



HAL
open science

Le réemploi appliqué au domaine de la construction : principe, impact environnemental et mesure dans le cadre d'une économie circulaire

Ambroise Lachat

► To cite this version:

Ambroise Lachat. Le réemploi appliqué au domaine de la construction : principe, impact environnemental et mesure dans le cadre d'une économie circulaire. Construction durable. École des Ponts ParisTech, 2022. Français. NNT : 2022ENPC0009 . tel-04011357

HAL Id: tel-04011357

<https://pastel.hal.science/tel-04011357>

Submitted on 2 Mar 2023

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.

Le Réemploi Appliqué au Domaine de la Construction : Principe, Impact Environnemental et Mesure dans le Cadre d'une Économie Circulaire

École doctorale SIE (Sciences, Ingénierie et Environnement) N° 531

Sciences de l'ingénieur

Thèse préparée au sein du laboratoire Navier, UMR 8205
équipe de recherche MSA (Matériaux et Structures Architecturées)

Manuscrit final, thèse soutenue le 13 Décembre 2022, par
Ambroise LCHAT

Composition du jury :

Jean-Claude, MOREL Directeur de recherche, ENTPE	<i>Président</i>
Natacha GONDRAN Professeure, Mines Saint-Etienne	<i>Rapporteur</i>
Guillaume HABERT Professeur, ETH Zurich	<i>Rapporteur</i>
Bruno PEUPORTIER Directeur de recherche, Mines ParisTech	<i>Examineur</i>
Anne VENTURA Directrice de recherche, Université Gustave Eiffel	<i>Examineur</i>
Tiffany DESBOIS ITPE Docteur, Cerema	<i>Encadrant</i>
Anne-Sophie COLAS IDTPE HDR, Université Gustave Eiffel	<i>Co-Directeur de thèse</i>
Adélaïde FERAILLE IDTPE HDR, Ecole des Ponts ParisTech	<i>Directeur de thèse</i>
Maxime TROCME Docteur, VINCI	<i>Invité</i>

« C'est donc ça une maison, c'est la décharge mise en ordre »

Le Chien (Cabot-Caboche, Daniel Pennac)

REMERCIEMENTS

Étape finale de cette aventure de thèse et pourtant premier texte de ce manuscrit, cela montre à quel point un travail ne se fait jamais seul.

Je souhaite remercier tout d'abord mon jury : mes deux rapporteurs Natacha Gondran et Guillaume Habert, mon président Jean-Claude Morel ainsi que mes examinateurs Bruno Peuportier, Anne Ventura et Maxime Trocmé pour avoir accepté de juger cette thèse mais surtout pour leurs discussions et leurs remarques constructives.

Je souhaite remercier également le lab Recherche Environnement pour son financement et notamment tous ses collaborateurs pour leurs échanges et pour m'avoir donné l'opportunité de présenter ma recherche.

Je remercie fortement mon encadrement Anne-Sophie, Tiffany et Adélaïde pour leur encadrement exemplaire, leur disponibilité exemplaire et leur aide (exemplaire) tout au long de ces trois ans. Au plaisir de collaborer de nouveau !

Merci au personnel du laboratoire Navier. Merci à Marie-Françoise qui est toujours là pour nous dépatouiller avec le Gloubi Boulga administratif. Merci à l'équipe technique : Christophe, Hocine et Gilles pour leur aide à la confection et la réalisation des essais. Merci aux permanents pour leur accueil. Merci notamment à Myriam et Charlotte pour vos discussions à l'occasion, entre autre, du groupe ACV. Merci à tous les doctorant(e)s du labo (pour certains maintenant docteurs).

Je souhaite encore remercier les intervenants du Cerema, de l'université Gustave Eiffel et de l'ENTPE pour les essais complémentaires et leur accueil de quelques heures à quelques jours au sein de leur structure.

