentaires seront nécessaires, notamment pour adapter des assemblages que l'on souhaitera réversibles, comme on a pu le voir en chapitre II.

L'étape d'extraction et de production des éléments de construction est diminuée lorsqu'il s'agit d'un réemploi effectif puisque l'élément a déjà été produit ultérieurement, ce qui représente le premier intérêt environnemental du réemploi. Une opération de reconditionnement spécifique aux éléments de réemploi constituera le principal contributeur à cette étape.

Le transport des éléments peut s'avérer plus vertueux en cas de réemploi. En effet les opérations de réemploi sont viables lorsqu'elles privilégient des approvisionnements locaux, voire un réemploi *in situ*, Benoît et al. [6]. La notion d'approvisionnement local est rarement quantifiée mais on peut donner à titre d'exemple une distance de 30 km pour les granulats et le béton, selon Rouvreau et al. [8]. Le gain réel sur le poste transport dépendra en grande partie du matériau réemployé. Le béton, neuf, est considéré comme un matériau local. Dans les bétons utilisés pour notre expérimentation, les matériaux les plus locaux sont les granulats, alors que le sable peut provenir de plus loin sur le territoire français et certains constituants, en quantités plus minimes, comme le plastifiant, peuvent provenir d'un pays étranger. Un béton réemployé ne permettra pas forcément de diminuer, ou alors très à la marge, le transport pour ces aspects. En revanche dans le cas d'un bois d'ingénierie fabriqué initialement en Autriche ou en Scandinavie² ou bien d'un acier provenant de l'étranger³ et dont le minerai de fer a été importé d'un autre continent, le réemploi de ces matériaux pourrait s'avérer très efficace pour diminuer la part de transport par rapport à un produit neuf équivalent.

Les postes chantier (environ 3%) ne diffèrent globalement pas entre les techniques en neuf et en réemploi, selon Benoît et al. [6]. Néanmoins un bâtiment réemployable sera, dans la plupart des cas, conçu comme un bâtiment préfabriqué et procurera les mêmes avantages (moindres nuisances, temps d'exécution raccourcis, moins de déchets) exposés par Hoyet [9].

Les premiers retours d'expérience ne font pas état de différence pour l'étape « vie du bâtiment » qui est semblable en bâtiment traditionnel et en bâtiment réemployable, selon Benoît et al. [6].

Lorsqu'une déconstruction est mise en place (en vue d'un réemploi), celle-ci peut être plus impactante qu'une démolition traditionnelle. En effet, déconstruire minutieusement un bâtiment en déposant chacun de ses éléments est plus chronophage qu'une démolition globale. Cependant les chantiers actuels tendent de plus en plus vers une dépose sélective et le tri se précise de plus en plus pour devenir très exigeant. En comparaison d'une dépose sélective, la déconstruction n'est pas plus longue, selon Benoît et al. [6]. Il faut également rappeler que ces chantiers de déconstruction demandent plus de main d'œuvre, ce qui peut être bénéfique socialement pour créer des emplois locaux. Dans ses conclusions, Brière [10] montre qu'après avoir étudié 3 scénarios possibles : une réutilisation, un recyclage et une mise en décharge, pour une poutre en béton armé, le scénario de réutilisation était pour de nombreux indicateurs la solution la plus pertinente, dès le remplacement d'une seule poutre pour les indicateurs « Ecotoxicité aquatique » et « Ecotoxicité terrestre », de 2 poutres pour les indicateurs

² Implantations du fabricant de bois d'ingénierie Stora Enso <https://www.storaenso.com/en/about-stora-enso/stora-enso-locations>, et du fabricant autrichien KLH, <https://www.lignatec.fr/>, consulté le 22/07/2019.

³ L'usine d'ArcelorMittal Europe qui produit les profilés de construction se trouve au Luxembourg, https://europe.arcelormittal.com/repository2/Europe/FACTBOOK2018-06_FR.pdf, consulté le 22/07/2019.

« Destruction de la couche d'ozone », « Ecotoxicité marine » et « Déchets en vrac » ou de 3 poutres pour l'indicateur « Changement climatique ». Selon son étude, certains indicateurs (comme l'oxydation photochimique ou l'énergie primaire totale) ne montrent une rentabilité environnementale qu'à partir de 10 poutres réutilisées.

Quant à la valorisation en fin de vie, elle semble à l'avantage du réemploi puisque celui-ci conserve au maximum l'intégrité de la matière. Ainsi, un élément de construction réemployé va nécessiter, dans le pire des cas, quelques opérations de reconditionnement (nettoyage, mise aux dimensions souhaitées, reprise des surfaces). En comparaison, un recyclage peut nécessiter une forte transformation de la matière avec éventuellement une demande en énergie non négligeable (comme pour le recyclage de l'acier). Dans le cas d'une incinération avec une valorisation énergétique, une analyse plus fine des bénéfices est à faire, mais il y aura forcément une perte par rapport au réemploi, en matière d'épuisement des ressources, comme le démontre Brière [10]. A noter que le réemploi, s'il s'accompagne de la mise en place d'une base de données numériques (formant une banque des matériaux) peut engendrer un impact environnemental dû au stockage de données numériques. Dans le domaine de l'impact environnemental du numérique, très peu de données existent aujourd'hui, mais on sait qu'il n'est pas négligeable. En effet, ce secteur est responsable aujourd'hui de 4 % des émissions mondiales de GES et la forte augmentation des usages laisse présager un doublement de cette empreinte carbone d'ici 2025, d'après l'Ademe [11]. En moyenne, il faut mobiliser de 50 à 350 fois leur poids en matières pour produire des appareils électriques à forte composante électronique, soit par exemple 800 kg pour un ordinateur portable et 500 kg pour une box Internet, dont notamment des métaux rares [11].

5.1.2. Les durées de vie

Aujourd'hui la plupart des référentiels ou des normes relatives à l'ACV sont appliqués pour une durée de vie des ouvrages fixée à 50 ans, comme E+C-, [4]. Concernant les fiches FDES ou DEP les durées de vie sont celles pour lesquelles les fabricants s'engagent, c'est-à-dire que la Durée de Vie de Référence (DVR) varie selon le produit (30 ans pour une fenêtre⁴, 50 ans pour un isolant⁵, 100 ans pour un élément porteur en béton⁶, par exemple selon la base INIES⁷). Ces durées de vie sont bien fixées selon les produits ou parfois selon les familles de produits. Les durées de vie sont déterminées à l'avance pour l'engagement temporel que prennent les fabricants dans l'établissement de leurs FDES, mais peuvent varier dans la réalité, en fonction de leur usage et de l'environnement dans lequel sont mis en œuvre les produits.

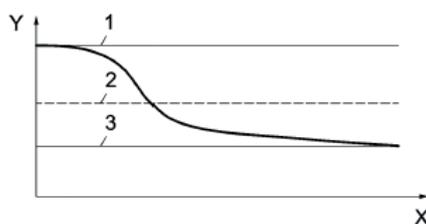
La norme NF EN 15804+A1 [12] considère ainsi une perte des performances du produit dans le temps, comme rappelé avec les extraits de cette norme en Figure V. 3 et Figure V. 4.

⁴ Fenêtre et Porte-fenêtre MC France coulissant Méo 4-20-4 (v.1.2)

⁵ Panneaux Rigides Isolants en Polyuréthane Ep 80 mm KNAUF Thane Mur RB2 (v.1.2)

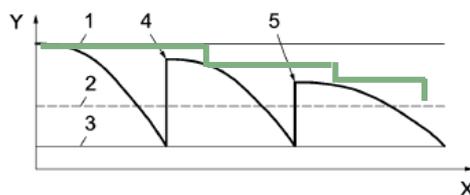
⁶ Dalle alvéolée en béton précontraint (v.1.1)

⁷ <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html>



Légende
X DVR
Y Performance fonctionnelle
1 Initiale
2 Moyenne
3 Minimale

Figure V. 3 : Figure A.1 de la norme NF EN 15804+A1, « Type de performance technique et fonctionnelle déclarées et DVR ».



Légende
X DVR
Y Performance technique et fonctionnelle
1 Initiale
2 Moyenne
3 Minimale
4 Maintenance/réparation
5 Maintenance/réparation

Figure V. 4 : Figure A.2 de la norme NF EN 15804+A1, « Type de performance technique et fonctionnelle déclarées, réparation/maintenance pendant la DVR ».

De la même façon qu'est prise en compte une dégradation des performances dans la norme, on pourrait mettre en place un coefficient de réemploi, qui abaisserait les caractéristiques théoriques considérées de l'élément réemployé. Le réemploi peut, en effet, engendrer des pertes de performances dont il faudra tenir compte. Ce coefficient de réemploi pourrait prendre en compte différents critères comme les phénomènes extrêmes subis pendant la vie en œuvre ou l'endommagement lors du chantier de déconstruction et des manipulations successives. *A priori*, un élément de structure ne va pas s'user pendant sa vie en œuvre mais sera davantage exposé à une dégradation lors du processus de déconstruction. Ce coefficient serait donc pris en compte à chaque déconstruction (nombre de démontages) et non en fonction du nombre d'années, puisque les démontages peuvent intervenir selon des cycles d'usage de différentes durées, comme signifié en vert sur la Figure V. 4.

Ainsi beaucoup d'éléments de construction, notamment les éléments porteurs sont bien plus durables dans la réalité. Rappelons que certains temples japonais en bois sont plus que millénaires, comme les temples d'Horyu-ji construits au début du 7^e siècle, d'après l'UNESCO [13], avec des hauteurs et des portées impressionnantes, et qu'aucun autre matériau structural, étudié dans la présente étude, ne présente une plus grande durabilité prouvée. Par ailleurs, ces durées indicatives ne sont également valables que pour un unique cycle de vie, c'est-à-dire que l'on considère une fin de vie (recyclage, valorisation) sans intégrer par avance la possibilité pour un élément d'enchaîner plusieurs vies soit 2, 3 cycles d'usages ou plus, pour un élément de structure. Quant à des données statistiques des filières professionnelles de produits pour un réemploi, très peu de FDES font état de réemploi dans le module D défini par la norme NF EN 15804+A1 [12], à part notamment pour des tuiles (cf. Ch I, partie 1.4.4.4.).

Le schéma en Figure V. 5, confronte la problématique du réemploi à l'échelle du produit et à l'échelle du bâtiment, avec un cas fictif simplifié. En effet, les temporalités ne sont pas les mêmes. Au sein d'un même bâtiment peuvent se succéder, différents produits neufs ou réemployés ayant des durées d'usages, précédentes et à venir, différentes, pour une même fonction assurée. Cela peut multiplier les combinaisons possibles tout au long du cycle de vie.

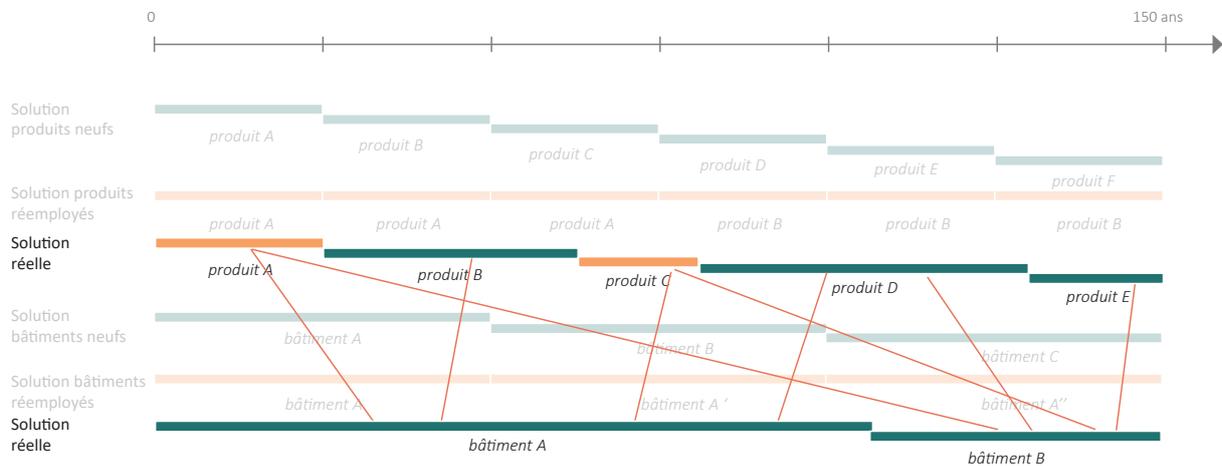


Figure V. 5 : Schématisation de la prise en compte d'une durée de vie produit et bâtiment

En revanche, un travail poussé d'ACV, permettrait de réaliser une étude plus précise. Dans le cadre de l'étude d'ACV réalisée dans ce chapitre, le nombre de cycles et la durée de ces cycles feront donc l'objet d'une analyse de sensibilité. Il faudrait s'intéresser à la notion de temps dans le réemploi ce qui pourrait passer par une ACV dynamique ou conséquentielle. Par ailleurs, il faut signaler que les domaines de l'ACV dynamique étudiée par Laratte [14], et de l'ACV conséquentielle étudiée par Roux [15], pourraient apporter des solutions pour prendre en compte ces phénomènes temporels mais sont éloignés du domaine applicatif des bureaux d'études structure visés principalement par le présent travail.

5.1.3. Choix des unités pour exprimer la fonction

Pour rappel, l'objectif général de ce travail est de permettre le réemploi d'éléments porteurs. Ainsi l'objectif de l'ACV réalisée ici est d'étudier l'impact du réemploi. Se pose alors la question de l'unité à choisir pour quantifier la fonction de notre système à étudier. La principale fonction des éléments porteurs est de reprendre une certaine charge pour l'amener jusqu'au sol. Cependant le calcul de cette charge ne peut se faire que dans le contexte de la structure de l'ensemble du bâtiment et de la place précise de l'élément en question. La charge à reprendre dépend ainsi du poids propre, des charges d'équipement, des charges d'exploitation qui dépendent du programme (bureaux, logements) mais également des charges de vent, séisme... (cf. Chapitre II). Enfin dans le cas d'un IGH le comportement global de la structure a une grande importance avec, en particulier, des critères de flèches, d'accélération et de déplacement en tête à respecter qui sont souvent dimensionnants. Ainsi les dimensions d'un élément porteur dépendent de tous ces paramètres et ne peuvent être fixées qu'après un certain nombre d'itérations pour vérifier que l'on répond à toutes les vérifications. L'intérêt est bien de pouvoir conseiller dans une configuration donnée de programme (bureaux, logements, ...) et sur une hauteur donnée, le système porteur le plus vertueux.

Pour comparer deux éléments porteurs, et donc deux charges reprises, on va alors les isoler du « système bâtiment ». On peut ainsi isoler une surface de plancher supportée et dans

ce cas choisir un m^2 de SDP comme unité fonctionnelle, ou une poutre avec une charge linéique en kN/ml , ou encore un poteau soumis à une force en kN . Les différents éléments structuraux et les charges reprises sont illustrés en Figure V. 6. Les différents types de charges ne permettent donc pas d'exprimer l'unité fonctionnelle de la même façon pour tous les éléments porteurs. Les comparaisons ne seront possibles, qu'à service rendu égal, entre deux poteaux reprenant une même force, deux poutres reprenant une même charge linéique ou deux planchers reprenant une même charge surfacique. A l'échelle supérieure d'une structure, la comparaison pourra se faire entre deux bâtiments aux dimensions similaires (nombre d'étages, surface d'un étage) abritant un programme similaire (bureaux par exemple).

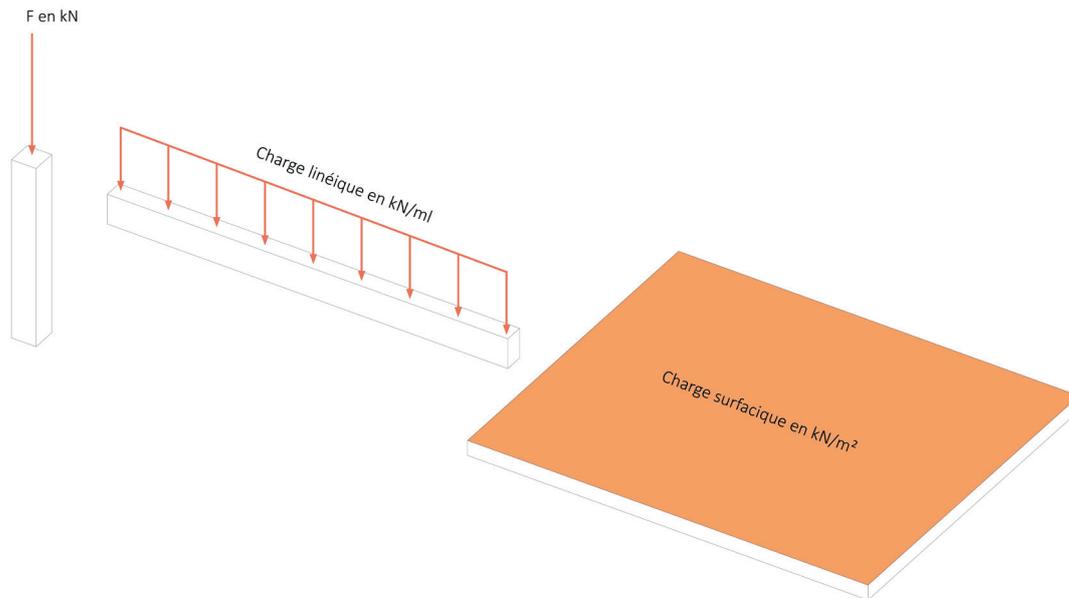


Figure V. 6 : Type de charge structurale selon l'élément porteur : poteau, poutre ou dalle.

Le risque est ainsi d'isoler un système qui, sans son contexte, n'a plus de sens. Un point d'attention, dans le cadre particulier du réemploi, concerne l'évolution structurale. Ainsi un système portique lors du 1^{er} cycle d'usage pourrait devenir une poutre et deux poteaux (remis en œuvre dans différents bâtiments) lors du 2^{ème} cycle d'usage par exemple.

Dans le cas d'un IGH en béton, on rapporte souvent le volume total de béton à la surface de plancher, c'est l'épaisseur moyenne. Mais l'épaisseur moyenne ne permettra pas de comparer une structure en béton avec une structure en acier remplissant la même fonction. Si l'on considère bien un bâtiment dans son ensemble et que l'on ramène le résultat absolu à un m^2 de surface de plancher construit ou à un kg de matière mise en œuvre, cela permet plus facilement de comparer ces valeurs à un autre bâtiment semblable (en programme et en nombre d'étages) à partir du moment où on connaît le total de m^2 construit ou le total de kg de matière mise en œuvre. L'usage dans la pratique est d'utiliser le m^2 de surface construite pour les estimations de coûts mais également de GES. Ainsi il sera préféré de conserver le m^2 à condition de l'utiliser pour comparer des bâtiments semblables en fonction et en nombre d'étages (service rendu égal), c'est-à-dire respectant les mêmes critères dimensionnants afin de comparer uniquement les impacts de la performance structurale.

Cependant dans le cadre des essais sur portiques du chapitre IV on compare un trio d'éléments linéaires (2 poteaux et une poutre) et il sera nécessaire de revenir au système portique avec une fonction exprimée en kN (force ponctuelle appliquée par le vérin). Les différents portiques sont tous dimensionnés pour reprendre la même charge linéique et présentent la même portée.

5.2. ACV du portique en béton armé réalisé dans le cadre de l'expérimentation

On propose de réaliser l'ACV des 4 portiques en béton armé à l'échelle 1/3 (décrits dans le chapitre IV), pour constituer le bilan environnemental d'un process de réemploi anticipé (construction et déconstruction puis reconstruction).

5.2.1. Objectifs et système

On cherche donc à réaliser une analyse comparative :

- entre les quatre portiques réemployables, pour identifier les leviers de conception permettant de diminuer leur impact ;
- entre le groupe de portiques réemployables et un portique neuf dimensionné plus classiquement et qualifié de « sans réemploi », pour identifier les différences d'impact des processus, notamment de déconstruction pour un réemploi (vs. démolition pour un recyclage).

Généralement, l'optimisation de matière en conception passe par l'usage d'un béton plus performant qui permet de réduire significativement la quantité totale mise en œuvre, d'après les retours d'expérience des projets de Setec tpi, et donc d'espérer des impacts environnementaux réduits. Dans un souci d'optimisation des coffrages pour la réalisation des portiques nous n'avons pas pu faire varier les sections de béton (dont la différence aurait été minime dans notre cas) entre les quatre portiques, mais nous avons adapté le ferrailage en fonction.

5.2.1.1. Unité fonctionnelle du portique

La fonction des portiques est de reprendre les chargements du poids propre, des charges permanentes complémentaires et d'exploitation et l'action du vent pour le programme défini soit :

- charges permanentes complémentaires de 0,7 kN/m² correspondant à un faux plafond, à des réseaux suspendus et un faux-plancher ;
- charges d'exploitation correspondant à la destination de bureaux (Catégorie B), soit 2,5 kN/m² avec les surcharges d'exploitation fixées par la NF EN 1991-1-1 et son Annexe Nationale, donc au total $Q_k = 2,5 + 0,87 = 3,3$ kN/m².

L'unité fonctionnelle, à l'échelle 1/3, pour l'ACV est donc définie ainsi : un portique de 0,44 m³ de béton (soit en dimensions : 0,35x0,35x1,4 pour chacun des poteaux, et 0,15x0,3x2,15 pour la poutre), d'une portée de 2m15, supportant une charge de 73 kN, correspondant à un usage de bureaux, pour une durée de vie de 50 ans.

Les flux de référence pour les quatre portiques, auxquels on ajoute un portique « sans réemploi » sont donc décrits dans le Tableau V. 2 :

	Masse d'armatures	Volume de béton courant C60	Béton clavetage	Volume de béton clavetage
Portique 1	75,6 kg	0,386 m ³	C25	0,054 m ³
Portique 2	73,9 kg	0,378 m ³	C60	0,062 m ³
Portique 3	80,3 kg	0,399 m ³	C60	0,041 m ³
Portique 4	80,7 kg	0,396 m ³	C45	0,044 m ³
Portique sans réemploi	67,7 kg	0,44 m ³	-	-

Tableau V. 2 : Flux de référence pour chaque scénario de portique.

Les portiques sont illustrés aux figures IV.4, et 5 du chapitre IV.

5.2.1.2. Limites du système des portiques

Pour chacun des quatre portiques de l'essai, les limites du système seront les mêmes, indiquées en jaune Figure V. 7. Les limites du système pour le portique neuf « sans réemploi » sont représentées en vert sur cette même figure. La différence entre les portiques portera sur la nature du béton de l'assemblage et sur le type de recouvrement de l'armature. On ne retiendra pas l'impact de l'étape de conception, qui de plus, est la même pour tous les portiques dans notre cas. Lors de la phase d'utilisation (correspondant à l'étape de vie en œuvre B1-B7 dans la norme NF EN 15804+A1/CN) la structure, abritée au sein du bâtiment (classe d'exposition XC1 pour le béton), ne se dégrade pas par rapport à l'étape A5 de cette même norme. On vérifiera les pertes de matière lors de l'hydrodémolition pour évaluer les impacts du process de déconstruction. Dans le cadre de l'ACV du portique, nous n'appliquons pas d'allocation.

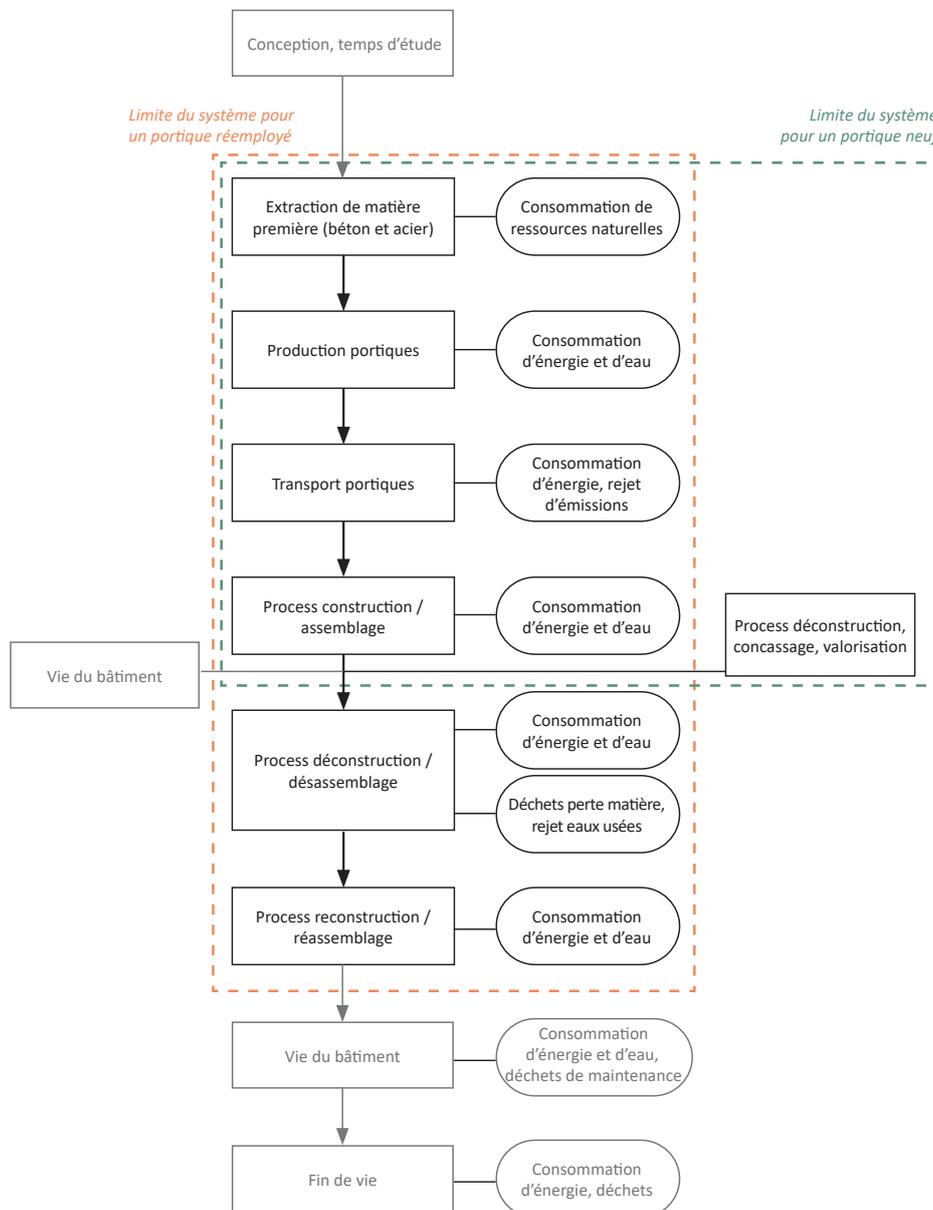


Figure V. 7 : Limites du système des portiques étudiés.

5.2.2. Inventaire, collecte des données

Le système pour le modèle ACV du portique a fait l'objet d'une prospection auprès des professionnels : ingénieurs structure, entreprises de construction, usine de préfabrication car les données sur ce process n'ont pas encore été éprouvées dans la pratique. Un questionnaire détaillé, disponible en annexe, a été soumis à l'usine de préfabrication et un recueil des données complémentaires *in situ* a été effectué. Cette expérimentation nous permet d'avoir les premières tendances mais nécessiterait un travail supplémentaire, notamment de collecte de données pour passer à une échelle plus importante.

Le Tableau V. 3, reprend les différences entre les quatre portiques de l'essai qui seront évalués dans l'ACV.

	Béton clavetage	Type de recouvrement	Longueur de clavetage	Volume de béton réemployable
Portique 1	C25	Crosses	0,6 m	0,386 m ³
Portique 2	C60	Droits	0,69 m	0,378 m ³
Portique 3	C60	Crosses	0,45 m	0,399 m ³
Portique 4	C45	Crosses	0,49 m	0,396 m ³
Portique sans réemploi	-	Crosses	-	-

Tableau V. 3 : Différences de matière mise en œuvre entre les portiques, prise en compte dans l'ACV.

5.2.2.1. Prise en compte de l'amortissement des installations matérielles pour la fabrication des portiques

Les portiques en béton armé pour l'expérimentation sont réalisés dans une usine de préfabrication qui utilise un banc de coffrage en acier. Selon les dires du directeur de l'usine les 4 tonnes d'acier de son banc de coffrage permettront de couler 15 300 toupies. Ainsi il est attribué l'impact de 4000 kg d'acier / 15 300 toupies = 0,261 kg d'acier par toupie. Cet acier sera considéré comme un acier allié (inoxydable) et on adoptera les mêmes hypothèses que Brière [10] pour la proportion de production entre la filière fonte haut fourneau et la filière électrique, c'est-à-dire le rapport 50:50. Un rapport d'information pour le sénat déposé en juillet 2019 [17], indique que la filière sidérurgique française est à 1/3 électrique et 2/3 fonte. Au niveau mondial la filière fonte représente 73,6%. Ce rapport indique également que la filière électrique produit les aciers spéciaux (inoxydables). Ainsi l'hypothèse 50:50 est un compromis entre la répartition de la filière à 2/3 fonte et à 1/3 électrique et une production d'aciers spéciaux qui pourrait provenir à 100% de la filière électrique. L'hypothèse 50:50 serait alors plutôt conservatrice.

Pour l'utilisation de toutes les machines en usine (notamment pour le façonnage des armatures, et la vibration du béton), le directeur de l'usine a communiqué le montant de sa facture d'électricité globale (2000€ par mois) pour 200T produites (acier et béton confondus). Le prix du kWh donné par EDF est de 0,18€. L'énergie totale en MJ est ensuite ramenée à la quantité en tonne produite pour un portique soit :

$$[[[2000€ (\text{facture EDF}) / 0,18€ (\text{prix du kWh})] * 3,6\text{MJ}] * 1,058 \text{ tonne par portique}]/200 = 211,6 \text{ MJ par portique.}$$

5.2.2.2. Recueil de données

Nous allons présenter ici les process Ecoinvent utilisés. En effet, la base de données Ecoinvent est l'une des plus complètes à ce jour et laisse la possibilité de modifier certains modules pour les adapter à notre étude. On privilégiera d'abord les données locales européennes et surtout françaises, lorsqu'elles existent, afin de correspondre au mieux au contexte français de l'expérimentation sur les portiques. Ainsi, en complément de la base

Ecoinvent, pour les bétons français, on prendra les données issues de l'ATILH⁸ et l'UNPG⁹. Les données « *market* » de la base Ecoinvent seront ensuite privilégiées lorsqu'elles existent, pour prendre en compte un transport moyen. Lorsqu'il sera plus pertinent de ne pas utiliser la donnée « *market* », la justification sera précisée dans le Tableau A.7 disponible en annexes.

Dans ce contexte prospectif de réemploi, on considérera que le bois et le béton sont recyclés en fin de vie (i.e. à chaque fin de cycle d'usage pour le portique « neuf », et lors de la fin du cycle ultime pour le portique « réemployé »). Notamment pour le bois, on s'appuiera sur les conclusions optimistes des recherches sur le cascading, dont la thèse de doctorat de Privat [18] dans le cadre du projet de recherche CaReWood (Cascading Recovered Wood) soutenu par le FCBA [19], les recommandations de la Commission Européenne, [20] et WWF [21], qui démontrent que le matériau bois peut enchaîner plusieurs recyclages de différentes natures (moyennant une légère dégradation de la matière cumulée à chaque recyclage) avant d'atteindre sa réelle fin de vie.

Pour chaque cycle de réemploi, le portique réemployé sera comparé à un portique neuf assurant la même fonction.

Les formules précises des bétons utilisés par l'usine sont confidentielles.

Concernant les éléments d'armatures, il y a deux façons de faire de l'acier : soit par la filière fonte avec convertisseur (minerai de fer + ferrailles), soit par la filière électrique avec arc électrique (ferrailles uniquement). A noter que dans les deux cas on doit ajuster la composition chimique de l'acier fondu pour le rendre pur (avec additions et divers traitements...) selon la fédération française de l'acier [22]. On considèrera, d'après les données DIOGEN¹⁰, que les armatures sont produites à 98% par la filière électrique et à 2% par la filière fonte.

La filière électrique a un impact moins élevé que la filière fonte, comme le précise le rapport d'information pour le Sénat sur « les enjeux de la filière sidérurgique dans la France du XXI^e siècle » [17], qui s'appuie sur les données fournies par Worldsteel association stipulant que « les hauts-fourneaux les plus performants libèrent 1,6 tonne de CO₂ par tonne d'acier produite, les moins performants 2,8 tonnes. La production d'une tonne d'acier en four électrique génère quant à elle environ 600 kg de CO₂ . ».

On considère une valeur de Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) pour le diesel de 42 MJ/L selon la Base Carbone de l'Ademe [23].

⁸ Données issues des fiches DIOGEN pour le CIMENT CEM I et le CIMENT CEM II/A-L réalisées par l'ATILH, disponible sur internet : <http://www.diogen.fr/index.php/betons/func-startdown/43/>, <http://www.diogen.fr/index.php/index.php/betons/B%C3%A9tons-et-ses-constituants/BetonNFEN15804/CIMENT-CEM-II-A-L-ou-LL-NFEN15804/>, consultées le 20/03/2020.

⁹ Module d'informations environnementales de la production de granulats issus de roches massives. Données sous format FDES conformes à la norme NF P01-010, 31 mai 2011, UNPG. Module d'informations environnementales de la production de granulats issus de roches meubles. Données sous format FDES conformes à la norme NF P01-010, 31 mai 2011, UNPG.

¹⁰ D'après la fiche DIOGEN de l'AFGC, « Fiche_DIOGEN_HA+site » disponible sur internet : <http://www.diogen.fr/index.php/index.php/aciers/Aciers/AcierNFP01010/Armatures-passives-du-b%C3%A9ton-arm%C3%A9/>, consulté le 20/11/2018.

A noter que l'on a pu constater lors du coulage, un usage parcimonieux de l'huile de coffrage. Cette huile sera donc négligée dans l'ACV, et, par ailleurs, celle-ci ne figure pas sur la liste des substances du règlement européen REACH (substances dangereuses). L'usine de préfabrication a fait le choix d'utiliser l'huile « MS-EMULSION HQE 100 BIO » qui est une émulsion d'huile végétale dans l'eau, sans solvant, sans odeur, biodégradable et ininflammable de la marque Mandelli.

On choisit la norme européenne d'émission EURO 5 pour les véhicules de transport. Elle concerne les véhicules qui ont été mis en service entre le 1er octobre 2009 et le 1er janvier 2014.

Le Tableau A.1 : Procédés utilisés dans Ecoinvent, disponible en annexes, détaille l'ensemble des procédés utilisés et justifiés pour modéliser les portiques. Les valeurs données correspondent à un portique.

Pour la fabrication du béton, chaque constituant a été pris en compte avec son transport depuis son extraction jusqu'à la centrale, l'usine de préfabrication à Vierzon, puis le lieu de mise en œuvre comme précisé dans le Tableau V. 4, le Tableau V. 5, et le Tableau V. 6.

Sable	20 km
Gravillon 4/11.2	37 km
Gravillon 411.2/22.4	37 km
Ciment	84 km
Addition filler	71 km
Plastifiant	855 km
Fumée de silice	455 km

Tableau V. 4 : Détail du transport des constituants du béton jusqu'à la centrale à béton.

Transport du béton C60 de la centrale à l'usine de préfabrication	30 km
Transport des bétons C25 et C45 de la centrale à l'usine de préfabrication	0,3 km
Transport du béton pour le recyclage	50 km

Tableau V. 5 : Détail du transport pris en compte pour les différents bétons.

	Elément	Procédé utilisé dans OpenLCA	Quantité
Fabrication du béton courant C60 (pour le portique 1)	Ciment	Ciment ATILH 52-5	177,6 kg
	Malaxage	<i>market for diesel, burned in building machine diesel, burned in building machine cut-off, U - GLO</i>	5,558 MJ
	Granulat (gravillons broyés)	Granulat roche massive concassé (UNPG)	191,8 kg
	Granulat (gravillons broyés)	Granulat roche massive concassé (UNPG)	221,4 kg
	Super Plastifiant	Plastifiant (SYNAD, EFCA)	2,443 kg
	Addition (filler / stabilisateur)	<i>market for inert filler inert filler cut-off, U - GLO</i>	11,58 kg
	Sable	Granulat roche meuble (UNPG)	324,6 kg
	Fumées de silice	<i>market for silica fume, densified silica fume, densified cut-off, U - GLO</i>	7,72 kg
	Eau	<i>market for tap water tap water cut-off, U - Europe without Switzerland</i>	73,73 kg
	Transport des constituants à la centrale	<i>transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 cut-off, U - RER</i>	43,12 t.km
	Eaux usées	<i>treatment of wastewater from concrete production, capacity 5E9l/year wastewater from concrete production cut-off, U - RoW</i>	0,002757 m ³
	Transport de centrale C60 à l'usine de préfabrication	<i>transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 cut-off, U - RER</i>	25,48 t.km

Tableau V. 6 : Description de la fabrication du béton jusqu'à l'usine de préfabrication, exemple du béton C60.

Les aciers d'armatures sont livrés en rouleaux jusqu'au lieu de façonnage puis sont transportés jusqu'à l'usine de préfabrication, comme détaillé dans le Tableau V. 7 et le Tableau V. 8.

**Transport des aciers d'armatures depuis 200 km
le fabricant jusqu'à l'usine de façonnage**

**Transport des armatures façonnées à 4,9 km
l'usine de préfabrication**

Tableau V. 7 : Détail du transport des aciers d'armatures jusqu'à l'usine de préfabrication.

	Elément	Procédé utilisé dans OpenLCA	Quantité
Fabrication des armatures (en rouleau et non façonnées)	Production-Laminage	<i>steel production, electric, low-alloyed steel, low-alloyed cut-off, U – RER</i> + <i>steel production, converter, unalloyed steel, unalloyed cut-off, U – RER</i> + <i>hot rolling, steel hot rolling, steel cut-off, U – RER</i>	67,7 à 80,7 kg (selon portique)
	Transport de l'usine aciériste à l'usine de façonnage	<i>transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 cut-off, U – RER</i>	13,54 à 16,14 t.km
Transport des armatures façonnées	Transport usine armature>usine portique	<i>transport, freight, light commercial vehicle transport, freight, light commercial vehicle cut-off, U – Europe without Switzerland</i>	0,3317 à 0,3954 t.km

Tableau V. 8 : Description de la fabrication et du façonnage des armatures jusqu'à l'usine de préfabrication.

L'étape d'usinage à Vierzon comprend, le coulage et la vibration du béton coulé en place, l'usage de consommables comme le cadre en bois et un amortissement pour le fonctionnement des installations, comme détaillé dans le Tableau V. 9.

	Elément	Procédé utilisé dans OpenLCA	Quantité
Façonnage armatures, vibrage béton, machines usine	Consommation des machines	<i>market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage cut-off, U – France</i>	211,6 MJ
Banc de coffrage du béton	Prise en compte de l'amortissement (acier laminé)	<i>steel production, electric, low-alloyed steel, low-alloyed cut-off, U – RER</i> + <i>steel production, converter, low-alloyed steel, low-alloyed cut-off, U</i> + <i>hot rolling, steel hot rolling, steel cut-off, U – RER</i>	0,261 kg
Cadre en bois pour le transport des portiques	Bois brut	<i>beam, softwood, raw, kiln drying to u=20% sawnwood, beam, softwood, raw, dried (u=20%) cut-off, U- RoW</i>	0,1549 m3
	Transport	<i>transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 cut-off, U – RER</i>	3,694 t.km
	Sciage, fabrication du cadre	<i>sawing, softwood saw dust, loose, wet, measured as dry mass cut-off, U – RoW</i>	0,5 kg

Tableau V. 9 : Description des éléments pris en compte lors de l'usinage des portiques.

Afin de mieux correspondre à un scénario réel de mise en œuvre dans un bâtiment, nous considérons ici que le portique livré à Champs-sur-Marne pour les essais au laboratoire, a atteint son lieu de mise en œuvre. Nous ne prendrons pas en compte le transport aller-retour des portiques pour l'hydrodémolition qui, en réalité, se déroulerait sur le chantier de déconstruction *in situ*. Un transport du portique depuis l'usine de préfabrication au laboratoire à Champs-sur-Marne de 226 km a donc été intégré.

Pour la déconstruction, on a recours à une hydrodémolition à la lance, dont la description est faite dans le Tableau V. 10.

	Élément	Procédé utilisé dans OpenLCA	Quantité
Hydrodémolition à la lance	Eau	<i>market for tap water tap water cut-off, U - Europe without Switzerland</i>	516,6 kg à 781,2 kg (selon les portiques)
	Eaux usées	<i>treatment of wastewater from concrete production, capacity 5E9l/year wastewater from concrete production cut-off, U – RoW</i>	0,52 à 0,78 m3 (selon les portiques)
	Energie nécessaire pour l'hydrodémolition	<i>market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage cut-off, U – France</i>	165,3 à 250,0 MJ (selon les portiques)

Tableau V. 10 : Description des éléments pris en compte lors de la déconstruction des portiques.

Enfin, on prendra en compte le recyclage des portiques lors de leur fin de vie, c'est-à-dire à la fin de chaque usage s'il s'agit du portique sans réemploi et à la fin de l'usage ultime lorsqu'il s'agit d'un portique réemployable. La description est faite dans le Tableau V. 11.

	Élément	Procédé utilisé dans OpenLCA	Quantité
Traitement pour un portique en fin de vie	Valorisation cadre en bois	<i>treatment of waste wood, post-consumer, sorting and shredding wood chips, from post-consumer wood, measured as dry mass cut-off, U – RoW</i>	26,18 kg
	Recyclage béton	<i>treatment of waste reinforced concrete, recycling waste reinforced concrete cut-off, U – Europe without Switzerland</i>	1035,7 kg

Tableau V. 11 : Description des éléments pris en compte lors du recyclage en fin de vie des portiques.

5.2.2.3. Première phase : construction du portique

Les trois principales phases du système : 1. la construction, 2. la déconstruction/reconstruction, puis 3. la fin de vie, sont illustrées à la Figure V. 8.

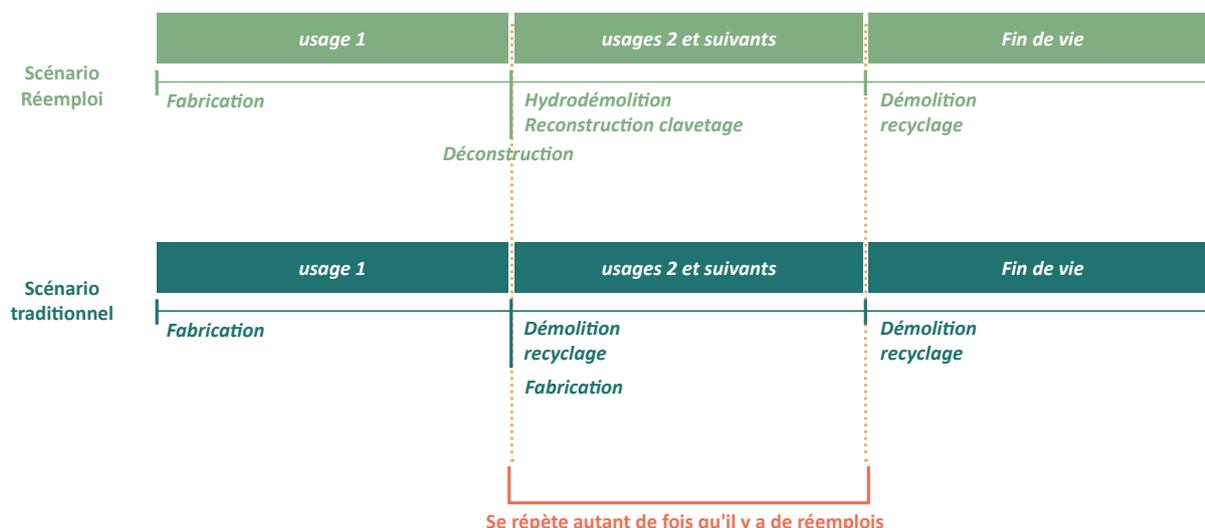


Figure V. 8 : Etapes prises pour réaliser l'ACV des portiques.

La Figure V. 9 détaille donc l'inventaire du portique 1 jusqu'à sa livraison pour la première phase d'essais (cf. Chapitre IV), i. e. son premier cycle d'usage en réalité. Les inventaires pour les autres portiques 2,3 et 4 sont similaires sauf pour les paramètres précisés précédemment dans le Tableau V. 3.

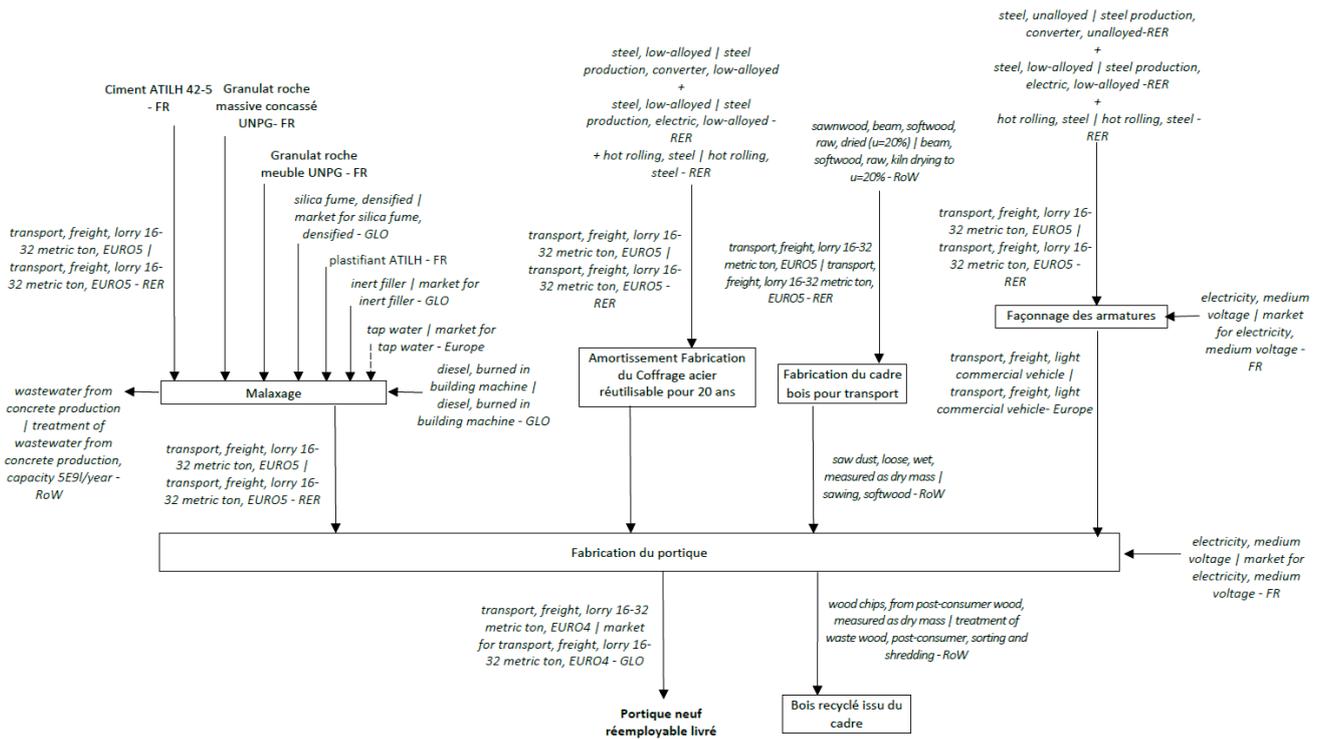


Figure V. 9 : Modèle ACV pour la fabrication d'un portique, usage 1, initial.

5.2.2.4. Deuxième phase : déconstruction puis reconstruction du portique

La Figure V. 10 détaille l'inventaire du portique pour le déconstruire puis le reconstruire jusqu'à sa livraison pour la deuxième phase d'essai, i. e. son deuxième cycle d'usage en réalité. Les inventaires pour les autres portiques 2,3 et 4 sont similaires sauf pour les paramètres précisés précédemment dans le Tableau V. 3.

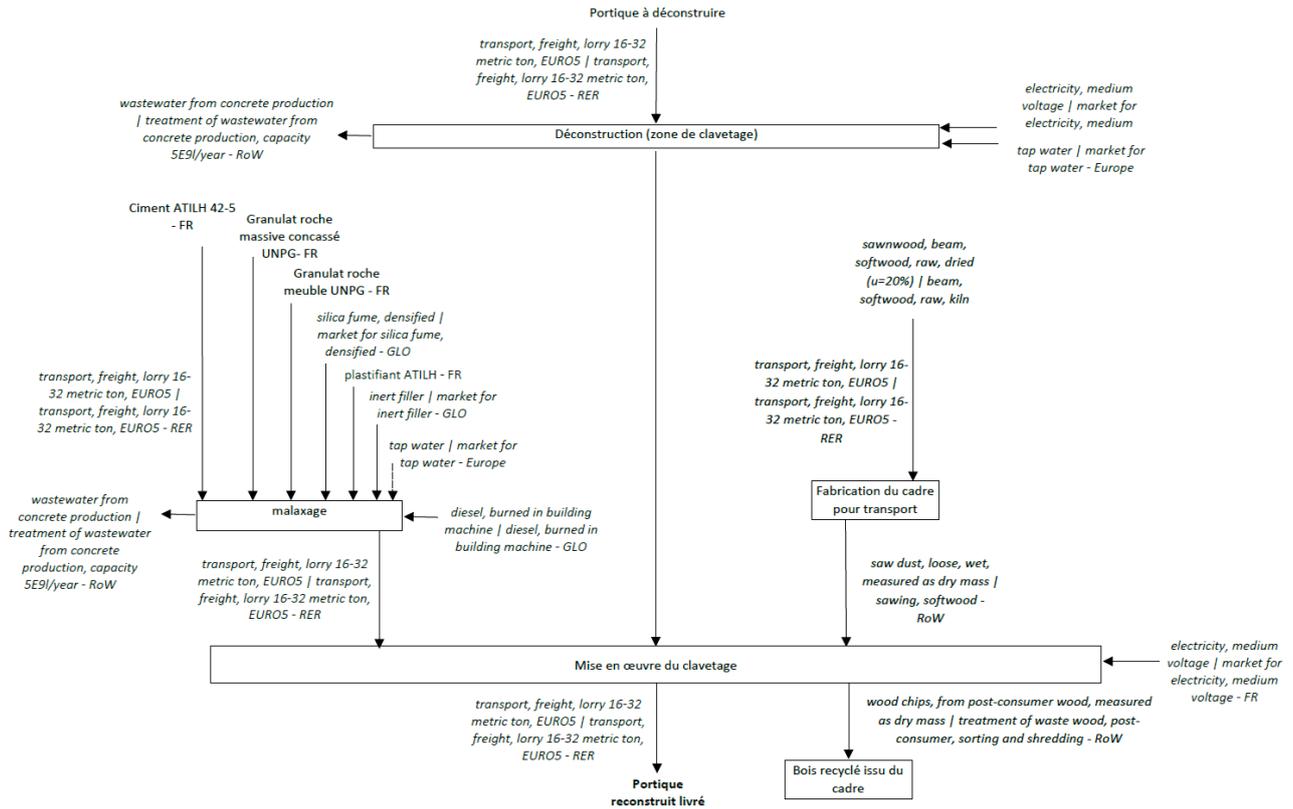


Figure V. 10 : Modèle ACV pour la déconstruction puis reconstruction d'un portique, usages 2 et intermédiaires.

En parallèle un portique non réemployable (conçu traditionnellement) est modélisé pour être comparé aux différentes variantes du portique réemployable.

5.2.3. Analyse de l'impact

Nous présentons les résultats obtenus suite au calcul d'impact selon la norme NF EN 15804+A1 [12] et la norme complémentaire NF EN 15804/CN, que nous avons choisies d'utiliser.

5.2.3.1. Catégorie d'impact de la NF EN 15804+A1/CN, les paramètres ressources et déchets

La méthode NF EN 15804+A1/CN choisie, permet de calculer neuf indicateurs d'impacts décrits dans le Tableau V. 12 ; dix paramètres décrivant l'utilisation des ressources de matières, de l'énergie et l'eau, renouvelables et non renouvelables, détaillés dans le Tableau V. 13 ; mais également les flux sortants (déchets) issus de l'ICV, décrits dans le Tableau V. 14.

Catégorie d'impact	Paramètre	Unité (exprimée par unité fonctionnelle ou par unité déclarée)
Épuisement des ressources abiotiques – éléments	Potentiel d'épuisement (ADP-éléments) pour les ressources abiotiques non fossiles ^a	kg de Sb équiv.
Épuisement de ressources abiotiques – combustibles fossiles	Potentiel d'épuisement (ADP-combustibles fossiles) pour les ressources abiotiques fossiles ^a	MJ, pouvoir calorifique inférieur
Acidification des sols et de l'eau	Potentiel d'acidification des sols et de l'eau, AP	kg de SO ₂ équiv.
Appauvrissement de la couche d'ozone	Potentiel de destruction de la couche d'ozone stratosphérique, ODP	kg de CFC 11 équiv.
Réchauffement climatique	Potentiel de réchauffement global, GWP	kg de CO ₂ équiv.
Eutrophisation	Potentiel d'eutrophisation, EP	kg de (PO ₄) ³⁻ équiv.
Formation d'ozone photochimique	Potentiel de formation d'ozone troposphérique, POCP	kg d'éthène équiv.
^a Le potentiel d'épuisement abiotique est calculé et déclaré par deux indicateurs différents: <ul style="list-style-type: none"> • ADP-éléments : inclut toutes les ressources de matières abiotiques non renouvelables (c'est-à-dire l'exception des ressources fossiles); • ADP-combustibles fossiles : inclut toutes les ressources fossiles. 		

Tableau V. 12 : Paramètres décrivant les impacts environnementaux, extraits de la NF EN 15804+A1, partie 7.2.3

Paramètre	Unité (exprimée par unité fonctionnelle ou par unité déclarée)
Utilisation de l'énergie primaire renouvelable, à l'exclusion des ressources d'énergie primaire renouvelables utilisées comme matières premières	MJ, pouvoir calorifique inférieur
Utilisation des ressources d'énergie primaire renouvelables utilisées en tant que matières premières	MJ, pouvoir calorifique inférieur
Utilisation totale des ressources d'énergie primaire renouvelables (énergie primaire et ressources d'énergie primaire utilisées comme matières premières)	MJ, pouvoir calorifique inférieur
Utilisation de l'énergie primaire non renouvelable, à l'exclusion des ressources d'énergie primaire non renouvelables utilisées comme matières premières	MJ, pouvoir calorifique inférieur
Utilisation des ressources d'énergie primaire non renouvelables utilisées en tant que matières premières	MJ, pouvoir calorifique inférieur
Utilisation totale des ressources d'énergie primaire non renouvelables (énergie primaire et ressources d'énergie primaire utilisées comme matières premières)	MJ, pouvoir calorifique inférieur
Utilisation de matière secondaire	kg
Utilisation de combustibles secondaires renouvelables	MJ, pouvoir calorifique inférieur
Utilisation de combustibles secondaires non renouvelables	MJ, pouvoir calorifique inférieur
Utilisation nette d'eau douce	m ³

Tableau V. 13 : Paramètres décrivant l'utilisation des ressources, extraits de la NF EN 15804+A1, partie 7.2.4

Paramètre	Unité (exprimée par unité fonctionnelle ou par unité déclarée)
Déchets dangereux éliminés	kg
Déchets non dangereux éliminés	kg
Déchets radioactifs éliminés	kg

Tableau V. 14 : Autres informations environnementales décrivant les catégories de déchets, extraites de la NF EN 15804+A1, partie 7.2.5

Nous allons expliquer succinctement ces catégories d'impact et ces paramètres afin de mieux appréhender les atteintes à l'environnement dont il est question. Ces explications sont synthétisées à partir de Lebert et al. [1].

Les ressources abiotiques, puisées dans l'environnement par l'homme, sont des ressources non vivantes parmi lesquelles on retrouvera d'une part les ressources « éléments » comme les minerais, et les ressources « fossiles » comme le charbon et le pétrole. Ces dernières sont reconnues comme épuisables à l'échelle temporelle humaine.

L'acidification des sols et de l'eau est notamment engendrée par les « pluies acides ». C'est l'accumulation des polluants dans l'air (principalement issus de sites industriels mais aussi la circulation routière, etc.) qui se retrouvent transportés sur des centaines de kilomètres puis dispersés vers le sol avec les précipitations. Ces pluies acides ont un pH inférieur à 5,6 ce qui crée un déséquilibre des milieux en contact avec celles-ci, jusqu'à atteindre les nappes phréatiques. A leur passage les pluies acides altèrent les forêts, les cultures, les sols, les lacs au détriment de la faune aquatique et provoquent l'érosion des roches et la corrosion d'équipements en structure métallique.

L'appauvrissement de la couche d'ozone consiste à diminuer la teneur en ozone de la stratosphère. La couche d'ozone nous protège des ultra-violets du rayonnement solaire, qui dérèglent les activités biologiques pouvant provoquer des cancers et des affaiblissements du système immunitaire. La teneur en ozone varie naturellement entre le jour et la nuit et selon les saisons. Cependant un « trou » dans la couche d'ozone est persistant au niveau de l'Antarctique. Cette couche d'ozone est détruite par la production de composés chlorofluorocarbures (CFC, HCFC) utilisés dans le domaine du froid, des aérosols et des mousses synthétiques. Bien que ces composés soient maintenant interdits, un décalage est à prévoir pour les résultats espérés car l'ozone détruit en 2020 est la résultante de molécules libérées dans les années 1995. Il existe toujours des sources d'émissions indépendantes malgré l'interdiction de nombreuses applications.

Le réchauffement climatique est certainement le plus vulgarisé des indicateurs d'impacts environnementaux. Il repose sur l'effet de serre, qui est un phénomène physique permettant de retenir une partie du rayonnement solaire et d'en renvoyer l'autre partie. Sans cet effet de serre, la température moyenne sur Terre serait de -18°C au lieu de 15°C . Les gaz à effet de serre émis par les activités humaines contribuent à augmenter la température de l'air jusqu'à provoquer des conséquences dramatiques (sécheresses, fonte des glaces, augmentation du niveau de la mer, réfugiés climatiques). Plusieurs phénomènes climatiques extrêmes sont également multipliés localement (cyclones, inondations). Cet indicateur d'impact a été requalifié en « Changement climatique » dans la NF EN 15804+A2, car bien que globalement la tendance soit à un réchauffement climatique, on désigne par cet indicateur l'ensemble des variations des caractéristiques climatiques en un endroit donné, au cours du temps : réchauffement ou refroidissement.

L'eutrophisation peut être illustrée par les phénomènes des « algues vertes » observés sur les côtes bretonnes. L'eutrophisation est due à une trop forte augmentation d'un milieu en nutriments. La forte augmentation de la biomasse en suspension aboutit à empêcher la photosynthèse. Ainsi les algues prolifèrent, l'eau se trouble, l'oxygène diminue, la faune aquatique est détruite, puis la matière végétale se décompose. L'eutrophisation est engendrée par les engrais azotés et phosphatés, les lessives et détergents, certains rejets industriels.

La formation d'ozone photochimique ou troposphérique concerne la couche atmosphérique la plus proche de la surface de la Terre. Il s'agit là, du « mauvais » ozone, contrairement au « bon » ozone appartenant à la couche d'ozone. L'ozone, lorsqu'il est trop proche de la surface terrestre, est un polluant qui provoque les « nuages de pollutions » ou les brumes observées lors des épisodes de pollutions. Il est généré principalement par les COV (composés organiques volatils) d'activités industrielles (solvants, hydrocarbures) et les NO_x (oxydes d'azote) des véhicules à moteur.

Le complément à la norme NF EN 15804/CN a ajouté les catégories d'impacts « pollution de l'air » et « pollution de l'eau » qui rendent compte, en complément des précédents indicateurs, de l'écotoxicité dans l'air et dans l'eau. La méthode de calcul consiste à détecter les seuils de concentration d'un polluant et de les comparer au seuil de toxicité défini pour chacune des substances nocives pour les organismes vivants. La méthode ne fait pas consensus dans la communauté scientifique.

Concernant les paramètres, l'utilisation des ressources d'énergie est étroitement liée à l'épuisement des ressources et au changement climatique. Les paramètres permettent de préciser si ces ressources sont renouvelables ou non, s'il s'agit d'une utilisation directe en énergie primaire ou indirecte. Deux totaux sont faits, d'une part pour l'utilisation totale d'énergie primaire renouvelable, et d'autre part pour l'utilisation totale d'énergie non renouvelable.

L'utilisation de matières secondaires permet d'éviter la consommation de ressources. On pourra ainsi prendre en compte les matériaux recyclés comme matières secondaires. De la même manière l'utilisation de combustibles secondaires permet d'éviter la consommation de ressources abiotiques-combustibles fossiles. La norme distingue les combustibles secondaires renouvelables (bois) et non renouvelables (pneus). Concernant l'utilisation d'eau douce, qui représente 3% de l'eau totale sur terre (à 97% salée), l'objectif est de prévenir les régions du monde où la vitesse de sa consommation est plus rapide que celle de sa régénération.

Enfin, les paramètres de déchets permettent de prévenir les éventuels impacts dus à leur élimination. La dangerosité des déchets est définie par ailleurs par les textes réglementaires européens.

5.2.3.2. Résultats pour chaque catégorie d'impacts environnementaux et paramètres selon la NF EN 15804+A1/CN

Les résultats sont donc donnés pour les 9 indicateurs d'impacts de la norme, ainsi que les paramètres de ressources et de déchets, depuis l'extraction des matières pour construire les portiques, jusqu'à leur livraison, selon le Tableau V. 15.

	Portique ass. C25	Portique ass. C45	Portique ass. C60C	Portique ass. C60D	Portique neuf C60C
Acidification des sols et de l'eau (kg SO ₂ eq.)	7,26E-01	7,50E-01	7,53E-01	7,32E-01	7,13E-01
Appauvrissement de la couche d'ozone (kg CFC 11 eq.)	2,43E-05	2,48E-05	2,49E-05	2,43E-05	2,38E-05
Eutrophisation (kg PO ₄ ³⁻ eq.)	1,27E-01	1,31E-01	1,32E-01	1,29E-01	1,26E-01
Formation d'ozone photochimique (kg éthène eq.)	4,47E-02	4,65E-02	4,66E-02	4,47E-02	4,30E-02
Pollution de l'air (m ³)	6,10E+02	6,30E+02	6,34E+02	6,18E+02	6,03E+02
Pollution de l'eau (m ³)	7,38E+04	7,63E+04	7,65E+04	7,35E+04	7,08E+04
Changement climatique (kg CO ₂ eq.)	2,77E+02	2,87E+02	2,90E+02	2,85E+02	2,80E+02
Épuisement des ressources abiotiques - combustibles fossiles (MJ)	3,92E+03	4,06E+03	4,13E+03	4,05E+03	3,98E+03
Épuisement des ressources abiotiques - éléments (kg Sb eq.)	9,97E-06	1,01E-05	1,02E-05	1,02E-05	1,02E-05

Tableau V. 15 : Indicateurs d'impacts de la phase de construction des 5 portiques.

De la même manière, les résultats sont ici donnés en Tableau V. 16 pour la phase de reconstruction c'est-à-dire depuis le transport des portiques sur le site de déconstruction, jusqu'à leur reconstruction et leur livraison pour remise en œuvre, selon la Figure V. 10.

	Portique ass. C25 reconstruit	Portique ass. C45 reconstruit	Portique ass. C60C reconstruit	Portique ass. C60D reconstruit	Portique neuf C60C
Acidification des sols et de l'eau (kg SO ₂ eq.)	1,24E-01	1,20E-01	1,21E-01	1,45E-01	8,43E-01
Appauvrissement de la couche d'ozone (kg CFC 11 eq.)	7,65E-06	6,62E-06	6,41E-06	8,74E-06	2,88E-05
Eutrophisation (kg PO ₄ ³⁻ eq.)	2,14E-02	2,12E-02	2,16E-02	2,61E-02	1,50E-01
Formation d'ozone photochimique (kg éthène eq.)	6,89E-03	6,71E-03	6,77E-03	7,86E-03	4,84E-02
Pollution de l'air (m ³)	9,71E+01	9,63E+01	9,80E+01	1,17E+02	7,18E+02
Pollution de l'eau (m ³)	1,10E+04	1,01E+04	1,01E+04	1,23E+04	1,15E+05
Changement climatique (kg CO ₂ eq.)	3,14E+01	3,23E+01	3,34E+01	4,43E+01	3,04E+02
Épuisement des ressources abiotiques - combustibles fossiles (MJ)	4,05E+02	4,05E+02	4,64E+02	6,12E+02	4,40E+03
Épuisement des ressources abiotiques - éléments (kg Sb eq.)	1,04E-06	9,16E-07	9,49E-07	1,43E-06	1,02E-05

Tableau V. 16 : Indicateurs d'impacts de la phase de reconstruction des 5 portiques.

Les résultats ci-après, dans le Tableau V. 17, détaillent les paramètres pour la phase de construction puis, dans le Tableau V. 18, la phase de déconstruction des portiques.

	Portique ass. C25	Portique ass. C45	Portique ass. C60C	Portique ass. C60D	Portique neuf C60C
Déchets dangereux éliminés (kg)	1,31E+01	1,39E+01	1,38E+01	1,28E+01	1,18E+01
Déchets non dangereux éliminés (kg)	7,80E+01	8,00E+01	8,04E+01	7,80E+01	7,59E+01
Déchets radioactifs éliminés (kg)	2,21E-02	2,25E-02	2,25E-02	2,21E-02	2,18E-02
Eau douce (m ³)	3,67E+01	3,81E+01	3,85E+01	3,85E+01	3,85E+01
Total énergie primaire non renouvelable (MJ)	5,09E+03	5,24E+03	5,33E+03	5,23E+03	5,16E+03
Total énergie primaire renouvelable (MJ)	2,50E+03	2,50E+03	2,50E+03	2,50E+03	2,49E+03

Tableau V. 17 : Paramètres pour la phase de construction des portiques.

	Portique ass. C25 reconstruit	Portique ass. C45 reconstruit	Portique ass. C60C reconstruit	Portique ass. C60D reconstruit	Portique neuf C60C
Déchets dangereux éliminés (kg)	5,62E-01	5,35E-01	5,32E-01	5,97E-01	2,98E+01
Déchets non dangereux éliminés (kg)	1,02E+01	9,50E+00	9,69E+00	1,16E+01	1,09E+03
Déchets radioactifs éliminés (kg)	1,16E-02	9,86E-03	9,39E-03	1,33E-02	2,46E-02
Eau douce (m ³)	3,68E+00	4,02E+00	4,22E+00	6,36E+00	3,85E+01
Total énergie primaire non renouvelable (MJ)	1,16E+03	1,04E+03	1,06E+03	1,49E+03	5,61E+03
Total énergie primaire renouvelable (MJ)	2,42E+03	2,41E+03	2,41E+03	2,42E+03	2,50E+03

Tableau V. 18 : Paramètres pour la phase de reconstruction des portiques.

5.2.4. Interprétation

5.2.4.1. Détails des contributeurs

On choisit de prendre pour référence le portique neuf non réemployable. Ainsi la Figure V. 11 montre les résultats comparés entre les constructions de chacun des portiques. On peut observer que le portique non réemployable est le moins impactant pour 6 parmi les 9 indicateurs, ensuite arrive le portique avec le clavetage en C25 recouvrement crosses qui est le moins impactant sur 3 indicateurs et puis le portique C60 recouvrements droits. Un couple de portiques réemployables (C25 crosses et C60 droits) se distingue dans les résultats de l'autre couple (C45 crosses et C60 crosses), pour tous les impacts sauf ceux de l'épuisement des ressources mais avec des écarts < 20%. On peut identifier que ces deux portiques (C25 crosses et C60 droits) semblent moins impactants que les deux autres réemployables également (C45 crosses et C60 crosses).

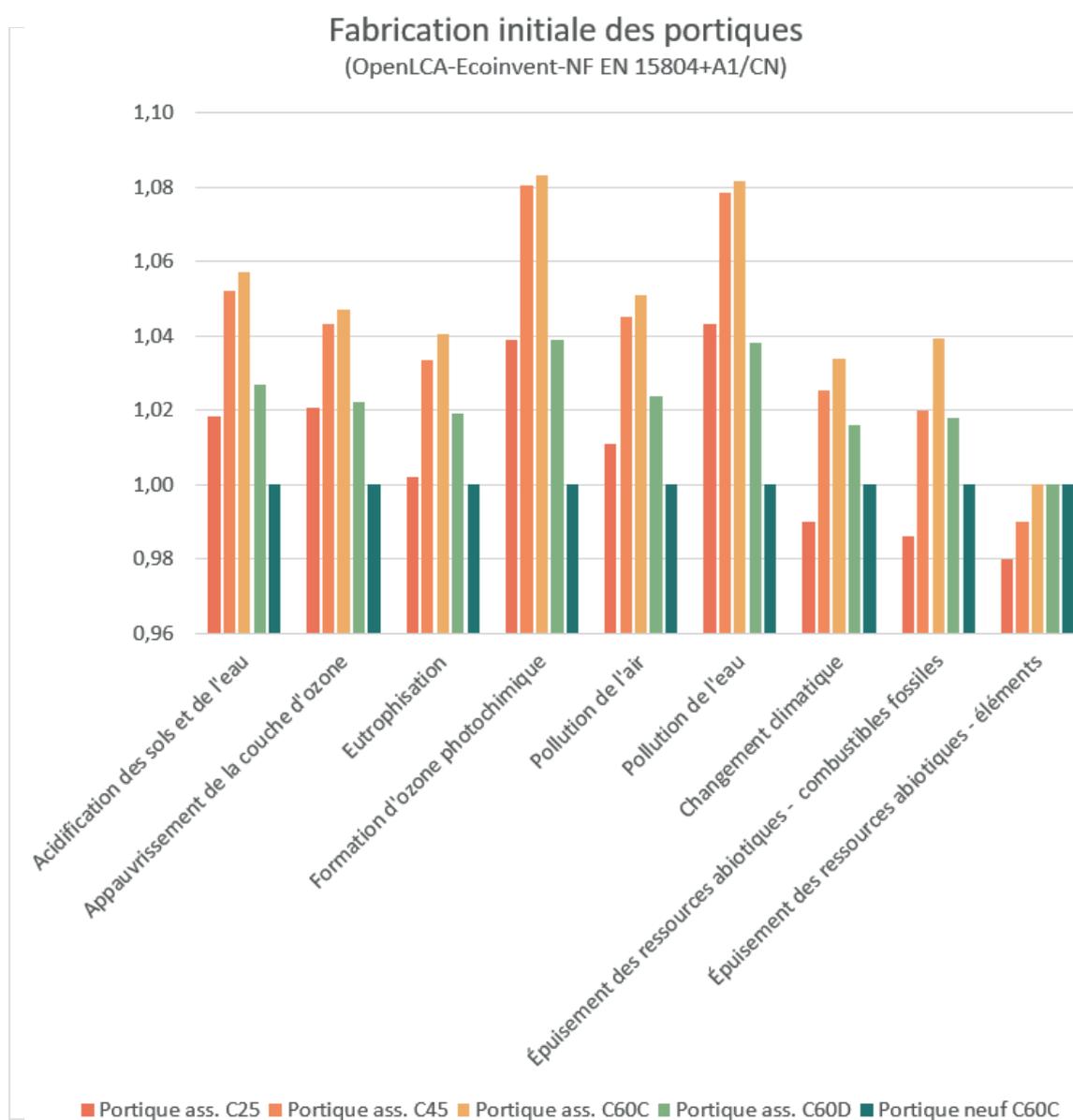


Figure V. 11 : Comparaison des impacts entre les portiques pour la fabrication initiale.

Sur la Figure V. 12 illustrant les résultats pour les paramètres, on peut à nouveau, comme précédemment, identifier les deux couples de résultats pour les paramètres déchets. Le

portique non réemployable est également le moins impactant globalement sauf pour les paramètres « eau douce » et « énergie primaire non renouvelable ». Quant à l'énergie primaire renouvelable, elle varie très peu selon les portiques car elle est due à 95% au matériau bois utilisé en quantité quasi égale dans toutes les variantes.

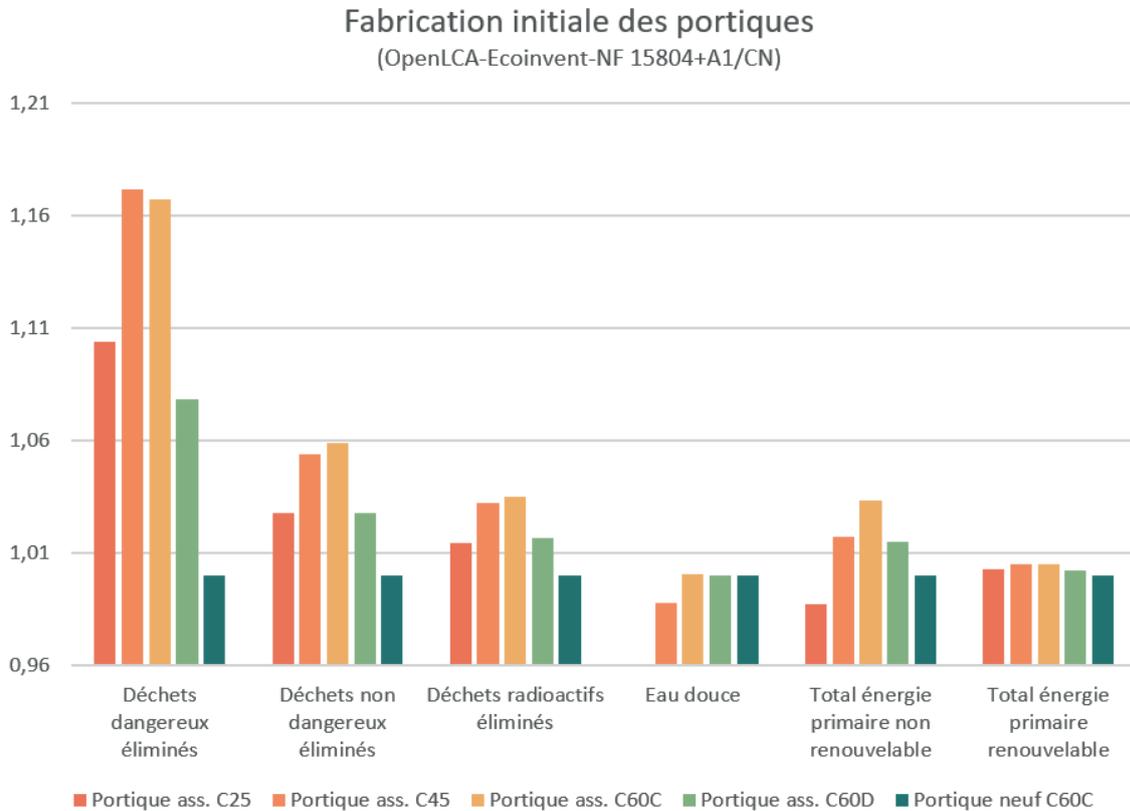
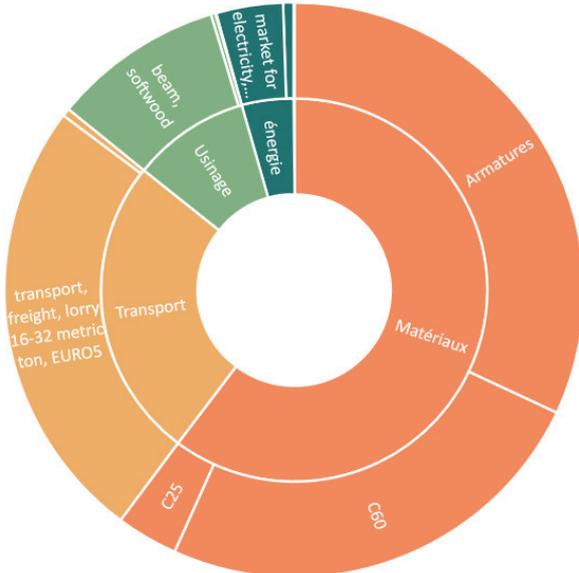


Figure V. 12 : Comparaison des paramètres entre les portiques pour la fabrication initiale.

Pour chaque indicateur et pour chaque portique, les résultats ont été détaillés afin d'identifier les contributeurs majeurs. La Figure V. 13 montre que pour chaque indicateur, à l'exception de l'indicateur « Appauvrissement de la couche d'ozone », le contributeur « Matériaux », en orange, incluant les bétons et les armatures, est prépondérant. Seuls les impacts pour le portique avec le clouage en C25 sont ici présentés mais les autres portiques suivent les mêmes tendances. La part des matériaux varie de 30% à 97% pour cette première phase consistant à construire une première fois les portiques. Le transport est important également et apparaît comme deuxième contributeur le plus important après le contributeur « Matériaux ». Ceci peut s'expliquer, d'une part, par le fait que les portiques aient été préfabriqués à Vierzon puis transportés à Champs-sur-Marne alors qu'une construction en coulé en place *in situ* aurait permis d'approvisionner du béton directement d'une centrale plus proche. Ainsi, sans prendre en compte le transport Vierzon>Champs-sur-Marne, cette part passe à 6,48% pour l'indicateur changement climatique alors qu'elle était de 19,9% avec la prise en compte du transport spécifique au lieu de préfabrication.

Répartition de l'indicateur "Acidification"
(OpenLCA-Ecoinvent-NF 15804+A1/CN)



Répartition de l'indicateur "Appauvrissement"
(OpenLCA-Ecoinvent-NF 15804+A1/CN)



Répartition de l'indicateur "Eutrophisation"
(OpenLCA-Ecoinvent-NF 15804+A1/CN)



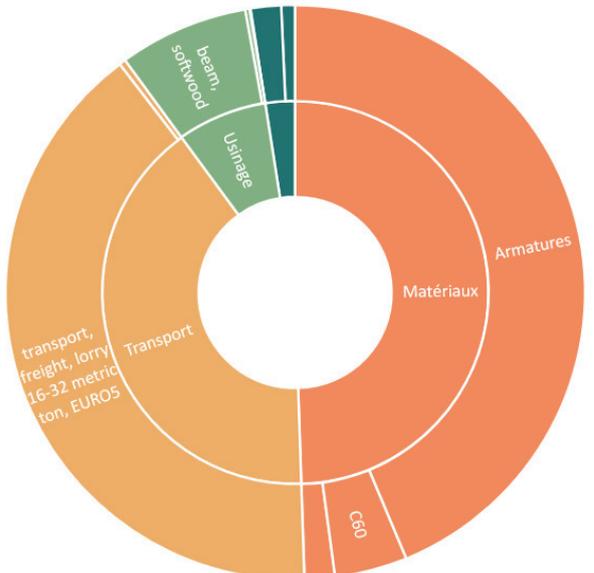
Répartition de l'indicateur "Formation ozone"
(OpenLCA-Ecoinvent-NF 15804+A1/CN)



Répartition de l'indicateur "Pollution air"
(OpenLCA-Ecoinvent-NF 15804+A1/CN)



Répartition de l'indicateur "Pollution eau"
(OpenLCA-Ecoinvent-NF 15804+A1/CN)



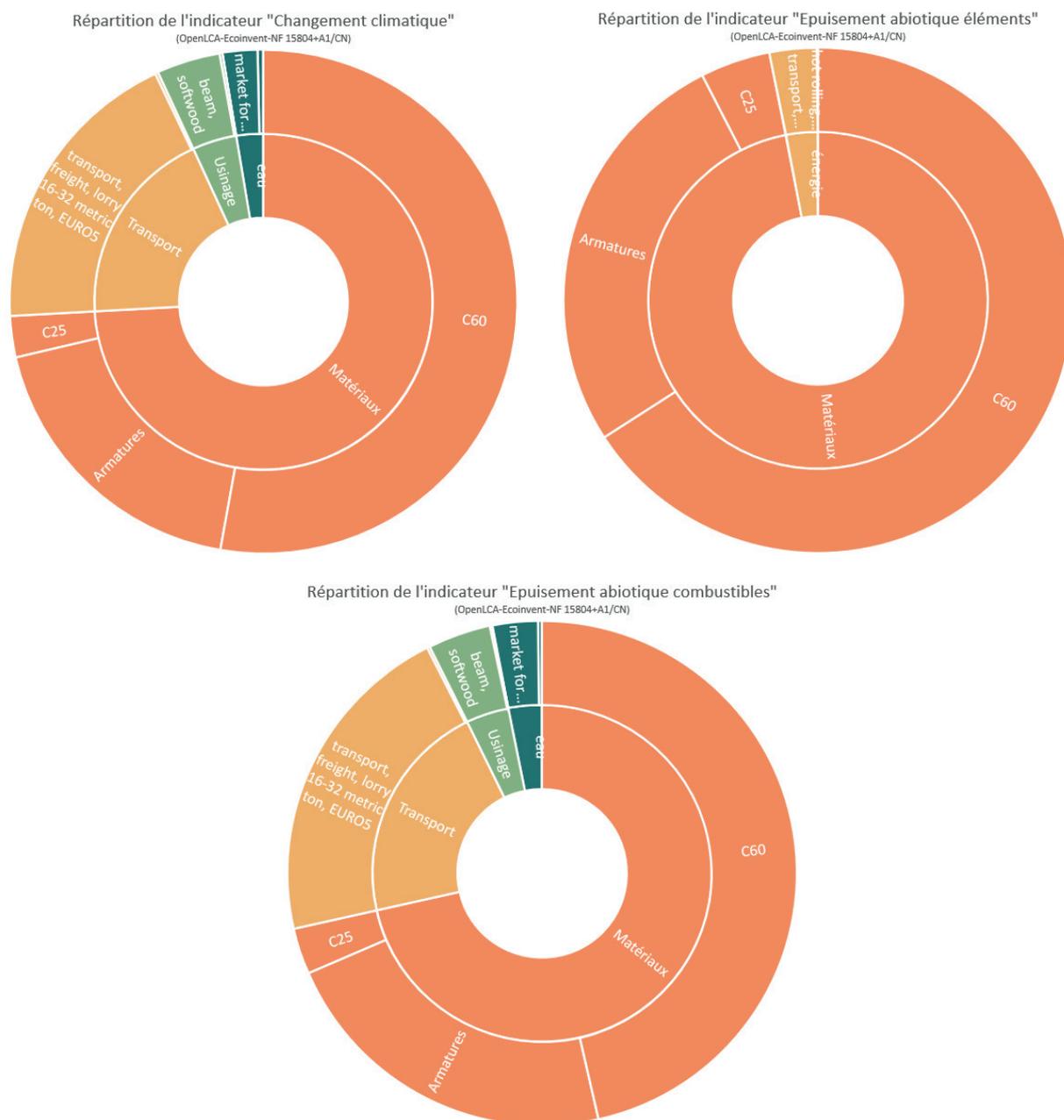


Figure V. 13 : Analyse détaillée des résultats du portique avec le clouage en C25 et pour chaque indicateur d'impact, pour la phase construction.

Les résultats concernant uniquement la phase de déconstruction/ reconstruction inversent les tendances, puisqu'ici ce sont les portiques avec le clouage en C45 crosses et le clouage en C60 crosses qui semblent légèrement plus vertueux sur la Figure V. 14. On retrouve les mêmes variations de résultats avec les paramètres en Figure V. 15. Le portique réemployable est cette fois significativement plus impactant pour l'ensemble des indicateurs et pour 6 paramètres sur 8. En revanche pour l'énergie primaire renouvelable, les portiques sont équivalents, pour les mêmes raisons qu'évoquées précédemment avec le matériau bois. Ce résultat est en accord avec l'analyse précédente et la littérature qui indiquent que la part des matériaux (et leur transport afférent) est majoritaire dans le total des résultats pour chaque indicateur d'impact. Le contributeur matériau est fortement réduit dans le cadre d'un réemploi puisque les impacts dus à l'extraction et la production ne figurent plus dans l'inventaire des données.

Il est donc nécessaire d'avoir une analyse globale sur plusieurs cycles d'usages et de comparer l'impact des portiques réemployés avec l'impact des portiques neufs équivalents.

Portiques déconstruits / reconstruits

(OpenLCA-Ecoinvent-NF EN 15804+A1/CN)

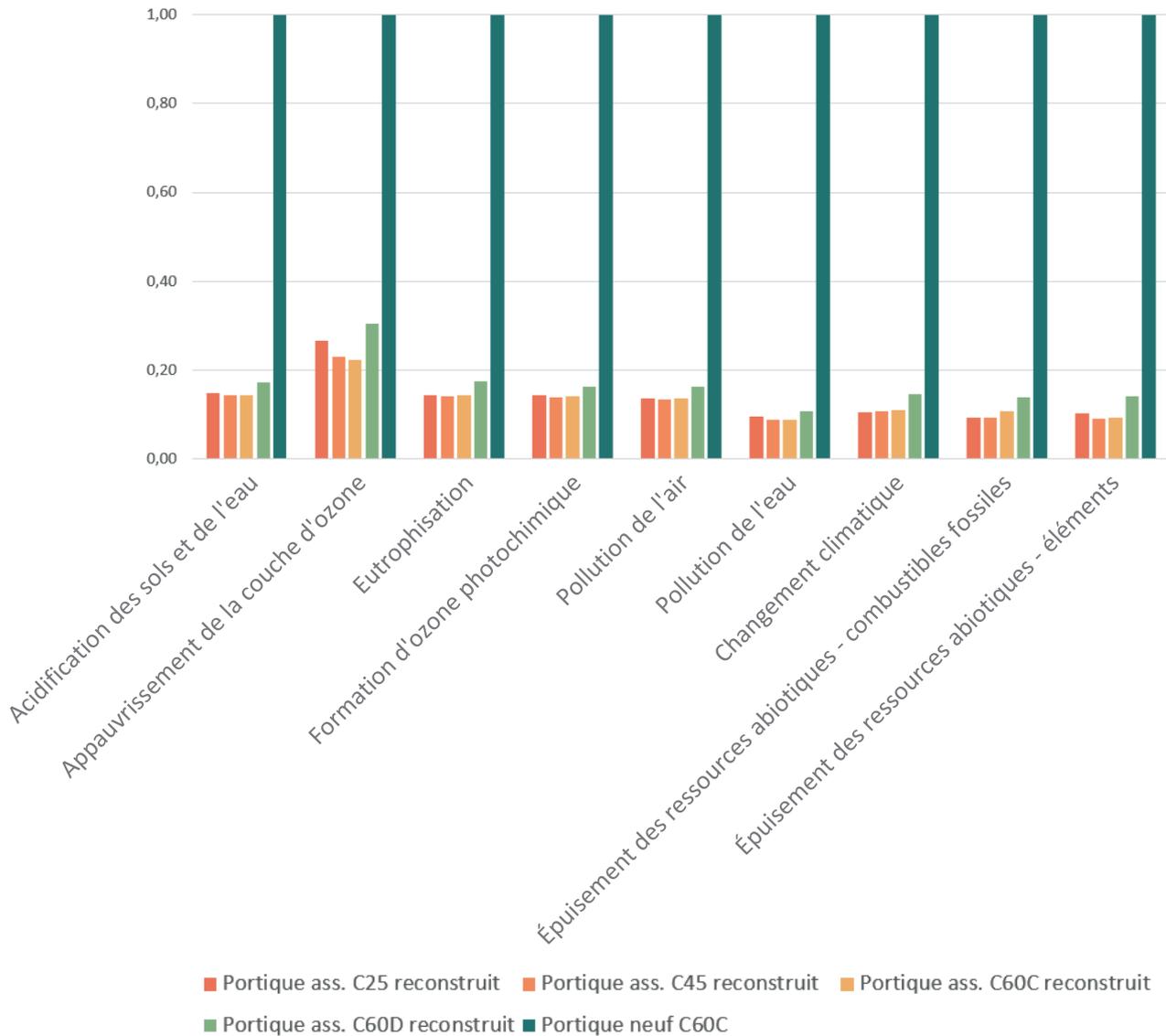


Figure V. 14 : Comparaison des catégories d'impacts entre les portiques pour la phase de déconstruction/reconstruction.

Portiques déconstruits / reconstruits

(OpenLCA-Ecoinvent-NF 15804+A1/CN)

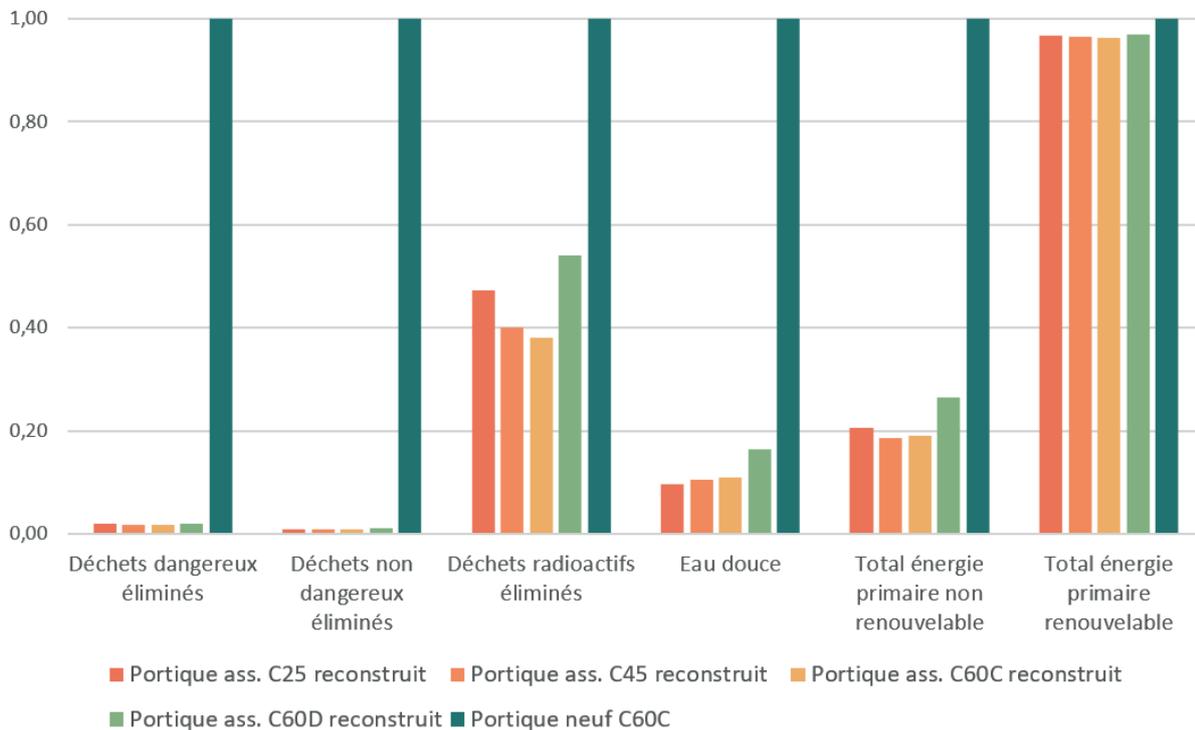
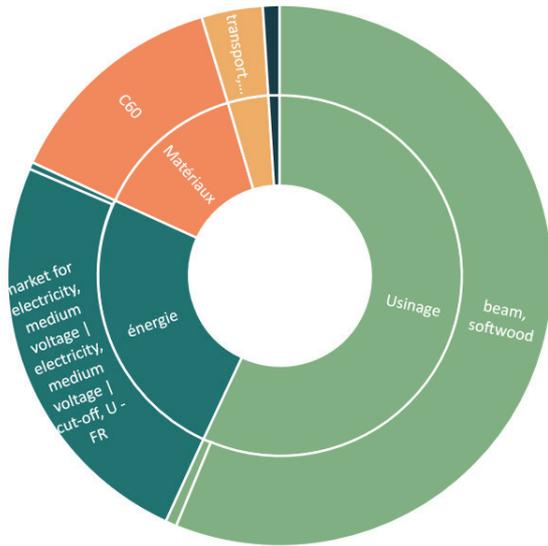


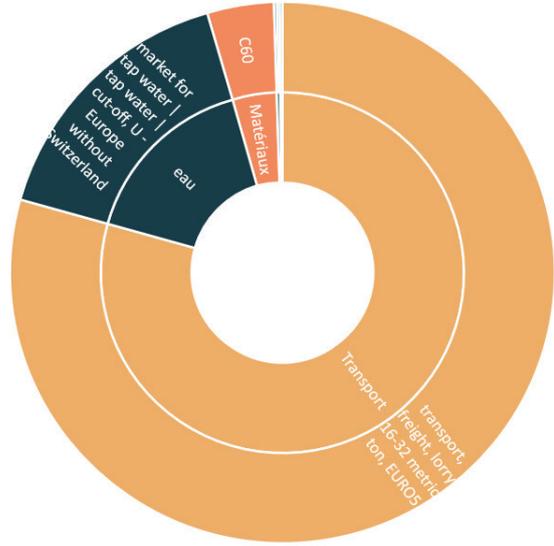
Figure V. 15 : Comparaison des paramètres entre les portiques pour la phase de déconstruction/ reconstruction.

Une autre analyse détaillée pour cette phase de déconstruction/ reconstruction sur l'exemple du portique avec le clavetage en C25 a été à nouveau effectuée, Figure V. 16, afin d'identifier les contributeurs majeurs pour cette phase. On peut remarquer alors que l'usage, en vert, est très impactant pour la plupart des indicateurs, sauf pour l'indicateur « Appauvrissement de la couche d'ozone » où le transport est dominant, et pour l'indicateur « Épuisement des ressources abiotiques – éléments », où c'est uniquement le contributeur matériaux qui est en cause. Pour les indicateurs « Changement climatique » et « Épuisement des ressources abiotiques – combustibles », les contributeurs principaux : usage, énergie, matériaux sont plus équilibrés. Cette analyse montre que le réemploi réduit drastiquement la part des matériaux dans les impacts environnementaux étudiés alors que c'est le contributeur principal pour une construction neuve. Le contributeur sur lequel agir ensuite est l'usage, puis l'énergie.