Bien sûr, un grand merci à ma famille pour m'avoir emmené jusqu'ici. Maman, papa et mes sœurs, modèles de ma vie ! Merci à Mathilde pour ces cinq années, en souhaitant que cela dure encore au moins l'équivalent de la durée de séjour du gaz carbonique dans l'atmosphère.

Enfin, je remercie cette Terre qui m'accueille, me nourrit et m'émerveille mais dont on ne prend pas suffisamment soin. En espérant que le fruit de ce travail réussira à changer au moins un peu les choses.

PS : Comment mentionner le présent sans parler du passé ! Ainsi je souhaite remercier Aude DeQuillacq enseignante passionnée de BCPST qui m'a transmis au moins un peu de sa passion en biologie et géologie. Je souhaite également remercier l'équipe de la DRTO Provence et notamment Vincent Dubos qui m'a amené sur la voie de l'ACV lors de mon TFE.

TITRE

Le réemploi appliqué au domaine de la construction : principe, impact environnemental et mesure dans le cadre d'une économie circulaire

RESUME

Le secteur du BTP est responsable de la moitié des extractions des matières premières et de la consommation d'énergie à l'échelle européenne, mais également de la production de 46 millions de tonnes de déchets en 2014 en France, dont 23 issus de la démolition (FFB). Par ailleurs, en France, le secteur du Bâtiment représente 43 % des consommations énergétiques et 23 % des émissions de gaz à effet de serre (MTECT).

Ces chiffres montrent l'impact fort de ce secteur sur l'environnement en terme de changement climatique et consommation des ressources. Il est dès lors de notre devoir d'œuvrer pour le rendre plus durable. Dans ce contexte, ce travail de thèse s'intéresse à la fin de vie des déchets du bâtiment dont notamment les structures en béton.

En partant de l'analyse de l'impact de deux chantiers de déconstruction (via la méthodologie de l'analyse du cycle de vie (ACV), méthode multicritères et multi-étapes), une réflexion sur les déchets, leur méthode de traitement et plus spécifiquement sur le recyclage du béton en granulats est conduite. Les observations mènent à une interrogation sur le cycle de la matière : la fin de vie est un début, la matière est réutilisée de nouveau. Ce principe est la base de l'économie circulaire.

Ainsi, une revue de littérature sur l'économie circulaire et sa mesure est réalisée. Puis, un indicateur existant est adapté pour prendre en compte certaines lacunes. Il a été, en effet, mis en avant que les indicateurs de circularité existant se limitent à un seul cycle et non plusieurs cycles comme le voudrait le concept d'économie circulaire.

Enfin, un focus est apporté sur le concept de réemploi. De manière exploratoire, une démarche de caractérisation physique d'éléments de structure en béton existants afin d'envisager leur réemploi est proposée. Suite à cela, des analyses du cycle de vie de plusieurs scénarios de valorisation de la poutre sont modélisés afin de comparer l'impact du réemploi face au recyclage tout au long du cycle de la matière. Enfin, un indicateur traduisant le potentiel de réemploi d'un élément de construction est développé et appliqué. Cet indicateur apporte une aide à la décision pour les gestionnaires d'ouvrages. Ainsi, cette thèse vise à indiquer que l'on peut rendre circulaire le fruit d'une économie linéaire.

MOTS CLEFS

Déconstruction, Qualité de valorisation, Potentiel de réemploi, Circularité, ACV

TITLE

Reuse applied to the field of construction: principle, environmental impact and measurement in a framework of a circular economy

ABSTRACT

The construction sector is responsible for half of the extraction of raw materials and energy consumption at a European scale, but also for the production of 46 million tons of waste in 2014 in France, including 23 from demolition (FFB). In addition, in France, the building sector represents 43% of energy consumption and 23% of greenhouse gas emissions (MTECT).

These figures show the strong impact of this sector on the environment in terms of climate change and resource consumption. It is therefore our duty to work to make it more sustainable. In this context, this thesis is interested in the end of life of building waste, especially concrete structures.