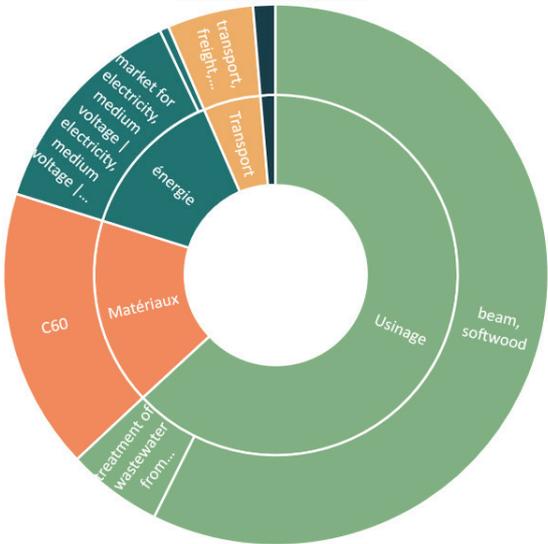
Répartition de l'indicateur "Acidification"
(OpenLCA-Ecoinvent-NF 15804+A1/CN)



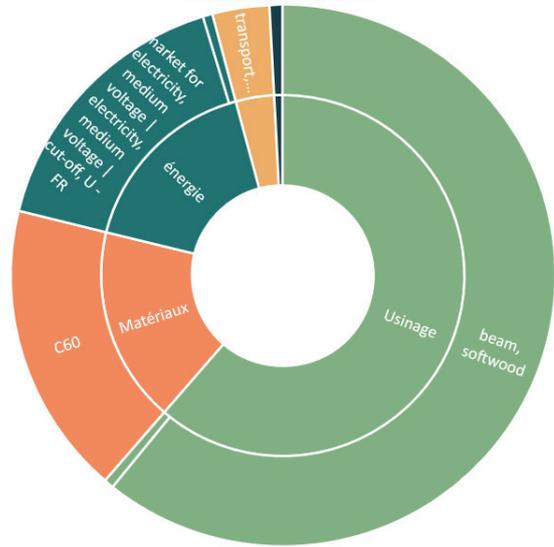
Répartition de l'indicateur "Appauvrissement"
(OpenLCA-Ecoinvent-NF 15804+A1/CN)



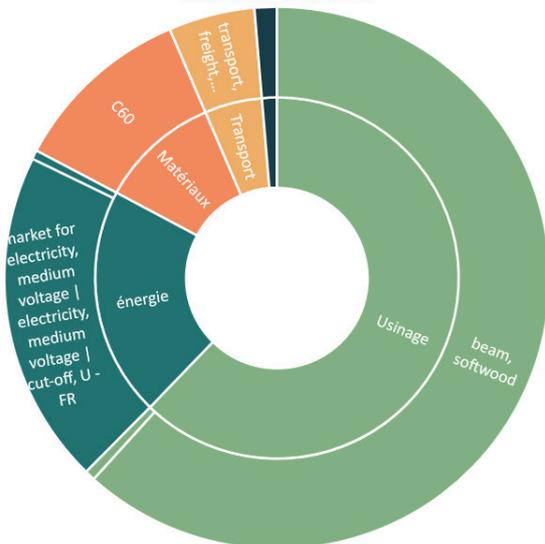
Répartition de l'indicateur "Eutrophisation"
(OpenLCA-Ecoinvent-NF 15804+A1/CN)



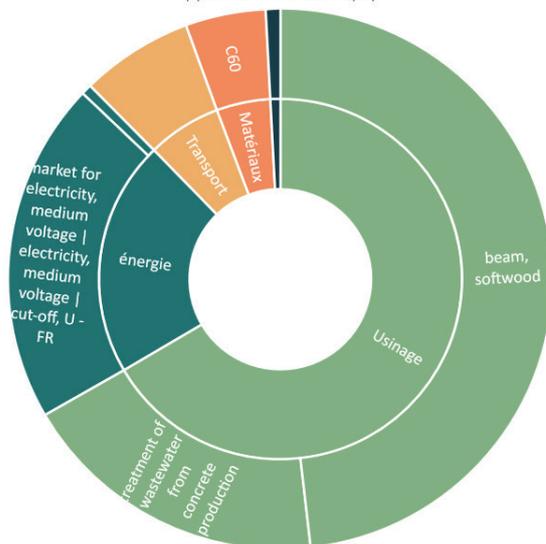
Répartition de l'indicateur "Pollution air"
(OpenLCA-Ecoinvent-NF 15804+A1/CN)



Répartition de l'indicateur "Formation ozone"
(OpenLCA-Ecoinvent-NF 15804+A1/CN)



Répartition de l'indicateur "Pollution eau"
(OpenLCA-Ecoinvent-NF 15804+A1/CN)



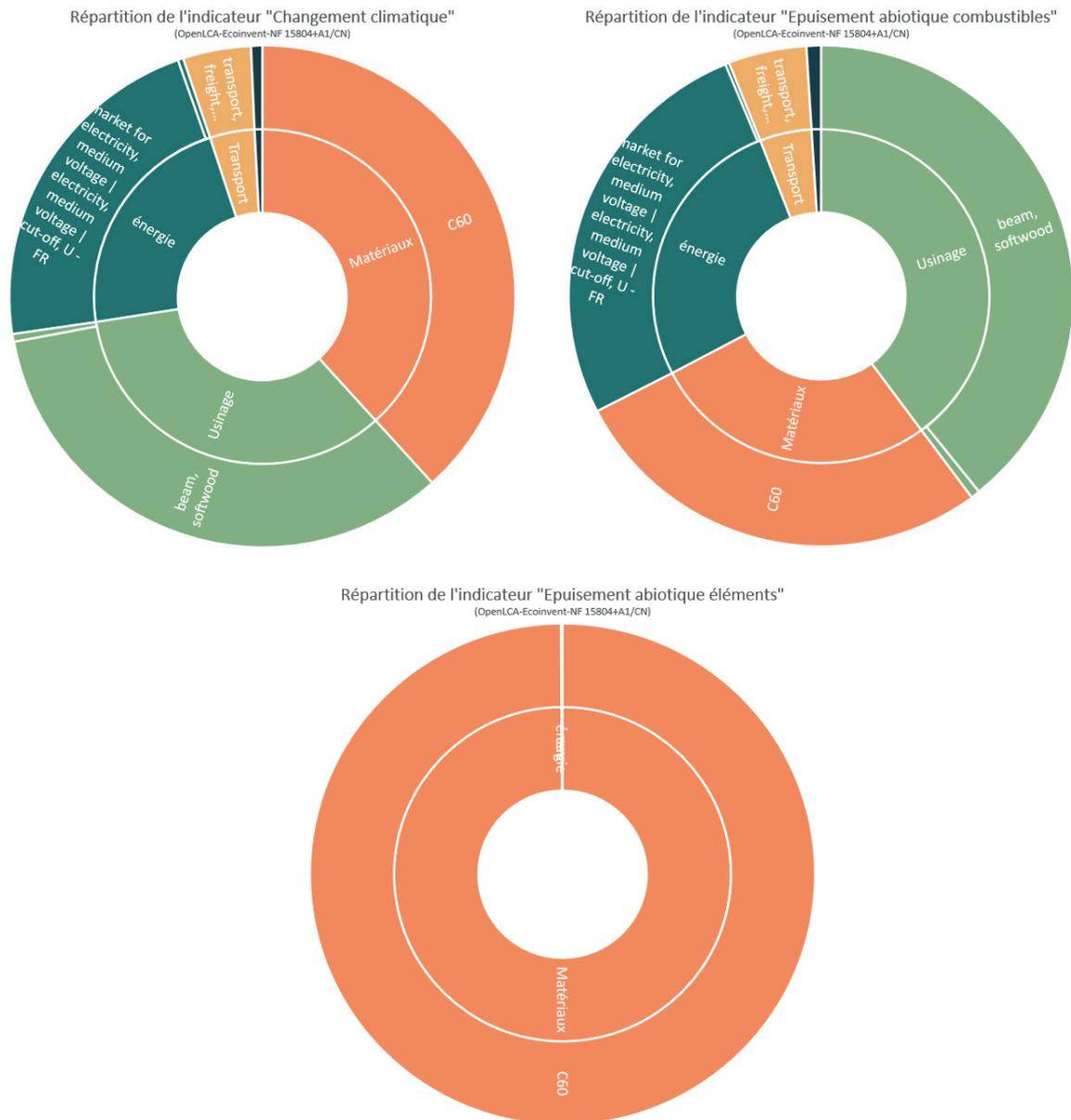


Figure V. 16 : Analyse détaillée des résultats du portique avec le clouage en C25 et pour chaque indicateur d'impact, pour la phase déconstruction/reconstruction.

Concernant l'eau, bien que la part des impacts dus à son utilisation semble minime dans la globalité (part bleu foncé dans la Figure V. 16), elle diffère selon le process de déconstruction d'une part, et de construction d'autre part. Ainsi l'utilisation directe d'eau pour la déconstruction et la reconstruction d'un portique est en moyenne de 1000L pour l'hydrodémolition et de 10L pour le nouveau béton du clouage, alors qu'il faut compter 90L dans le béton pour construire en parallèle un portique neuf. Cependant l'analyse systémique qui prend en compte également toutes les utilisations indirectes d'eau (extraction, transformation des matériaux, ...) sur l'ensemble de la chaîne du cycle de vie donne tout de même significativement l'avantage aux pratiques de réemploi. On verra ainsi dans la partie qui suit que le réemploi est bénéfique dès le premier réusage par rapport à la construction d'un portique neuf.

5.2.4.2. Impacts du réemploi cumulés pour les deux phases

Comme nous l'avons vu précédemment, les tendances s'inversent pour les portiques les plus vertueux entre la phase 1 (fabrication initiale) et la phase 2

(déconstruction/reconstruction). Il est donc nécessaire de calculer les impacts cumulés sur les deux phases. L'enjeu est bien d'intégrer l'ensemble des impacts pour 2 cycles d'usages : un premier cycle commun de construction « traditionnelle », un deuxième cycle se différenciant entre un réemploi ou une nouvelle construction « traditionnelle ».

Ainsi, dans un premier temps uniquement pour le réemploi, la Figure V. 17 indique les résultats des impacts et la Figure V. 18 les résultats des paramètres des quatre portiques réemployables au moment de leur 2^{ème} cycle d'usage, c'est-à-dire, après qu'ils ont subi une première déconstruction-reconstruction. On constate alors que le portique C25 crosses est le plus vertueux pour 7 sur les 9 indicateurs, et vient ensuite le portique C45 crosses, puis C60 crosses et C60 droits. Cependant les écarts sont toujours tous inférieurs à 20%. Ainsi, même si une tendance se dégage et montre que le portique le plus vertueux, pour deux usages dont un réemploi, est le portique avec le clavetage en C25, elle n'est pas significative.

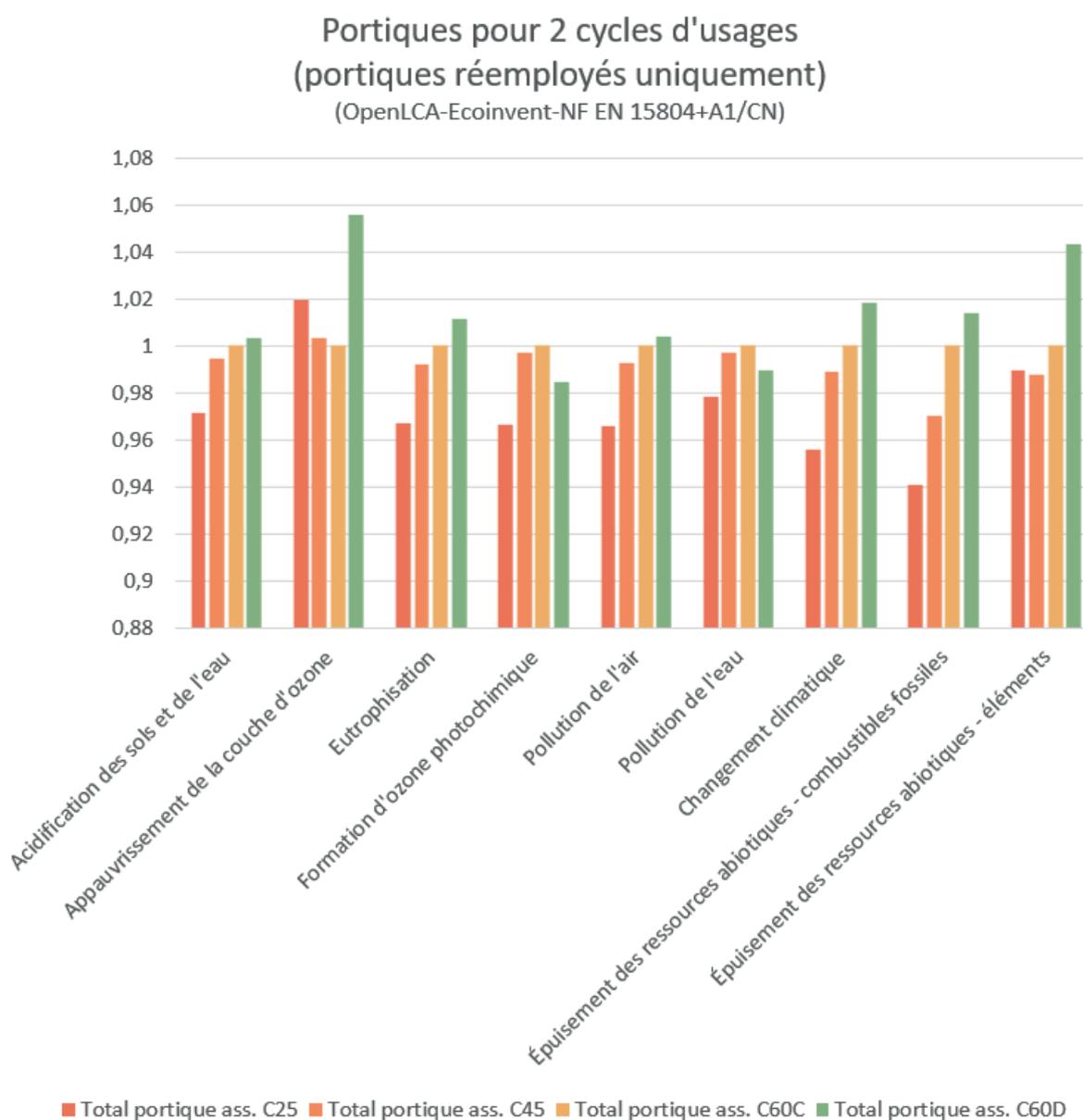


Figure V. 17 : Comparaison des impacts entre les portiques pour les deux cycles enchaînés.

Pour l'analyse des résultats des paramètres, le portique C25 crosses est aussi le plus vertueux pour 4 paramètres sur 8, puis viennent les portiques C45 crosses équivalant au portique C60 crosses et enfin le portique C60 droits.

Portiques pour 2 cycles d'usages (portiques réemployés uniquement) (OpenLCA-Ecoinvent-NF 15804+A1/CN)

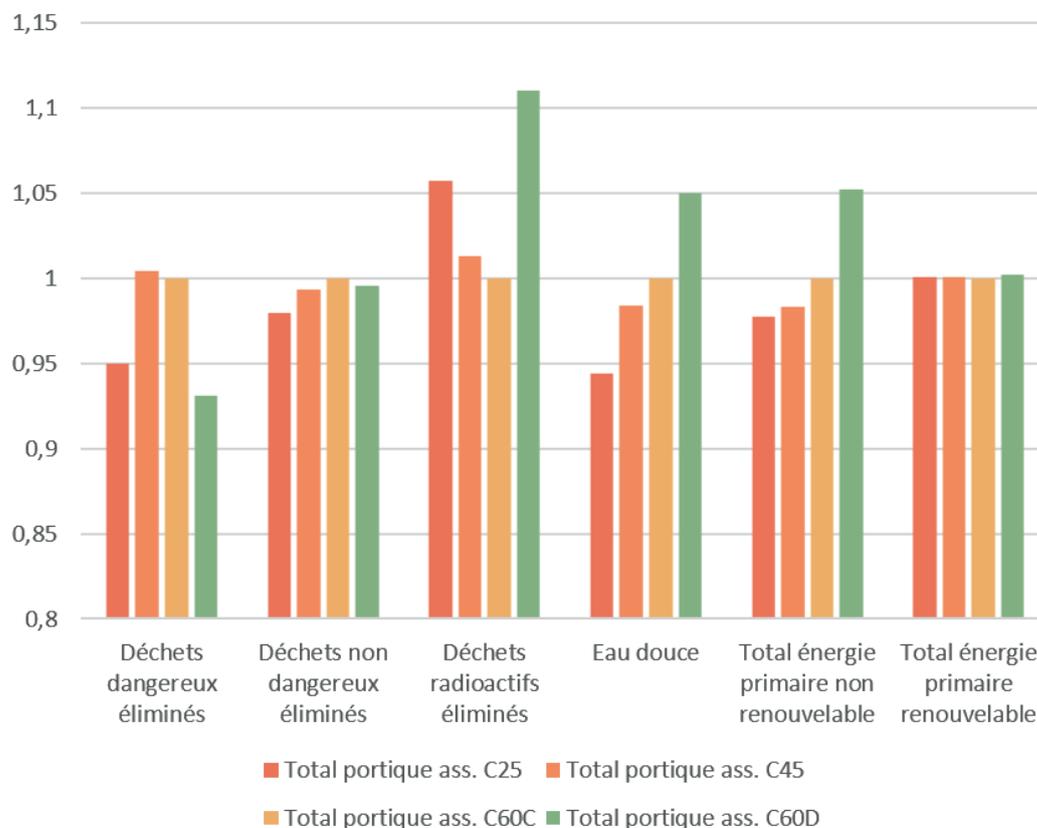


Figure V. 18 : Comparaison des paramètres entre les portiques pour les deux cycles enchaînés.

Une explication des résultats de la Figure V. 17 peut être donnée par la qualité du béton C25 qui est moindre et donc moins impactante. En effet, si l'on considère 1m^3 de béton indépendamment d'une unité fonctionnelle, alors l'impact d' 1m^3 de béton augmente avec la qualité de béton. La différence entre le C25, le C45 et le C60 s'explique principalement par la différence de quantité de ciment et/ou la nature de ce ciment. On rappelle également que la fonction assurée par 1m^3 de béton C25, n'est pas la même qu'avec 1m^3 de C60. Nous avons testé, dans cette étude, différentes qualités de bétons, plus ou moins performants. Ici l'augmentation de la qualité du béton de clavetage n'a pas diminué la quantité totale de béton mise en place puisque l'on a utilisé cette qualité plus élevée principalement pour chercher à réduire la longueur de clavetage, ce qui ne nous a pas permis de diminuer la quantité totale de béton mis en œuvre. A quantités égales c'est bien le béton de moindre qualité qui présente les meilleurs impacts environnementaux étudiés. La variation limitée des quantités d'armatures entre les portiques, n'a pas eu d'impact significatif sur l'analyse globale.

Ensuite, nous ajoutons le portique neuf non réemployable dans la comparaison précédente. Les résultats cumulés pour ces 2 cycles entre les portiques réemployés et les portiques neufs équivalents sont présentés dans la Figure V. 19, où l'on peut distinguer que les portiques réemployés sont significativement plus favorables pour tous les impacts.

Portiques pour 2 cycles d'usages (OpenLCA-Ecoinvent-NF EN 15804+A1/CN)

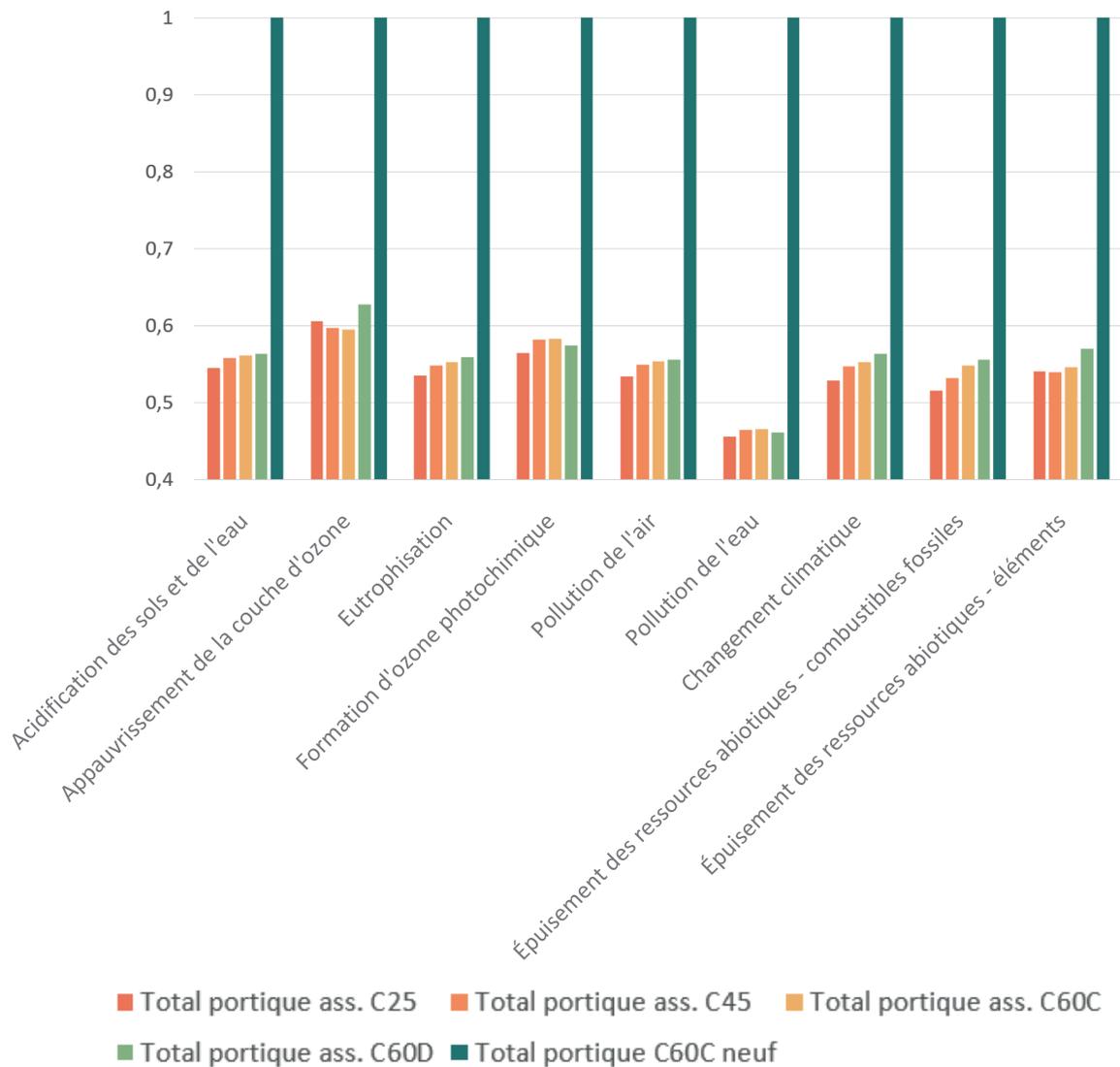


Figure V. 19 : Comparaison des résultats d'impacts entre les portiques réemployés et les portiques neufs pour deux cycles d'usages.

Il en est de même pour tous les paramètres, en Figure V. 20, où le portique non réemployable est significativement plus impactant, sauf pour l'énergie primaire renouvelable, où tous les portiques sont équivalents.

Portiques pour 2 cycles d'usages (OpenLCA-Ecoinvent-NF 15804+A1/CN)

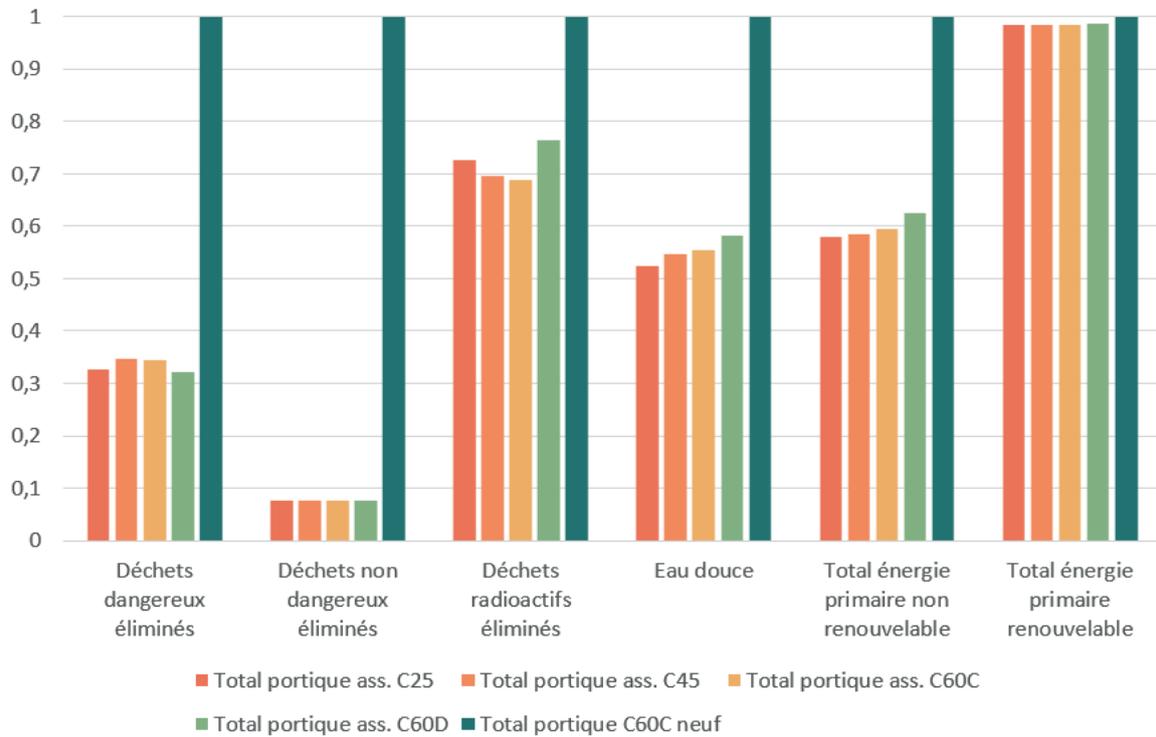


Figure V. 20 : Comparaison des résultats de paramètres entre les portiques réemployés et les portiques neufs pour deux cycles d'usages.

Cette première interprétation nous permet d'affirmer que le surdimensionnement de certaines variantes pour le réemploi, non optimisées par rapport à une conception plus traditionnelle, n'a pas d'impact significatif.

5.2.5. Analyses de sensibilité

Nous allons étudier plus en détails certains critères influants pour la pratique du réemploi uniquement pour l'indicateur d'impact « Changement climatique ». En effet, celui-ci présente les mêmes tendances que les indicateurs « Acidification des sols et de l'eau », « Eutrophisation », « Pollution de l'air », « Epuisement des ressources abiotiques-combustibles fossiles », soient cinq indicateurs sur les neuf.

5.2.5.1. Nombre de cycles de réemploi

L'enjeu est maintenant de comparer les impacts cumulés de la phase 1 et de la phase 2, que l'on va multiplier par le nombre de réemplois. Le schéma de la Figure V. 21 explique les différences de process entre les portiques pour les différentes phases de fabrication/déconstruction/reconstruction pour les portiques réemployés et les phases successives de constructions pour les portiques neufs.

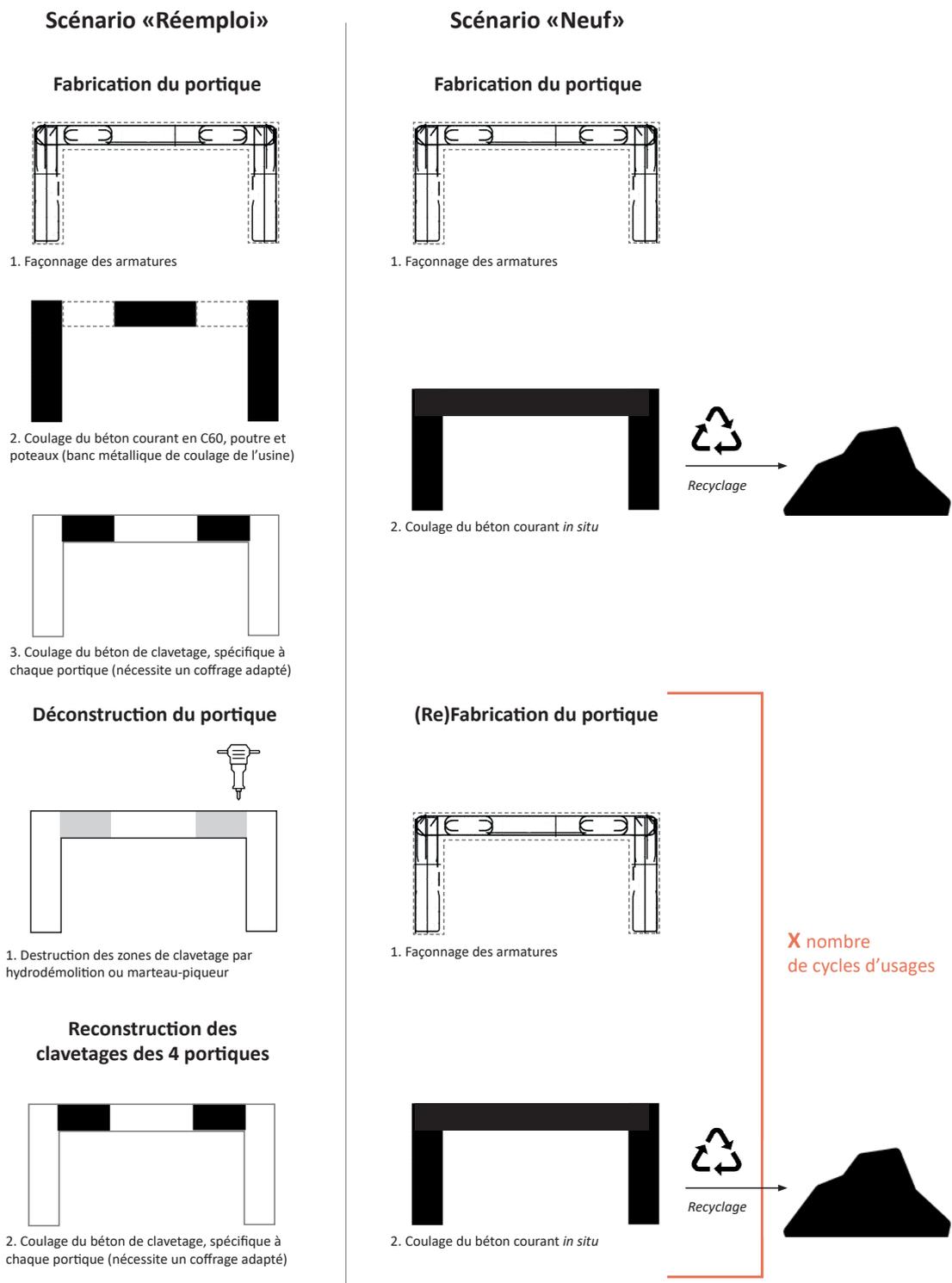


Figure V. 21 : Différences de process prises en compte pour le scénario avec réemploi et le scénario neuf.

La Figure V. 22 indique donc les impacts du portique réemployable avec l'assemblage en C25 (en bleu) et ceux du portique non réemployable (en orange), sur 8 cycles d'usage. Le 1^{er} cycle prend en compte la fabrication initiale et le 9^{ème} cycle représente uniquement l'impact de fin de vie. Le portique réemployable semble donc plus vertueux dès le 1^{er} réemploi par rapport à une construction neuve. Pour le cycle final, on rappelle que l'on choisit un scénario optimiste de recyclage du béton.

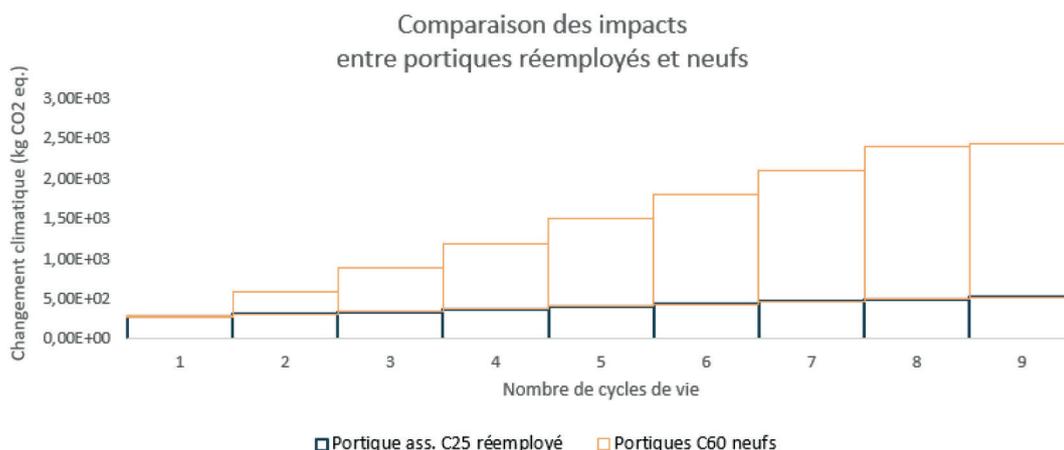


Figure V. 22 : Impacts cumulés pour l'indicateur "Changement climatique" entre le portique réemployé et les portiques neufs équivalents.

La Figure V. 24 permet de détailler pour les cycles 2 à 8 de la Figure V. 22, la part des différents contributeurs selon le portique avec et sans réemploi.

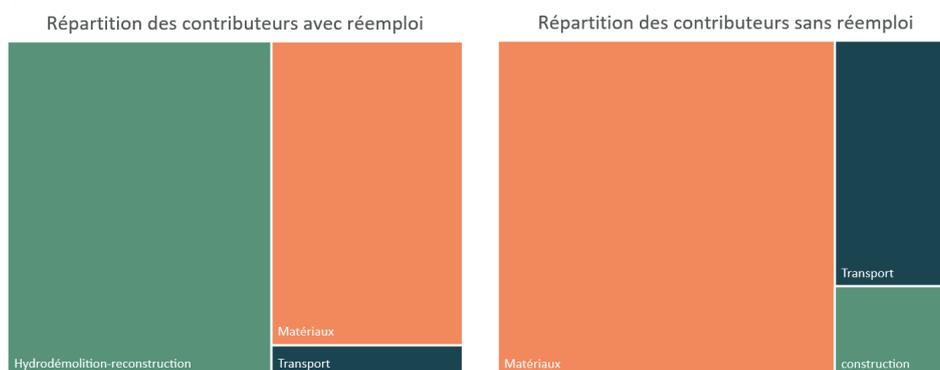


Figure V. 23 : Comparaison graphique de la part des contributeurs pour les cycles n+1 pour l'indicateur « Changement climatique » entre le portique réemployé et les portiques neufs équivalents.

Afin de comparer les impacts cumulés sur un plus grand nombre de cycles d'usages, il est plus juste d'introduire un coefficient de perte/casse ou d'usure précoce pour les portiques réemployés. A noter, qu'il est plus probable que l'on casse un portique lors des manutentions, plutôt qu'un portique soit inapte pour cause de signe de vieillesse (mise en œuvre en intérieur, en milieu non agressif). Ce coefficient est fixé à 10% de perte en matière sur les neuf cycles d'usages dans la Figure V. 24, où l'on remarque que l'impact des portiques neufs, en orange, est toujours plus élevé (+28% dès le premier réemploi) que l'impact du portique réemployé, en bleu, malgré le coefficient de perte.

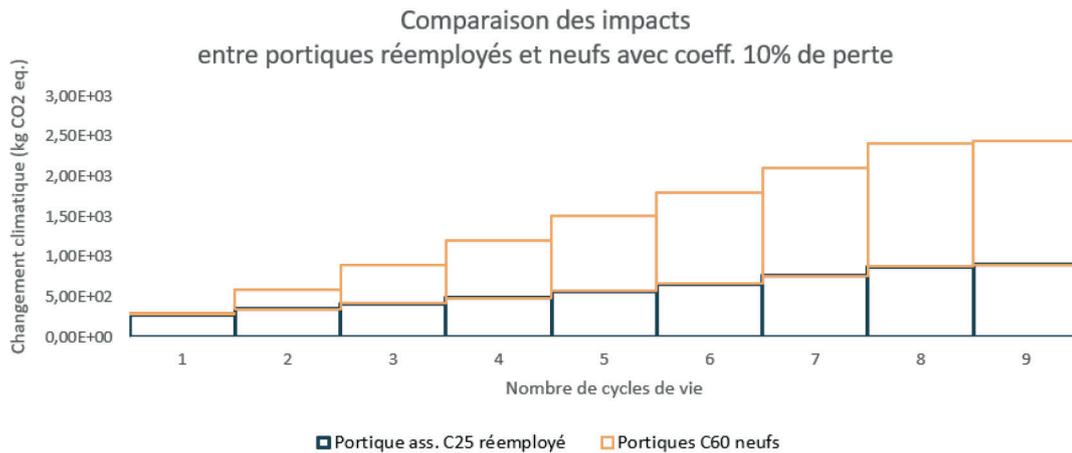


Figure V. 24 : Impacts cumulés pour l'indicateur "Changement climatique" entre le portique réemployé et les portiques neufs équivalents, en appliquant un coefficient de perte de 10% pour le réemploi.

5.2.5.2. Nombre d'années des cycles

Afin de ne pas créer de malentendus sur l'incitation au réemploi, il est nécessaire d'étudier l'influence du nombre d'années d'un cycle d'usage sur les impacts environnementaux étudiés. Ainsi, la Figure V. 25 présente l'influence de la variation du nombre d'années par cycle. On constate donc qu'au bout de 200 ans, c'est bien le scénario comportant un unique réemploi (en orange) qui est le moins impactant. En revanche, plus on augmente la fréquence de déconstruction/ reconstruction, plus les impacts augmentent sur une durée donnée.

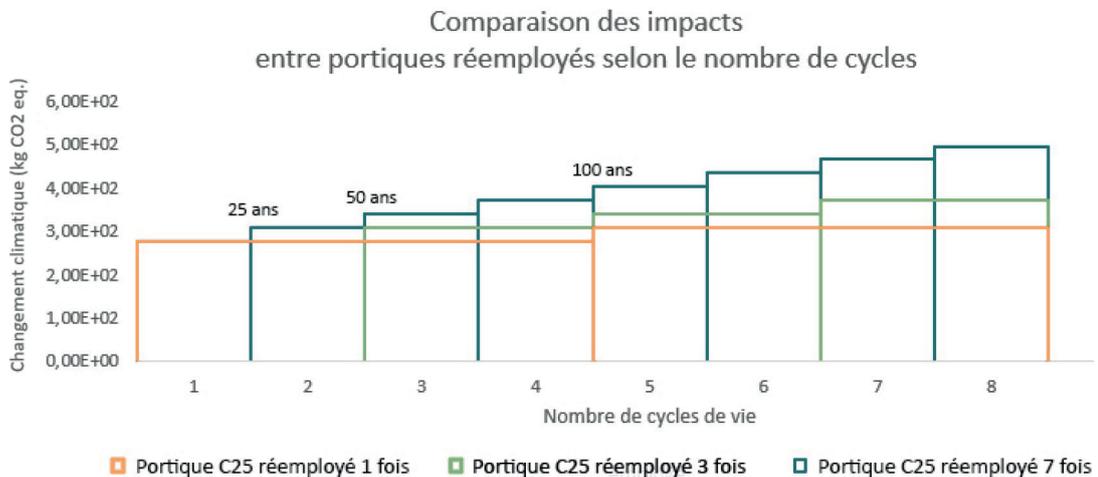


Figure V. 25 : Influence du nombre d'années par cycle sur l'indicateur "Changement climatique" cumulé.

Il est donc préférable d'allonger au maximum la durée des cycles de vie d'un élément de structure. Ce principe rejoint la recherche d'allongement de durée de vie valable généralement pour diminuer les impacts environnementaux d'un bâtiment mais aussi d'un produit.

5.2.5.3. Déclassement fonctionnel du portique

Nous allons considérer ici, l'hypothèse que le portique réemployable fera l'objet d'un coefficient de sécurité supplémentaire à chaque réemploi. En effet, l'ingénieur structure qui intégrera un élément réemployé dans une nouvelle structure risque de prendre des précautions supplémentaires dans son dimensionnement, comme nous l'avons explicité dans le chapitre II. Ainsi un déclassement fonctionnel pourrait progressivement faire diminuer artificiellement la capacité structurale du portique. On pourrait donc considérer une pleine capacité en cycle 1, en reprenant la charge de 70 kN pour notre étude; puis 60 kN en cycle 2; 50 kN en cycle 3; 40 kN en cycle 4; puis 30 kN en cycle 5. Nous considérons un cycle 6, ultime, qui prend en compte l'impact du recyclage de fin de vie. On peut ainsi constater, en Figure V. 26, que les écarts entre le portique réemployable et les portiques neufs sont moins importants que dans l'étude de la Figure V. 22.

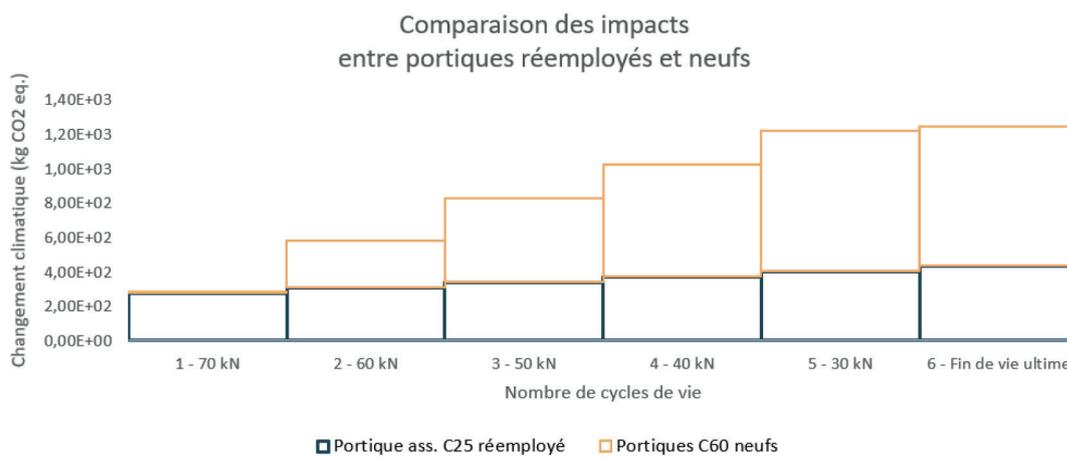


Figure V. 26 : Comparaison de l'indicateur "Changement climatique" entre le portique réemployé et le portique neuf sur plusieurs cycles intégrant une perte de capacité structurale.

Comme pour l'étude de la Figure V. 24, nous intégrons maintenant un coefficient de perte de 10% pour la Figure V. 27, puis 20% pour la Figure V. 28, et 30% pour la Figure V. 29.

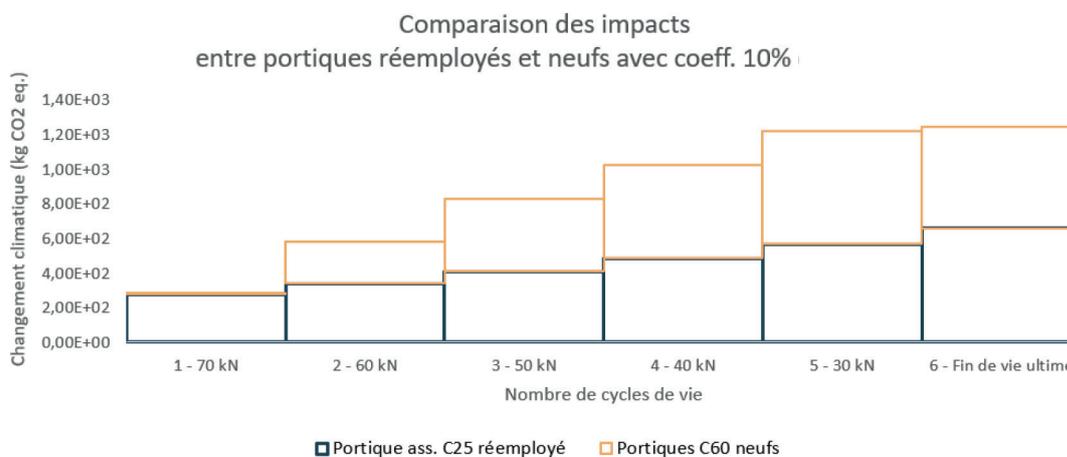


Figure V. 27 : Comparaison de l'indicateur "Changement climatique" entre le portique réemployé et le portique neuf sur plusieurs cycles intégrant une perte de capacité structurale et un coefficient de perte de 10%.

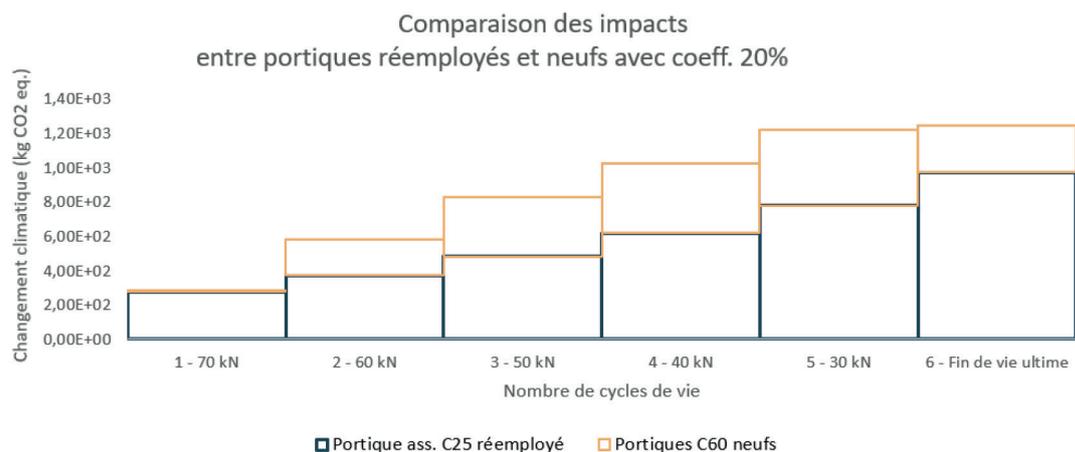


Figure V. 28 : Comparaison de l'indicateur "Changement climatique" entre le portique réemployé et le portique neuf sur plusieurs cycles intégrant une perte de capacité structurale et un coefficient de perte de 20%.

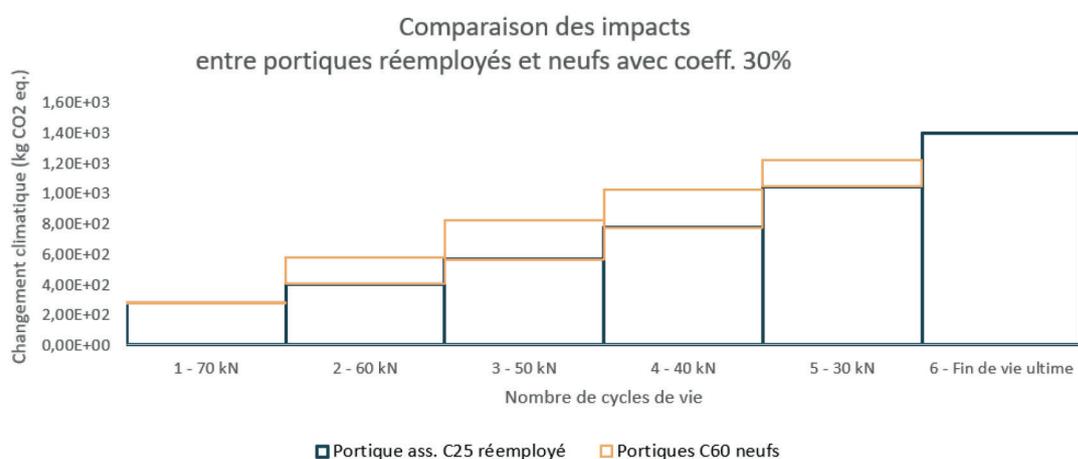


Figure V. 29 : Comparaison de l'indicateur "Changement climatique" entre le portique réemployé et le portique neuf sur plusieurs cycles intégrant une perte de capacité structurale et un coefficient de perte de 30%.

Même en prenant en compte la perte de fonction et un coefficient de casse ou de perte de 20%, le portique réemployé reste plus favorable. A partir de 30% de perte, en fin de vie ultime après 4 réemplois et 6 cycles d'usage, le portique neuf commence à redevenir plus favorable par rapport au portique réemployé.

5.3. Extrapolation à l'échelle du bâtiment

5.3.1. Multiplication du portique à l'échelle du bâtiment

Dans cette partie, nous allons passer de l'échelle du portique à l'échelle du bâtiment constitué de plusieurs portiques, correspondant au bâtiment défini dans la partie 2.3.2. du chapitre II.

Pour cela, on considère que les deux bâtiments initiaux sont construits avec des bétons « coulés en place ». Le bâtiment réemployable sera composé des portiques avec les assemblages démontables en C25 (issus des variantes étudiées dans les parties précédentes), alors que le bâtiment neuf non réemployable sera coulé en place d'un seul et même béton de classe C60. Ces bâtiments ont fait l'objet d'une adaptation, à l'échelle 1, de l'ossature répétant le portique des parties précédentes conçu lui à une échelle 1/3. Le dimensionnement à l'échelle 1 permet

de disposer des taux d'armatures réalistes (non proportionnels pour passer de l'échelle 1/3 à l'échelle 1). A titre de comparaison, le bâtiment est constitué de 640 poutres et 420 poteaux. Pour l'hydrodémolition, le rendement observé au m³ de béton hydrodémoli sur le portique échelle 1/3 a été retenu pour être appliqué au volume à hydrodémolir sur le bâtiment réemployable.

Pour les cycles de réemploi, le bâtiment réemployé sera alors considéré préfabriqué, puisqu'il utilisera les méthodes de préfabrication pour assembler les éléments déjà fabriqués en premier cycle. Pour le scénario avec les bâtiments neufs, on considérera donc une fabrication coulée en place à chaque nouveau cycle. Les dalles ne font pas partie de l'étude, on analysera les éléments constituant le portique (poutres et poteaux). Les temps d'utilisation de grue sont ceux proposés par l'IUT Robert Schuman ¹¹ et distinguent le temps de pose d'un élément préfabriqué, du temps nécessaire au coulage en place. La puissance moyenne de la grue est retenue à 40 kW (alimentation électrique) par heure et pour une journée de 7h de travail, d'après les données du fabricant de grues Potain ¹².

Pour le cycle final en vue d'un recyclage, on considérera un abattage de la structure du bâtiment (démolition) et un traitement du béton en vue de son recyclage. Pour cela on reprendra les données d'abattage proposées par Brière [10], c'est-à-dire que la cadence d'abattage est de 226 tonnes de béton par jour. Dans notre cas, le bâtiment réemployé fait 5286 tonnes et notre bâtiment neuf 4941 tonnes, soit respectivement 24 jours et 22 jours d'abattage. D'après l'étude de Brière [10], on peut déduire que l'abattage représente 8668,8 MJ par jour soit, respectivement, 202965,11 MJ pour le bâtiment réemployé et 189718,24 MJ pour le bâtiment neuf.

On obtient ainsi les résultats visibles sur la Figure V. 30, pour les indicateurs d'impacts et sur la Figure V. 32 pour les paramètres. Les couleurs foncées correspondent à la version réemployable et les couleurs pâles à la version non réemployable du bâtiment. Les trois cycles d'usages successifs sont signifiés respectivement en bleu, vert et rouge. Les résultats sont cumulés à chaque nouveau cycle. Au bout de 3 cycles d'usages, intégrant donc, d'une part deux réemplois et une fin de vie ultime pour le scénario réemployable, et d'autre part trois constructions et trois fins de vie pour le scénario non réemployable, on peut distinguer que le bâtiment réemployable est significativement moins impactant de 38% à 67% pour 8 indicateurs et moins impactant de 16% pour le 9^{ème} indicateur, l'appauvrissement de la couche d'ozone.

¹¹ <http://polyvert.iutrs.unistra.fr/temps-unitaires-de-cycles-de-grue/>, consulté le 5 février 2020.

¹² <https://docplayer.fr/8566860-Potain-alimentation-electrique-gamme-2012-guide-produit-ref-608-2012-04-fr.html>, consulté le 16 avril 2019.

Comparaison bâtiments avec et sans réemploi sur trois usages

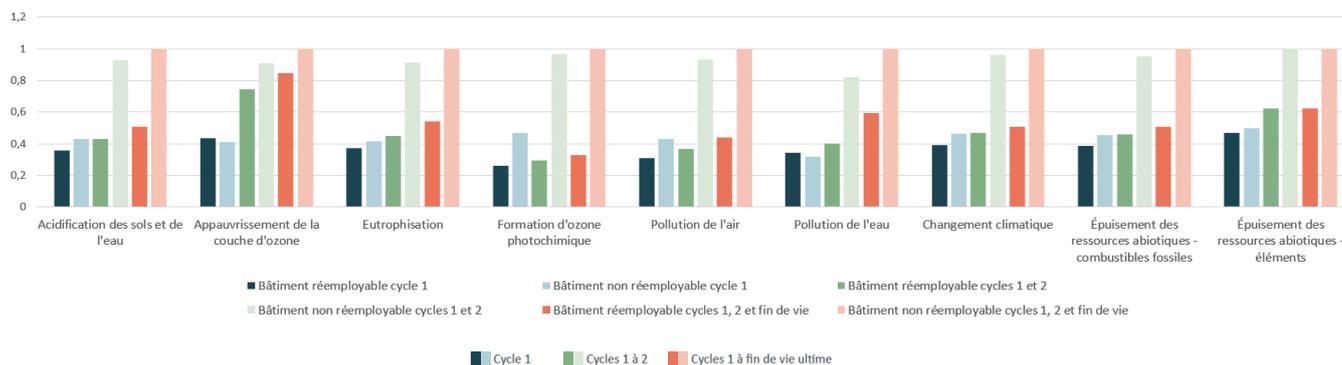


Figure V. 30 : Comparaison entre les bâtiments comportant les portiques réemployés et les bâtiments neufs, selon les indicateurs d'impacts de la NF EN 15804+A1/CN.

Comme nous l'avons vu précédemment, il est recommandé de compléter les résultats basés sur des catégories intermédiaires, avec les résultats des catégories de dommages. Nous choisissons donc la méthode *ReCiPe Endpoint (H,A)* qui est une méthode consensuelle, qui se réfère aux valeurs de normalisation internationale avec une pondération moyenne fixée selon la perspective hiérarchique, *Hierarchist (H)*, qui prend en compte un cadre temporel et politique moyen, recommandée par plusieurs études [24], [25], [26], [27]. ReCiPe propose par ailleurs deux autres types de perspectives, *Individualist (I)* optimiste et court terme et *Egalitarian (E)*, prudente et long terme^{13, 14}. L'enjeu ici est principalement de vérifier si les ordres de grandeur par catégories d'impacts sont les mêmes avec les catégories *midpoint* et *endpoint*. Enfin, la méthode utilisée ici repose sur le système de points mais il faut signaler que d'autres méthodes reposent sur le système de DALY (*Disability Adjusted Life Years*). Les résultats obtenus sur la Figure V. 31 montrent que le bâtiment avec les portiques réemployables est également significativement moins impactant (de 47% à 55% selon les indicateurs), même avec les catégories *endpoint*. C'est pour l'indicateur de ressources que le réemploi est le plus efficace, ce qui confirme la tendance selon laquelle la pratique du réemploi permet de lutter contre l'épuisement des ressources dans le domaine de la construction. Cependant cet indicateur ne laisse paraître qu'une partie des impacts environnementaux connus et doit donc être perçu avec précaution.

¹³ <https://pre-sustainability.com/articles/recipe/>, consultée le 30/04/2020.

¹⁴ <http://www.gabi-software.com/support/gabi/gabi-lcia-documentation/recipe/>, consultée le 30/04/2020.

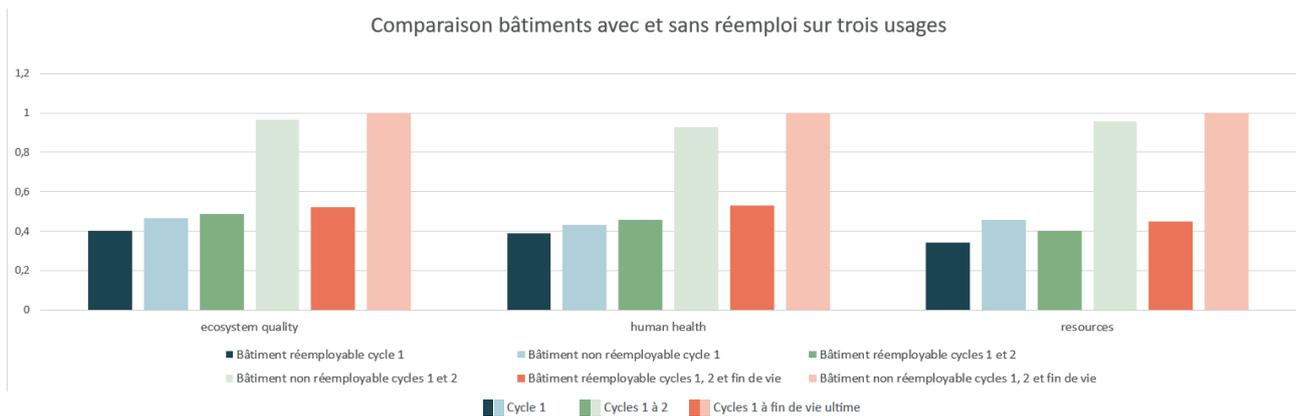


Figure V. 31 : Comparaison entre les bâtiments comportant les portiques réemployés et les bâtiments neufs, selon les indicateurs d'impacts *endpoint ReCiPe H/A*.

Concernant les paramètres en Figure V. 32, le bâtiment réemployable est moins impactant de 29% à 48% pour 5 paramètres, mais en revanche il est plus impactant que le bâtiment non réemployable pour les paramètres « déchets radioactifs éliminés » (+21%) et « énergie primaire renouvelable » (+9%). Le bâtiment avec réemploi est plus vertueux car le réemploi agit directement sur le levier du poste matériaux, prépondérant dans les totaux des résultats d'impacts, comme démontré précédemment. Le bâtiment réemployable est significativement plus impactant que le bâtiment non réemployable uniquement pour le paramètre « déchets radioactifs éliminés ». Ceci peut s'expliquer par la nécessité de déconstruire deux fois, ce qui engendre une part de déchets avant de pouvoir reconstruire, alors que pour le scénario du bâtiment neuf, on considère un recyclage en fin de vie, ce qui est un scénario optimiste, qui ne génère pas de déchets par rapport à une démolition sans valorisation.

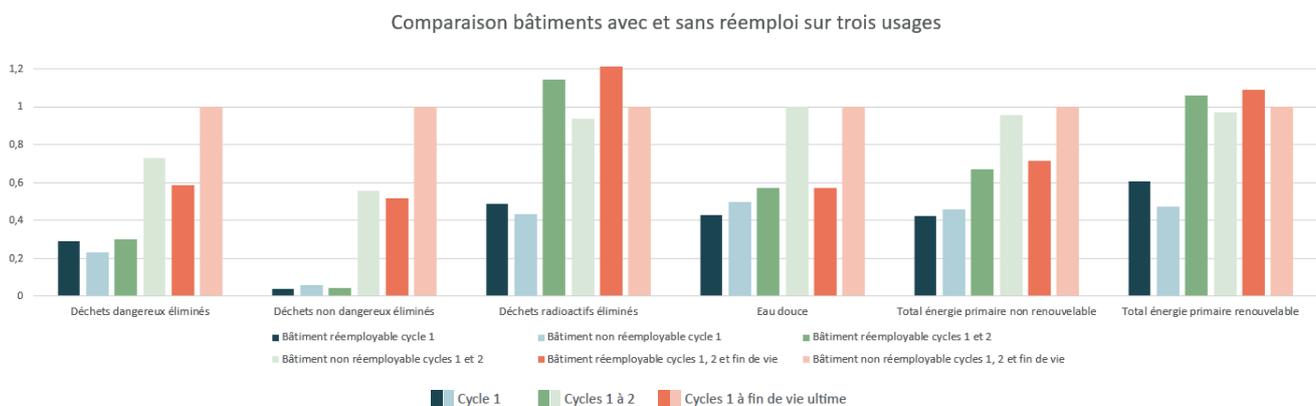


Figure V. 32 : Comparaison entre les bâtiments comportant les portiques réemployés et les bâtiments neufs, selon les paramètres de la NF EN 15804+A1/CN.

On peut donc en déduire que le réemploi à l'échelle du bâtiment est bien plus vertueux que la construction traditionnelle coulée en place. La tendance est vraie dès le premier cycle de réemploi et confirmée au bout de deux cycles de réemploi, incluant une fin de vie ultime. Néanmoins on rappelle que le système est limité à l'ossature porteuse du bâtiment et que les données exploitées ici sont issues d'une expérimentation. Bien que les techniques de déconstruction et reconstruction de l'expérimentation soient très proches des techniques usuelles sur chantier, l'échantillon réduit traité constitue un cas particulier. On ne peut donc pas extrapoler ces résultats à tous types de bâtiment. De plus, chaque projet de construction étant conçu comme un prototype avec des particularités propres, une ACV spécifique doit être réalisée pour chaque cas.

5.3.2. Allocations possibles du réemploi

Jusqu'à maintenant, dans les parties précédentes, nous avons évalué les impacts environnementaux de la matière réellement mise en œuvre en cas de réemploi, à un temps t , c'est-à-dire, la matière physiquement présente lors du premier cycle d'usage (qui comprend les impacts des procédés de la fabrication), lors des cycles intermédiaires (qui comprennent les impacts des procédés des déconstructions et reconstructions d'assemblages) et un cycle final (qui comprend les impacts des procédés du démantèlement pour recyclage). Nous proposons d'utiliser ici différentes répartitions des impacts selon différents types d'allocations, afin d'identifier si cette méthode permet d'encourager les pratiques de réemploi, notamment du point de vue des décideurs, ici les constructeurs, promoteurs, bailleurs ou aménageurs.

Comme nous l'avons vu, après avoir explicité et rappelé la légitimation d'une allocation dans le Chapitre I, partie 1.4.4.2., le réemploi pourrait justifier une allocation, afin de répartir autrement les bénéfices environnementaux de cette pratique. En effet, d'après les résultats précédents, le réemploi devient « rentable » environnementalement à partir du 2^{ème} cycle d'usage, c'est-à-dire après un premier réemploi. Or si les propriétaires du bâtiment du 1^{er} cycle d'usage et celui du 2^{ème} cycle d'usage sont différents, alors on pourra constater que le premier propriétaire endosse l'impact environnemental de la conception en vue du réemploi (plus impactant que pour une construction traditionnelle), et que le deuxième propriétaire tire les bénéfices de cette conception en réemployant la matière et donc profite, seul, des efforts mis en place par le propriétaire concepteur initial. Afin de ne pas léser ces concepteurs et de les encourager à concevoir réemployable, il serait plus juste que le bénéfice final du réemploi, après plusieurs cycles d'usages, soit réparti plus équitablement, par anticipation, dès le premier cycle d'usage. A l'inverse on pourrait également avancer le fait que le propriétaire réemployeur prend un risque en remettant en œuvre des éléments réemployés et/ou que les coûts engendrés pour caractériser les éléments réemployables pourraient être compensés par ailleurs. L'investissement financier supplémentaire pour une opération de réemploi pourrait ainsi être compensé par un bonus environnemental.

Pour équilibrer cette répartition ou évaluer un bonus, plusieurs options sont possibles. On pourra notamment interroger les propriétés physiques (par exemple la masse), la valeur économique (rapport entre le prix du bien secondaire et celui de la production primaire), et le nombre d'utilisations ultérieures du bien secondaire, évoqués par l'ILCD Handbook [28] pour la modélisation de la réutilisation dans l'ACV.

Par ailleurs, d'autres critères pourraient être proposés dans le cadre du réemploi dont le contexte normatif n'est pas encore figé. Ainsi on pourrait considérer une allocation fondée sur une durée en service, un degré de responsabilité ou de risque du réemploi, un nombre d'usages (passés et à venir), la prise en compte du surdimensionnement initial réparti sur tous les usages successifs ou une répartition égale des bénéfices environnementaux finaux entre les différents acteurs utilisant les éléments réemployés.

Cependant, on retrouve globalement une volonté de mettre en œuvre des incitations qui récompensent l'utilisation de biens secondaires, comme exposées dans l'ILCD Handbook, [28], et des politiques incitant à l'économie circulaire comme nous avons pu largement le voir dans le chapitre 0.

La Figure V. 33 expose la problématique de cette répartition entre différents cycles et différents propriétaires confrontés au réemploi. Le problème de l'allocation se pose lorsque des propriétaires successifs entrent en jeu, créant un système exclusif. De plus, le nombre de cycles intermédiaires (entre le cycle initial comprenant la fabrication et le cycle ultime comprenant la fin de vie) n'est pas fixé a priori, ce qui rend impossible une répartition chiffrée par anticipation.

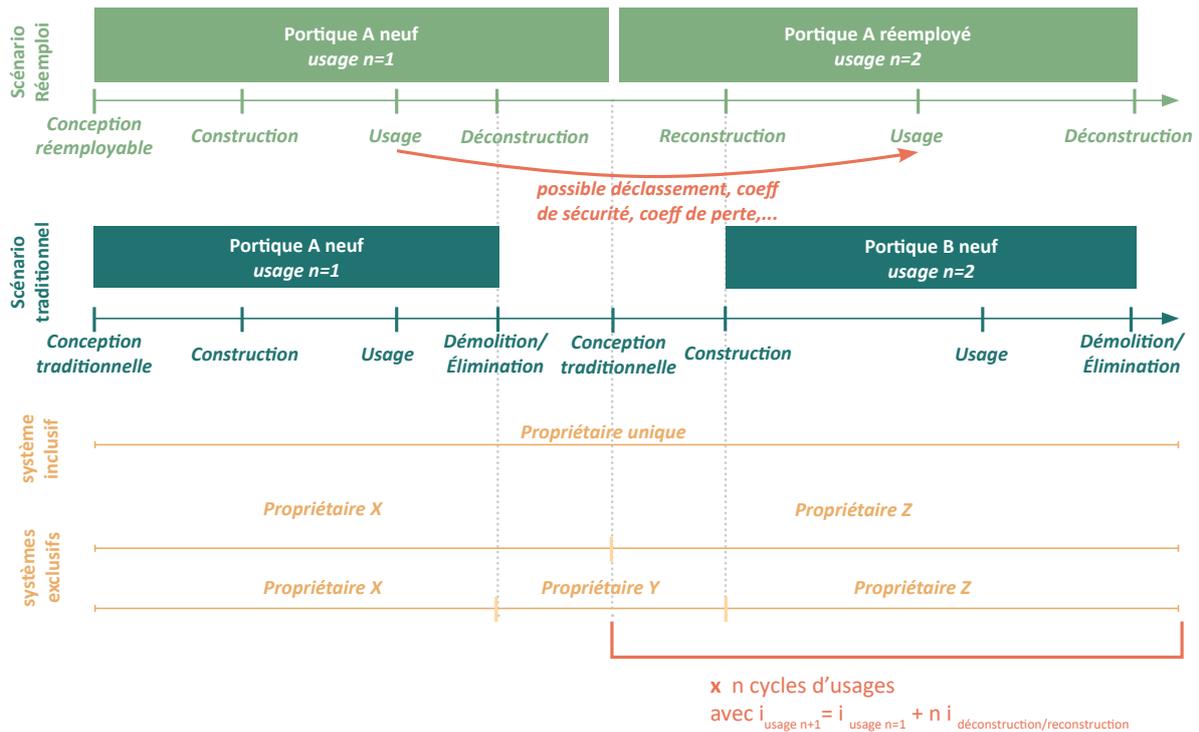


Figure V. 33 : Problématique de la répartition des impacts entre différents cycles et différents propriétaires.

En théorie, il est tout de même possible de définir l'impact du réemploi dans l'absolu. Ainsi, on définit le système d'équations suivant :

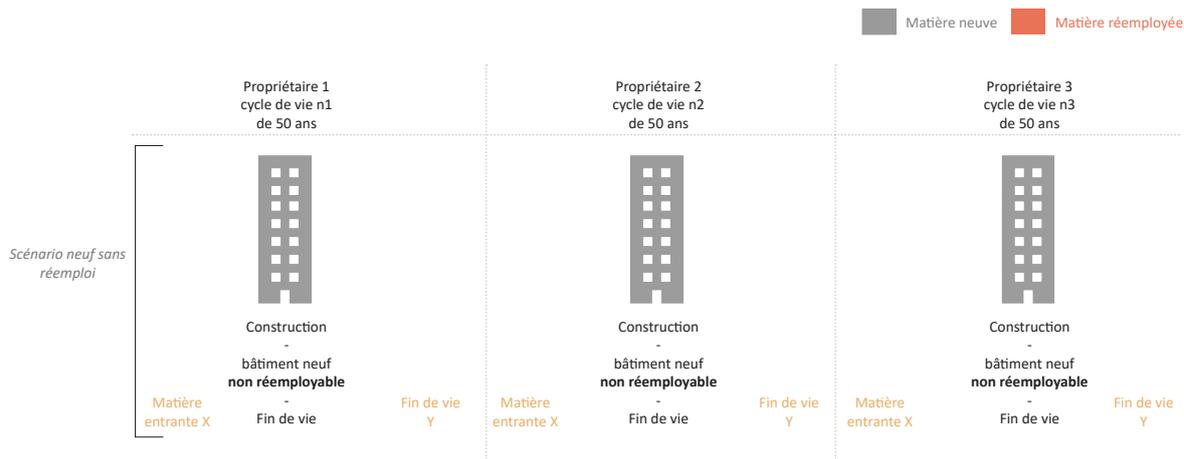
$$I_{pn} = I_{p1} + nr$$

$$I_{p2} = I_{p1} + r$$

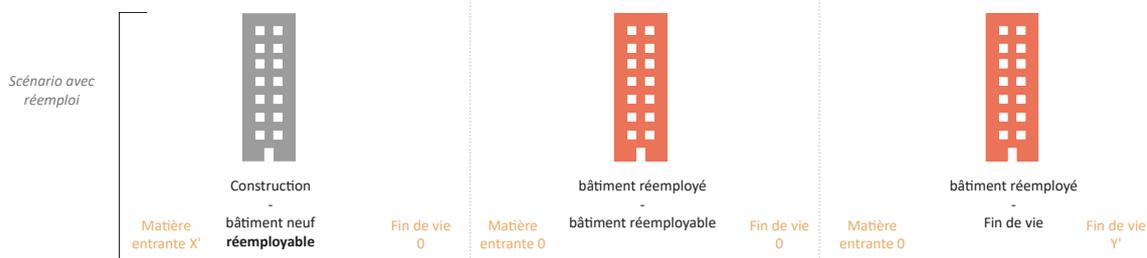
$$I_{pf} = I_{pn} + D$$

avec I_{p1} = impact de la fabrication initiale du portique, n = le nombre de cycles, r =impact de la reconstruction (déconstruction des assemblages), I_{pf} = impact final du portique, D = élimination du portique. Ces impacts peuvent être ensuite répartis entre différentes parties prenantes.

Un récent article, par De Wolf et al. [31], propose plusieurs types d'allocations (rappelés dans le Ch I, partie 1.4.4.2.) pour répartir les impacts du réemploi, et permet de visualiser les variations d'impacts par cycle, selon la répartition adoptée. Les principaux types de répartition de charge environnementale sont synthétisés dans la Figure V. 34 qui permet également de visualiser la matière réemployée (en orange) en comparaison de la matière neuve mobilisée (en gris).

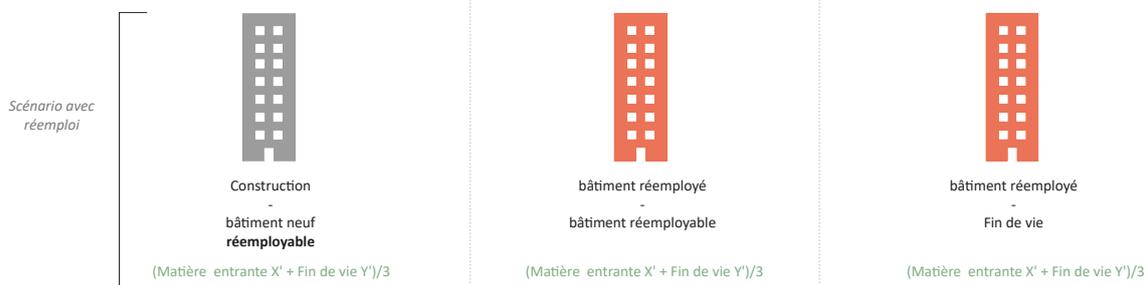


A. Système isolé propre à chaque propriétaire, méthode des stocks



B. Répartition des impacts entre les différents propriétaires, Allocations*

* répartition égale ou à pondérer selon un critère comme le risque pris vis-à-vis des responsabilités par ex.



C. Application d'un bonus, impacts évités par substitution

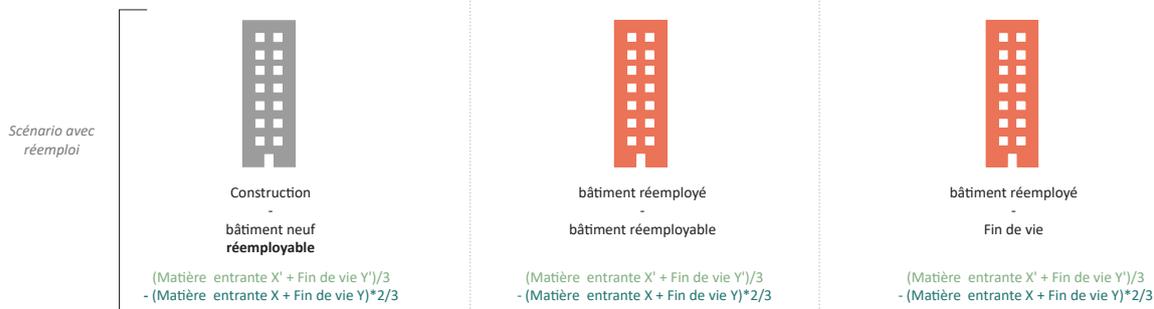


Figure V. 34 : Affectations possibles des impacts environnementaux du réemploi entre plusieurs cycles de vie en ACV.

Dans le cadre de l'expérimentation de nos portiques, nous pouvons donc appliquer numériquement ces différentes méthodes afin de mieux visualiser, pour chacun des indicateurs

d'impacts, les conséquences engendrées par le choix d'allocation, Figure V. 35 à Figure V. 40. Les cycles intermédiaires peuvent être répétés indépendamment.

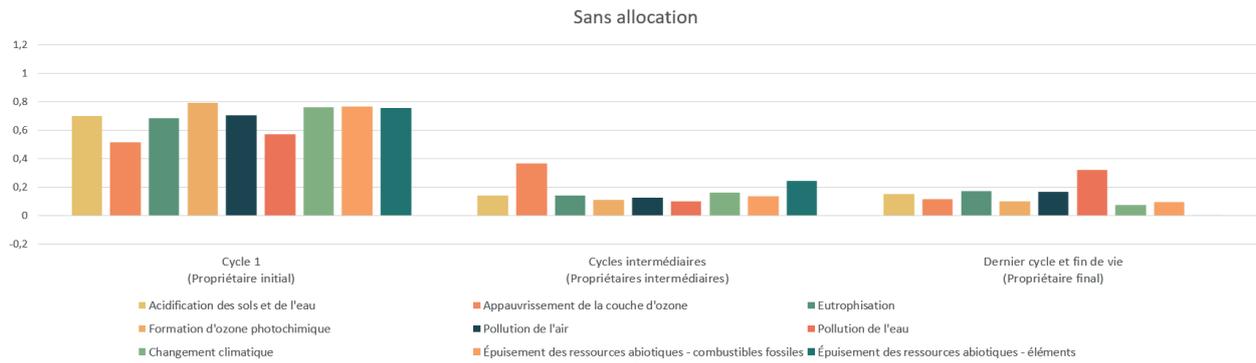


Figure V. 35 : Répartition des impacts sans allocation, fondée sur la réalité physique de la matière.

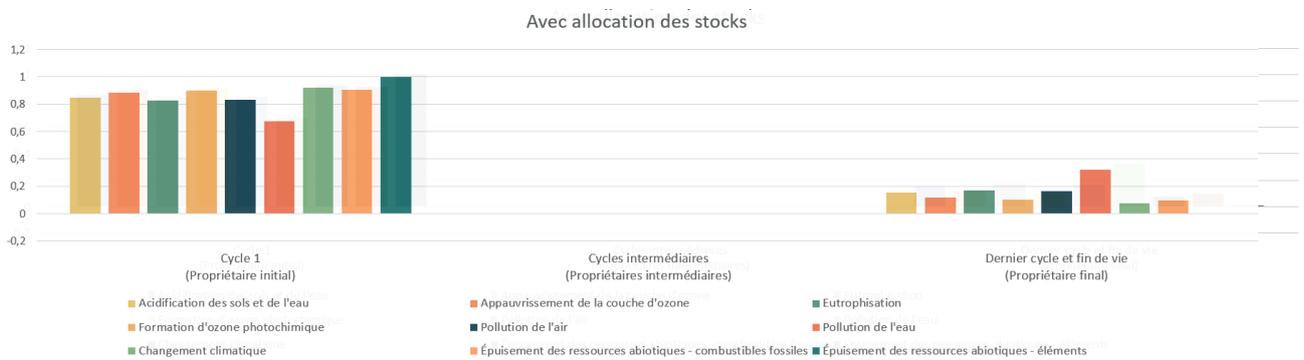


Figure V. 36: Répartition des impacts avec la méthode des stocks.

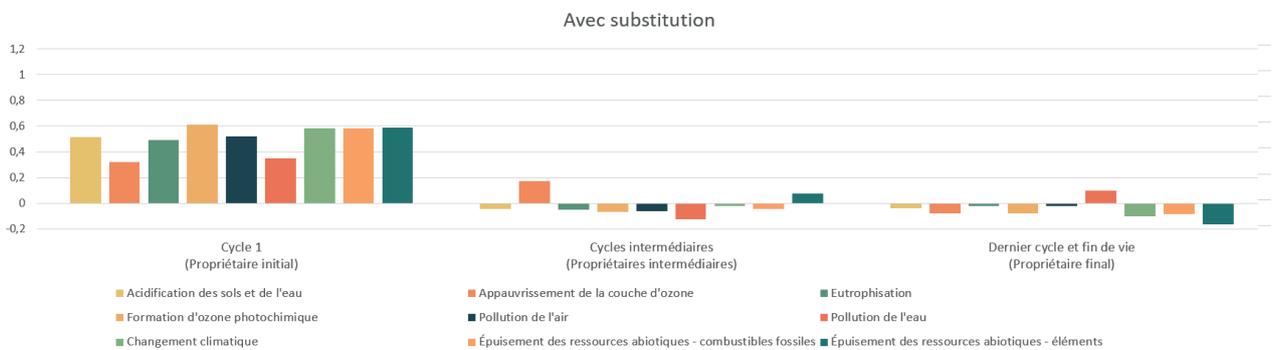


Figure V. 37: Répartition des impacts avec substitution (soustraction des impacts du portique neuf que l'on ne produira pas grâce au réemploi).

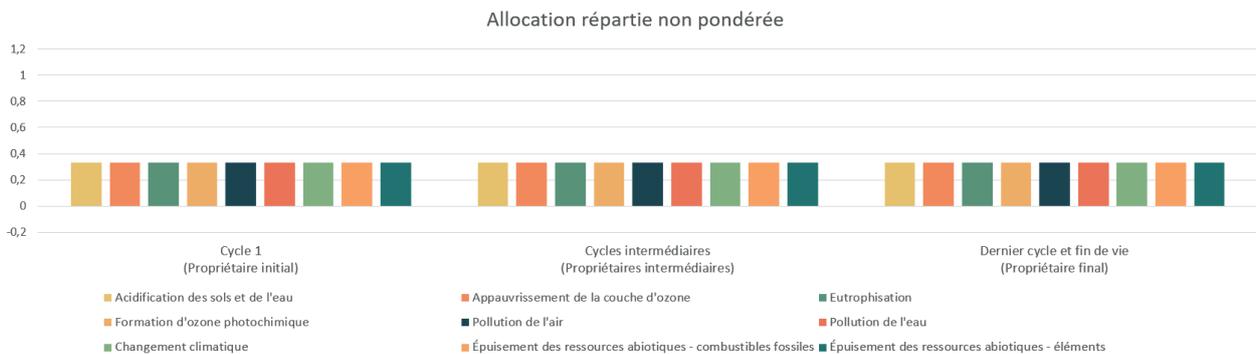


Figure V. 38: Répartition des impacts avec allocation de répartition équitable, non pondérée.

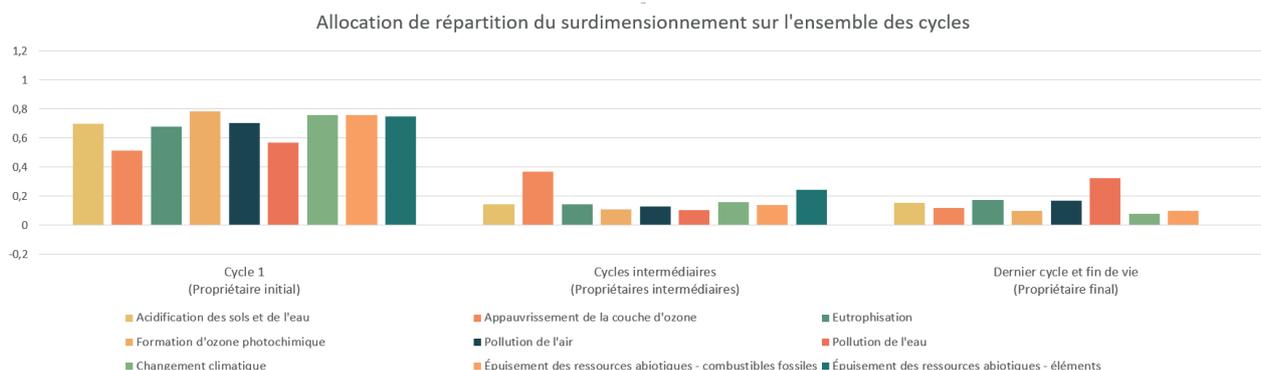


Figure V. 39 : Répartition des impacts avec allocation prenant en compte l'effort de surdimensionnement initial réparti sur l'ensemble des cycles.

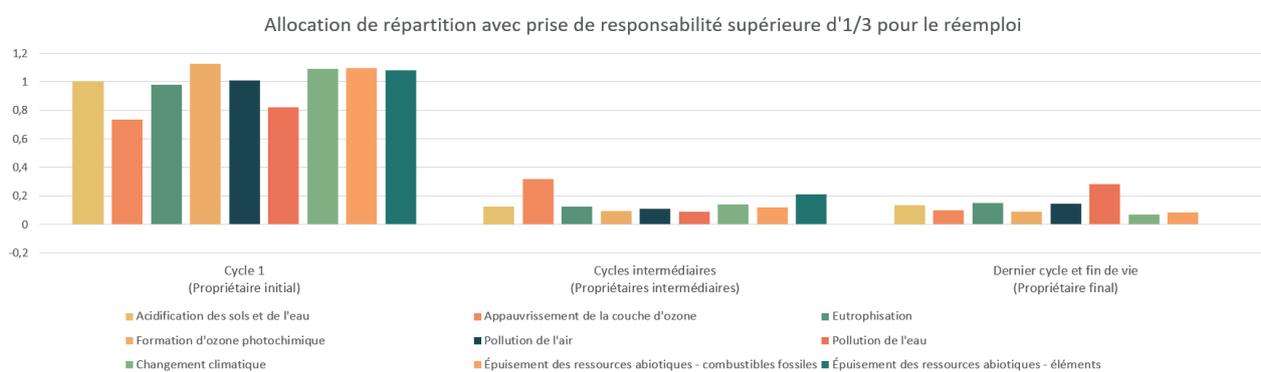


Figure V. 40 : Répartition des impacts avec allocation instaurant une pondération au tiers, qui permet aux propriétaires réemployeurs de diminuer les impacts en cycles n+1.

Dans la plupart des cas, le cycle initial reste prépondérant dans les résultats de l'ensemble du cycle de vie. Le surdimensionnement pour le réemploi étant inférieur à 1% de la matière totale, il n'y a pas d'intérêt à répartir cet effort de surdimensionnement sur l'ensemble des cycles. L'allocation la plus incitative pour le réemploi serait de mettre en place la répartition non pondérée, équilibrant la charge environnementale totale entre tous les cycles et les propriétaires à « iso-impact ». En premier lieu, dans le contexte d'une conception en vue du réemploi, c'est bien le premier décideur qu'il faut convaincre d'investir, condition *sine qua non* pour que les cycles d'usages suivants puissent se mettre en place.

En résumé, nous pouvons établir une grille de tendances en fonction du cycle concerné, du propriétaire et du type de répartition mis en place, en Figure V. 41. On peut donc signaler que la méthode des stocks est la moins équitable et que la méthode des impacts évités peut aboutir à une sous-estimation du poids environnemental réel du process de réemploi. Les allocations dépendront de la justification apportée, mais peuvent, potentiellement, mener à la répartition la plus équitable.

	Propriétaire 1 cycle de vie n1 de 50 ans	Propriétaire 2 cycle de vie n2 de 50 ans	Propriétaire 3 cycle de vie n3 de 50 ans	
Scénario avec réemploi	A. Méthode des stocks	--	++	-
	B. Allocations	+	+	+
	C. Impacts évités	+	++	++

Figure V. 41 : Avantage par propriétaire selon la méthode choisie.

5.4. Outil pour évaluer le potentiel de réemployabilité

Nous avons défini dans le chapitre II, des critères de réemployabilité reposant sur des caractéristiques techniques structurales :

1. Proportion volumique des éléments réemployables par rapport au volume total du bâtiment ;
2. Taux de standardisation de la géométrie, répétitivité des éléments et de la trame, par rapport aux principes de bâtiment universel défini partie 2.3 ;
3. Taux de réversibilité des éléments (poteau en poutre) ;
4. Énergie et temps nécessaires au désassemblage et réassemblage ;
5. Degré de mise en place d'une traçabilité et instrumentation (objet du chapitre III).

Ces critères viennent en complément d'une ACV dont les limites en termes de réemploi sont établies, comme l'explicitent De Wolf [31] qui recommandent la mise en place d'un critère d'évaluation du réemploi permettant de mesurer la démontabilité d'une structure pour élargir le spectre de l'ACV. En effet, l'ACV ne peut prendre en compte la difficulté de déconstruction que via les consommations d'eau, énergie, mais il y a besoin d'un indice complémentaire lié à la complexité technique du processus. L'ACV ne permet pas, non plus, de percevoir distinctement certains aspects de la réemployabilité comme, par exemple, la dégradation locale d'un assemblage.

Par ailleurs, comme nous l'avons évoqué précédemment, la démarche de réemploi s'inscrit pleinement dans l'économie circulaire (chapitre I) et favorise également l'économie sociale et solidaire (chapitre 0, partie 0.1.4.2) dont les remontées territoriales doivent être valorisées dans une évaluation plus large. L'ACV ne permet pas instinctivement, de percevoir les retombées sociales d'un chantier d'insertion. Nous allons donc dans cette partie, reprendre notre définition du concept de DfReu, en proposant une méthode d'évaluation permettant de calculer la réemployabilité d'une structure et ainsi aider le concepteur à mettre en œuvre le bâtiment qui aboutira à la meilleure optimisation de matière réemployable. Le bilan environnemental global d'une opération reposera alors conjointement sur l'ACV et sur cet indice de réemployabilité.

5.4.1. Nécessité de critères techniques, sociaux et territoriaux

En complément de l'analyse technique qui apparaît à travers l'aspect de déconstructibilité, d'autres impacts doivent participer à la décision de mettre en place une opération de réemploi. Ainsi pour l'impact territorial, les critères suivants ont été identifiés :

- Impact du projet sur le territoire (programme, usages générés, typologie et consommation foncière)
- Projet participatif avec consultation de la population et transmission des bonnes pratiques en termes d'économie circulaire par analogie au bâtiment réemployé.

Le réemploi a également une forte composante sociale en permettant la création d'emplois locaux à différents niveaux de compétences dont la plupart s'inscrit dans l'économie sociale et solidaire et dont l'impact doit être évalué :

- Moyens humains nécessaires pour réaliser le projet
- Favorisation de création de nouvelles filières locales de réemploi
- Nombre d'emplois en réinsertion

Nous nous focalisons principalement sur la conception en vue du réemploi, néanmoins certains critères pourront être invoqués lors de l'étape effective de remise en œuvre de la matière :

- Accessibilité du site : desserte, déplacements de la matière (*in situ* ou *ex situ*), déplacements de la main d'œuvre, distance entre les sites d'origine et de réemploi
- Nuisances générées ou évitées (bruit, vibrations, air/poussières/odeurs) en cours de travaux
- Présence de filière de valorisation locale, impact de la distance au site
- Nombre de créations d'emploi
- Possibilité de formation et de montée en compétences sur le projet, variétés de compétences requises

Nous allons voir par la suite comment il serait possible de quantifier ces critères, même si certains resteront dépendants d'une certaine subjectivité.

5.4.2. Modes de calcul

Nous évoquons ici les différents travaux proposant des méthodes d'évaluation du caractère circulaire d'une matière, d'un élément, d'un bâtiment, globalement sous la forme du calcul d'un indice. Une méthodologie pour évaluer la circularité d'un projet est en cours de mise en œuvre dans le cadre d'un projet expérimental « PULSE Paris », Saadé et al. [30]. Nous reprenons ici la synthèse d'état de l'art du projet « PULSE Paris » en ajustant des propositions de calculs adaptés au réemploi, dans la Figure V. 42. Nous écartons alors les indices focalisés exclusivement sur le recyclage, sauf s'ils peuvent être repris avec l'angle du réemploi.

	Formule	Unités des termes	Durée de vie résiduelle	Valorisation et pondération entre les cycles	Proposition d'adaptation au réemploi
Taux de valorisation déchet	$T_{val} = M_{val} / (M_{reb} + M_{val})$	Mval : masse de déchets valorisés (rec, reuti, reemp, compos, digérés) Mreb : masse de déchets mis en décharges ou incinérés		Effective (0:100)	Remplacer Mval par Mree (masse de déchets réemployés) afin de se focaliser spécifiquement sur le réemploi. (base massique)
Taux de réincorporation	$T_{inc} = M_{sec} / (M_{pri} + M_{sec})$	Mpri: masse des matériaux primaires utilisés en début de cycle Msec: masse de matériaux secondaires utilisés en début de cycle		Effective (0:100)	Préciser Msec en Msec,ree pour exprimer la quantité de matériaux réemployés.
Circular Material Use rate (CMU)	$CMU = \frac{U}{M} = \frac{(RCV_R - IMP_w + EXP_w)}{DMC + (RCV_R - IMP_w + EXP_w)}$	U : déchets valorisés pour la société M : besoins matière de la société + totaux déchets de la société RCV _R valorisation autre que la valorisation énergétique et le remblayage ; IMP _w quantité de déchets importés pour être valorisés ; EXP _w quantité de déchets exportés pour être valorisés ; DMC : consommation intérieure apparente de matières (Domestic Material Consumption).		Effective (100 :0)	Préciser U en matériaux réemployés ou déchets évités non produits avec RCV _R exprimant la valorisation par le réemploi exclusivement.
Zero Waste Index (ZWI)	$ZWI = \frac{\sum_{i=1}^n (WMS_{ij} * SF_{ij})}{\sum_1^n GWS}$	WMS : quantité de déchets « i » traités par le système « j » SF : facteur de substitution GWS : quantité totale de déchets produits		Potentielle (0:100)	Remplacer WMS par RMS quantité de matériaux réemployés ou déchets non produits.
Material Circularity Indicator (MCI), indice de la fondation Mcarthur [32]	$MCI = 1 - LFI * F(X)$ $LFI = \frac{V + W}{2M + \frac{W_f - W_c}{2}}$ $F(X) = \frac{0.9}{X}$	LFI indicateur de linéarité V : masse de matériaux vierges W : masse totale de matériaux éliminés en décharge ou incinérés W _f : déchets process recyclage en incorpo W _c : déchets process recyclage en dépose M : Masse du produit X : facteur d'utilité	X	Effective (50:50)	Remplacer W _f par R _f , matériaux réemployés ou déchets non produits en incorpo ; et W _c par R _c , matériaux réemployés ou déchets non produits en dépose (implique un système modélisé au préalable, avec un choix fixé d'allocation 50-50).

Figure V. 42 : Synthèse des indicateurs adaptée du projet Pulse-Paris [30], et ajustée pour le réemploi.

On ne retiendra donc pas le ZWI qui s'apparente fortement à un taux de valorisation complexifié. On ne pourra pas, non plus, utiliser le CMU qui implique des données régionales et qui n'est pas applicable à l'échelle d'un élément ou d'un bâtiment. Il faut signaler que ces indicateurs peuvent refléter directement les matériaux pondéreux (très lourds ou très volumineux selon le critère choisi), c'est pourquoi le travail de recherche « PULSE-PARIS » Saadé et al. [30], propose une pondération physique (par exemple sur la base de la dangerosité des matériaux ou déchets), économique, ou représentative d'une autre fonction. Il faut également veiller à éviter les doubles comptages dans les formules proposées.

5.4.3. Critère de démontabilité

Comme nous l'avons vu dans l'état de l'art (chapitre I, partie 1.2.3.), plusieurs classements existent pour évaluer le degré de démontabilité d'un assemblage. Cependant ceux-ci n'établissent pas clairement de hiérarchie dans le classement pour favoriser un réemploi. On peut cependant proposer une transposition de la démontabilité facilitée au réemploi favorisé qui s'appuierait prioritairement sur :

1. des connexions indirectes avec dispositifs de fixations supplémentaires,
2. des connexions directes avec des dispositifs de fixation supplémentaires,
3. des connexions directes entre deux composants préfabriqués
4. les connexions chimiques directes et indirectes sont à éviter dans la mesure du possible pour privilégier les connexions à sec.

D'autres travaux proposent une méthode de calcul pour un indice de circularité dans le bâtiment, comme le BCI (*building circularity index*)¹⁶, issu du travail de recherche de Verbene [33] (*building circularity indicator*). Le BCI propose une classification pondérée selon le type de connexion des éléments structuraux en Figure V. 43, que nous proposons de reprendre pour l'incorporer à notre calcul d'indice de réemployabilité.

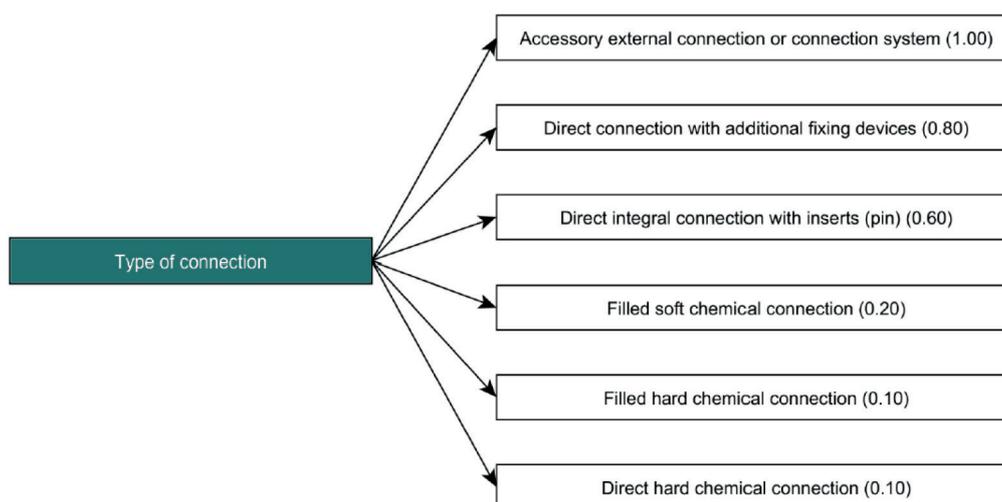


Figure V. 43 : Pondération par type de connexion, présentée par alba concept, [34].

En parallèle, un *material recovery potential index* (MRPI) est proposé par Mayer et al. [35] et définit certaines échelles de scores préétablies, synthétisées dans le Tableau V. 19. Plus le score se rapproche de 1, plus il est favorable au réemploi et au recyclage.

¹⁶ <https://albaconcepts.nl/circulairbouwen/>, consulté le 19/01/2020.

	Indice de dommages de séparation	Indice de temps de démontage	Indice d'effort de désassemblage
0.00	Dommages très importants - la pièce est endommagée, ce qui la rend impropre au recyclage	Composants inséparables	L'ensemble ne peut pas être démonté
0.25	Dommages importants - la pièce doit être davantage triée et préparée avant d'être recyclée	Plus d'une minute par composant	Nécessité d'engins de déconstruction
0.50	Non réutilisable - la pièce peut être facilement recyclée mais pas réutilisée	40-60 secondes par composant	Outils électriques à main
0.75	Dommages mineurs - la pièce nécessite quelques réparations mais peut encore être entièrement réutilisée	10-40 secondes par composant	Outils (non électriques) à main
1.00	Entièrement réutilisable - la pièce peut être séparée en parfait état	Moins de 10 secondes par composant	Démontage manuel, le montage peut être démonté sans outils

Tableau V. 19 : Synthèse des échelles de scores proposées par Mayer et al. [35], reprise pour le calcul de la difficulté de désassemblage.

Ces échelles de score permettent ainsi de quantifier un critère subjectif en lui attribuant une valeur numérique. Cependant l'établissement de ces échelles reste subjectif et le score ainsi obtenu n'est pas aussi précis qu'un calcul sur la base d'un système métrique ou massique.

Nous proposons, sur ce modèle de réflexion, une grille de score dans le Tableau V. 20, concernant le degré de mise en place d'une traçabilité et instrumentation, reposant sur les LOIN du BIM définis dans le chapitre III.

Score	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00
Modélisation BIM (Mod)	LOD/LOI 300	LOD/LOI 400	LOD/LOI 500	LOD/LOI 600	LOD/LOI 700
Instrumentation (Ins)	Marquages/ gravures sommaires	Marquages/ gravures détaillés	Marquages + Enregistrement sur base de données	Puces RFID + Marquages + Enregistrement sur base de données	Capteurs + Puces RFID + Marquages + Enregistrement sur base de données

Tableau V. 20 : Echelles de scores proposées pour évaluer la traçabilité

De même, nous proposons, une grille de score dans le Tableau V. 21, concernant l'évaluation de la déconstructibilité, dans le Tableau V. 22 de l'impact territorial, et dans le Tableau V. 23 de l'impact sociétal.

La déconstructibilité regroupe différents critères d'évaluation allant de la facilité de démontage, la conservation de la matière, la faisabilité et la répliquabilité de l'opération, à l'effort nécessaire pour récupérer les éléments. Ainsi ces critères et leurs scores respectifs sont détaillés dans le Tableau V. 21.

Score	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00
Intégrité matière : perte de qualité, déclasserement	Upcycling	Détournement en décoration	Réutilisation en détournement pour second œuvre	Réutilisation en structure de capacité restreinte	Réutilisation en structure de même capacité
Amplitude de réemploi	Réutilisation des composants sur un nouveau site dans un but différent	Réutilisation des composants sur un nouveau site dans le même but	Réutilisation du système sur un nouveau site dans un but différent	Réutilisation du système sur un nouveau site dans le même but	Réutilisation adaptative <i>in situ</i>
Opérations de caractérisation	Tests destructifs en labo	Tests destructifs <i>in situ</i>	Tests non destructifs en labo	Tests non destructifs <i>in situ</i>	Visuelles
Étape de stockage	Stockage long en lieu de zone tendue	Stockage court en lieu de zone tendue	Temps de stockage long, en friche	Temps de stockage court, en friche	Pas de stockage des matériaux, flux tendu
Chute, taux de perte en masse après reconditionnement	>50%	25% à 50%	15% à 25%	5% à 15%	0 à 5%
Type de connexion	Connexions chimiques dures	Connexions chimiques souples	Connexions directes entre deux composants préfabriqués	Connexions directes avec des dispositifs de fixations supplémentaires	Connexions indirectes avec dispositifs de fixations supplémentaires
Taille des éléments à manipuler	Procédure chantier de déconstruction	Engin de levage lourd	Engin de levage léger	Déplaçable à la main, à plusieurs	Déplaçable à la main, seul
Répliquabilité de l'opération	Opération très spécifique	Opération lourde pouvant être répétée	Opération moyenne pouvant être répétée	Opération légère pouvant être répétée	Opération classique, facilement répliquable

Tableau V. 21 : Echelles de scores proposées pour évaluer la déconstructibilité.