Starting from the analysis of the impact of two deconstruction sites (via the methodology of the life cycle analysis (LCA), a multi-criteria and multi-stage method), a reflection on waste, their treatment method and more specifically on the recycling of concrete into aggregate is conducted. The observations lead to a questioning on the cycle of the material: the end of life is a beginning, the material is reused again. This principle is the basis of the circular economy.

Thus, a literature review on the circular economy and its measurement is conducted. Then, an existing indicator is adapted to take into account some shortcomings. Indeed, it was pointed out that existing circularity indicators are limited to a single cycle and not several cycles as the circular economy concept would like.

Finally, a focus is brought on the concept of reuse. In an exploratory way, an approach of physical characterization of existing concrete structural elements in order to consider their reuse is proposed. Following this, life cycle analyses of several scenarios of recovery of the beam are modelled in order to compare the impact of reuse versus recycling throughout the material cycle. Finally, an indicator translating the reuse potential of a construction element is developed and applied. This indicator provides a decision support for the managers of structures. Thus, this thesis aims to indicate that we can make circular the fruit of a linear economy.

KEY WORDS

Deconstruction, Quality of recovery, Reuse potential, Material circularity, LCA

Laboratoire Navier UMR 8205, Équipe MSA

*6-8 avenue Blaise-Pascal, Cité Descartes,
77455 Champs-sur-Marne, Marne-la-Vallée cedex 2
École des Ponts ParisTech*

TABLE DES MATIERES

Introduction générale.....	16
Chapitre 1. La fin de vie du bâtiment.....	18
1.1 Un secteur producteur de déchets.....	20
1.1.1 Les déchets du BTP.....	21
1.1.1.1 Typologie des déchets.....	21
1.1.1.2 Répartition des déchets du BTP.....	22
1.1.1.3 Intérêts de la minimisation de la production des déchets.....	26
1.1.2 La gestion des déchets du BTP en France.....	28
1.1.2.1 Les techniques de tri.....	29
1.1.2.2 Les filières de traitement.....	32
1.1.3 Cadre réglementaire.....	35
1.1.3.1 Responsabilité élargie des producteurs (REP).....	35
1.1.3.2 Le diagnostic déchet pour la déconstruction.....	36
1.2 Focus sur le matériau béton.....	38
1.2.1 Les techniques de diagnostic.....	39
1.2.1.1 Inspection visuelle.....	40
1.2.1.2 Essais non destructifs et instrumentation.....	40
1.2.1.3 Essais destructifs et essais complémentaires.....	42
1.2.2 Les techniques de démolition.....	43
1.2.2.1 Déconstruction et démolition.....	43
1.2.2.2 La déconstruction de la structure.....	44
1.2.3 Le granulat recyclé.....	49
1.2.3.1 Le procédé de transformation en granulat.....	49
1.2.3.2 Le recyclage des granulats dans le béton.....	50
1.3 L'analyse du cycle de vie : une méthode d'évaluation environnementale multicritères et multi-étapes.....	52
1.3.1 Définition de l'ACV, historique et contexte normatif.....	52
1.3.1.1 Historique : du concept à la normalisation.....	52
1.3.1.2 L'ACV une méthode multicritères et multi-étapes.....	52
1.3.1.3 Description de la méthodologie.....	54
1.3.2 Définition des objectifs et du champ d'étude.....	55
1.3.2.1 La notion d'unité fonctionnelle.....	55