Score	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00
Impact social et environnemental du projet sur le territoire (Programme, usages générés, typologie...)	Impact très négatif	Impact négatif	Impact inchangé	Impact positif	Impact très positif
Présence de filières de réemploi	Filière inexistante	Plateforme stockage revente réemploi éloignée	Plateforme stockage revente locale	Reconditionnement réemploi et plateforme revente éloignés	Reconditionnement réemploi et plateforme revente locaux
Projet participatif, transmission des bonnes pratiques	Pas d'information ni de consultation	Informations publiques	Consultation virtuelle de la population	Consultation physique de la population passive et atelier jeunesse	Consultation participative de la population et atelier jeunesse

Tableau V. 22 : Echelles de scores proposées pour évaluer l'impact territorial.

Score	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00
Moyens humains nécessaires pour réaliser le projet	Pas d'intervenants	Intervenants issus d'entreprises spécialisées	Intervenants issus d'entreprises généralistes	Intervenants devant suivre une formation	Intervenants peu spécialisés
Nombre d'emplois en réinsertion	Inexistants – 0%	Faibles – 0 à 25%	Peu importants – 25 à 50%	Importants – 50 à 75%	Très importants – 75 à 100 %
Possibilité de formation et de montée en compétences sur le projet, variétés de compétences requises	Inexistantes	Faibles	Peu importantes	Importantes	Très importantes
Favorisation de création de nouvelles filières locales de réemploi	Inexistantes	Faibles	Peu importantes	Importantes	Très importantes

Tableau V. 23 : Echelles de scores proposées pour évaluer l'impact sociétal.

5.4.4. Critère de performances résiduelles

Un potentiel de réemploi fondé sur les performances résiduelles a été développé par Colas [36] pour la maçonnerie du génie civil, Equation V. 1. L'identification des caractéristiques et des performances résiduelles associées est bien le critère phare pour les éléments de structures que l'on souhaite réemployer notamment pour : 1. Déterminer le futur usage ; 2. Mettre en place le protocole de caractérisation avec l'assureur et le bureau de contrôle ; 3. Déterminer le coefficient de sécurité du réemploi avant la remise en œuvre de l'élément.

$$P_{2RV} = \frac{P_{Req}}{P_{eff}} \frac{1}{C_t}$$

Equation V. 1 : Potentiel de réemploi pour la maçonnerie en génie civil proposé par Colas, A.-S. [36]

Avec les termes : P_{eff} , les caractéristiques mécaniques, physico-chimiques ou autres, déterminant les performances effectives du produit de construction à l'issue du cycle de vie n (performances résiduelles, après déconstruction et stockage éventuel du produit) ; P_{req} les performances requises par l'emploi du produit dans la fonction du cycle $n + 1$, déterminées par les règlements de calcul, les normes, etc. ; C_t , les processus de transformation nécessaires au réemploi ou à la valorisation du produit depuis le cycle n vers le cycle $n + 1$.

Cependant aucun indice dédié à l'anticipation d'un réemploi n'a été développé et il sera question dans la partie suivante d'évaluer le potentiel de réemployabilité. Nous proposons de reprendre le critère de performances résiduelles défini par A-S. Colas pour l'incorporer à notre calcul d'indice de réemployabilité.

5.4.5. Synthèse

L'indice de réemployabilité doit pouvoir se calculer d'abord au niveau d'un élément, puis d'un système, puis d'un bâtiment, comme proposé avec le *Building Circularity Index (BCI)* d'alba concepts [34] avec la progression suivante : *Material Circularity Indicator (MCI)*, puis *Product Circularity Indicator (PCI)*, puis *System Circularity Indicator (SCI)*, puis *Building Circularity Indicator (BCI)*. Chacun de ces indices est compris entre 0 et 1, ce qui permet d'obtenir un résultat de 0 à 1, 1 étant le meilleur score vis-à-vis de la circularité. De même, pour le potentiel de réemploi présenté en 5.4.4, la valeur optimale de réemploi est obtenue avec 1 (avec des valeurs comprises entre 0 et 1).

Cependant les types de pondération pour changer d'échelle d'étude ou pour agglomérer les différents sous-critères peuvent être divers : masse, coût, épuisement des

ressources, performances résiduelles, ... et il n'est pas aisé de justifier le type de pondération adaptée au réemploi. Les données les plus accessibles concernent la masse, qui est l'unité de quantification la plus répandue et la moins confidentielle. Le coût est souvent réservé aux usages internes confidentiels des bureaux d'études, tandis que les autres critères évoqués (épuiement des ressources, performances résiduelles) demandent une étude spécifique à eux seuls. Nous proposons donc de continuer à raisonner avec les masses des matériaux. Si l'on reprend les critères de réemployabilité du chapitre II, on peut également les intégrer au calcul d'un indice de réemployabilité en ramenant à une valeur de 0 à 1, comme détaillé dans le Tableau V. 24.

Enfin, plus globalement, on n'oubliera pas de rattacher ces critères parfois subjectifs aux indicateurs d'impacts normés, calculés lors d'une ACV, pour comparer le poids de tout ou partie des éléments réemployés d'une opération de déconstruction, avec une variante traditionnelle reposant sur des matériaux neufs ou recyclés.

	Critère quantifié	Formule	Termes	Subjectivité
Efficacité matière <i>Eff_{matière}</i>	Taux de valorisation déchet	$\frac{M_{ree}}{(M_{reb} + M_{ree})}$	M _{ree} : masse de déchets réemployés M _{reb} : masse de déchets mis en décharges ou incinérés	
	Taux de réincorporation	$\frac{M_{sec,ree}}{(M_{pri} + M_{sec,ree})}$	M _{pri} : masse des matériaux primaires utilisés en début de cycle M _{sec,ress} : masse de matériaux réemployés utilisés en début de cycle	
	<i>Material circularity Indicator</i>	$LFI = \frac{V + W}{2M + \frac{R_f + R_c}{2}}$ $F(X) = \frac{0,9}{X}$ $MCI' = 1 - LFI * F(X)$	Cf. Figure V. 48 en changeant W _f par R _f , matériaux réemployés ou déchets non produits en incorporation ; et W _c par R _c , matériaux réemployés ou déchets non produits en dépose	
Facteur de déconstructibilité <i>F_{Dec}</i>	Taux de standardisation de la géométrie, répétitivité	$\frac{n_{\text{éléments rép.}} \times n_{\text{max éléments id.}}}{n_{\text{éléments}}}$	n _{éléments rép.} , nombre d'éléments répétés au sein un groupe d'éléments* ; n _{éléments} , nombre total d'éléments ; n _{max éléments id.} , nombre maximal d'éléments identiques au sein d'un même groupe. * on considère un groupe d'éléments à partir de 3 éléments identiques (rentabilité du réemploi selon Brière, R. [10])	+/-
	Taux de réversibilité des éléments	$\frac{n_{\text{éléments réversibles}}}{n_{\text{éléments}}}$	Un élément réversible est considéré comme élément structural pouvant fonctionner indifféremment en poteau ou en poutre	+/-
	Echelle de scores par critère de la grille d'évaluation de la difficulté de désassemblage	$\frac{\sum_{i=1}^n i}{n}$	Moyenne des scores obtenus selon la grille d'évaluation	
	Echelle de scores par critère de la grille d'évaluation de la déconstructibilité	$\frac{\sum_{i=1}^n i}{n}$	Moyenne des scores obtenus selon la grille d'évaluation	++
Performances résiduelles <i>P_{res}</i>	Potentiel de réemploi	$P_{2RV} = \frac{P_{Req}}{P_{eff}} \frac{1}{C_t}$	P _{eff} , performances effectives ; P _{req} , performances requises ; C _t , les processus de transformation	
	Facteur de traçabilité	$\frac{Mod + Ins}{2}$	Mod, degré de modélisation BIM ; Ins, degré d'instrumentation	+/-
Impact territorial <i>I_{terr}</i>	Echelle de scores par critère de la grille d'évaluation	$\frac{\sum_{i=1}^n i}{n}$	Moyenne des scores obtenus selon la grille d'évaluation	++
Impact sociétal <i>I_{soc}</i>	Echelle de scores par critère de la grille d'évaluation	$\frac{\sum_{i=1}^n i}{n}$	Moyenne des scores obtenus selon la grille d'évaluation	++

Tableau V. 24 : Synthèse de calculs pour l'ensemble des critères de réemploi.

L'ensemble des critères exposés aboutit à la formule de l'indice de réemployabilité suivante :

$$\text{Indice de réemployabilité} = \frac{\text{Eff}_{\text{matière}} + F_{\text{Dec}} + P_{\text{res}} + I_{\text{terr}} + I_{\text{soc}}}{5}$$

On obtient ainsi une valeur de 0 à 1, avec une valeur idéale en 1 qui traduit une réemployabilité optimale. L'équation laisse la possibilité d'introduire des coefficients de pondération si les besoins spécifiques de prises de décision sur un projet les justifient.

On propose d'appliquer ce calcul pour chacun des éléments structuraux d'un bâtiment, Tableau V. 25. La moyenne des indices de réemployabilité des éléments permettra d'obtenir l'indice de réemployabilité du bâtiment en Figure V. 44, pour lequel nous n'avons pas les données suffisantes pour calculer les critères de l'impact sociétal et de l'impact territorial d'un projet. Un indice de réemployabilité limité à l'élément est donc proposé en Figure V. 45.

	Formules	Pour portique réemployable	Pour un portique neuf
Efficacité matière <i>Eff_{matière}</i>	$\frac{M_{ree}}{(M_{reb} + M_{ree})}$	0,89	0
	$\frac{M_{sec,ree}}{(M_{pri} + M_{sec,ree})}$ (pour le 2 ^e cycle)	0,89	0
	$LFI = \frac{V + W}{2M + \frac{R_F + R_C}{2}}$	X= 16 ; LFI =0,11	X= 1 ; LFI=1
	$F(X) = \frac{0,9}{X}$	MCI = 0,99	MCI = 0,1
	$MCI' = 1 - LFI * F(X)$		
Facteur de déconstructibilité <i>F_{Dec}</i>	$\frac{n_{\text{éléments rép.}} \times n_{\text{max éléments id.}}}{n_{\text{éléments réversibles}}}$	1	1
	$\frac{n_{\text{éléments}}}{n_{\text{éléments réversibles}}}$	1	0
	Désassemblage : $\frac{\sum_{i=1}^n i}{n}$	0,5	Non applicable
	Déconstructibilité : $\frac{\sum_{i=1}^n i}{n}$	0,78	0,125
Performances résiduelles <i>P_{res}</i>	$P_{2RV} = \frac{P_{Req}}{P_{eff}} \frac{1}{C_t}$	0,7	Non applicable
	$\frac{Mod + Ins}{2}$	0,875	0,25
Impact territorial <i>I_{terr}</i>	$\frac{\sum_{i=1}^n i}{n}$		
Impact sociétal <i>I_{soc}</i>	$\frac{\sum_{i=1}^n i}{n}$	Non applicable à l'échelle d'un élément	
Moyenne pour le bâtiment	$\frac{\text{Eff}_{\text{matière}} + F_{\text{Dec}} + P_{\text{res}} + I_{\text{terr}} + I_{\text{soc}}}{5}$	0,843	0,219

Tableau V. 25 : Application du calcul des critères de réemployabilité.

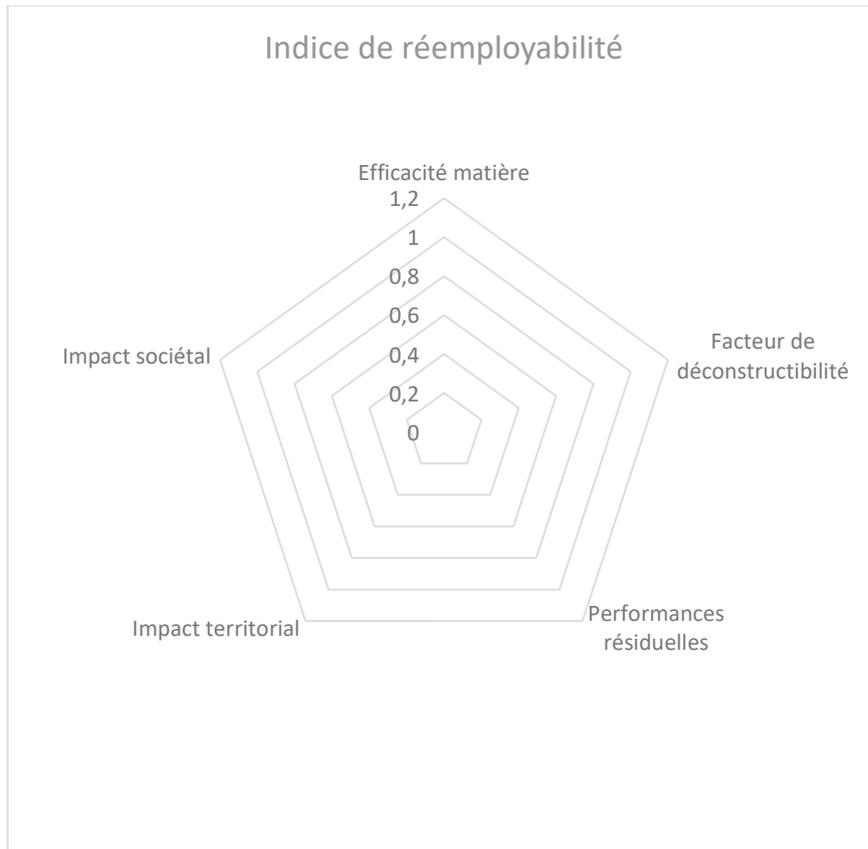


Figure V. 44 : Graphique de type radar pour les résultats comparatifs de l'indice de réemployabilité à l'échelle d'un projet de bâtiments.

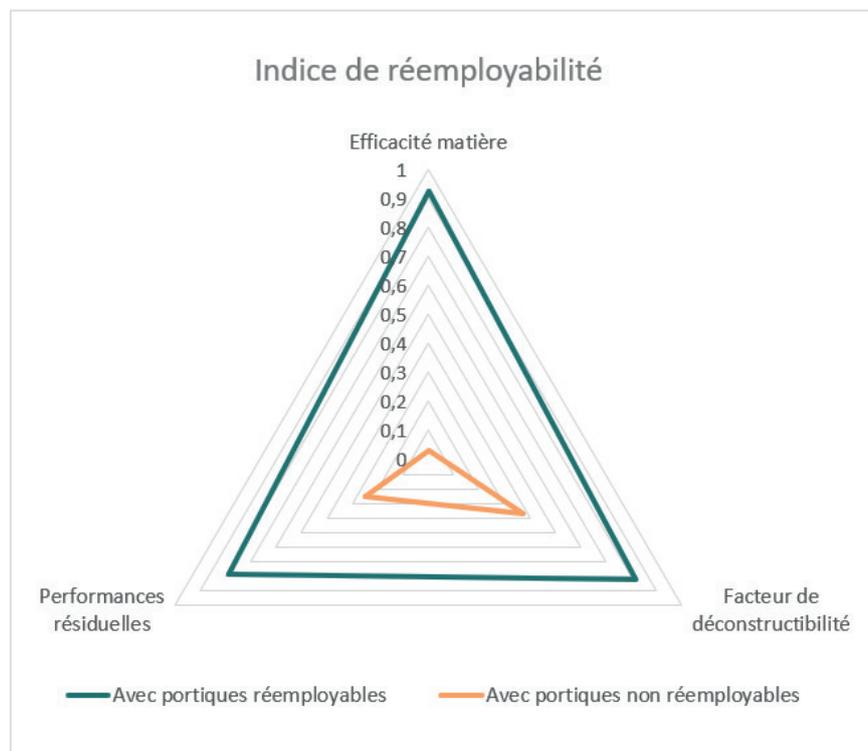


Figure V. 45 : Résultats comparatifs de l'indice de réemployabilité des éléments réemployables et non réemployables (nombre de critères réduits).

5.5. Conclusion

En conclusion, d'après les résultats de notre expérimentation, la comparaison entre les process d'un cycle de vie d'un bâtiment « traditionnel » de la Figure V. 1 et celui d'un cycle de vie d'un bâtiment « réemployable » de la Figure V. 2, nous permet d'indiquer des tendances en termes d'impacts environnementaux. Ces tendances sont à considérer avec leur contexte et ne sont pas applicables pour tous les projets qui présentent chacun des particularités et des hypothèses variables. Le Tableau V. 26 de comparaison permet de synthétiser ces différences d'impacts, avec « + » pour l'impact le plus important, « - » pour l'impact le moins important ou 0 lorsqu'il n'y a pas d'impact, et repose à la fois sur la littérature à ce jour et sur les études de cas et l'expérimentation explorées dans le cadre de notre travail.

Etapes de process	Bâtiment traditionnel	Bâtiment réemployable
Conception	-	+
Extraction/Production	+	0
Transport	+	-
Chantier		idem
Vie du bâtiment		idem
Démolition ou déconstruction	-	+
Valorisation ou réemploi	+	-

Tableau V. 26 : Comparaison multicritères des impacts environnementaux sans et avec réemploi.

L'ACV a permis de démontrer les bénéfices du réemploi sur plusieurs indicateurs, notamment ceux de l'épuisement des ressources et du changement climatique qui étaient pressentis en introduction. L'ACV a également montré que l'on n'observait pas de déplacement de pollution avec les pratiques de réemploi, ce qui est encourageant pour diminuer les impacts environnementaux de la construction. La méthode ACV reste néanmoins subordonnée à un recueil de données suffisant et de qualité qui doit être amélioré, notamment par des relevés systématiques sur les chantiers pour permettre des analyses à plus grande échelle et affiner les tendances observées.

L'ACV a également soulevé la problématique d'allocations qui peut avantager l'une ou l'autre des parties prenantes de la chaîne de construction selon le calcul adopté. Un renforcement de ces règles d'allocations pourrait permettre de fixer le cadre commun pour éviter que des impacts environnementaux ne soient finalement pris en compte par aucun des acteurs. Le poids politique pour définir ce cadre pourrait également influencer sur les pratiques de réemploi, en les encourageant ou non.

Les particularités du réemploi introduisent par ailleurs un facteur temps à long terme (enchaînement de plusieurs cycles d'usages) qu'il est compliqué de maîtriser avec une ACV classique. Il faudrait ainsi réaliser une ACV dynamique, telle que définie par Laratte [14] sur la durée de vie réelle, en fonction du nombre réel de cycles de vies. Nous avons également montré que les écarts entre les impacts environnementaux avec le réemploi et ceux sans réemploi, s'accroissent avec le nombre de cycles d'usages successifs.

L'indice de réemployabilité permet de combler une partie des manques actuels pour évaluer le potentiel de déconstructibilité d'un bâtiment, de démontabilité d'un élément et la pertinence de mettre en œuvre un process de réemploi.

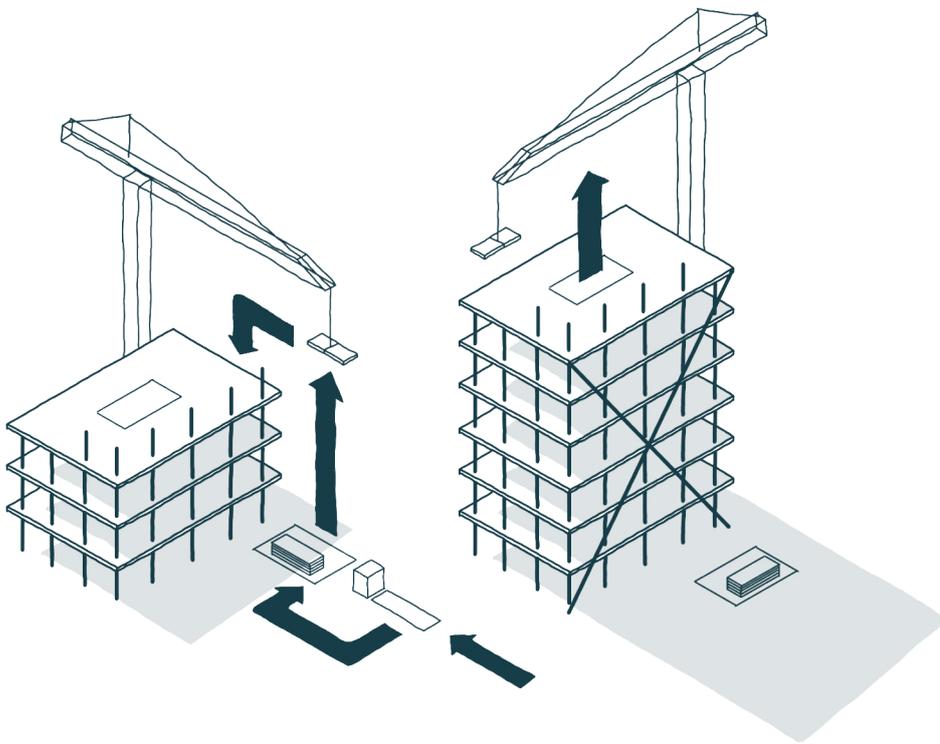
L'étude des portiques avec l'extrapolation à l'échelle du bâtiment a permis de démontrer que le réemploi permettait de diminuer significativement les impacts environnementaux étudiés de la construction, que ce soit par une ACV ou avec un indice de réemployabilité.

Références bibliographiques :

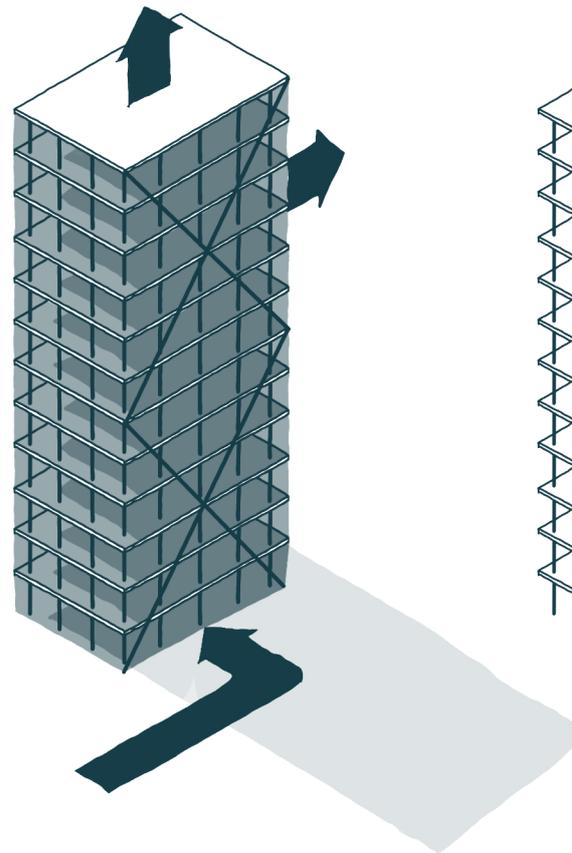
- [1] A. Lebert et J.-L. Chevalier, L'analyse du cycle de vie dans le bâtiment, Comprendre et réaliser une ACV, Champs-sur-Marne: CSTB Editions, 2018, p. 202.
- [2] Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire et Ministère de la Cohésion des Territoires, «Référentiel « Énergie - Carbone » - Méthode d'évaluation de la performance énergétique et environnementale des bâtiments neufs,» 4 Janvier 2019. [En ligne]. Available: <http://www.batiment-energiecarbone.fr/IMG/pdf/referentiel-energie-carbone-methode-evaluation-2017-07-01.pdf>. [Accès le 27 Mars 2019].
- [3] DGALN, DHUP et HQE Performance, «Performance environnementale des bâtiments,» Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie; Ministère du Logement, de l'Egalité des Territoires et de la Ruralité, 2019.
- [4] Ministère de la transition écologique et solidaire, Ministère de la cohésion des territoires et Ademe, «Données publiques de l'observatoire E+C-,» 2020. [En ligne]. Available: <http://observatoire.batiment-energiecarbone.fr/console/>. [Accès le 26 Mars 2020].
- [5] LETI, London Energy Transformation Initiative, «LETI Climate Emergency Design Guide, How new buildings can meet UK climate change targets,» Janvier 2020. [En ligne]. Available: https://b80d7a04-1c28-45e2-b904-e0715cface93.filesusr.com/ugd/252d09_3b0f2acf2bb24c019f5ed9173fc5d9f4.pdf. [Accès le 29 Janvier 2020].
- [6] J. Benoît, G. Saurel, M. Billet, F. Bougrain et S. Laurenceau, REPAR 2 : Le réemploi passerelle entre architecture et industrie, ADEME, BELLASTOCK, CSTB, avril 2018, 545 p.
- [7] I. Bertin, «Réemploi et préfabrication : En quoi la préfabrication engendre-t-elle un potentiel et une source de réemploi en architecture ?,» Ecole d'architecture de la ville et des territoires à Marne-La-Vallée. Mémoire de master, Champs-sur-Marne, 2016.
- [8] L. Rouvreau et M. Serrand, «Projet ANR ASURET Approvisionnement en matériaux de construction dans le département du Loiret et la Région Centre (tâche 4.3). Rapport final BRGM/RP-62296-FR,» BRGM, projet « ECOTECH » 2009 de l'ANR avec le soutien de la ville d'ORLÉANS et du CONSEIL GÉNÉRAL des BOUCHES-DU-RHÔNE, Orléans, 2013.
- [9] N. Hoyet, Matériaux et Architecture durable, Fabrication et transformations propriétés physiques et architecturales, approche environnementale, Paris: Dunod, 2013, p. 224.
- [10] R. Brière, «Etude ACV des chantiers de démolition en vue de la préservation des ressources. Focus sur les procédés de transport et de décharge,» Université Paris-Est, Ecole Doctorale Sciences, Ingénierie et Environnement, Thèse de Doctorat, 2016.
- [11] ADEME, «La face cachée du numérique, Réduire les impacts du numérique sur l'environnement,» Ademe, Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, Angers, 2019.
- [12] AFNOR, Association française de normalisation, *NF EN 15804+A1 April 2014, Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products*, AFNOR.
- [13] UNESCO, «Monuments bouddhiques de la région d'Horyu-ji,» UNESCO, [En ligne]. Available: <https://whc.unesco.org/fr/list/660/>. [Accès le 14 mars 2020].
- [14] B. Laratte, «Evaluation dynamique et cumulative des impacts environnementaux dans le cadre d'une analyse de cycle de vie.,» Université de Technologie de Troyes, Thèse de doctorat, 2013.
- [15] C. Roux, «Analyse de cycle de vie conséquentielle appliquée aux ensembles bâtis,» Université de recherche Paris Sciences et Lettres. Thèse de doctorat , Paris, 2017.
- [16] O. Jolliet, M. Saadé et P. Crettaz, Analyse du cycle de vie, Comprendre et réaliser un écobilan, Première éd., vol. 23, Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, 2005, p. 242.
- [17] V. Létard, «Sur les enjeux de la filière sidérurgique dans la France du XXIe siècle : opportunité de croissance et de développement - Rapport,» 9 Juillet 2019. [En ligne]. Available: <https://www.senat.fr/rap/r18-649-1/r18-649-117.html>. [Accès le 16 Avril 2020].

- [18] F. Privat, «Faisabilité du recyclage en boucle fermée des déchets post-consommateurs en bois massif,» Ecole Centrale de Nantes, Université Bretagne Loire, Ecole Sciences pour l'ingénieur, Thèse de Doctorat, Nantes, 2019.
- [19] FCBA, Institut Technologique, «Vision d'ensemble, Rapport annuel 2016,» 2017. [En ligne]. Available: https://www.fcba.fr/sites/default/files/files/RA_2016.pdf.
- [20] M. Vis, U. Mantau et B. Allen, «Cascades. Étude sur l'utilisation en cascade optimisée du bois. Synthèse,» Commission Européenne, Brussels, 2016.
- [21] WWF, «Le WWF appelle l'Union européenne à placer une hiérarchie des usages du bois au cœur de l'économie circulaire et de sa stratégie bio énergie,» 15 Mars 2016. [En ligne]. Available: <https://www.wwf.fr/vous-informer/actualites/le-wwf-appelle-lunion-europeenne-a-placer-une-hierarchie-des-usages-du-bois-au-coeur-de-leconomie>. [Accès le 4 Mars 2020].
- [22] Fédération Française de l'Acier, «Comment fabrique-t-on l'acier?,» Juillet 2012. [En ligne]. Available: <http://www.a3m-asso.fr/wp-content/uploads/2017/02/comment-fabrique-acier.pdf>. [Accès le 18 Avril 2020].
- [23] ADEME, «Documentation des facteurs d'émissions de la Base Carbone[®],» ADEME, 2014.
- [24] W. Flanagan, H. Dhaliwal et M. Browne, «Glass or Plastic: An Environmental Life Cycle Assessment (LCA) and Related Economic Impact of Contrast Media Packaging,» *EPOS*, p. 16, doi : 10.1594/ecr2015/C-2599.
- [25] M. Goedkoop, «ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level.,» *VROM–Ruimte en Milieu, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer*, 2009.
- [26] L. Stougie, H. Van der Kooi et R. Stikkelman, «Electricity production from renewable and non-renewable energy sources: a comparison of environmental, economic and social sustainability indicators with exergy losses throughout the supply chain,» chez *Proceedings of ecos 2012 - The 25th international conference on efficiency, cost, optimization, simulation and environmental impact of energy systems*, Perugia, Italy, 2012.
- [27] B. Steubing, G. Wernet, J. Reinhard, C. Bauer et E. Moreno-Ruiz, «The ecoinvent database version 3 (part II): analyzing LCA results and comparison to version 2,» *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 21, pp. 1269-1281, 2016, doi: 10.1007/s11367-016-1109-6.
- [28] European Commission, Joint Research Centre et Institute for Environment and Sustainability, «International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance.,» Mars 2010. [En ligne]. Available: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjw6fq_zKTrAhVqx4UKHdOSBJUQFjABegQIAxAB&url=https%3A%2F%2Fepi.jrc.ec.europa.eu%2Fuploads%2FILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-DETAILED-GUIDANCE-12March2010-ISBN-fin. [Accès le 11 Mars 2020].
- [29] B. Peupartier, BAZED, Ademe, Nobatek, xb architectures et Armines, «L'ACV pour l'analyse des bénéfices environnementaux,» chez *Bâtiment, mieux concevoir pour éviter les déchets!*, Pessac, 9 décembre 2015.
- [30] M. Saadé, C. Roux, S. Pawlak et B. Peupartier, «PULSE-PARIS. Livrable 2: Développement méthodologique de l'ACV à l'échelle d'un projet urbain,» Ademe, Paris, 2020.
- [31] C. De Wolf, E. Hoxha et C. Fivet, «Comparison of environmental assessment methods when reusing building components: A case study,» *Sustainable Cities and Society*, vol. 61, n° 1102322, p. 11, 10 Juin 2020, DOI:<https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102322>.
- [32] Ellen MacArthur Foundation et Granta Design, «Circularity Indicators, An Approach to Measuring Circularity Methodology,» Mai 2015. [En ligne]. Available: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/insight/Circularity-Indicators_Methodology_May2015.pdf. [Accès le 8 Mai 2019].
- [33] J. Verbene, «Building circularity indicators, an approach for measuring circularity of a building,» Eindhoven University of Technology, Master thesis, Eindhoven, 2016.

- [34] alba concepts, «The value of circular buildings,» chez *Europengineers*, Rotterdam, 2019.
- [35] M. Mayer et M. Bechthold, «Development of Policy Metrics for Circularity Assessment in Building Assemblies,» *Economics and policy of energy and the environment*, n° 11-2, pp. 57-84, 21 Décembre 2017.
- [36] A. S. Colas, *Étude des ouvrages en maçonnerie du génie civil : aptitude au service, sécurité et performances environnementales. Habilitation à diriger les recherches.*, Université Paris-Est, 2017.

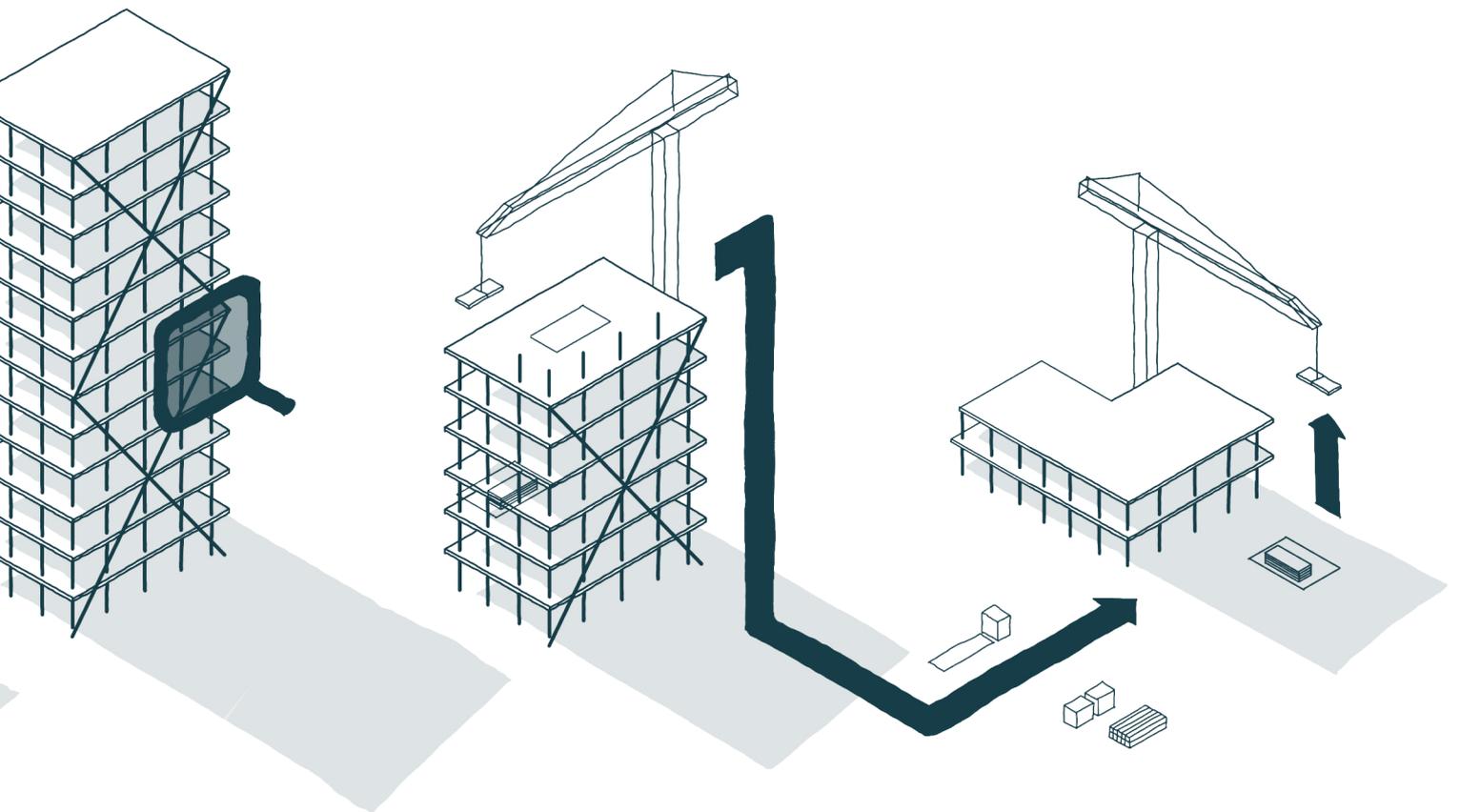


Approvisionnement /
Construction



Vie du bâtiment

Conclusion



Diagnostic ressources

Collecte / Préparation /
Stockage / Construction

1. Résultats

L'objectif principal de la thèse était de proposer le cadre pour concevoir les futures ossatures de bâtiments totalement réemployables. A cette fin trois thématiques principales ont fait l'objet de trois chapitres : ch II. la conception structurale pour maximiser les stocks d'éléments réemployables reposant sur le *DfReu (Design for Reuse)*, ch. III. la mise en place d'une traçabilité numérique via le BIM avec une instrumentation physique passive et active, ch. V. l'analyse environnementale avec une ACV et la définition d'un indice de réemployabilité afin de démontrer les bénéfices du réemploi. Très vite, il est apparu qu'il fallait générer des données à la fois pour vérifier le comportement structural à la suite d'un protocole de construction/déconstruction, mais aussi pour permettre de réaliser l'ACV, ce qui a fait l'objet du chapitre IV.

Les réflexions et simulations effectuées dans le chapitre II sur la conception des bâtiments, et notamment ceux de grande hauteur, ont conduit à préférer les structures sans noyau porteur, avec des trames privilégiant la réversibilité des usages, compatibles avec les différents programmes futurs. Nous n'avons pas souhaité écarter de matériaux structuraux afin de viser le maximum de configurations et de projets possibles, que ce soit en bois, en béton ou en acier. Les conclusions obtenues sur les IGH ont pu être extrapolées pour la plupart d'entre elles aux bâtiments plus courants de petites et moyennes hauteurs. Enfin, pour aller au-delà des précédents préceptes du *DfD (Design for deconstruction)*, nous avons défini dans le chapitre II le concept de *DfReu (Design for Reuse)*, qui détermine la conception d'un bâtiment intégrant la diversification possible des usages et l'anticipation de réemplois en fin de cycle. Les pistes de conception abordent le choix des typologies structurales, les trames à privilégier et la géométrie des éléments dessinés réversibles afin d'augmenter, en fin de vie, le potentiel de réemployabilité des systèmes porteurs et le stock d'éléments à remettre en œuvre dans de nouveaux projets.

Dans le chapitre III, nous avons montré que les outils contemporains à notre disposition sont adéquats pour assurer la pérennité des données, avec un potentiel restant à consolider grâce à des développements ou des adaptations spécifiques, notamment pour le traitement des données issues de puces RFID ou de capteurs. Nous avons proposé une méthodologie pour accompagner le processus BIM et transmettre les éléments nécessaires aux différents acteurs réemployeurs. La donnée ainsi capitalisée doit permettre de faciliter les diagnostics ressource, et de favoriser l'émergence d'une banque de matériaux à grande échelle et en flux tendu, comme nous l'avons amorcée à travers notre exemple.

Le chapitre IV explore un protocole complet de réemploi d'un assemblage en béton coulé en place. Il présente des expérimentations visant à étudier le comportement structural de portiques en béton armé, représentant à l'échelle 1/3 un assemblage poteau-poutre d'IGH. La comparaison de la liaison poteau-poutre entre une solution neuve et des variantes d'une solution de réemploi, a montré que la perte de rigidité est négligeable pour la solution de réemploi. Ces essais valident donc le principe de l'assemblage encastré, démonté, reconstitué, réemployé, et apportent en même temps des données d'entrée pour la création de processus utilisés par la méthode ACV.

Dans le chapitre V, le bilan environnemental de l'ossature en béton armé de notre bâtiment réversible, réalisé en utilisant la méthode ACV, a permis de démontrer que le réemploi diminue significativement les impacts environnementaux. Ce gain est obtenu dès le 1^{er} réemploi et ce grâce au gain de matière. De plus un indice de réemployabilité est proposé afin de guider le concepteur. L'étude de cas sur les portiques avec l'extrapolation à l'échelle du bâtiment doit

être cependant confirmée par d'autres études sur d'autres typologies de bâtiment, en portant une attention particulière au recueil de données des chantiers.

2. Perspectives

Le travail réalisé a ouvert de nombreuses pistes à poursuivre. Ainsi sur l'aspect du matériau, nous pouvons évoquer notamment les suivantes :

- Les recherches sur le comportement du béton (semi-encastrement, encastrement) et les conséquences sur la matière en œuvre et la démontabilité sont à affiner notamment pour l'aspect de la raideur qu'il faut assurer, et lorsque l'on prévoit de nombreux assemblages démontables ;
- Les matériaux de structure disponibles, avec leurs performances différentes, suggèrent qu'il est intéressant de chercher la mixité structurale. Cette piste reste à explorer, pour améliorer la réemployabilité dans l'objectif du *DfReu*.

Pour l'aspect de la structure et de la mécanique, d'autres sujets de recherche en cours pourraient intégrer cet objectif de réemploi :

- La recherche sur les maçonneries sans joint, particulièrement favorables à un démontage sans altération des matériaux, doit se poursuivre dans le domaine des bâtiments à multi-étages, pour atteindre de plus grandes hauteurs (*Abeille vault*, systèmes autobloquants, *geometric interlocking*, ostéomorphes...) en explorant l'intérêt de la précontrainte externe pour les assemblages ;
- La recherche de systèmes d'assemblages/désassemblages des éléments plans (en compléments des éléments linéaires développés dans la thèse), sera décisive notamment pour le réemploi des dalles/prédalles dont on a pu montrer que la part, en masse dans les bâtiments, était prépondérante ;
- Les recherches en cours sur les assemblages à sec dans les constructions en bois pourraient permettre de proposer des solutions pour les immeubles de grande hauteur avec une raideur suffisante.

Dans le domaine de l'ACV, les champs d'exploration restent vastes :

- L'ACV des process liés au réemploi demande notamment un important travail de recueil des données, avec des relevés sur le terrain qui doivent être intégrés à un projet global avec anticipation, en amont, du suivi exhaustif d'un chantier ;
- Bien que notre travail ait été principalement axé sur la prise en compte de l'énergie grise, il demande à être affiné avec les dépenses énergétiques de la déconstruction, en étudiant également d'autres protocoles de désassemblage ;
- La notion du temps et de l'anticipation des usages futurs (gestion de différents scénarios projetés dans le futur) s'est avérée limitée avec les méthodes actuelles d'ACV qui pourraient se développer pour devenir plus prospectives et adaptables aux différents scénarios d'usages possibles selon le réemploi permis (usage identique, détournement, déclassement, passages itératifs des produits au bâtiment...) ;
- Un champ d'étude lié à l'analyse des flux de matières (*MFA, Material flow analysis*) et de la dispersion des matériaux de construction pourrait également se rapprocher de l'objectif de réemploi pour mieux comprendre et maîtriser le stock de matière qui sera à disposition des concepteurs des futurs bâtiments.

Les aspects économiques ne sont pas en reste, car déterminants dans le processus de construction :

- Une approche économiste du réemploi et des investissements relatifs en 1^{er} cycle, pourrait aboutir à mieux définir la rentabilité environnementale et le coût global de la mise en œuvre d'éléments réemployés dans les bâtiments ;
- Les responsabilités et les coûts induits par le réemploi motivent une étude probabiliste des risques, la détermination d'un coefficient de sécurité propre au réemploi avec les Eurocodes, et des études de risque auprès des assureurs ;
- En parallèle des développements en *datascience*, sur la généralisation d'une banque de données et leurs impacts environnementaux sont à mener afin de massifier le réemploi et de lui donner un réel poids économique et politique dans la chaîne de valeur actuelle du patrimoine construit.

Nous espérons que les ingénieurs structure, mais plus largement les concepteurs membres de la maîtrise d'œuvre (architectes, ingénieurs et bureaux d'études spécialisés en environnement), convaincus de la nécessité d'une écoconception, s'approprieront ce travail et incluront les variantes de réemploi à leurs projets (bâtiments neufs ou existants), grâce aux méthodologies et aux outils proposés ici. Nous souhaitons également que les décideurs, maîtres d'ouvrage et les politiques, prennent connaissance de nos recommandations, notamment pour renforcer le cadre législatif et réglementaire, et inciter plus fortement les pratiques de réemploi qui ont démontré, entre autres, qu'elles diminuaient significativement la production de déchets, préservaient les ressources naturelles et réduisaient fortement les émissions de gaz à effet de serre dans la construction.

Annexes

A.1 Chapitre 2

A.1.1. Partie 2.3.2.

FICHE SYNTHÈSE TOUR				Tour Reversible			
1. CARACTERISTIQUES GENERALES				Batterie haute	charges permanentes	6,73	KN/m
	Site de construction	La Défense			charges d'équipement	1,70	KN/m
	Usage de la tour	Bureaux			charges d'exploitation	2,50	KN/m
	Date de livraison						
2. GEOMETRIE				7. CHARGES HORIZONTALES			
Global	Nombre de niveaux de superstructure	18	u	Infrastructure	pression de vent au ml	0	KN/m
	Hauteur totale superstructures	82,5	m	Batterie basse	accélération pseudo statique		
	Hauteur d'un étage courant	3,75	m		pression de vent au ml	0,90	KN/m
	Hauteur hall d'accès	3,75	m	Batterie moyen	accélération pseudo statique		
	Largeur de façade (la plus grande)	45	m		pression de vent au ml	1,00	KN/m
	Entre axe poteaux (selon petite inertie)	15,00	m	Batterie haute	accélération pseudo statique		
	surface shob	11 475	m		pression de vent au ml	1,10	KN/m
	surface brute des horizontaux (shob)	13 500	m		accélération pseudo statique		
3. SOUTÈNEMENT				8. CARACTERISTIQUES MECANIQUES			
Infrastructure	nombre de niveaux	2	u	Infrastructure	aire du noyau	19	m ²
	surface brute de chaque niveau	675	m ²		inertie du noyau	86	m ⁴
	surface brute des horizontaux	643	m ²		aire des poteaux	12,6	m ²
	hauteur totale des infrastructures	7,5	m		inertie des poteaux	707	m ⁴
Batterie basse	nombre de niveaux	6	u	Batterie basse	aire du noyau	19	m ²
	surface brute de chaque niveau	675	m ²		inertie du noyau	86	m ⁴
	surface brute des horizontaux	647	m ²		aire des poteaux	9,1	m ²
	hauteur totale batterie basse	22,5	m		inertie des poteaux	511	m ⁴
Batterie moyenne	nombre de niveaux	6	u	Batterie moyen	aire du noyau	16	m ²
	surface brute de chaque niveau	675	m ²		inertie du noyau	73	m ⁴
	surface brute des horizontaux	653	m ²		aire des poteaux	6,2	m ²
	hauteur totale batterie moyenne	37,5	m		inertie des poteaux	346	m ⁴
Batterie haute	nombre de niveaux	6	u	Batterie haute	aire du noyau	13	m ²
	surface brute de chaque niveau	675	m ²		inertie du noyau	59	m ⁴
	surface brute des horizontaux	659	m ²		aire des poteaux	2,5	m ²
	hauteur totale batterie haute	22,5	m		inertie des poteaux	143	m ⁴
4. FONDATIONS				9. SOLlicitations : COMBINAISON G+G'+Q+W			
Berlinoise	périmètre de berlinoise	236,4	ml	Infrastructure	Effort normal N	166	MN
	hauteur totale de berlinoise	17,4	ml		Moment de flexion M	188	MNm
Paroi moulée	périmètre de paroi moulée		ml		Effort tranchant V	3,7	MN
	hauteur totale paroi moulée		ml	Batterie basse	Effort normal N	148	MN
5. STRUCTURE				10. COEFFICIENTS DE REPARTITION NOYAU / FACADE			
Infrastructure	largeur du noyau	5,00	ml		Répartition des descentes de charge : % noyau	50%	
	longueur du noyau	16,00	ml		Répartition du contreventement : % noyau	90%	
	épaisseur des voiles longitudinaux	0,50	m	11. CONTRAINTES : COMBINAISON G+G'+Q+W			
	épaisseur des voiles transversaux	0,80	m	Sol	Sous radier : σ compression max	0,26	MPa
	nombre de poteaux	16	m		Sous radier : σ compression min	0,06	MPa
	diamètre moyen des poteaux	1,00	m	Infrastructure	Noyau : σ compression max	9,27	MPa
	surface cumulée des voiles	0,9	m ²		Noyau : σ compression min	-0,63	MPa
	épaisseur moyenne des horizontaux	0,180	m		Noyau : τ cisaillement	1,03	MPa
Batterie basse	largeur du noyau	5,00	ml		Poteaux : σ compression max	6,81	MPa
	longueur du noyau	16,00	ml		Poteaux : σ compression min	6,41	MPa
	épaisseur des voiles longitudinaux	0,50	m	Batterie basse	Noyau : σ compression max	8,04	MPa
	épaisseur des voiles transversaux	0,80	m		Noyau : σ compression min	-0,33	MPa
	nombre de poteaux	16	m		Poteaux : σ compression max	8,38	MPa
	diamètre moyen des poteaux	0,85	m		Poteaux : σ compression min	7,91	MPa
	surface cumulée des voiles	0,90	m ²	Batterie moyen	Noyau : σ compression max	5,69	MPa
	épaisseur moyenne des horizontaux	0,180	m		Noyau : σ compression min	0,38	MPa
Batterie moyenne	largeur du noyau	5,00	ml		Poteaux : σ compression max	8,16	MPa
	longueur du noyau	16,00	ml		Poteaux : σ compression min	7,79	MPa
	épaisseur des voiles longitudinaux	0,40	m	Batterie haute	Noyau : σ compression max	2,13	MPa
	épaisseur des voiles transversaux	0,80	m		Noyau : σ compression min	1,17	MPa
	nombre de poteaux	16	m		Poteaux : σ compression max	8,56	MPa
	diamètre moyen des poteaux	0,70	m		Poteaux : σ compression min	8,43	MPa
	surface cumulée des voiles	0,90	m ²	12. COMPORTEMENT DYNAMIQUE			
	épaisseur moyenne des horizontaux	0,180	m		Inertie moyenne d'après déplacement	83	m ⁴
Batterie haute	largeur du noyau	5,00	ml		Inertie moyenne d'après formule $I_{y,variable}$	81	m ⁴
	longueur du noyau	16,00	ml		Période calculée avec inertie moyenne et masse	3,96	s
	épaisseur des voiles longitudinaux	0,30	m		Période de vibration selon plus faible inertie	3,50	s
	épaisseur des voiles transversaux	0,80	m		Période selon Eurocode	1,96	s
	nombre de poteaux	16	m	13. DEPLACEMENTS			
	diamètre moyen des poteaux	0,45	m	Sommet tour	Déplacement horizontal sous vent	0,136	m
	surface cumulée des voiles	0,90	m ²		Accélération maximale en tête de tour	17,55	mg
	épaisseur moyenne des horizontaux	0,180	m	14. EPAISSEURS EQUIVALENTES (sur shob)			
6. CHARGES VERTICALES				Horizontaux superstructure		0,18	m
Infrastructure	charges permanentes	9,13	KN/m ²	Verticaux superstructure		0,16	m
	charges d'équipement	2,50	KN/m ²	Horizontaux infrastructure		0,18	m
	charges d'exploitation	2,50	KN/m ²	Verticaux infrastructure		0,19	m
Batterie basse	charges permanentes	8,60	KN/m ²	Epaisseur moyenne totale hors fondations		0,33	m ³
	charges d'équipement	1,70	KN/m ²	Epaisseur moyenne totale avec fondations		0,40	m ³
	charges d'exploitation	2,50	KN/m ²	15. POIDS TOTAL			
Batterie moyenne	charges permanentes	9,84	KN/m ²	Volume total de béton avec fondations hors soutènement		5 423	m ³
	charges d'équipement	1,70	KN/m ²	Poids propre total G		13 558	t
	charges d'exploitation	2,50	KN/m ²	Poids total G+G'+0.2Q		15 871	t

Figure A. 1 : Extrait de la feuille de calcul ayant permis de dimensionner le noyau du bâtiment réversible.

A.1.2. Partie 2.3.4.

A.1.2.1. Définition des sections

Cette partie présente les sections qui seront validées par la suite.

On fixe l'épaisseur de la dalle à 23cm. La dalle sera continue sur deux travées.

Les poutres ont pour section 30cmx70cm. On considérera des poutres continues sur trois travées pour le bâtiment classique et des poutres isostatiques pour le bâtiment réemployable.

On distinguera deux catégories de poteaux :

- Les poteaux inférieurs (niveaux sous-sol à 2) ayant pour section 50cmx50cm
- Les poteaux supérieurs (niveaux 3 à 8) ayant pour section 40cmx40cm

On considérera des poteaux continus sur deux étages.

A.1.2.2. Hypothèses

Les caractéristiques du béton sont déduites du tableau 3.1 de la norme NF EN 1992-1-1 en fonction de la classe de résistance du béton retenu.

Dans le cas présent on utilisera un béton C40/50 avec les caractéristiques suivantes :

Caractéristiques Béton- NF EN 1992-1-1 §3.1			
Résistance à la compression sur cylindre à 28 jours	f_{ck}	40	MPa
Résistance à la compression sur cube à 28 jours	$f_{ck,cube}$	50	MPa
Valeur moyenne de la résistance à la traction	$f_{ctm}=0.3f_{ck}^{2/3}$	3,5	MPa
Valeur moyenne de la résistance en compression	$f_{cm}=f_{ck}+8$	48	MPa
Module d'élasticité	$E_{cm}=22000(f_{cm}/10)^{0.3}$	35	GPa
Masse volumique	ρ	25	kN/m ³

Tableau A. 1 : Caractéristiques du béton prises en compte dans les calculs de dimensionnement

Les caractéristiques des armatures sont définies dans la norme EN 10080 et dans l'EN 1992-1-1 §3.2 : nuance des aciers, FeE 500 ; limite d'élasticité f_{yk} 500 MPa ; classe de ductilité : Classe B (ductilité moyenne) ; module de Young (E) : 200 GPa.

Dans le cadre de cette étude, on suppose une classe d'exposition XC1 et structurale S4. L'enrobage pris en compte est de 30 mm pour un cas d'éléments structuraux en intérieur.

D'après le BAEL, le coefficient d'équivalence acier/béton est égale à 15. Ne connaissant pas précisément la valeur de E_{eff} , nous avons conservé cette valeur mais un calcul précis au cas par cas doit être fait suivant l'Eurocode 2 : $\alpha e = E_s/E_{c,eff}$.

Charges permanentes G_k

- Poids volumiques des matériaux

Béton armé (Bétons ordinaires) : 25 kN/m³

Acier de charpente : 78,5 kN/m³

Charges permanentes complémentaires G'_k

Ces charges correspondent aux poids propres des équipements et autres aménagements des espaces. La valeur est déterminée en fonction du type d'usage de bâtiment et elle doit être confirmée par les lots concernés.

Dans le cas présent, on considère une charge de **0,7 kN/m²** correspondant à un faux plafond, à des réseaux suspendus et un faux-plancher.

Surcharges d'exploitation Q_k

Les surcharges d'exploitations sont fixées par la NF En 1991-1-1 et son Annexe Nationale.

Pour la catégorie B (bureaux) **$Q_k = 2,5+0,8^* = 3,3$ kN/m²**

*La surcharge de 0,8 kN/m² correspond à des cloisons mobiles de poids propre < 2 kN/m (NF EN 1991-1-1 §6.3.1.2 (8))

Tableau récapitulatif

Les valeurs des charges permanentes complémentaires et les charges d'exploitation sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Destination du local	Catégorie d'usage	Charges permanentes complémentaires G' [kN/m ²]	Surcharges d'exploitation Q_k [kN/m ²]
Bureaux	B	0,7	2,5+0,8

Tableau A. 2 : Charges prises en compte pour un programme de bureaux.

Les combinaisons ELS et ELU ont la forme suivante (Eurocode 0) :

ELU fondamental : $1,35(G_k + G'_k) + 1,5Q_k$

ELS caractéristique : $G_k + G'_k + Q_k$

ELS quasi-permanent : $G_k + G'_k + 0,3Q_k$

Les coefficients d'accompagnement Ψ résultent de la catégorie d'usage. Ils sont tirés du tableau A1.1 de l'EN 1990 Annexe A1.

A.1.2.3. Critères de prédimensionnement

a) Dalles et poutres

Sous combinaison ELU, on propose un premier critère empirique de prédimensionnement basé sur des conditions de flèches, $\frac{M_{ELU}}{b d^2} < 3$

Par ailleurs, on vérifie que les contraintes dans le béton et l'acier resteront inférieures aux contraintes admissibles, respectivement $f_{cd}=26,7\text{MPa}$ et $f_{yd}=435\text{MPa}$, sous combinaison ELU.

Sous combinaison ELS, on vérifiera que les poutres et planchers respectent les critères de l'Eurocode relatif au béton armé :

- Pour les poutres de rives supportant les façades, on limitera la flèche à $L/500$ (EC2 §7.4.1 (5)) .
- Pour les autres poutres (poutres intermédiaires), on limitera la flèche à $L/250$ (EC2 §7.4.1 (4))

Attention, les limites de flèches en façade peuvent être plus critiques que la limite $L/500$ mais elles seront à définir au cas par cas.

b) Poteaux

Sous combinaison ELU, on vérifiera que la contrainte dans le béton reste inférieure à $f_{cd}=26,7\text{MPa}$. Les poteaux étant continus sur deux étages, la longueur de flambement est prise égale $0,7L_0$ (L_0 étant la distance entre deux niveaux finis). Cette hypothèse se base sur les critères de l'Eurocode pour un cas articulé-encasturé (EC2 §5.8.3.2 Fig 5.7) :

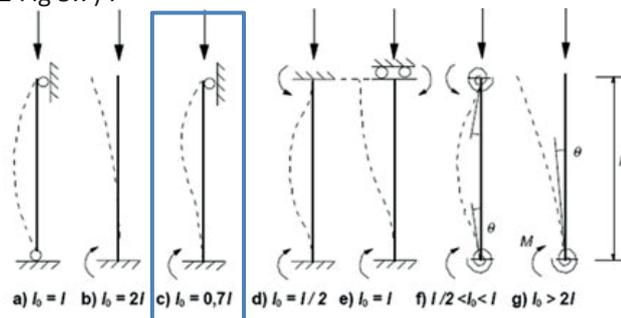


Figure A.2 : Modes de flambement d'un poteau selon ses conditions d'appuis.

Sous combinaison ELS, on propose un autre critère empirique de prédimensionnement,

$$\sigma_{\text{poteau ELS cara}} < \frac{f_{ck}}{3}$$

A.2. Chapitre 3

A.2.1. Partie 3.1.1.2.

	Industrie / Fabricant		Concepteur / MOE/entreprise		Exploitant / MOA		Déconstruteur / Plateforme		Industrie / Valorisation (recyclage)	
	Génération	Accès	Génération	Accès	Génération	Accès	Génération	Accès	Génération	Accès
Données	oui	non	oui	non	oui	non	oui	non	oui	non
	Transmission	Accès	Transmission	Accès	Transmission	Accès	Transmission	Accès	Transmission	Accès
Géométrie	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Hauteur d'une section d'un profil	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Largeur d'une section d'un profil	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Classe d'exécution des structures	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Coefficient de dilatation thermique	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Contre-flicke	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Particularité traitement	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Composon (mixte)	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Assemblage	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Epaisseur d'âme d'un profil acier	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Epaisseur de semelle d'un profil «	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Inertie de gauchissement	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Inertie de torsion de St. Venant	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Limite d'élasticité de l'acier	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Masse linéique d'un profilé en L o	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Masse volumique	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Module d'élasticité	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Module d'élasticité longitudinale	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Moment d'inertie de flexion selon	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Moment d'inertie de flexion selon	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Portée d'une poutre en acier	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Rayon de congé d'un profil en L c	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Rayon de courbure	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Résistance à la traction	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Résistance à l'arrachement lamell	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Etat de laminage	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Corrosion	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Rugosité de surface d'un objet	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Surface développée par unité de	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Type de finition de surface de l'a	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Date fabrication	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Résilience de l'acier	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Convention BIM	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Cahier des charges BIM	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Cahier des charges fabricants	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Dictionnaire	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Maquette BIM D/E	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Maquette BIM D/EI	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Fichier IFC	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Puces RFID	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Capteurs	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Désignation normalisée	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Désignation symbolique	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Identifiant de production de l'élé	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Recyclage	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Enviro	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
EPSE (avec norme afférente)	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	
Composition chimique complète d'X	X		X		X		X		X	
	X		X		X		X		X	

Figure A.3 : Résultats de l'enquête pour la transmission des données entre acteurs de la construction, constats des pratiques.

A.2.2. Partie 3.2.3

Paramètres / données à intégrer en conception
selon le type d'éléments structurels:

Matériau	Classification IFC	Conception	Nomenclature
Béton armé	Mur	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Épaisseur - hauteur - Longueur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Désignation NF EN 206-1 - ratio ferrailage - f_{ck} - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - durée d'utilisation de la structure - Taux de travail ELS MPa - conditions d'appuis , chaînage <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - épaisseur enrobage - réalisation : préfa ou coulé en place - précontraint : oui / non <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) 	XXX
	Dalle	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Épaisseur - Longueur - Largeur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Désignation NF EN 206-1 - ratio ferrailage - f_{ck} - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - durée d'utilisation de la structure - Taux de travail ELS MPa - flèche - conditions d'appuis <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - épaisseur enrobage - réalisation : préfa ou coulé en place - précontraint : oui / non <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) 	
	Toiture	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Épaisseur - Longueur - Largeur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Désignation NF EN 206-1 - ratio ferrailage - f_{ck} - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - durée d'utilisation de la structure - Taux de travail ELS MPa - flèche - conditions d'appuis <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - épaisseur enrobage - réalisation : préfa ou coulé en place - précontraint : oui / non <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) 	

Matériau	Classification IFC	Conception	Nomenclature
Béton armé	Poteau	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Section - hauteur - élançement <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Désignation NF EN 206-1 - ratio ferrailage - f_{yk} - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - durée d'utilisation de la structure - Taux de travail ELS MPa - conditions aux limites <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - épaisseur enrobage - réalisation : préfa ou coulé en place - précontraint : oui / non <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) 	XXX
	Poutres	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Section - Longueur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Désignation NF EN 206-1 - ratio ferrailage - f_{yk} - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - durée d'utilisation de la structure - Taux de travail ELS MPa - Flèche - conditions d'appuis <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - épaisseur enrobage - réalisation : préfa ou coulé en place - précontraint : oui / non <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) 	
	Escalier	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - volume béton - volume encombrement - inclinaison - hauteur de marche - profondeur de marche - nombre de marches <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Désignation NF EN 206-1 - ratio ferrailage - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - durée d'utilisation de la structure - type de connexions <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - épaisseur enrobage - réalisation : préfa ou coulé en place - précontraint : oui / non <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) - niveau haut et niveau bas 	
	Rampe		

Matériau	Classification IFC	Conception	Nomenclature
Bois	Mur	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Épaisseur - Longueur - Hauteur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Matériau bois (BM,BLC,LVL,CLT), - Classe mécanique (résistance du bois C / D / G) + norme dont elle est issue - Norme de calcul et référence (EC5, Avis technique pour le CLT) - Sens de sollicitation - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES - Essence de bois <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Classe d'emploi, de service du bois - durée d'utilisation de la structure - k_{mod} - Taux de travail ELS MPa - conditions d'appuis , chaînage <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - fluage k_{def} <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) 	
	Dalle	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Épaisseur - Longueur - Largeur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Matériau bois (BM,BLC,LVL,CLT), - Classe mécanique (résistance du bois C / D / G) + norme dont elle est issue - Norme de calcul et référence (EC5, Avis technique pour le CLT) - Sens de sollicitation - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES - Essence de bois <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Classe d'emploi, de service du bois - durée d'utilisation de la structure - k_{mod} - Taux de travail ELS MPa - flèche - conditions d'appuis <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - fluage k_{def} <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) 	
	Toiture	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Épaisseur - Longueur - Largeur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Matériau bois (BM,BLC,LVL,CLT), - Classe mécanique (résistance du bois C / D / G) + norme dont elle est issue - Norme de calcul et référence (EC5, Avis technique pour le CLT) - Sens de sollicitation - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES - Essence de bois <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Classe d'emploi, de service du bois - durée d'utilisation de la structure - k_{mod} - Taux de travail ELS MPa - flèche - conditions d'appuis <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - fluage k_{def} <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) 	
	Poteau	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Section - hauteur - élancement <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Matériau bois (BM,BLC,LVL,CLT), - Classe mécanique (résistance du bois C / D / G) + norme dont elle est issue - Norme de calcul et référence (EC5, Avis technique pour le CLT) - Sens de sollicitation - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES - Essence de bois <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Classe d'emploi, de service du bois - durée d'utilisation de la structure - k_{mod} - Taux de travail ELS MPa - conditions aux limites <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - fluage k_{def} <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) 	

Matériau	Classification IFC	Conception	Nomenclature
	Poutres	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Section - Longueur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Matériau bois (BM,BLC,LVL,CLT), - Classe mécanique (résistance du bois C / D / G) + norme dont elle est issue - Norme de calcul et référence (EC5, Avis technique pour le CLT) - Sens de sollicitation - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES - Essence de bois <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Classe d'emploi, de service du bois - durée d'utilisation de la structure - k_{mod} - Taux de travail ELS MPa - flèche - conditions d'appuis <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - fluage k_{def} <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) 	
	Escalier	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - volume bois - volume encombrement - inclinaison - hauteur de marche - profondeur de marche - nombre de marches <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Matériau bois (BM,BLC,LVL,CLT), - Classe mécanique (résistance du bois C / D / G) + norme dont elle est issue - Norme de calcul et référence (EC5, Avis technique pour le CLT) - Sens de sollicitation - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES - Essence de bois <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Classe d'emploi, de service du bois - durée d'utilisation de la structure - type de connexions <p>Comportement du matériau :</p> <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) - niveau haut et niveau bas 	
	Rampe		
Acier	Mur		
	Dalle (cf bac collaborant)	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Épaisseur - Longueur - Largeur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - composition de l'acier (dont soudabilité) - désignation de l'acier : nuance, qualité (dont Re et Rr) - procédé de laminage? - type de produits laminés (IPE, HEA, HEA, ...) ou PRS - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES - Module d'Young E <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - classe d'exposition des structures - durée d'utilisation de la structure - Taux de travail ELS MPa - flèche - conditions d'appuis - coefficient de voilement élastique? <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - protection corrosion ou état de corrosion <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) 	
	Toiture (cf bac collaborant)	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Épaisseur - Longueur - Largeur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - composition de l'acier (dont soudabilité) - désignation de l'acier : nuance, qualité (dont Re et Rr) - procédé de laminage? - type de produits laminés (IPE, HEA, HEA, ...) ou PRS - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES - Module d'Young E <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - classe d'exposition des structures - durée d'utilisation de la structure - Taux de travail ELS MPa - flèche - conditions d'appuis - coefficient de voilement élastique <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - protection corrosion ou état de corrosion <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) 	

Matériau	Classification IFC	Conception	Nomenclature
	Poteau	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - section - élancement - Hauteur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - composition de l'acier (dont soudabilité) - désignation de l'acier : nuance, qualité (dont Re et Rr) - procédé de laminage? - type de produits laminés (IPE, HEA, HEA, ...) ou PRS - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES - Module d'Young E <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - classe d'exposition des structures - durée d'utilisation de la structure - Taux de travail ELS MPa - conditions aux limites - coefficient d'élancement <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - protection corrosion ou état de corrosion <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) 	
	Poutres	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - section - Longueur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - composition de l'acier (dont soudabilité) - désignation de l'acier : nuance, qualité (dont Re et Rr) - procédé de laminage? - type de produits laminés (IPE, HEA, HEA, ...) ou PRS - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES - Module d'Young E <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - classe d'exposition des structures - durée d'utilisation de la structure - Taux de travail ELS MPa - flèche - contreflèche - moment fléchissant critique / contrainte critique de déversement - conditions d'appuis <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - protection corrosion ou état de corrosion <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) 	
	Escalier	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - volume acier - volume encombrement - inclinaison - hauteur de marche - profondeur de marche - nombre de marches <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - composition de l'acier (dont soudabilité) - désignation de l'acier : nuance, qualité (dont Re et Rr) - procédé de laminage? - type de produits laminés (IPE, HEA, HEA, ...) ou PRS - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES - Module d'Young E <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - classe d'exposition des structures - durée d'utilisation de la structure - type de connexions <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - protection corrosion ou état de corrosion <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) - niveau haut et niveau bas 	
	Rampe		

Paramètres / données à ajouter selon les phases du projet et le type d'éléments structurels:

Matériau	Classification IFC	Exécution	Vie en œuvre	Déconstruction, reconditionnement
Béton armé	Mur	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Épaisseur - Longueur - Hauteur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Désignation NF EN 206-1 (y compris type, classe et quantité du ciment CEM) - quantité des additions - dosage clinker - rapport eau-ciment - A_s et $A_{s'}$ + lien vers plans de ferrailage - Type HA - f_{ck} - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - durée d'utilisation de la structure (selon EC 0) - contrainte reprise ELS - Taux de travail ELS MPA - moment ultime et service Mu, Ms - effort normal Nu, Ns - conditions de liaisons chaînage + lien vers plans EXE <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - épaisseur enrobage - épaisseur carbonatée : $x(t)=x_c+K \sqrt{t}$ - loi de vieillissement <p>- réalisation : préfa ou coulé en place - précontraint : oui / non</p> <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) <p>Comportement global de la structure:</p> <ul style="list-style-type: none"> - raccourcissement différentiel - tassement sol - déplacement en tête - accélération en tête - Déplacements différentiels entre étages - Répartition descente de charges - Répartition efforts horizontaux - Critère dimensionnant 	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Épaisseur - Longueur - Hauteur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Désignation NF EN 206-1 (y compris type, classe et quantité du ciment CEM) - quantité des additions - dosage clinker - rapport eau-ciment - A_s et $A_{s'}$ + lien vers plans de ferrailage - Type HA - f_{ck} - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - durée d'utilisation de la structure (selon EC 0) - contrainte reprise - Taux de travail ELS MPA - conditions de liaisons, chaînage + lien vers plans EXE <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - épaisseur enrobage - épaisseur carbonatée : $x(t)=x_c+K \sqrt{t}$ - loi de vieillissement <p>- réalisation : préfa ou coulé en place - précontraint : oui / non</p> <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) <p>Comportement global de la structure:</p> <ul style="list-style-type: none"> - raccourcissement différentiel - tassement sol - déplacement en tête - accélération en tête - Déplacements différentiels entre étages - Répartition descente de charges - Répartition efforts horizontaux - Critère dimensionnant 	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Épaisseur - Longueur - Hauteur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Désignation NF EN 206-1 (y compris type, classe et quantité du ciment CEM) - quantité des additions - dosage clinker - rapport eau-ciment - A_s et $A_{s'}$ + lien vers plans de ferrailage - Type HA - f_{ck} - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - durée d'utilisation de la structure (selon EC 0) - contrainte reprise - Taux de travail ELS MPA - conditions de liaisons, chaînage + lien vers plans EXE <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - épaisseur enrobage - épaisseur carbonatée : $x(t)=x_c+K \sqrt{t}$ - loi de vieillissement <p>- réalisation : préfa ou coulé en place - précontraint : oui / non</p> <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) <p>Comportement global de la structure:</p> <ul style="list-style-type: none"> - raccourcissement différentiel - tassement sol - déplacement en tête - accélération en tête - Déplacements différentiels entre étages - Répartition descente de charges - Répartition efforts horizontaux - Critère dimensionnant <p>Essai, tests à mettre en place :</p> <ul style="list-style-type: none"> - essais normalisés de caractérisation - test de carbonatation, - pénétration des chlorures <p>Procédure qualité déconstruction</p>
	Dalle	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Épaisseur - Longueur - Largeur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Désignation NF EN 206-1 (y compris type, classe et quantité du ciment CEM) - quantité des additions - dosage clinker - rapport eau-ciment - A_s et $A_{s'}$ + lien vers plans de ferrailage - Type HA - f_{ck} - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - durée d'utilisation de la structure - contrainte reprise - Taux de travail ELS MPA - flèche - conditions de liaisons + lien vers plans EXE <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - épaisseur enrobage - loi de vieillissement - réalisation : préfa ou coulé en place - précontraint : oui / non <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) <p>Comportement global de la structure:</p> <ul style="list-style-type: none"> - raccourcissement différentiel - tassement sol - déplacement en tête - accélération en tête - Déplacements différentiels entre étages - Répartition descente de charges - Répartition efforts horizontaux - Critère dimensionnant 	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Épaisseur - Longueur - Largeur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Désignation NF EN 206-1 (y compris type, classe et quantité du ciment CEM) - quantité des additions - dosage clinker - rapport eau-ciment - A_s et $A_{s'}$ + lien vers plans de ferrailage - Type HA - f_{ck} - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - durée d'utilisation de la structure - contrainte reprise - Taux de travail ELS MPA - flèche - conditions de liaisons + lien vers plans EXE <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - épaisseur enrobage - loi de vieillissement - ouverture des fissures - réalisation : préfa ou coulé en place - précontraint : oui / non <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) <p>Comportement global de la structure:</p> <ul style="list-style-type: none"> - raccourcissement différentiel - tassement sol - déplacement en tête - accélération en tête - Déplacements différentiels entre étages - Répartition descente de charges - Répartition efforts horizontaux - Critère dimensionnant 	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Épaisseur - Longueur - Largeur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Désignation NF EN 206-1 (y compris type, classe et quantité du ciment CEM) - quantité des additions - dosage clinker - rapport eau-ciment - A_s et $A_{s'}$ + lien vers plans de ferrailage - Type HA - f_{ck} - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - durée d'utilisation de la structure - contrainte reprise - Taux de travail ELS MPA - flèche - conditions de liaisons + lien vers plans EXE <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - épaisseur enrobage - loi de vieillissement - pH du béton - réalisation : préfa ou coulé en place - précontraint : oui / non <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) <p>Comportement global de la structure:</p> <ul style="list-style-type: none"> - raccourcissement différentiel - tassement sol - déplacement en tête - accélération en tête - Déplacements différentiels entre étages - Répartition descente de charges - Répartition efforts horizontaux - Critère dimensionnant <p>Essai, tests à mettre en place :</p> <ul style="list-style-type: none"> - essais normalisés de caractérisation - test de carbonatation, - pénétration des chlorures <p>Procédure qualité déconstruction</p>

Matériau	Classification IFC	Exécution	Vie en œuvre	Déconstruction, reconditionnement
	Toiture	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Epaisseur - Longueur - Largeur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Désignation NF EN 206-1 (y compris type, classe et quantité du ciment CEM) - quantité des additions - dosage clinker - rapport eau-ciment - A_s et $A_{s'}$ + lien vers plans de ferrailage - Type HA - f_{ck} - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - durée d'utilisation de la structure - contrainte reprise - Taux de travail ELS MPa - flèche - conditions de liaisons + lien vers plans EXE <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - épaisseur enrobage <p>- loi de vieillissement</p> <p>- réalisation : préfa ou coulé en place</p> <p>- précontraint : oui / non</p> <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) <p>Comportement global de la structure :</p> <ul style="list-style-type: none"> - raccourcissement différentiel - tassement sol - déplacement en tête - accélération en tête - Déplacements différentiels entre étages - Répartition descente de charges - Répartition efforts horizontaux - Critère dimensionnant 	<p>Géométrie:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Epaisseur - Longueur - Largeur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Désignation NF EN 206-1 (y compris type, classe et quantité du ciment CEM) - quantité des additions - dosage clinker - rapport eau-ciment - A_s et $A_{s'}$ + lien vers plans de ferrailage - Type HA - f_{ck} - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - durée d'utilisation de la structure - contrainte reprise - Taux de travail ELS MPa - flèche - conditions de liaisons + lien vers plans EXE <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - épaisseur enrobage <p>- loi de vieillissement</p> <p>- ouverture des fissures</p> <p>- réalisation : préfa ou coulé en place</p> <p>- précontraint : oui / non</p> <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) <p>Comportement global de la structure :</p> <ul style="list-style-type: none"> - raccourcissement différentiel - tassement sol - déplacement en tête - accélération en tête - Déplacements différentiels entre étages - Répartition descente de charges - Répartition efforts horizontaux - Critère dimensionnant 	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Epaisseur - Longueur - Largeur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Désignation NF EN 206-1 (y compris type, classe et quantité du ciment CEM) - quantité des additions - dosage clinker - rapport eau-ciment - A_s et $A_{s'}$ + lien vers plans de ferrailage - Type HA - f_{ck} - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - durée d'utilisation de la structure - contrainte reprise - Taux de travail ELS MPa - flèche - conditions de liaisons + lien vers plans EXE <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - épaisseur enrobage <p>- loi de vieillissement</p> <p>- pH du béton</p> <p>- réalisation : préfa ou coulé en place</p> <p>- précontraint : oui / non</p> <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) <p>Comportement global de la structure :</p> <ul style="list-style-type: none"> - raccourcissement différentiel - tassement sol - déplacement en tête - accélération en tête - Déplacements différentiels entre étages - Répartition descente de charges - Répartition efforts horizontaux - Critère dimensionnant <p>Essai, tests à mettre en place :</p> <ul style="list-style-type: none"> - essais normalisés de caractérisation - test de carbonatation, - pénétration des chlorures <p>Procédure qualité déconstruction</p>
	Poteau	<p>Géométrie:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Section - élancement - Hauteur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Désignation NF EN 206-1 (y compris type, classe et quantité du ciment CEM) - quantité des additions - dosage clinker - rapport eau-ciment - A_s et $A_{s'}$ + lien vers plans de ferrailage - Type HA - f_{ck} - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - durée d'utilisation de la structure - contrainte reprise N ultime Nser (en service et ultime) - Taux de travail ELS MPa - conditions de liaisons + lien vers plans EXE <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - épaisseur enrobage <p>- loi de vieillissement</p> <p>- réalisation : préfa ou coulé en place</p> <p>- précontraint : oui / non</p> <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) <p>Comportement global de la structure :</p> <ul style="list-style-type: none"> - raccourcissement différentiel - tassement sol - déplacement en tête - accélération en tête - Déplacements différentiels entre étages - Répartition descente de charges - Répartition efforts horizontaux - Critère dimensionnant 	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Section - élancement - Hauteur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Désignation NF EN 206-1 (y compris type, classe et quantité du ciment CEM) - quantité des additions - dosage clinker - rapport eau-ciment - A_s et $A_{s'}$ + lien vers plans de ferrailage - Type HA - f_{ck} - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - durée d'utilisation de la structure - contrainte reprise - Taux de travail ELS MPa - conditions de liaisons + lien vers plans EXE <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - épaisseur enrobage <p>- loi de vieillissement</p> <p>- ouverture des fissures</p> <p>- réalisation : préfa ou coulé en place</p> <p>- précontraint : oui / non</p> <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) <p>Comportement global de la structure :</p> <ul style="list-style-type: none"> - raccourcissement différentiel - tassement sol - déplacement en tête - accélération en tête - Déplacements différentiels entre étages - Répartition descente de charges - Répartition efforts horizontaux - Critère dimensionnant 	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Section - élancement - Hauteur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Désignation NF EN 206-1 (y compris type, classe et quantité du ciment CEM) - quantité des additions - dosage clinker - rapport eau-ciment - A_s et $A_{s'}$ + lien vers plans de ferrailage - Type HA - f_{ck} - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - durée d'utilisation de la structure - contrainte reprise - Taux de travail ELS MPa - conditions de liaisons + lien vers plans EXE <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - épaisseur enrobage <p>- loi de vieillissement</p> <p>- pH du béton</p> <p>- réalisation : préfa ou coulé en place</p> <p>- précontraint : oui / non</p> <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) <p>Comportement global de la structure :</p> <ul style="list-style-type: none"> - raccourcissement différentiel - tassement sol - déplacement en tête - accélération en tête - Déplacements différentiels entre étages - Répartition descente de charges - Répartition efforts horizontaux - Critère dimensionnant <p>Essai, tests à mettre en place :</p> <ul style="list-style-type: none"> - essais normalisés de caractérisation - test de carbonatation, - pénétration des chlorures <p>Procédure qualité déconstruction</p>
	Poutres	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Section - Longueur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Désignation NF EN 206-1 (y compris type, classe et quantité du ciment CEM) - quantité des additions - dosage clinker - rapport eau-ciment - A_s et $A_{s'}$ + lien vers plans de ferrailage - Type HA - f_{ck} - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - durée d'utilisation de la structure - contrainte reprise M_{ult} / M_{ser} - Taux de travail ELS MPa - Flèche - conditions de liaisons + lien vers plans EXE <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - épaisseur enrobage <p>- loi de vieillissement</p> <p>- réalisation : préfa ou coulé en place</p> <p>- précontraint : oui / non</p> <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) <p>Comportement global de la structure :</p> <ul style="list-style-type: none"> - raccourcissement différentiel - tassement sol - déplacement en tête - accélération en tête - Déplacements différentiels entre étages - Répartition descente de charges - Répartition efforts horizontaux - Critère dimensionnant 	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Section - Longueur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Désignation NF EN 206-1 (y compris type, classe et quantité du ciment CEM) - quantité des additions - dosage clinker - rapport eau-ciment - A_s et $A_{s'}$ + lien vers plans de ferrailage - Type HA - f_{ck} - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - durée d'utilisation de la structure - contrainte reprise M_{ult} / M_{ser} - Taux de travail ELS MPa - Flèche - conditions de liaisons + lien vers plans EXE <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - épaisseur enrobage <p>- loi de vieillissement</p> <p>- ouverture des fissures</p> <p>- réalisation : préfa ou coulé en place</p> <p>- précontraint : oui / non</p> <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) <p>Comportement global de la structure :</p> <ul style="list-style-type: none"> - raccourcissement différentiel - tassement sol - déplacement en tête - accélération en tête - Déplacements différentiels entre étages - Répartition descente de charges - Répartition efforts horizontaux - Critère dimensionnant 	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Section - Longueur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Désignation NF EN 206-1 (y compris type, classe et quantité du ciment CEM) - quantité des additions - dosage clinker - rapport eau-ciment - A_s et $A_{s'}$ + lien vers plans de ferrailage - Type HA- f_{ck} - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - durée d'utilisation de la structure - contrainte reprise M_{ult} / M_{ser} - Taux de travail ELS MPa - Flèche - conditions de liaisons + lien vers plans EXE <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - épaisseur enrobage <p>- loi de vieillissement</p> <p>- pH du béton</p> <p>- réalisation : préfa ou coulé en place</p> <p>- précontraint : oui / non</p> <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) <p>Comportement global de la structure :</p> <ul style="list-style-type: none"> - raccourcissement différentiel - tassement sol - déplacement en tête - accélération en tête - Déplacements différentiels entre étages - Répartition descente de charges - Répartition efforts horizontaux - Critère dimensionnant <p>Essai, tests à mettre en place :</p> <ul style="list-style-type: none"> - essais normalisés de caractérisation - test de carbonatation, - pénétration des chlorures <p>Procédure qualité déconstruction</p>

Matériau	Classification IFC	Exécution	Vie en œuvre	Déconstruction, reconditionnement
	Escalier	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - volume béton - volume encombrement - inclinaison - hauteur de marche - profondeur de marche - nombre de marches <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Désignation NF EN 206-1 (y compris type, classe et quantité du ciment CEM) - quantité des additions - dosage clinker - rapport eau-ciment - A_s et A_t + lien vers plans de ferrailage - Type HA - f_c - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - durée d'utilisation de la structure - conditions de liaisons + lien vers plans EXE <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - épaisseur enrobage <p>- loi de vieillissement</p> <p>- réalisation : préfa ou coulé en place</p> <p>- précontraint : oui / non</p> <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) - niveau haut et niveau bas <p>Comportement global de la structure:</p> <ul style="list-style-type: none"> - raccourcissement différentiel - tassement sol - déplacement en tête - accélération en tête - Déplacements différentiels entre étages - Répartition descente de charges - Répartition efforts horizontaux - Critère dimensionnant 	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - volume béton - volume encombrement - inclinaison - hauteur de marche - profondeur de marche - nombre de marches <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Désignation NF EN 206-1 (y compris type, classe et quantité du ciment CEM) - quantité des additions - dosage clinker - rapport eau-ciment - A_s et A_t + lien vers plans de ferrailage - Type HA - f_c - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - durée d'utilisation de la structure - conditions de liaisons + lien vers plans EXE <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - épaisseur enrobage <p>- loi de vieillissement</p> <p>- ouverture des fissures</p> <p>- réalisation : préfa ou coulé en place</p> <p>- précontraint : oui / non</p> <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) - niveau haut et niveau bas <p>Comportement global de la structure:</p> <ul style="list-style-type: none"> - raccourcissement différentiel - tassement sol - déplacement en tête - accélération en tête - Déplacements différentiels entre étages - Répartition descente de charges - Répartition efforts horizontaux - Critère dimensionnant 	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - volume béton - volume encombrement - inclinaison - hauteur de marche - profondeur de marche - nombre de marches <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Désignation NF EN 206-1 (y compris type, classe et quantité du ciment CEM) - quantité des additions - dosage clinker - rapport eau-ciment - A_s et A_t + lien vers plans de ferrailage - Type HA - f_c - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - durée d'utilisation de la structure - conditions de liaisons + lien vers plans EXE <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - épaisseur enrobage <p>- loi de vieillissement</p> <p>- pH du béton</p> <p>- réalisation : préfa ou coulé en place</p> <p>- précontraint : oui / non</p> <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) - niveau haut et niveau bas <p>Comportement global de la structure:</p> <ul style="list-style-type: none"> - raccourcissement différentiel - tassement sol - déplacement en tête - accélération en tête - Déplacements différentiels entre étages - Répartition descente de charges - Répartition efforts horizontaux - Critère dimensionnant <p>Essai, tests à mettre en place :</p> <ul style="list-style-type: none"> - essais normalisés de caractérisation - test de carbonatation, - pénétration des chlorures <p>Procédure qualité déconstruction</p>
		Rempe		
Bois	Mur	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Epaisseur - Longueur - Hauteur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Matériau bois (BM,BLC,LVL,CLT), - Classe mécanique (résistance du bois C / D / G) + norme dont elle est issue - Norme de calcul et référence (ECS, Avis technique pour le CLT) - Sens de sollicitation - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES - Essence de bois <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Classe d'emploi, de service du bois - durée d'utilisation de la structure - k_{mod} - contrainte reprise - Taux de travail ELS MPa - conditions d'appuis - Taux d'humidité - Traitement du bois et sa durée <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - fluage k_{def} - humidité de mise en œuvre <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) <p>Comportement global de la structure:</p> <ul style="list-style-type: none"> - raccourcissement différentiel - tassement sol - déplacement en tête - accélération en tête - Déplacements différentiels entre étages - Répartition descente de charges - Répartition efforts horizontaux - Critère dimensionnant 	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Epaisseur - Longueur - Hauteur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Matériau bois (BM,BLC,LVL,CLT), - Classe mécanique (résistance du bois C / D / G) + norme dont elle est issue - Norme de calcul et référence (ECS, Avis technique pour le CLT) - Sens de sollicitation - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES - Essence de bois <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Classe d'emploi, de service du bois - durée d'utilisation de la structure - k_{mod} - contrainte reprise - Taux de travail ELS MPa - conditions d'appuis - Taux d'humidité - Traitement du bois et sa durée <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - fluage k_{def} - humidité de mise en œuvre <p>- fissuration</p> <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) <p>Comportement global de la structure:</p> <ul style="list-style-type: none"> - raccourcissement différentiel - tassement sol - déplacement en tête - accélération en tête - Déplacements différentiels entre étages - Répartition descente de charges - Répartition efforts horizontaux - Critère dimensionnant 	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Epaisseur - Longueur - Hauteur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Matériau bois (BM,BLC,LVL,CLT), - Classe mécanique (résistance du bois C / D / G) + norme dont elle est issue - Norme de calcul et référence (ECS, Avis technique pour le CLT) - Sens de sollicitation - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES - Essence de bois <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Classe d'emploi, de service du bois - durée d'utilisation de la structure - k_{mod} - contrainte reprise - Taux de travail ELS MPa - conditions d'appuis - Taux d'humidité - Traitement du bois et sa durée <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - fluage k_{def} - humidité de mise en œuvre <p>- fissuration</p> <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) <p>Comportement global de la structure:</p> <ul style="list-style-type: none"> - raccourcissement différentiel - tassement sol - déplacement en tête - accélération en tête - Déplacements différentiels entre étages - Répartition descente de charges - Répartition efforts horizontaux - Critère dimensionnant <p>Procédure qualité déconstruction</p>
		Dalle	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Epaisseur - Longueur - Largeur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Matériau bois (BM,BLC,LVL,CLT), - Classe mécanique (résistance du bois C / D / G) + norme dont elle est issue - Norme de calcul et référence (ECS, Avis technique pour le CLT) - Sens de sollicitation - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES - Essence de bois <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Classe d'emploi, de service du bois - durée d'utilisation de la structure - k_{mod} - contrainte reprise - Taux de travail ELS MPa - flèche - conditions d'appuis - Taux d'humidité - Traitement du bois et sa durée <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - fluage k_{def} - humidité de mise en œuvre <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) <p>Comportement global de la structure:</p> <ul style="list-style-type: none"> - raccourcissement différentiel - tassement sol - déplacement en tête - accélération en tête - Déplacements différentiels entre étages - Répartition descente de charges - Répartition efforts horizontaux - Critère dimensionnant 	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Epaisseur - Longueur - Largeur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Matériau bois (BM,BLC,LVL,CLT), - Classe mécanique (résistance du bois C / D / G) + norme dont elle est issue - Norme de calcul et référence (ECS, Avis technique pour le CLT) - Sens de sollicitation - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES - Essence de bois <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Classe d'emploi, de service du bois - durée d'utilisation de la structure - k_{mod} - contrainte reprise - Taux de travail ELS MPa - conditions d'appuis - Taux d'humidité - Traitement du bois et sa durée <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - fluage k_{def} - humidité de mise en œuvre <p>- fissuration</p> <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) <p>Comportement global de la structure:</p> <ul style="list-style-type: none"> - raccourcissement différentiel - tassement sol - déplacement en tête - accélération en tête - Déplacements différentiels entre étages - Répartition descente de charges - Répartition efforts horizontaux - Critère dimensionnant

Matériau	Classification IFC	Exécution	Vie en œuvre	Déconstruction, reconditionnement
	Poutres	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - section - Longueur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - composition de l'acier (dont soudabilité) - désignation de l'acier : nuance, qualité (dont Re et Rt) - procédé de laminage? - type de produits laminés (IPE, HEA, HEA, ...) ou PRS - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES - Module d'Young E <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - classe d'exposition des structures - durée d'utilisation de la structure - contrainte reprise - Taux de travail ELS MPa - flèche - contreflèche - moment fléchissant ELS / contrainte critique de déversement - conditions de liaisons <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - protection corrosion ou état de corrosion - loi de vieillissement? <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) <p>Comportement global de la structure:</p> <ul style="list-style-type: none"> - raccourcissement différentiel - tassement sol - déplacement en tête - accélération en tête - Déplacements différentiels entre étages - Répartition descente de charges - Répartition efforts horizontaux - Critère dimensionnant 	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - section - Longueur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - composition de l'acier (dont soudabilité) - désignation de l'acier : nuance, qualité (dont Re et Rt) - procédé de laminage? - type de produits laminés (IPE, HEA, HEA, ...) ou PRS - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES - Module d'Young E <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - classe d'exposition des structures - durée d'utilisation de la structure - contrainte reprise - Taux de travail ELS MPa - flèche - contreflèche - moment fléchissant ELS / contrainte critique de déversement - conditions de liaisons <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - protection corrosion ou état de corrosion - loi de vieillissement? <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) <p>Comportement global de la structure:</p> <ul style="list-style-type: none"> - raccourcissement différentiel - tassement sol - déplacement en tête - accélération en tête - Déplacements différentiels entre étages - Répartition descente de charges - Répartition efforts horizontaux - Critère dimensionnant 	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - section - Longueur <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - composition de l'acier (dont soudabilité) - désignation de l'acier : nuance, qualité (dont Re et Rt) - procédé de laminage? - type de produits laminés (IPE, HEA, HEA, ...) ou PRS - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES - Module d'Young E <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - classe d'exposition des structures - durée d'utilisation de la structure - contrainte reprise - Taux de travail ELS MPa - flèche - contreflèche - moment fléchissant ELS / contrainte critique de déversement - conditions de liaisons <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - protection corrosion ou état de corrosion - loi de vieillissement? <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) <p>Comportement global de la structure:</p> <ul style="list-style-type: none"> - raccourcissement différentiel - tassement sol - déplacement en tête - accélération en tête - Déplacements différentiels entre étages - Répartition descente de charges - Répartition efforts horizontaux - Critère dimensionnant <p>Procédure qualité déconstruction</p>
	Escalier	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - volume acier - volume encombrement - inclinaison - hauteur de marche - profondeur de marche - nombre de marches <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - composition de l'acier (dont soudabilité) - désignation de l'acier : nuance, qualité (dont Re et Rt) - procédé de laminage? - type de produits laminés (IPE, HEA, HEA, ...) ou PRS - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES - Module d'Young E <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - classe d'exposition des structures - durée d'utilisation de la structure - type de connexions <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - protection corrosion ou état de corrosion - loi de vieillissement? <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) <p>Comportement global de la structure:</p> <ul style="list-style-type: none"> - raccourcissement différentiel - tassement sol - déplacement en tête - accélération en tête - Déplacements différentiels entre étages - Répartition descente de charges - Répartition efforts horizontaux - Critère dimensionnant 	<p>Géométrie:</p> <ul style="list-style-type: none"> - volume acier - volume encombrement - inclinaison - hauteur de marche - profondeur de marche - nombre de marches <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - composition de l'acier (dont soudabilité) - désignation de l'acier : nuance, qualité (dont Re et Rt) - procédé de laminage? - type de produits laminés (IPE, HEA, HEA, ...) ou PRS - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES - Module d'Young E <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - classe d'exposition des structures - durée d'utilisation de la structure - type de connexions <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - protection corrosion ou état de corrosion - loi de vieillissement? <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) <p>Comportement global de la structure:</p> <ul style="list-style-type: none"> - raccourcissement différentiel - tassement sol - déplacement en tête - accélération en tête - Déplacements différentiels entre étages - Répartition descente de charges - Répartition efforts horizontaux - Critère dimensionnant 	<p>Géométrie :</p> <ul style="list-style-type: none"> - volume acier - volume encombrement - inclinaison - hauteur de marche - profondeur de marche - nombre de marches <p>Composition :</p> <ul style="list-style-type: none"> - composition de l'acier (dont soudabilité) - désignation de l'acier : nuance, qualité (dont Re et Rt) - procédé de laminage? - type de produits laminés (IPE, HEA, HEA, ...) ou PRS - Données environnementales eq CO₂/ lien vers FDES - Module d'Young E <p>Emploi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - classe d'exposition des structures - durée d'utilisation de la structure - type de connexions <p>Comportement du matériau :</p> <ul style="list-style-type: none"> - protection corrosion ou état de corrosion - loi de vieillissement? <p>Localisation</p> <ul style="list-style-type: none"> - position relative de l'élément (repère local x,y,z) <p>Comportement global de la structure:</p> <ul style="list-style-type: none"> - raccourcissement différentiel - tassement sol - déplacement en tête - accélération en tête - Déplacements différentiels entre étages - Répartition descente de charges - Répartition efforts horizontaux - Critère dimensionnant <p>Procédure qualité déconstruction</p>
	Rempes			

Tableau A.3 : Propriétés détaillées par matériaux et par phases pour une intégration au modèle BIM, afin de permettre et d'anticiper un réemploi structural.

A.3. Chapitre 4

A.3.1. Parties 1.2.3. et 1.2.4. : Géométraux des portiques testés

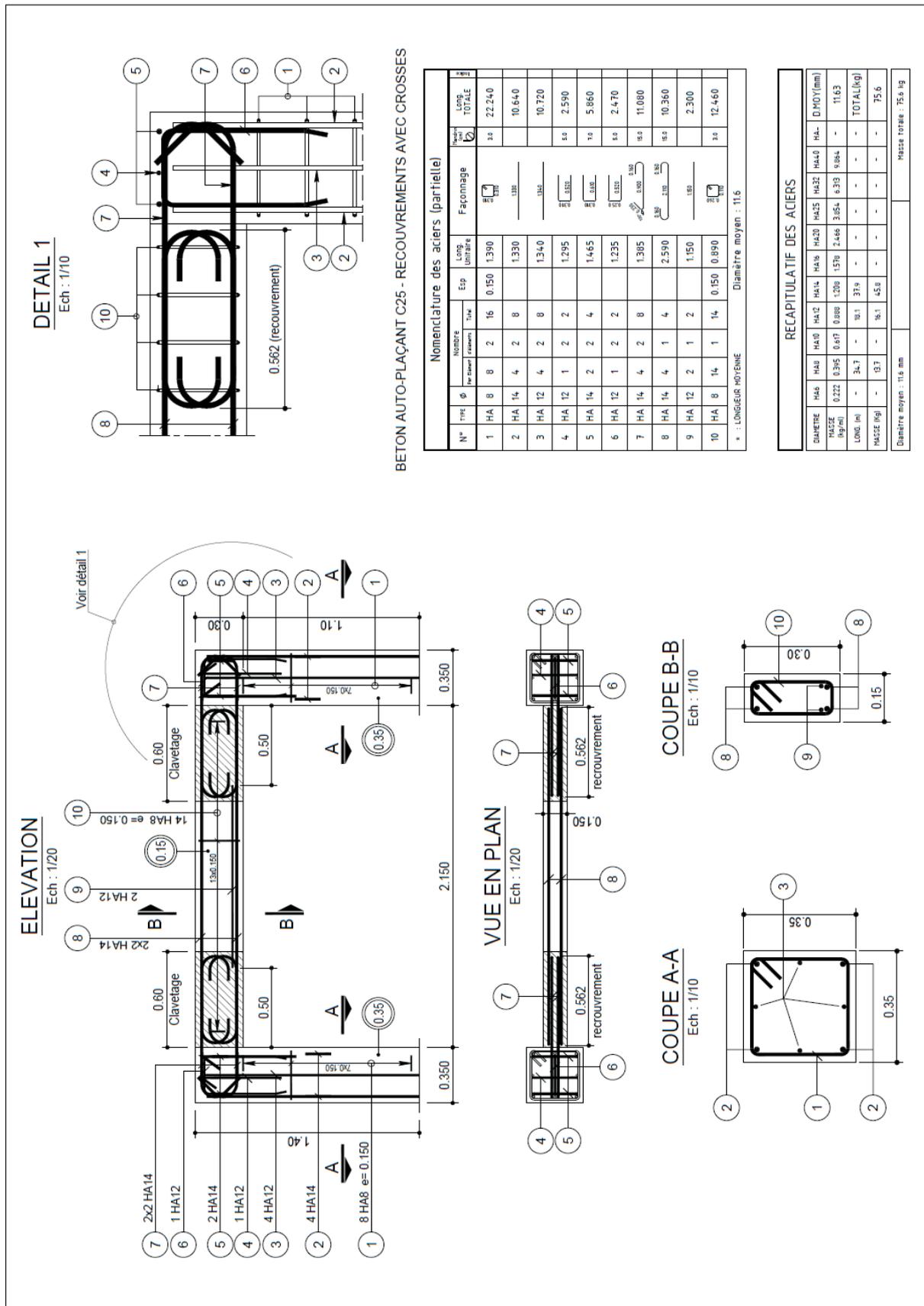


Figure A. 4 : Géométral du portique n°1.

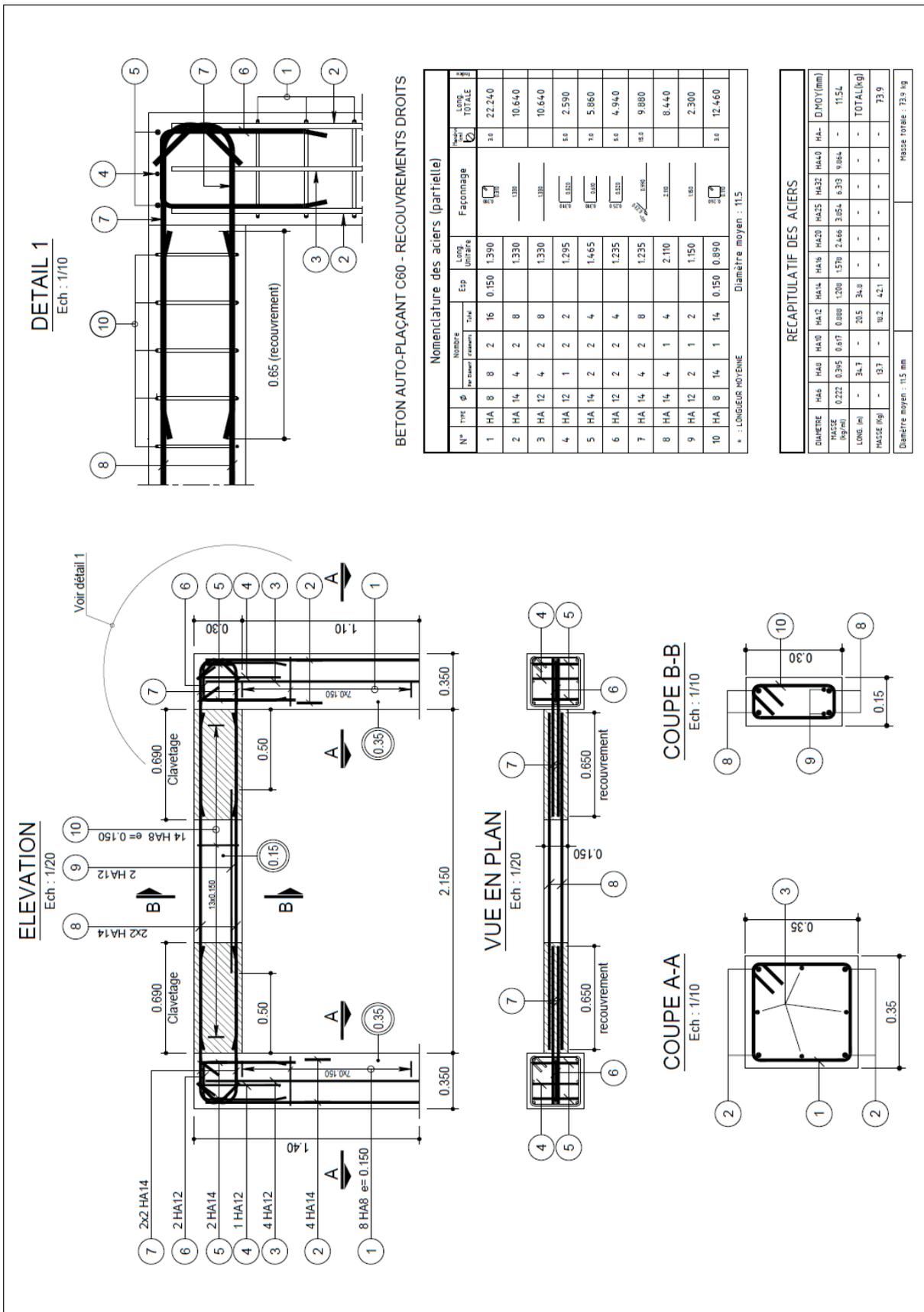
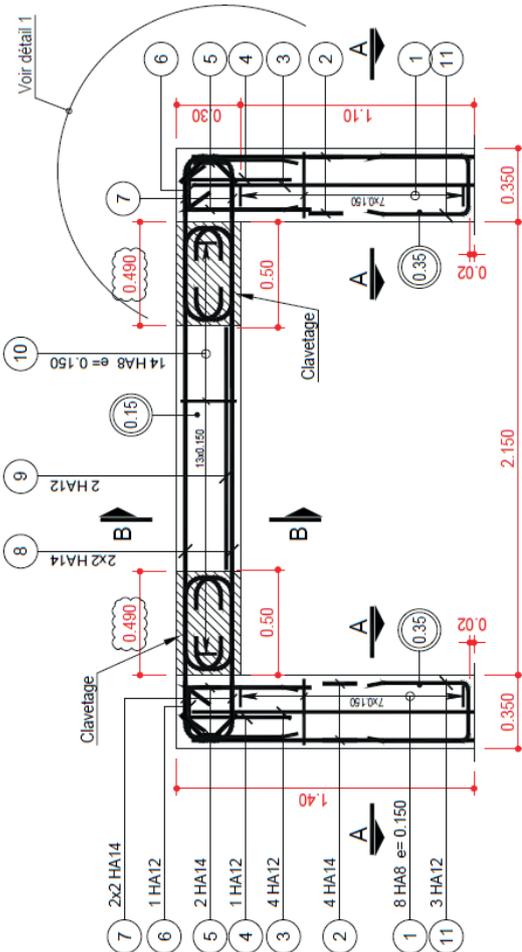


Figure A. 5 : Géométral du portique n°2.

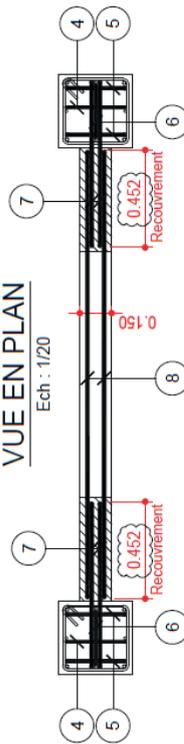
ELEVATION

Ech : 1/20



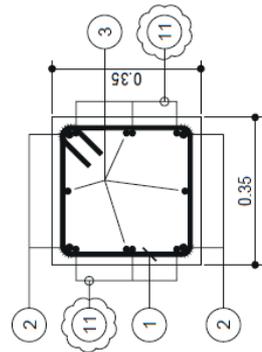
VUE EN PLAN

Ech : 1/20



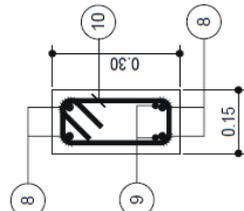
COUPE A-A

Ech : 1/10



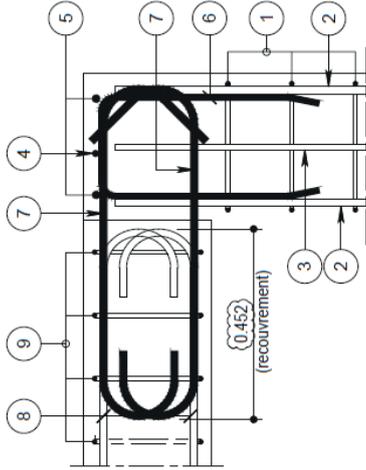
COUPE B-B

Ech : 1/10



DETAIL 1

Ech : 1/10



BETON AUTO-PLAÇANT (C45), RECOUVREMENTS AVEC CROSSES

N°	TYPE	Ø	NOMBRE		Esp	LONG. UNITAIRE	Façonnage	LONG. TOTALE
			par élément	Total				
1	HA	8	2	16	0.150	1.390	22.240	
2	HA	14	4	2	8	1.330	10.640	
3	HA	12	4	2	8	1.330	10.640	
4	HA	12	1	2	2	1.275	2.550	
5	HA	14	2	2	4	1.445	5.780	
6	HA	12	1	2	2	1.235	2.470	
7	HA	14	4	2	8	1.275	10.200	
8	HA	14	4	1	4	2.590	10.360	
9	HA	12	2	1	2	1.150	2.300	
10	HA	8	14	1	14	0.150	12.460	
11	HA	12	3	2	6	1.195	7.170	

* : LONGUEUR MOYENNE Diamètre moyen : 11.6

RECAPITULATIF DES ACIERS

DIAMETRE	HA8	HA10	HA12	HA14	HA16	HA20	HA25	HA32	HA40	HA-	D MOY (mm)
DIAMETRE	0.222	0.395	0.617	0.889	1.209	1.579	2.448	3.654	6.313	9.884	11.63
MASSÉ (kg/m)	-	34.7	25.1	37.0	-	-	-	-	-	-	-
LONG. (m)	-	13.7	21.3	44.7	-	-	-	-	-	-	-
MASSÉ (kg)	-	475.0	544.7	1653.0	-	-	-	-	-	-	80.7

Diamètre moyen : 11.6 mm Masse totale : 80.7 kg

Figure A. 7 : Géométral du portique n°4.

A.3.3. Partie 1.3.3.1.

A.3.3.1. Résultats du modèle Pythagore

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats obtenus avec le logiciel Pythagore, développé par setec tpi, qui permet de simuler le comportement réel du portique en calculant les sollicitations et les déplacements, avec les lois de comportement les plus réalistes.

Le tableau ci-dessous, montre les résultats calculés par Pythagore (sans prise en compte de la traction), pour les portiques 1, 2, 3 et 4. La colonne Charge de rupture ELU montre la valeur maximale de charge admissible, en considérant un béton avec une loi de comportement parabole-rectangle.

	Déformation à mi-travée (m)	Charge de rup. (kN)	N°Elément	Charge de rup. ELU
Portique 1	-0,00402448	155	-51	121
Portique 2	-0,00397671	156	-100	121
Portique 3	-0,00397671	156	-100	121
Portique 4	-0,00397813	155	-51	121

Tableau A. 4 : Caractéristiques des déformations à la rupture des portiques, obtenues par la modélisation sur le logiciel Pythagore.

Dans le modèle de calcul, la rupture a lieu dans les éléments -100 et -51 qui sont les éléments situés au niveau des assemblages entre le poteau et la poutre. Dans le modèle Pythagore, ces éléments correspondent aux endroits entre la poutre et la zone de clavetage.

Obs. 1 : Les charges de rupture sont calculées en augmentant progressivement les valeurs des charges jusqu'au moment où le logiciel Pythagore ne converge plus. Cela indique qu'il n'existe plus de situation d'équilibre, c'est ce que nous interpréterons comme la rupture du portique.

Obs. 2 : Nous avons décidé d'utiliser la loi du béton sans prise en compte de la traction, car nous voulions comparer les résultats avec les calculs à l'ELU, qui ne prennent pas en compte l'effet de la traction du béton.

Les images suivantes montrent les contraintes dans la section de béton à mi-travée et au nu de la poutre.

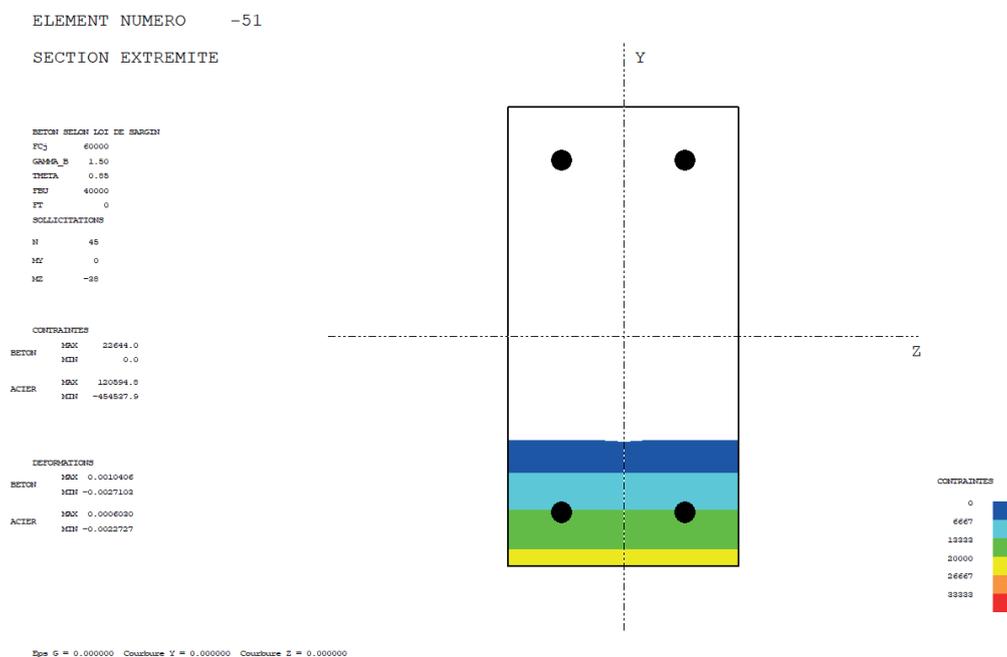
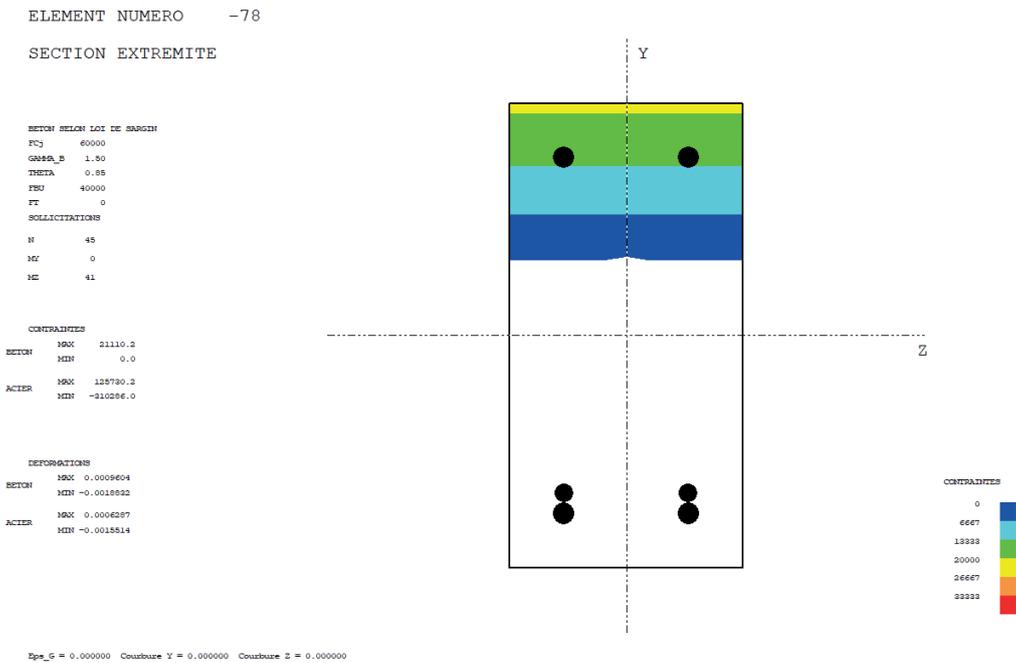


Figure A. 8 : Contraintes dans la section au nu de la poutre, issues du modèle réalisé avec le logiciel Pythagore.



A.3.3.2. Vérifications ELS et ELU

Pour les calculs à l'ELS et à l'ELU de la section, nous allons considérer une combinaison de coefficients de minoration de 1,5 pour la résistance du béton et de 1,15 pour la résistance des barres en acier. En revanche, pour les forces appliquées, nous n'allons pas considérer de coefficients de pondération sur les charges, car on connaît exactement la force appliquée (par le vérin).

En analysant les sections critiques du portique, on peut déterminer le tableau suivant, avec les moments résistants de chaque section.

Section clavetage		
Type de béton	ELS moment résistant (kN.m)	ELU moment résistant (kN.m)
C25	-20.8	-31.7
C45	-29.4	-33.0
C60	-29.5	-33.8

Tableau A. 5 : Moments ELS et ELU selon le type de béton de l'assemblage du portique.

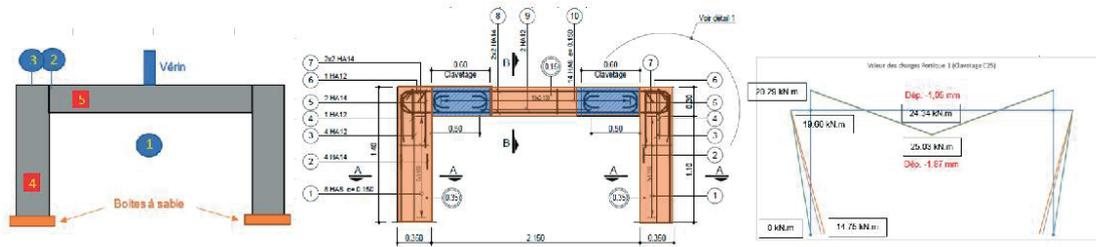
Le moment résistant pour la section à mi-travée est déterminé comme suit :

Section mi-travée		
Type de béton	ELS moment résistant	ELU moment résistant
C60	50,1	56.1

Tableau A. 6 : Moments ELS et ELU à mi-travées des portiques.

Nous allons donc déterminer la charge maximale à laquelle le portique peut résister sans dépasser les valeurs de l'ELS et l'ELU. La charge qui permet de respecter toutes les combinaisons est une charge de 73 kN. Nous proposons de charger les portiques à 70 kN pour assurer le non-endommagement pendant les essais non-destructifs de la 1^{ère} phase. La charge calculée à l'ELU est de 121 kN et la charge de rupture calculée à l'aide de Pythagore est de 156 kN.

Portique 1 (Clavetage C25)



Phase 1 (essais non-destructifs) :

Charge de 70KN à mi-travée

	Valeur mesurée	Valeur attendue	Borne inf.	Borne sup.
Déplacement mi-travée (1)		1,13 mm	1,05 mm	1,87 mm
Déplacement en haut du poteau (3)		0,02 mm	0,10 mm	0,13 mm
Déplacement des assemblages (2)		0,11 mm	0,05 mm	0,02 mm
Rotation des assemblages		0,36 °	0,34 °	0,63 °
Contrainte dans le poteau (4)		286 kPa	-	-
Ouverture de fissures		-	-	-

Phase 2 (essais à la rupture):

Charge de 70KN à mi-travée

	Valeur mesurée	Valeur attendue	Borne inf.	Borne sup.
Déplacement mi-travée (1)		1,130 mm	1,050 mm	1,870 mm
Déplacement en haut du poteau (3)		0,020 mm	0,100 mm	0,130 mm
Déplacement des assemblages (2)		0,110 mm	0,050 mm	0,020 mm
Rotation des assemblages		0,36 °	0,34 °	0,63 °
Contrainte dans le poteau (4)		286 kPa	-	-
Contrainte dans les aciers du clavetage (5)		-	-	-
Ouverture de fissures		-	-	-

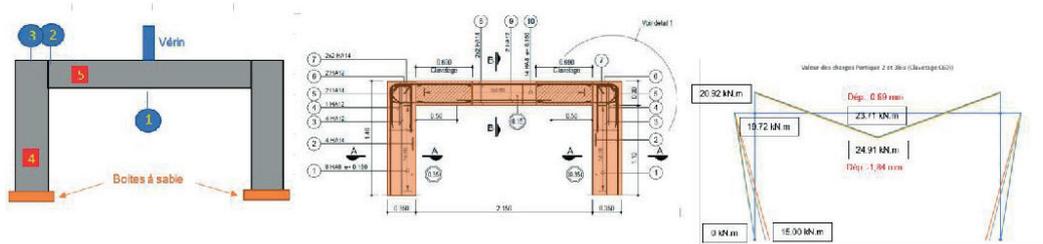
Essai de rupture	Valeur attendue	ELU
Charge de rupture	155 kN	121 kN
Déformation à la rupture	4,35 mm	-

Les valeurs attendues sont les valeurs prévues par le modèle Pythagore, avec la prise en compte de la traction du béton et rotules pour les appuis

Les Borne inf. et sup. sont calculées en variant les paramètres Pythagore (loi du béton et conditions dans les appuis)

Figure A. 10 : Fiche de suivi de l'essai et des résultats pour le portique n°1.

Portique 2 (Clavetage C60 droit)



Phase 1 : (Non-destructive)

Charge de 70kN à mi-travée

	Valeur mesurée	Valeur attendue	Borne inf.	Borne sup.
Déplacement mi-travée (1)		1,06 mm	0,99 mm	1,84 mm
Déplacement en haut du poteau (3)		0,02 mm	0,02 mm	0,05 mm
Déplacement des assemblages (2)		0,87 mm	0,81 mm	1,54 mm
Rotation des assemblages		0,34 °	0,32 °	0,64 °
Contrainte dans le poteau (4)		286 kPa	-	-
Ouverture de fissures		-	-	-

Phase 2 :

Charge de 70kN à mi-travée

	Valeur mesurée	Valeur attendue	Borne inf.	Borne sup.
Déplacement mi-travée (1)		1,06 mm	0,99 mm	1,84 mm
Déplacement en haut du poteau (3)		0,02 mm	0,02 mm	0,05 mm
Déplacement des assemblages (2)		0,87 mm	0,81 mm	1,54 mm
Rotation des assemblages		0,34 °	0,32 °	0,64 °
Contrainte dans le poteau (4)		286 kPa	-	-
Contraintes acier clavetage (5)		-	-	-
Ouverture de fissures		-	-	-

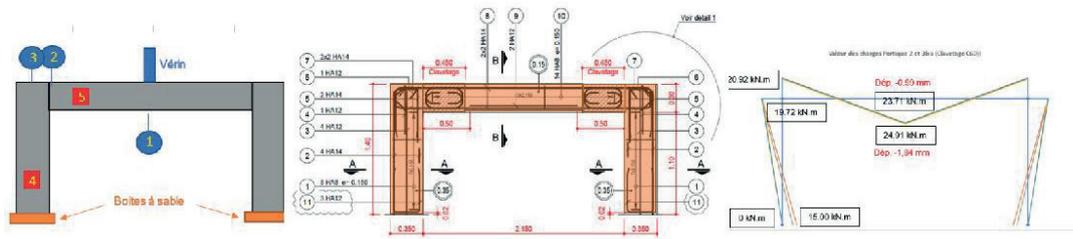
Essai de rupture	Valeur attendue	ELU
Charge de rupture	155 kN	121 kN
Déformation à la rupture	4,35 mm	-

Les valeurs attendues sont les valeurs prévues par le modèle Pythagore, avec la prise en compte de la traction du béton et rotules pour les appuis

Les Borne inf. et sup. sont calculées en variant les paramètres Pythagore (loi du béton et conditions dans les appuis)

Figure A. 11 : Fiche de suivi de l'essai et des résultats pour le portique n°2.

Portique 3BIS (Clavetage C60)



Phase 1 : (Non-destructive)

Charge de 70kN à mi-travée

	Valeur mesurée	Valeur attendue	Borne inf.	Borne sup.
Déplacement mi-travée (1)		1,06 mm	0,99 mm	1,84 mm
Déplacement en haut du poteau (3)		0,02 mm	0,02 mm	0,05 mm
Déplacement des assemblages (2)		0,87 mm	0,81 mm	1,54 mm
Rotation des assemblages		0,34 °	0,32 °	0,64 °
Contrainte dans le poteau (4)		286 kPa	-	-
Ouverture de fissures		-	-	-

Phase 2 :

Charge de 70kN à mi-travée

	Valeur mesurée	Valeur attendue	Borne inf.	Borne sup.
Déplacement mi-travée (1)		1,06 mm	0,99 mm	1,84 mm
Déplacement en haut du poteau (3)		0,02 mm	0,02 mm	0,05 mm
Déplacement des assemblages (2)		0,87 mm	0,81 mm	1,54 mm
Rotation des assemblages		0,34 °	0,32 °	0,64 °
Contrainte dans le poteau (4)		286 kPa	-	-
Contraintes acier clavetage (5)		-	-	-
Ouverture de fissures		-	-	-

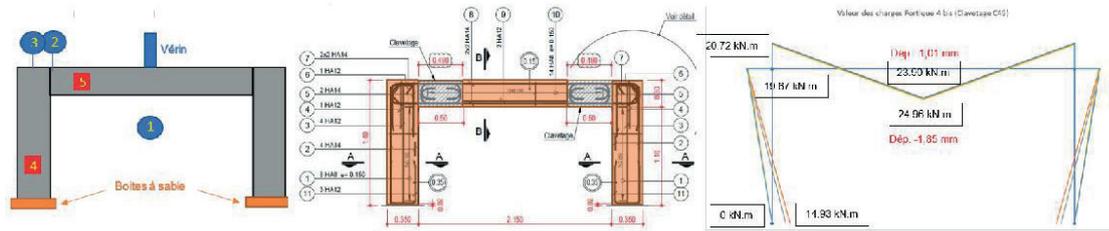
Essai de rupture	Valeur attendue	ELU
Charge de rupture	155 kN	121 kN
Déformation à la rupture	4,35 mm	-

Les valeurs attendues sont les valeurs prévues par le modèle Pythagore, avec la prise en compte de la traction du béton et rotules pour les appuis

Les Bornes inf. et sup. sont calculées en variant les paramètres Pythagore (loi du béton et conditions dans les appuis)

Figure A. 12 : Fiche de suivi de l'essai et des résultats pour le portique n°3.

Portique 4BIS (Clavetage C45)



Phase 1 : (Non-destructive)

Charge de 70kN à mi-travée

	Valeur mesurée	Valeur attendue	Borne inf.	Borne sup.
Déplacement mi-travée (1)		1,08 mm	1,01 mm	1,85 mm
Déplacement en haut du poteau (3)		0,02 mm	0,02 mm	0,05 mm
Déplacement des assemblages (2)		0,11 mm	0,10 mm	0,12 mm
Rotation des assemblages		0,35 °	0,32 °	0,62 °
Contrainte dans le poteau (4)		286 kPa	-	-
Ouverture de fissures		-	-	-

Phase 2 :

Charge de 70kN à mi-travée

	Valeur mesurée	Valeur attendue	Borne inf.	Borne sup.
Déplacement mi-travée (1)		1,08 mm	1,01 mm	1,85 mm
Déplacement en haut du poteau (3)		0,02 mm	0,02 mm	0,05 mm
Déplacement des assemblages (2)		0,11 mm	0,10 mm	0,12 mm
Rotation des assemblages		0,35 °	0,32 °	0,62 °
Contrainte dans le poteau (4)		1,08 mm	1,01 mm	1,85 mm
Contraintes acier clavetage (5)		-	-	-
Ouverture de fissures		-	-	-

Essai de rupture	Valeur attendue	ELU
Charge de rupture	155 kN	121 kN
Déformation à la rupture	4,35 mm	-

Les valeurs attendues sont les valeurs prévues par le modèle Pythagore, avec la prise en compte de la traction du béton et rotules pour les appuis

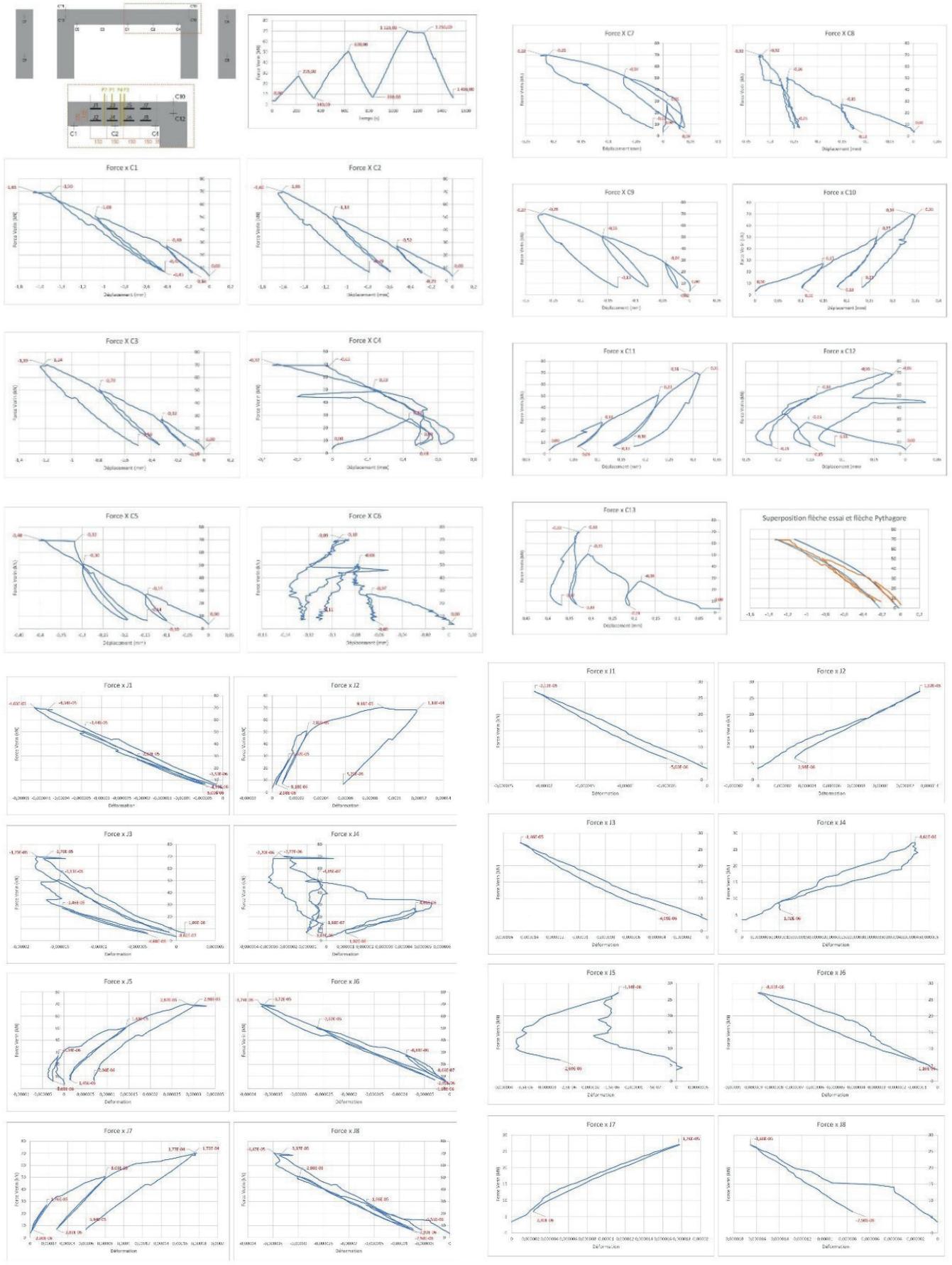
Les Bornes inf. et sup. sont calculées en variant les paramètres Pythagore (loi du béton et conditions dans les appuis)

Figure A. 13 : Fiche de suivi de l'essai et des résultats pour le portique n°4.

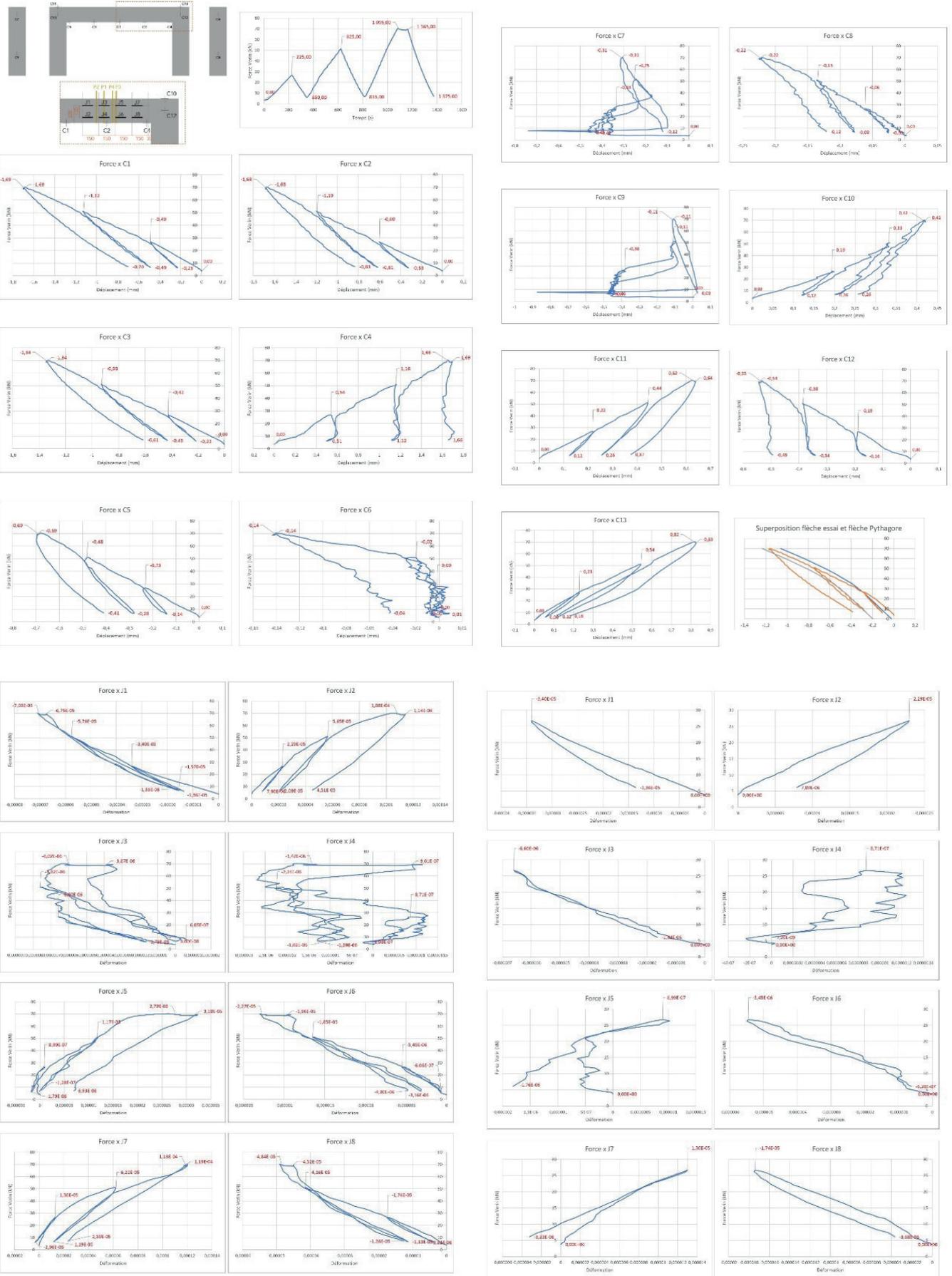
A.3.4. Partie 1.5.

Résultats des capteurs et des jauges lors des essais sur les portiques.

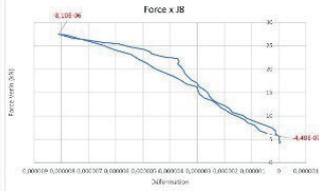
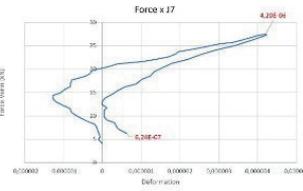
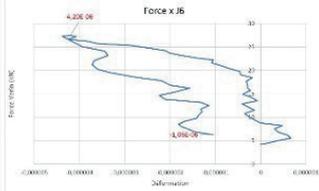
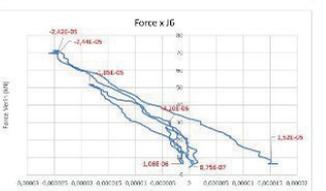
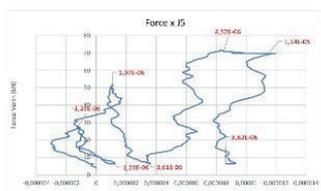
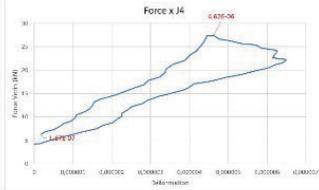
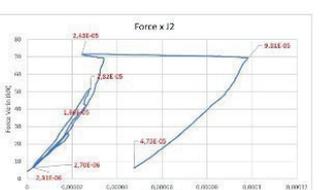
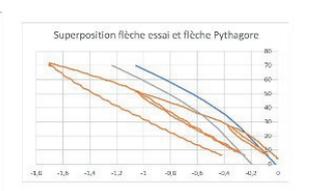
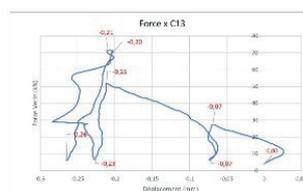
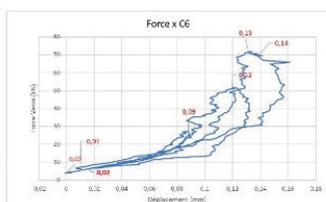
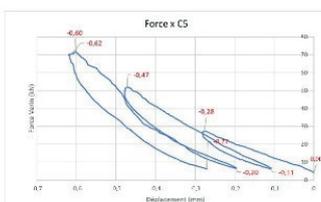
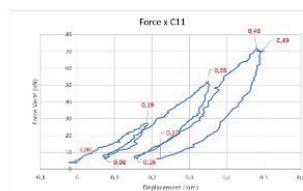
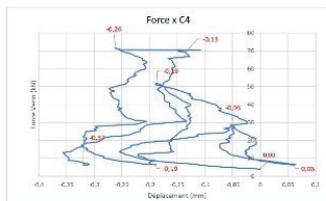
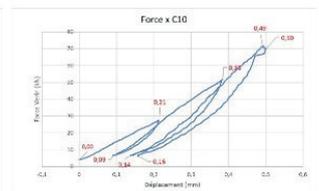
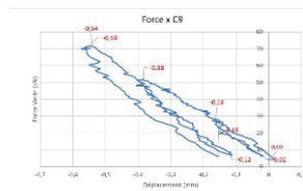
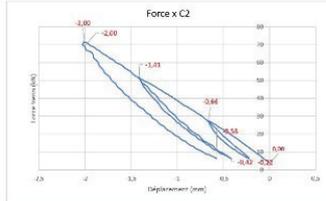
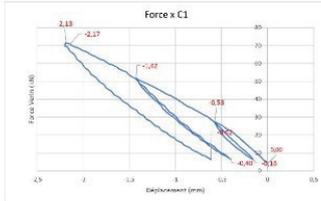
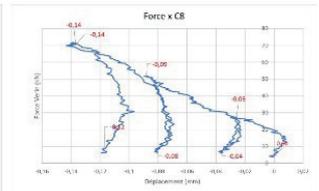
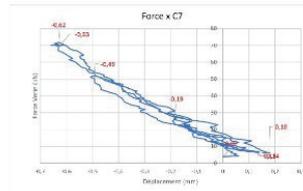
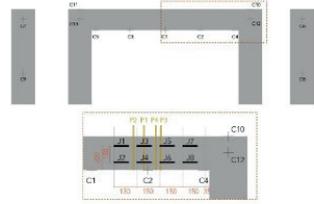
Portique 1 (clavetage C25, recouvrements croisés) - Mesures de l'essai réalisé le 01/07/20



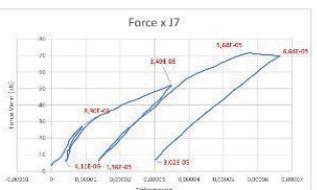
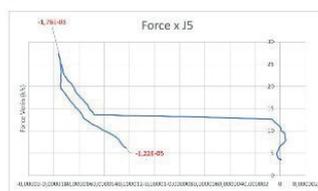
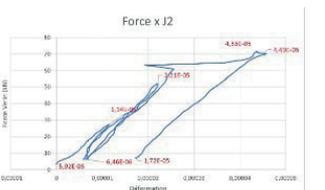
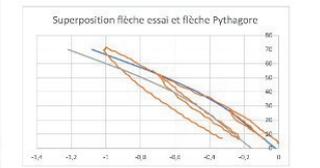
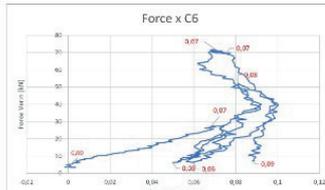
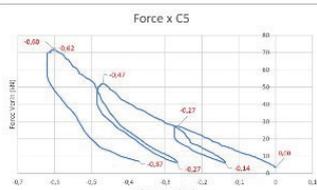
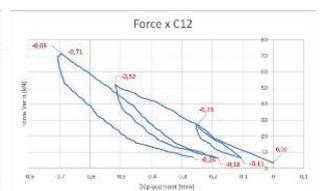
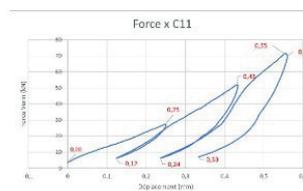
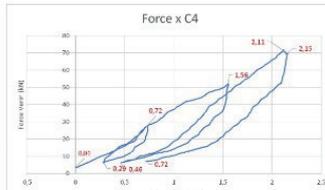
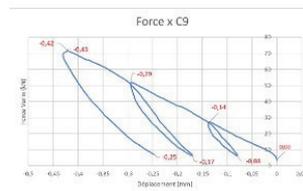
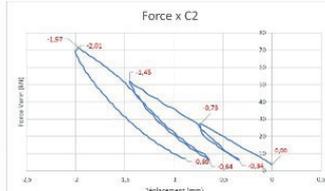
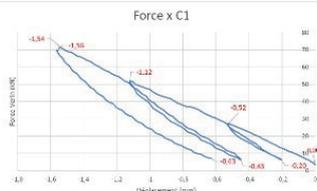
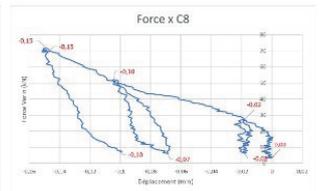
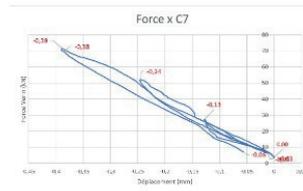
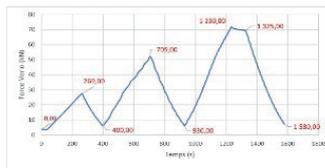
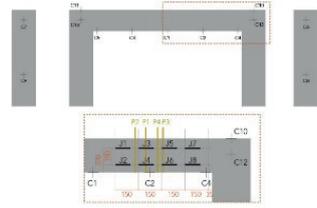
Portique 2 (clavetage C60, recouvrements droits) - Mesures de l'essai réalisé le 03/07/20



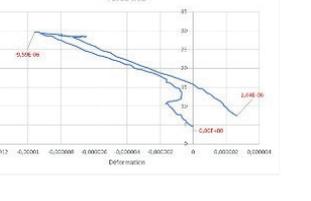
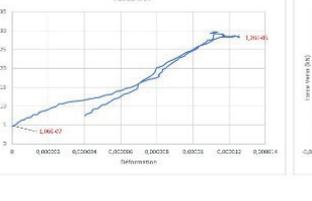
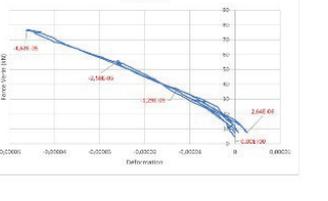
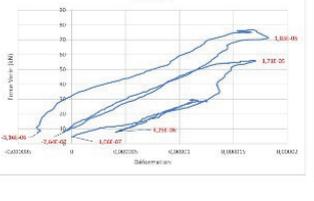
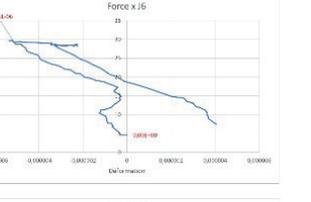
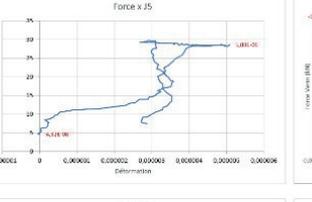
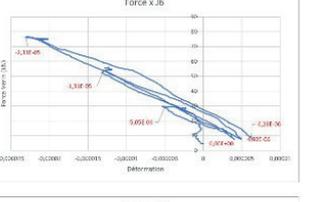
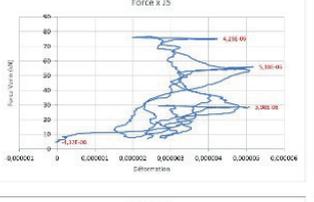
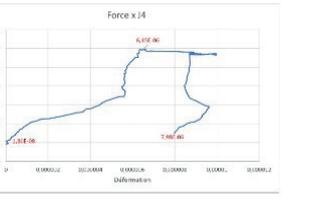
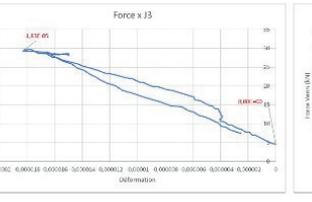
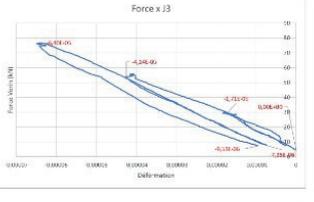
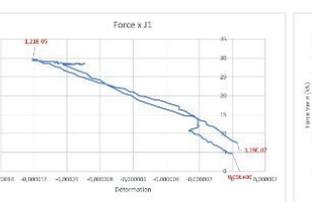
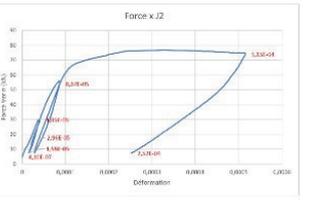
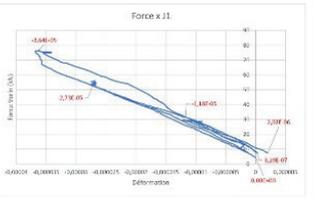
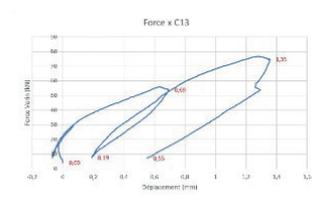
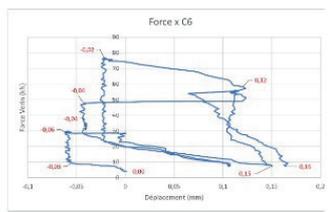
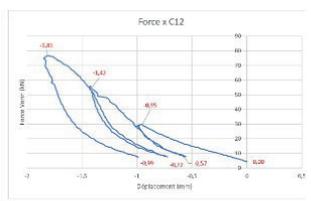
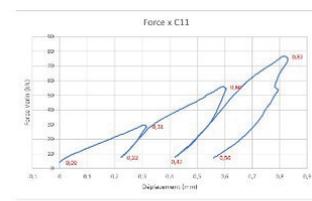
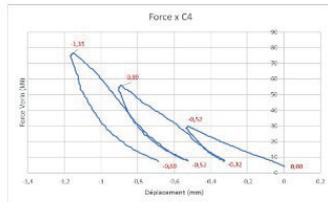
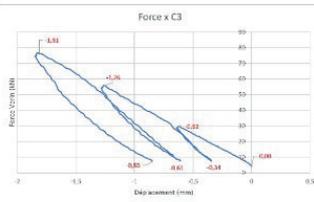
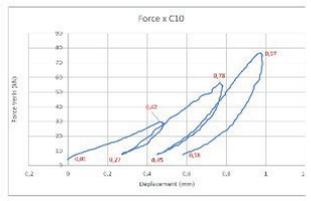
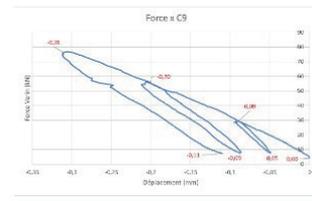
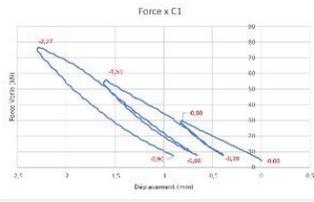
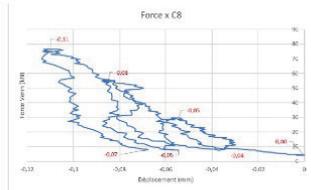
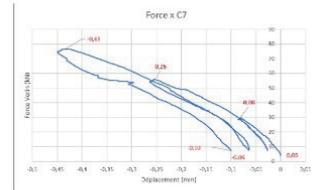
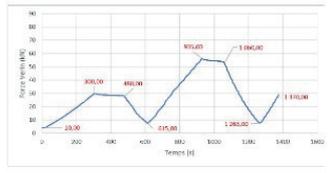
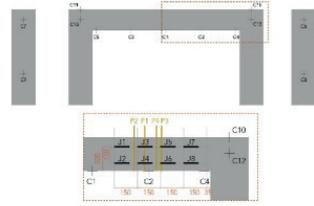
Portique 3 (clavetage C60, recouvrements crosses) - Mesures de l'essai réalisé le 07/07/20



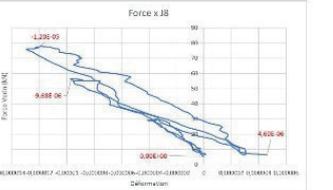
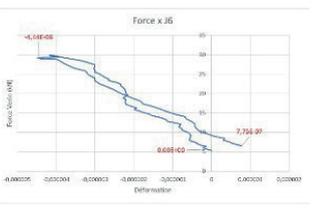
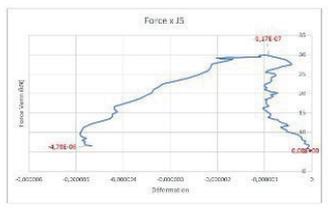
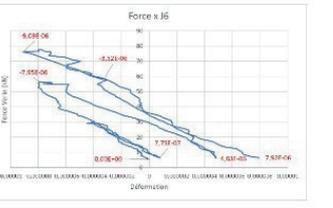
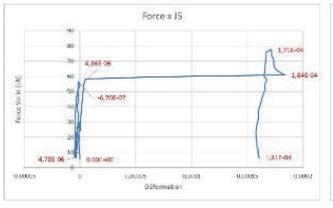
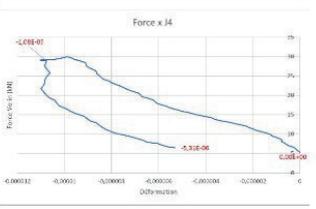
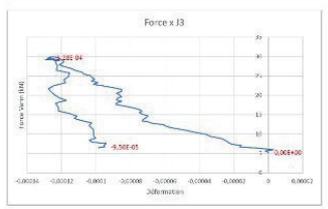
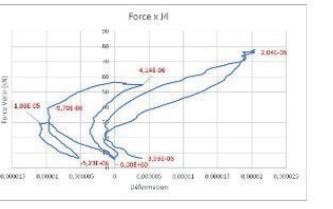
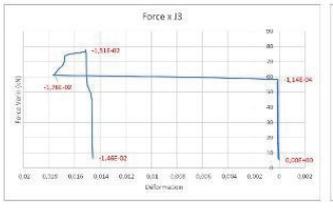
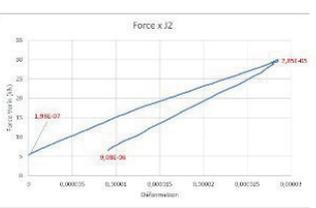
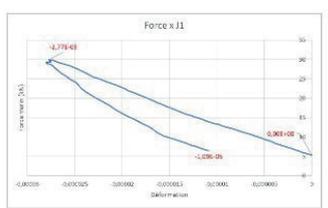
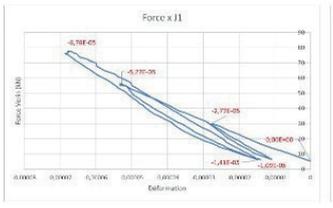
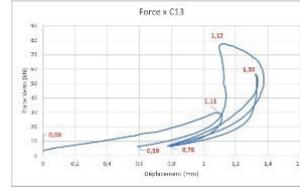
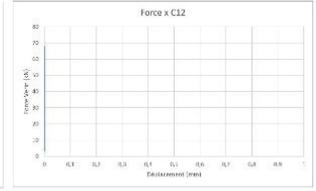
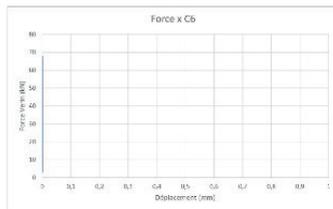
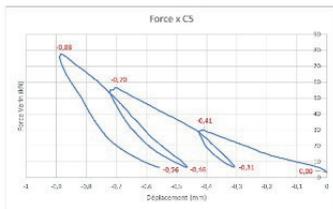
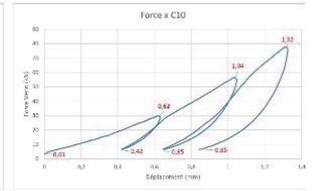
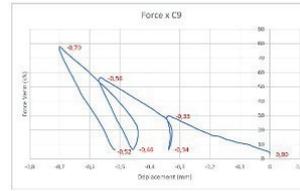
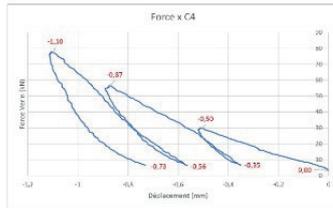
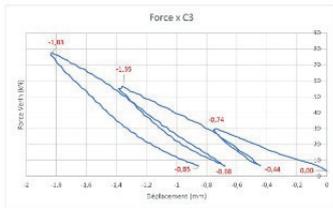
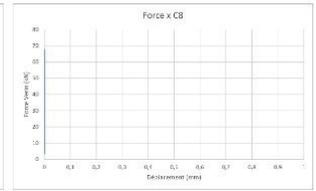
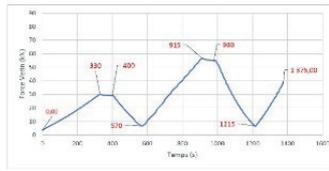
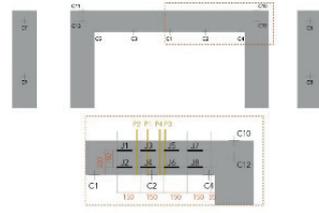
Portique 4 (clavetage C45, recouvrements croisés) - Mesures de l'essai réalisé le 10/07/20



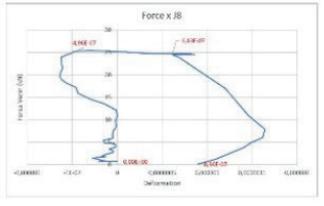
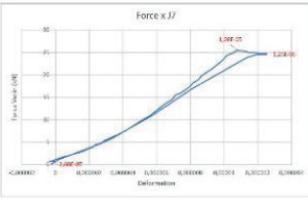
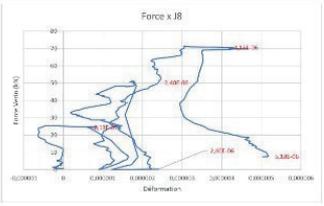
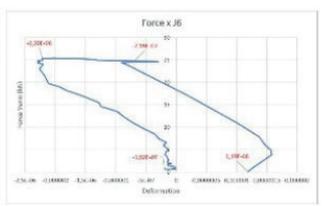
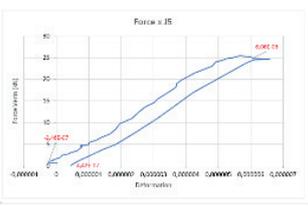
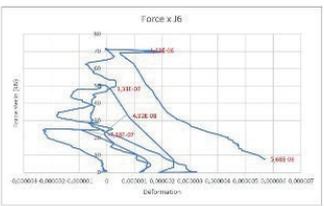
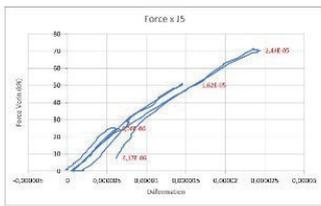
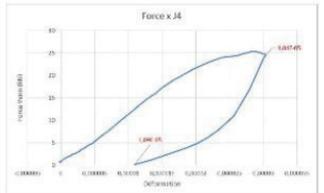
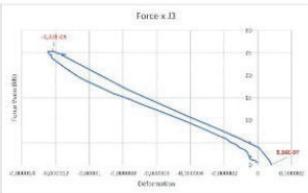
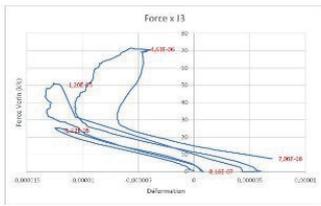
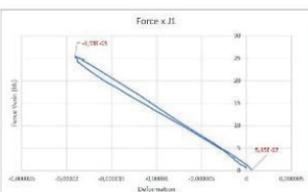
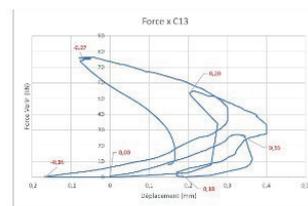
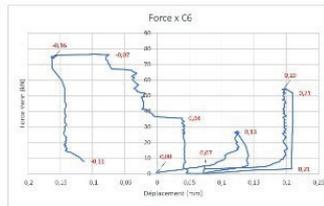
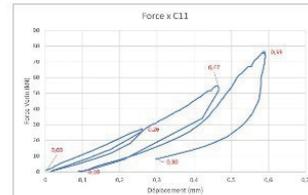
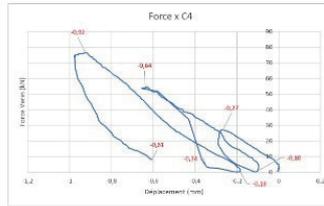
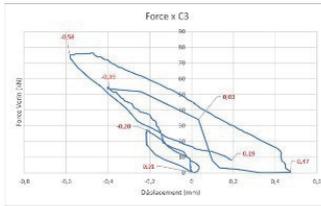
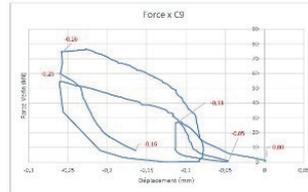
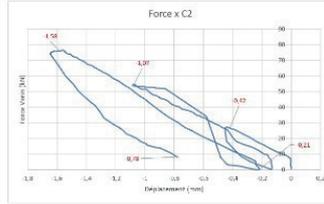
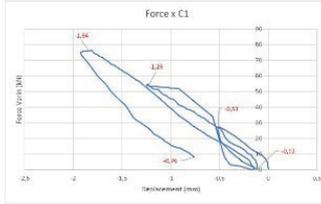
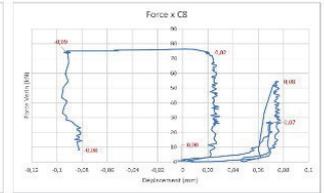
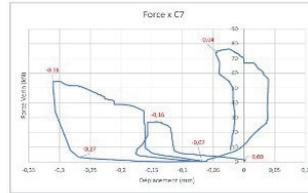
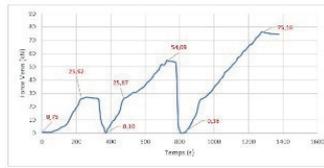
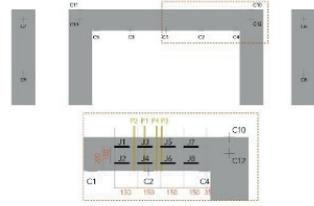
Portique 1 (clavetage C25, recouvrements crosses) - Mesures de l'essai réalisé le 14/09/20



Portique 2 (clavetage C60, recouvrements droits) - Mesures de l'essai réalisé le 07/09/20



Portique 4 (clavetage C45, recouvrements crosses) - Mesures de l'essai réalisé le 23/09/20



A.4. Chapitre 5

A.4.1. Partie 5.2.2

A.4.1.1. Questionnaire Données ACV :

Fabrication des portiques :

- Quelle est la formulation précise du béton (NF EN 206) ?
- > La formule est confidentielle et a été transmise uniquement pour permettre de réaliser l'ACV
 - Quel est le type d'acier utilisé (fyk)?
- > B500B
 - Quelle est la provenance des différents constituants du portique (acier et constituants béton, km parcourus ou nom/ adresse du fournisseur) ?
- > cadre en bobine acier RIVA Montereau / barre Arcelor dans les Yvelines
- > granulats cf bon de la Centrale (Preuilley)
 - Quelle est la distance centrale-usine ?
- > pour le C60 unibéton Bourges (30km)
- > pour les autres bétons, 200 m de l'usine
 - Quelle est l'énergie consommée pour le malaxage béton ?
- > 2 à 3 L de gasoil
 - Quelle est la quantité de coffrage et/ou étaielements utilisés (est-il réutilisé par ailleurs) ?
- > coffrage utilisé 20 ans (30 à 40 réutilisations) 2 à 4 toupies par jour pendant 51 semaines de production par an
 - Quel est le process de fabrication des coffrages ? énergie consommée?
- > 4 tonnes d'acier pour l'installation utilisée pour les portiques (20 ans de service)
 - Quantité et nature huile coffrage ?
- > huile bio mandelli (5L utilisé pour 15j jours de production)
 - Quel est le process de façonnage des armatures ? énergie consommée?
- > les armatures façonnées parcourent 4,9 km pour aller sur site coulage
- > 100 à 110 kg pour les 4 portiques fabriqués yc acier de manutention
- > facture EDF de 2000€ par mois pour l'ensemble des 2 sites (armature et coulage) pour 200 T produites (acier + béton) répartis 50% acier et 50% béton
 - Quelle est la quantité d'eau utilisée au cours de la fabrication des portiques ?
- > nettoyage de 100L pour 14m3 de béton
 - Y a-t-il eu des déchets produits (yc rejet d'eau, béton jeté) ? (nature et quantité)
- > laitance et béton résiduel > concassé chez setec Vierzon (rien à voir avec le groupe setec !) pour en faire du granulats de 2nde catégorie
 - Quelles ont été les machines utilisées pour fabriquer les portiques (temps d'utilisation, consommation) ?
- > cadreuse, coupeuse, poste à souder, pont roulant, aiguille vibrante (tout compris dans facture EDF de 2000€/mois)
 - Nombre d'heures passées par ouvrier et nombre d'ouvriers ?
- > 1 opérateur 45 min

Transport des portiques :

- Quel type de camion et sa consommation ?
- > DAF 400 environ 26L/ 100km
- > poids marchandise pour 4 portiques 5T + 2x 800 kg de poids de calage + 30kg de cadre bois

A.4.1.2. Procédés utilisés dans OpenLCA :

Le Tableau A. 7, détaille les procédés utilisés pour modéliser les portiques. Les valeurs données correspondent à un portique.

Etape de construction	Description	Procédé utilisé dans OpenLCA	Quantité	Précisions
Fabrication du béton de clavetage C25	Ciment	Ciment ATILH 42-5	14,58 kg	CEM II/A-L 42.5 R CP2 NF (Provenance Calcia, BEFFES)
	Malaxage	<i>market for diesel, burned in building machine diesel, burned in building machine cut-off, U - GLO</i>	0,7776 MJ	
	Granulat (gravillons broyés)	Granulat roche massive concassé (UNPG)	17,55 kg	4/11.2 Calc C Provenance LE SUBDRAY
	Granulat (gravillons broyés)	Granulat roche massive concassé (UNPG)	36,18 kg	11.2/22.4 Cal CLS Provenance LE SUBDRAY
	Super Plastifiant	Plastifiant (SYNAD, EFCA)	0,1539 kg	Provenance SALZKOTTEN Procédé reconstitué à partir de la Déclaration Environnementale Plastifiants Normaux de Mars 2006 du SynAd (Syndicat National des Adjuvants pour Bétons et Mortiers) et l'EFCA (European Federation of Concrete Admixtures Associations)
	Addition (filler / stabilisateur)	<i>market for inert filler inert filler cut-off, U - GLO</i>	1,62 kg	Provenance ST MAUR
	Sable	Granulat roche meuble (UNPG)	46,44 kg	0/4 All R L (provenance PREUILLY)
	Eau	<i>market for tap water tap water cut-off, U - Europe without Switzerland</i>	10,21 kg	
	Transport des constituants à la centrale	<i>transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 cut-off, U - RER</i>	4,388 t.km	Distances jusqu'à centrale VIERZON : - sable : provenance PREUILLY, 20 km - Gravillon 4/11.2 : provenance LE SUBDRAY, 37 km - Gravillon 411.2/22.4 : provenance LE SUBDRAY, 37 km - Ciment : provenance BEFFES, 84 km - addition filler : provenance ST MAUR, 71 km - plastifiant : provenance SALZKOTTEN, 855 km
	Eaux usées	<i>treatment of wastewater from concrete production, capacity 5E9l/year wastewater from concrete production cut-off, U - RoW</i>	0,0003857 m3	La donnée « market » fait une moyenne <i>treatment of wastewater</i> entre RoW et CH, ce qui est plus favorable que la donnée non « market ». Nous choisissons donc la donnée non « market », plus conservatrice
Transport centrale C30>usine	<i>transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 cut-off, U - RER</i>	0,03564 t.km	0,3km pour C25 centrale à chantier	
Fabrication du béton de clavetage C45	Ciment	Ciment ATILH 42-5	17,6 kg	CEM II/A-L 42.5 R CP2 NF (Provenance Calcia, BEFFES)
	Malaxage	<i>market for diesel, burned in building machine diesel, burned in building machine cut-off, U - GLO</i>	0,6336 MJ	
	Granulat (gravillons broyés)	Granulat roche massive concassé (UNPG)	13,64 kg	4/11.2 Calc C Provenance LE SUBDRAY
	Granulat (gravillons broyés)	Granulat roche massive concassé (UNPG)	28,16 kg	11.2/22.4 Cal CLS Provenance LE SUBDRAY
	Super Plastifiant	Plastifiant (SYNAD, EFCA)	0,180 kg	Provenance SALZKOTTEN Procédé reconstitué à partir de la Déclaration Environnementale Plastifiants Normaux de Mars 2006 du SynAd (Syndicat National des Adjuvants pour Bétons et Mortiers) et l'EFCA (European Federation of Concrete Admixtures Associations)
	Addition (filler / stabilisateur)	<i>market for inert filler inert filler cut-off, U - GLO</i>	1,32 kg	Provenance ST MAUR
	Sable	Granulat roche meuble (UNPG)	34,76 kg	0/4 All R L (provenance PREUILLY)
	Eau	<i>market for tap water tap water cut-off, U - Europe without Switzerland</i>	8,316 kg	
	Transport des constituants à la centrale	<i>transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 cut-off, U - RER</i>	3,968 t.km	Distances jusqu'à centrale VIERZON : - sable : provenance PREUILLY, 20 km - Gravillon 4/11.2 : provenance LE SUBDRAY, 37 km - Gravillon 411.2/22.4 : provenance LE SUBDRAY, 37 km

				- Ciment : provenance BEFFES, 84 km - addition filler : provenance ST MAUR, 71 km - plastifiant : provenance SALZKOTTEN, 855 km
	Eaux usées	<i>treatment of wastewater from concrete production, capacity 5E9l/year wastewater from concrete production cut-off, U - RoW</i>	0,003143 m3	La donnée « market » fait une moyenne <i>treatment of wastewater</i> entre RoW et CH, ce qui est plus favorable que la donnée non « market ». Nous choisissons donc la donnée non « market », plus conservatrice
	Transport centrale C45>usine	<i>transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 cut-off, U – RER</i>	0,02904 t.km	0,3km pour C45 centrale à chantier
Fabrication du béton courant C60 (pour le portique 1)	Ciment	Ciment ATILH 52-5	177,6 kg	CEM I 52.5 N CE CP2 NF (Provenance Calcia, BEFFES)
	Malaxage	<i>market for diesel, burned in building machine diesel, burned in building machine cut-off, U - GLO</i>	5,558 MJ	
	Granulat (gravillons broyés)	Granulat roche massive concassé (UNPG)	191,8 kg	4/11.2 Calc C Provenance LE SUBDRAY
	Granulat (gravillons broyés)	Granulat roche massive concassé (UNPG)	221,4 kg	11.2/22.4 Cal CLS Provenance LE SUBDRAY
	Super Plastifiant	Plastifiant (SYNAD, EFCA)	2,443 kg	Provenance SALZKOTTEN Procédé reconstitué à partir de la Déclaration Environnementale Plastifiants Normaux de Mars 2006 du SynAd (Syndicat National des Adjuvants pour Bétons et Mortiers) et l'EFCA (European Federation of Concrete Admixtures Associations)
	Addition (filler / stabilisateur)	<i>market for inert filler inert filler cut-off, U – GLO</i>	11,58 kg	Provenance ST MAUR
	Sable	Granulat roche meuble (UNPG)	324,6 kg	0/4 All R L (provenance PREUILLY)
	Fumées de silice	<i>market for silica fume, densified silica fume, densified cut-off, U - GLO</i>	7,72 kg	Provenance CHAMBERY
	Eau	<i>market for tap water tap water cut-off, U - Europe without Switzerland</i>	73,73 kg	
	Transport des constituants à la centrale	<i>transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 cut-off, U – RER</i>	43,12 t.km	Distances jusqu'à centrale VIERZON : - sable : provenance PREUILLY, 20 km - Gravillon 4/11.2 : provenance LE SUBDRAY, 37 km - Gravillon 411.2/22.4 : provenance LE SUBDRAY, 37 km - Ciment : provenance BEFFES, 84 km - addition filler : provenance ST MAUR, 71 km - plastifiant : provenance SALZKOTTEN, 855 km - fumée de silice : provenance CHAMBERY, 455 km
	Eaux usées	<i>treatment of wastewater from concrete production, capacity 5E9l/year wastewater from concrete production cut-off, U - RoW</i>	0,002757 m3	La donnée « market » fait une moyenne <i>treatment of wastewater</i> entre RoW et CH, ce qui est plus favorable que la donnée non « market ». Nous choisissons donc la donnée non « market », plus conservatrice
	Transport centrale C60>usine	<i>transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 cut-off, U – RER</i>	25,48 t.km	30 km pour le C60 centrale à chantier
Fabrication des armatures (en rouleau et non façonnées)	Production-Laminage	<i>steel production, electric, low-alloyed steel, low-alloyed cut-off, U – RER</i> + <i>steel production, converter, unalloyed steel, unalloyed cut-off, U - RER</i> + <i>hot rolling, steel hot rolling, steel cut-off, U – RER</i>	67,7 à 80,7 kg (selon portique)	Les armatures sont produites à 98% par la filière électrique et 2% filière fonte. L'acier d'armature n'est pas allié. L'acier est laminé à chaud. On pondérera donc à 98% le procédé « <i>steel production, electric, low-alloyed steel, low-alloyed cut-off, U – RER</i> » et à 2% le procédé « <i>steel production, converter, unalloyed steel, unalloyed cut-off, U – RER</i> ».
	Transport de l'usine aciériste à l'usine de façonnage	<i>transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 cut-off, U – RER</i>	13,54 à 16,14 t.km	200 km pour livrer les bobines à l'usine de façonnage de VIERZON

Transport des armatures façonnées	Transport usine armature>usine portique	<i>transport, freight, light commercial vehicle transport, freight, light commercial vehicle cut-off, U – Europe without Switzerland</i>	0,3317 à 0,3954 t.km	4,9 km pour livrer les cadres façonnés à l'usine préfa béton de VIERZON
Façonnage armatures, vibrage béton, machines usine	Consommation des machines	<i>market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage cut-off, U - France</i>	211,6 MJ	Consommation mensuelle totale ramenée proportionnellement à la quantité d'acier et de béton d'un portique
Banc de coffrage du béton	Prise en compte de l'amortissement (acier laminé)	<i>steel production, electric, low-alloyed steel, low-alloyed cut-off, U – RER</i> + <i>steel production, converter, low-alloyed steel, low-alloyed cut-off, U</i> + <i>hot rolling, steel hot rolling, steel cut-off, U – RER</i>	0,261 kg	Quantité d'acier du banc ramenée proportionnellement à la quantité de béton coulé, acier allié produit à 50% par la filière fonte, et à 50% par la filière électrique
Cadre en bois pour le transport des portiques	Bois brut	<i>beam, softwood, raw, kiln drying to u=20% sawnwood, beam, softwood, raw, dried (u=20%) cut-off, U- RoW</i>	0,1549 m3	Pin/ sapin séché au four 20% humidité La donnée « market » n'est pas prise ici car elle fait une moyenne séchage air et four, avec un transport monde, alors que notre bois est séché au four localement.
	Transport	<i>transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 cut-off, U – RER</i>	3,694 t.km	45 km entre scierie et usine VIERZON
	Sciage, fabrication du cadre	<i>sawing, softwood saw dust, loose, wet, measured as dry mass cut-off, U-RoW</i>	0,5 kg	Préparation du cadre en bois à VIERZON
Transport du portique usine > Navier	Transport du portique complet fabriqué	<i>transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 cut-off, U – RER</i>	237,3 t.km	226 km pour livrer les portiques de VIERZON au labo Navier avec un camion DAF PTAC 19T (y compris accessoires manutention)
Hydrodémolition à la lance	Eau	<i>market for tap water tap water cut-off, U - Europe without Switzerland</i>	516,6 kg à 781,2 kg (selon les portiques)	
	Eaux usées	<i>treatment of wastewater from concrete production, capacity 5E9l/year wastewater from concrete production cut-off, U - RoW</i>	0,52 à 0,78 m3 (selon les portiques)	La donnée « market » fait une moyenne <i>treatment of wastewater</i> entre RoW et CH, ce qui est plus favorable que la donnée non « market ». Nous choisissons donc la donnée non « market », plus conservatrice
	Energie nécessaire pour l'hydrodémolition	<i>market for electricity, medium voltage electricity, medium voltage cut-off, U - France</i>	165,3 à 250,0 MJ (selon les portiques)	Avec 1 kWh = 3,6 MJ Rendement de 0,0119 m³/min
Traitement pour un portique en fin de vie	Valorisation cadre en bois	<i>treatment of waste wood, post-consumer, sorting and shredding wood chips, from post-consumer wood, measured as dry mass cut-off, U RoW</i>	26,18 kg	Ce processus comprend le transport des déchets urbains et du bois de démolition vers l'installation de broyage (50 km), l'infrastructure, le broyage du bois en copeaux dans la scierie, la consommation d'eau et l'élimination des effluents et des déchets issus du triage.
	Recyclage béton	<i>treatment of waste reinforced concrete, recycling waste reinforced concrete cut-off, U – Europe without Switzerland</i>	1035,7 kg	Procédé adapté. Les déchets contiennent 0,97 kg de matière inerte et 0,03 kg d'acier. La densité des déchets est de 2300 kg/m³. Sont incluses : l'énergie pour le démantèlement, les émissions de particules provenant du démantèlement et de la manutention. Cet ensemble de données a été copié à partir d'un ensemble de données original couvrant la Suisse avec une incertitude ajustée en conséquence.

Tableau A. 7 : Procédés Ecoinvent utilisés

A.4.2. Partie 5.4.5.

Ci-après, nous présentons le calcul détaillé de l'indice de réemployabilité obtenu à la Figure V.46 à partir des données du portique réemployable et du portique neuf non réemployable. Dans les grilles de notation, les cases bleues correspondent au score du portique réemployable et les cases orangées correspondent au score du portique neuf non réemployable.

A.4.2.1. Calcul de l'efficacité matière $Eff_{matière}$:

Portique réemployable	Portique neuf, non réemployable
- Masse matière réemployée, $M_{ree} = 0,386 * 2200 + 75,6 = 924,8$ kg	- Masse matière réemployée, $M_{ree} = 0$
- Masse de déchets, $M_{reb} = 0,054 * 2200 = 118,8$ kg	- Masse de déchets, $M_{reb} = 0,44 * 2200 + 67,7 = 1035,7$ kg
- Taux de valorisation réemploi, $\frac{M_{ree}}{(M_{reb} + M_{ree})} = \frac{924,8}{(118,8 + 924,8)} = 0,89$	- Taux de valorisation réemploi, $\frac{M_{ree}}{(M_{reb} + M_{ree})} = 0$
- Masse de matériaux secondaires réemployés en début de cycle, $M_{sec,ree} = 0,386 * 2200 + 75,6 = 924,8$ kg	- Masse de matériaux secondaires réemployés en début de cycle, $M_{sec,ree} = 0$
- Masse des matériaux primaires utilisés en début de cycle, $M_{pri} = 0,054 * 2200 = 118,8$ kg	- Masse des matériaux primaires utilisés en début de cycle, $M_{pri} = 0$
- Taux de réincorporation, $\frac{M_{sec,ree}}{(M_{pri} + M_{sec,ree})} = \frac{924,8}{(118,8 + 924,8)} = 0,89$	- Taux de réincorporation, $\frac{M_{sec,ree}}{(M_{pri} + M_{sec,ree})} = 0$
- Masse de matériaux vierges, $V = 0,054 * 2200 = 118,8$ kg	- Masse de matériaux vierges, $V = 0,44 * 2200 + 67,7 = 1035,7$ kg
- Masse totale de matériaux éliminés en décharge ou incinérés, $W = 0,054 * 2200 = 118,8$ kg	- Masse totale de matériaux éliminés en décharge ou incinérés, $W = 0,44 * 2200 + 67,7 = 1035,7$ kg
- Matériaux réemployés en incorpo, $R_f = 0,386 * 2200 + 75,6 = 924,8$ kg	- Matériaux réemployés en incorpo, $R_f = 0$
- Matériaux réemployables en dépose, $R_c = 0,386 * 2200 + 75,6 = 924,8$ kg	- Matériaux réemployables en dépose, $R_c = 0$
- Masse du produit, $M = 924,8 + 118,8 = 1043,6$ kg	- Masse du produit, $M = 0,44 * 2200 + 67,7 = 1035,7$ kg
- $LFI = \frac{V+W}{2M + \frac{R_f + R_c}{2}} = \frac{118,8 + 118,8}{2 \times 1043,6 + \frac{924,8 + 924,8}{2}} = 0,11$	- $LFI = \frac{V+W}{2M + \frac{R_f + R_c}{2}} = \frac{1035,7 + 1035,7}{2 \times 1035,7 + \frac{0}{2}} = 1$
- Facteur d'utilité, $X = \frac{L}{L_{av}} \times \frac{U}{U_{av}} = \frac{200}{50} \times \frac{4}{1} = 16$ avec L, durée d'usage réel ; L_{av} durée d'usage théorique du fabricant ; U, nombre d'usages réels ; U_{av} nombre d'usages théoriques du fabricant.	- Facteur d'utilité, $X = \frac{L}{L_{av}} \times \frac{U}{U_{av}} = \frac{50}{50} \times \frac{1}{1} = 1$ avec L, durée d'usage réel ; L_{av} durée d'usage théorique du fabricant ; U, nombre d'usages réels ; U_{av} nombre d'usages théoriques du fabricant.
- $F(X) = \frac{0,9}{X} = \frac{0,9}{16} = 0,056$	- $F(X) = \frac{0,9}{X} = \frac{0,9}{1} = 0,9$
- Material Circularity Indicator, $MCI = 1 - LFI \times F(X) = 1 - 0,11 \times 0,056 = 0,99$	- Material Circularity Indicator, $MCI = 1 - LFI \times F(X) = 1 - 1 \times 0,9 = 0,1$

A.4.2.2. Calcul du facteur de déconstructibilité F_{Dec} :

	Indice de dommages de séparation	Indice de temps de démontage	Indice d'effort de désassemblage
0.00	Dommages très importants - la pièce est endommagée, ce qui la rend impropre au recyclage	Composants inséparables	L'ensemble ne peut pas être démonté
0.25	Dommages importants - la pièce doit être davantage triée et préparée avant d'être recyclée	Plus d'une minute par composant	Nécessité d'engins de déconstruction
0.50	Non réutilisable - la pièce peut être facilement recyclée mais pas réutilisée	40-60 secondes par composant	Outils électriques à main
0.75	Dommages mineurs - la pièce nécessite quelques réparations mais peut encore être entièrement réutilisée	10-40 secondes par composant	Outils (non électriques) à main
1.00	Entièrement réutilisable - la pièce peut être séparée en parfait état	Moins de 10 secondes par composant	Démontage manuel, le montage peut être démonté sans outils

Score	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00
Intégrité matière : perte de qualité, déclassement	Upcycling	Détournement en déco	Réutilisation en détournement pour second œuvre	Réutilisation en structure de capacité restreinte	Réutilisation en structure de même capacité
Amplitude de réemploi	Réutilisation des composants sur un nouveau site dans un but différent	Réutilisation des composants sur un nouveau site dans le même but	Réutilisation du système sur un nouveau site dans un but différent	Réutilisation du système sur un nouveau site dans le même but	Réutilisation adaptative in situ
Opérations de caractérisation	Tests destructifs en labo	Tests destructifs in situ	Tests non destructifs en labo	Tests non destructifs in situ	Visuelles
Étape de stockage	Stockage long en lieu de zone tendue	Stockage court en lieu de zone tendue	Temps de stockage long, en friche	Temps de stockage court, en friche	Pas de stockage des matériaux, flux tendu
Chute, taux de perte en masse après reconditionnement	>50%	25% à 50%	15% à 25%	5% à 15%	0 à 5%
Type de connexion	Connexions chimiques dures	Connexions chimiques souples	Connexions directes entre deux composants préfabriqués	Connexions directes avec des dispositifs de fixations supplémentaires	Connexions indirectes avec dispositifs de fixations supplémentaires
Taille des éléments à manipuler	Procédure chantier de déconstruction	Engin de levage lourd	Engin de levage léger	Déplaçable à la main à plusieurs	Déplaçable à la main seul

Réplicabilité de l'opération	Opération très spécifique	Opération lourde pouvant être répétée	Opération moyenne pouvant être répétée	Opération légère pouvant être répétée	Opération classique, facilement réplicable
------------------------------	---------------------------	---------------------------------------	--	---------------------------------------	--

Portique réemployable

- $\frac{n_{\text{éléments rép.}} \times n_{\text{max éléments id.}}}{n_{\text{éléments}}} = \frac{1 \times 1}{1} = 1$
- $\frac{n_{\text{éléments réversibles}}}{n_{\text{éléments}}} = \frac{1}{1} = 1$
- Désassemblage : $\frac{\sum_{i=1}^n i}{n} = \frac{0,75+0,5+0,25}{3} = 0,5$
- Déconstructibilité : $\frac{\sum_{i=1}^n i}{n} = \frac{5 \times 1 + 0,75 + 2 \times 0,25}{8} = 0,78$

Portique neuf, non réemployable

- $\frac{n_{\text{éléments rép.}} \times n_{\text{max éléments id.}}}{n_{\text{éléments}}} = \frac{1 \times 1}{1} = 1$
- $\frac{n_{\text{éléments réversibles}}}{n_{\text{éléments}}} = \frac{0}{1} = 0$
- Déconstructibilité : $\frac{\sum_{i=1}^n i}{n} = \frac{0+0+0,25+0,25}{4} = 0,125$

A.4.2.3. Calcul des performances résiduelles P_{Res} :

Score	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00
Modélisation BIM (Mod)	LOD/LOI 300	LOD/LOI 400	LOD/LOI 500	LOD/LOI 600	LOD/LOI 700
Instrumentation (Ins)	Marquages/gravures sommaires	Marquages/gravures détaillés	Marquages + Enregistrement sur base de données	Puces RFID + Marquages + Enregistrement sur base de données	Capteurs + Puces RFID + Marquages + Enregistrement sur base de données

Portique réemployable

- Performances requises par l'emploi du produit dans la fonction du cycle $n + 1$, $P_{req} = 1$
- Performances effectives du produit de construction à l'issue du cycle de vie, $P_{eff} = 1$
- Coefficient de transformation, supérieur ou égal à 1, $C_t = 1,43$
- $P_{2RV} = \frac{P_{req}}{P_{eff} C_t} = \frac{1}{1 \times 1,43} = 0,7$
- Degré de modélisation, $Mod = 1$
- Degré d'instrumentation, $Ins = 0,75$
- Facteur de traçabilité, $\frac{Mod+Ins}{2} = \frac{1+0,75}{2} = 0,875$

Portique neuf, non réemployable

- Degré de modélisation, $Mod = 0,5$
- Degré d'instrumentation, $Ins = 0$
- Facteur de traçabilité, $\frac{Mod+Ins}{2} = \frac{0,5+0}{2} = 0,25$

A.4.2.4. Calcul de l'indice de réemployabilité :

Portique réemployable

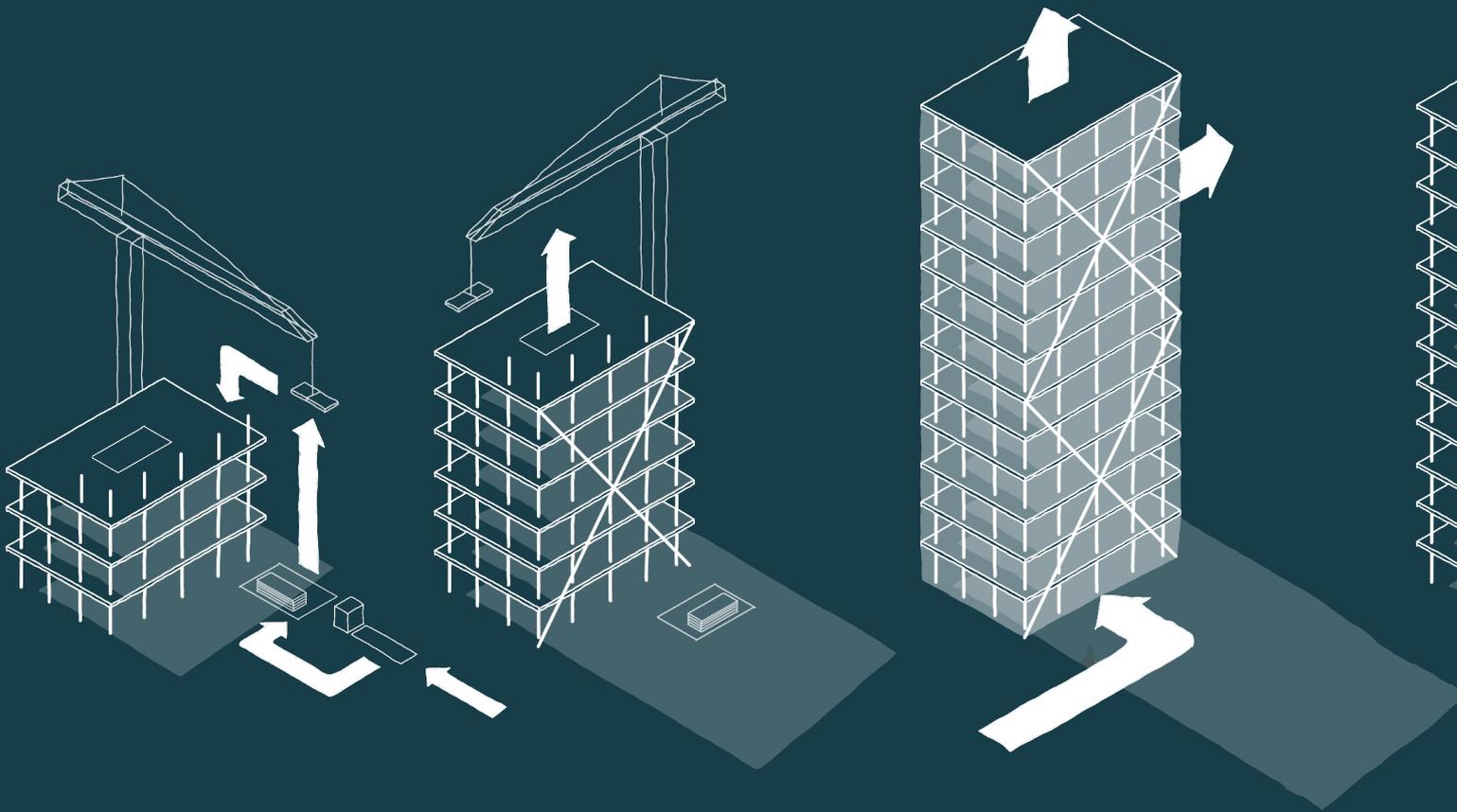
$$- \frac{Eff_{\text{matière}} + F_{Dec} + P_{Res} + I_{terr} + I_{soc}}{5} = \frac{\frac{0,89+0,89+0,99}{3} + \frac{1+1+0,5+0,78}{4} + \frac{0,7+0,875}{2} + 0+0}{3} = 0,843$$

Portique neuf, non réemployable

$$- \frac{Eff_{\text{matière}} + F_{Dec} + P_{Res} + I_{terr} + I_{soc}}{5} = \frac{\frac{0+0+0,1}{3} + \frac{1+0+0,125}{3} + 0,25+0+0}{3} = 0,219$$

A.5. Articles et communications

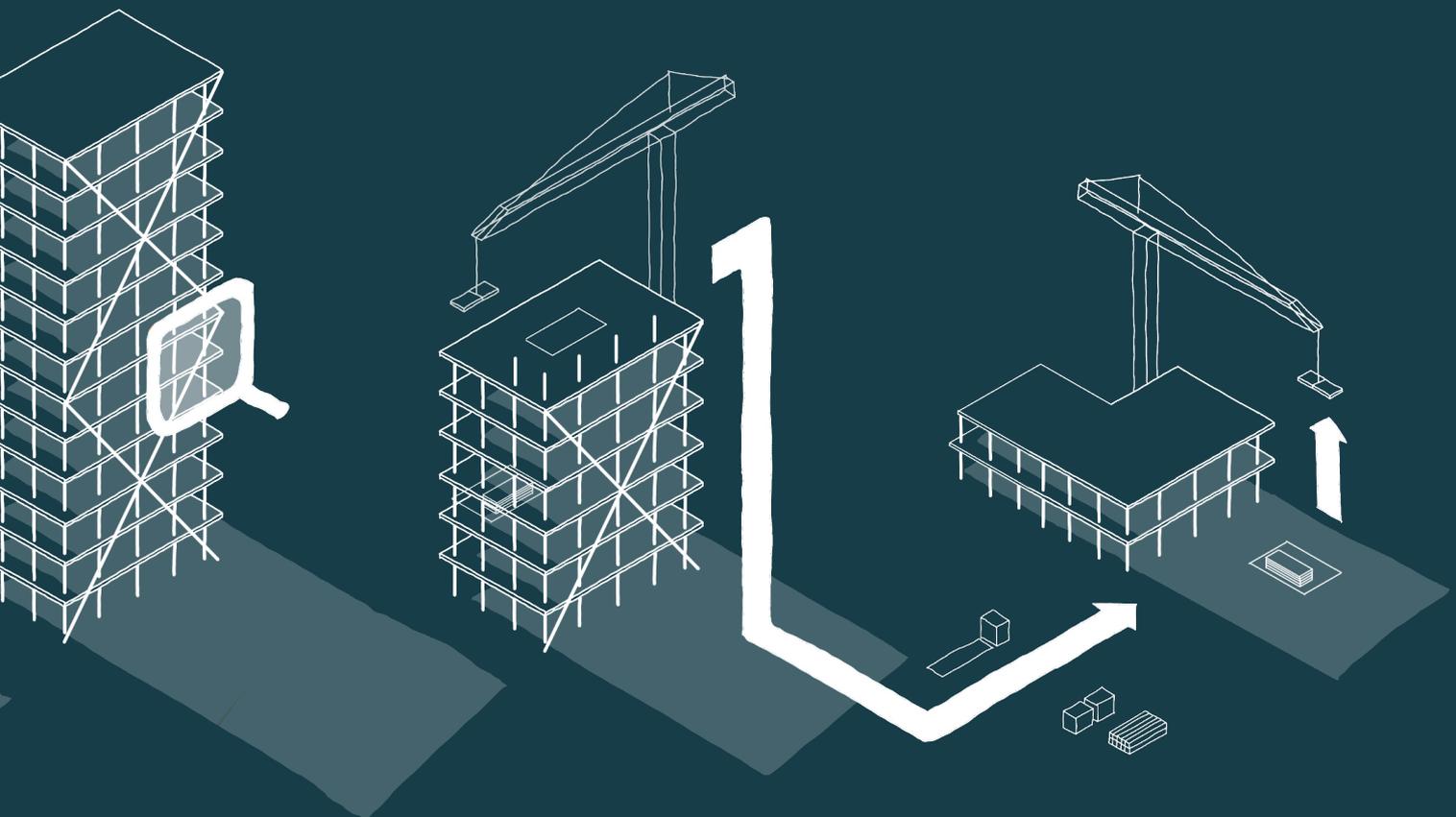
- «A BIM-Based Framework and Databank for Reusing Load-Bearing Structural Elements», I.Bertin, R. Mesnil, J.-M.Jaeger, A.Feraille and R.Le Roy, *Sustainability*, MDPI, 2020, 12 (8), pp.3147; <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/8/3147>, doi : 10.3390/su12083147
- ECO Design 2019, Yokohama : «Design for Reuse (DfReu) applied to buildings; anticipate disassembly for the End-of-Life (EoL), in order to preserve resources», I Bertin, A Feraille, B Laratte (I2M ENSAM), R Le Roy, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02318320v1>, doi : 10.6084/m9.figshare.12034077
- SBE 2019, Graz : «Construction, deconstruction, reuse of the structural elements: the circular economy to reach zero carbon», I Bertin, F Lebrun, N Braham and R Le Roy, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02318320>,doi : 10.1088/1755-1315/323/1/012020
- 2019, GC 19 de l'AFGC : Article aux journées GC de l'AFGC, «Construction, déconstruction, réemploi de la structure : le numérique au service de l'économie circulaire», Ingrid Bertin, (Jean-Marc Jaeger, Robert Le Roy) <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02330338>, doi : 10.6084/m9.figshare.12034191
- 2018, Annales du BTP : QUAND LES IMMEUBLES DE GRANDE HAUTEUR SONT EN BOIS / WHEN HIGH RISE BUILDINGS ARE MADE OF WOOD, Jean-Marc Jaeger, Ingrid Bertin, Jordi Cornudella, Robert Le Roy <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02330314>, doi : 10.6084/m9.figshare.12034272
- 26 octobre 2018, Le Moniteur : Lyon goûte à la sobriété low tech, Ingrid Bertin, Denis Seimbille, Bilge Aksoy
- 2017, GC 17 de l'AFGC : Article aux journées GC, «Quand les immeubles de grande hauteur sont en bois», Jean-Marc Jaeger, Ingrid Bertin, Jordi Cornudella, Robert Le Roy
- 2017, ADIVBois : Vade-mecum des Immeubles à Vivre Bois. Partie 2 - Etat de l'art-Ingénierie-Conception Technique, Structure (ouvrage collectif) <http://www.adivbois.org/wp-content/uploads/Vademecum-27022017.pdf>



Approvisionnement /
Construction

Construction

Vie du bâtiment



Diagnostic ressources

Collecte / Préparation /
Stockage / Construction

Résumé :

Dans un contexte de pression environnementale où le secteur de la construction a le plus grand impact, le réemploi des éléments porteurs est le plus prometteur pour éviter la production de déchets, préserver les ressources naturelles et réduire les émissions de GES.

Cette thèse porte sur trois principaux axes :

1. L'amélioration de la conception structurale en définissant le DfReu (Design for Reuse) afin d'anticiper la mise en œuvre d'éléments porteurs démontables et réemployables
2. le développement d'une méthodologie pour la mise en place d'une traçabilité renforcée autour d'une banque de matériaux et du BIM afin de disposer de toutes les caractéristiques en fin de vie et de faciliter le réemploi sur le plan technique mais aussi assurantiel
3. L'identification des paramètres influençant les impacts environnementaux propres au réemploi, permettant une meilleure compréhension des conséquences de ce processus et de sa prise en compte lors de la conception, appuyant l'aide à la décision.

Une expérimentation basée sur des portiques démonstrateurs en béton armé a permis de corroborer ces trois axes en générant des données manquantes dans la littérature.

Mots clés : réemploi des matériaux ; réversibilité ; déconstruction ; Analyse de cycle de vie (ACV) ; économie circulaire dans le bâtiment ; building information modeling (BIM) ; traçabilité ; design for reuse (DfReu) ; structure ; construction durable ; énergie grise ; gaz à effet de serre (GES) ; immeubles de grande hauteur (IGH).

Abstract :

In a context of strong environmental pressure in which the construction sector has the greatest impact, the reuse of the load-bearing elements is the most promising as it significantly avoids waste production, preserves natural resources and reduces greenhouse gas emissions by cutting down on embodied energy.

This thesis covers three main areas:

1. Improvement of structural design by defining the DfReu (Design for Reuse) in order to anticipate the implementation of load-bearing elements that can be dismantled and reused.
2. Development of a methodology for the implementation of a reinforced and long-lasting traceability centered on a materials bank with the use of BIM in order to secure all the characteristics at the end of life and to facilitate reuse technically but also on an insurance level.
3. Identification of the parameters influencing the environmental impacts of reuse, allowing a better understanding of the consequences of this process and its consideration in design, giving support to decision making.

An experiment based on reinforced concrete demonstration portal frames has corroborated these three lines of research by generating missing data in literature.

Keywords: reuse of materials; reversibility; deconstruction; life cycle assessment (LCA); building circular economy; building information modeling (BIM); traceability; design for reuse (DfReu); sustainable construction; embodied energy; greenhouse gases (GHGs) ; high-rise buildings (HRB).