1.3.2.2	Le système et ses frontières	56
1.3.2.3	Hypothèses et limites de l'étude.....	58
1.3.3	Réalisation de l'inventaire du cycle de vie (ICV).....	59
1.3.4	Évaluation des impacts (Analyse de l'impact du cycle de vie (AICV))	61
1.3.5	Interprétation des résultats	64
1.3.5.1	Fiabilité et incertitudes en ACV	65
1.3.5.2	Les autres méthodes d'ACV (dynamique et conséquentielle)	69
1.3.6	L'ACV appliquée au bâtiment, les étapes et normes	71
1.4	Analyse environnementale sur la fin de vie des bâtiments et sur la création de granulats recyclés.....	75
1.4.1	Objectifs et champ de l'étude	75
1.4.1.1	Cas d'études	75
1.4.1.2	Objectifs.....	77
1.4.1.3	Unité fonctionnelle.....	77
1.4.1.4	Frontières du système	78
1.4.1.5	Règle de coupure.....	78
1.4.1.6	Outils et méthode.....	78
1.4.1.7	Collecte des données.....	79
1.4.2	Inventaire du cycle de vie des cas d'étude.....	79
1.4.2.1	Structure du modèle.....	79
1.4.2.2	Transport du personnel.....	80
1.4.2.3	Transport de l'équipement.....	81
1.4.2.4	Transport et traitement de l'amiante	82
1.4.2.5	Transport et traitement des autres déchets	83
1.4.2.6	Phase du chantier de déconstruction.....	84
1.4.2.7	Qualité des données.....	85
1.4.3	Évaluation des impacts et interprétation.....	88
1.4.3.1	Résultats à l'échelle de la démolition.....	88
1.4.3.2	Résultats à l'échelle du granulat recyclé	91
1.4.4	Discussion	97
1.4.4.1	Analyse de sensibilité sur l'usage des engins de démolition.....	98
1.4.4.2	Analyse de sensibilité sur les allocations.....	99
1.4.4.3	Conclusion de l'étude	101
1.5	Conclusion du chapitre 1.....	103

Chapitre 2.	La mesure de l'économie circulaire.....	104
2.1	L'économie circulaire	106
2.1.1	Définition de l'économie circulaire	106
2.1.2	Principe de l'économie circulaire	109
2.1.3	L'économie circulaire appliquée au bâtiment.....	116
2.1.3.1	Les définitions de l'économie circulaire appliquée au secteur de la construction .	117
2.1.3.2	Thèmes et phases du cycle de vie abordés	118
2.1.4	Les indicateurs de l'économie circulaire	119
2.1.4.1	Définition de l'indicateur d'économie circulaire.....	119
2.1.4.2	Indicateurs génériques	119
2.1.4.3	Indicateurs adaptés pour le secteur de la construction.....	122
2.2	Étude de cas sur les indicateurs d'économie circulaire	126
2.2.1	Cas d'étude.....	127
2.2.2	Méthodologie	128
2.2.3	Résultats	130
2.2.4	Analyse	132
2.2.4.1	Notion de perte de valeur intrinsèque et perte de valeur d'usage.....	132
2.2.4.2	Extension des frontières et étude sur plusieurs cycles	133
2.3	Adaptation d'un indicateur d'économie circulaire existant.....	134
2.3.1	Principe et objectif	136
2.3.2	Modification de l'indicateur	137
2.3.3	Application et analyse	138
2.4	Conclusion du chapitre 2.....	144
Chapitre 3.	L'identification du potentiel de réemploi.....	146
3.1	Le réemploi et la réutilisation dans le secteur du BTP	148
3.1.1	Contexte historique et cadre réglementaire du réemploi	148
3.1.1.1	Bref historique du réemploi	148
3.1.1.2	Cadre réglementaire.....	149
3.1.2	Les enjeux du réemploi	150
3.1.2.1	Les freins au réemploi	151
3.1.2.2	Les leviers et bénéfices économiques	155
3.1.2.3	Les bénéfices environnementaux.....	157
3.1.3	La démarche générale du réemploi et de la réutilisation	158
3.1.3.1	Pré-déconstruction.....	159

3.1.3.2	Déconstruction	160
3.1.3.3	Préparation.....	161
3.1.3.4	Construction	161
3.1.4	Exemples et principaux matériaux réemployés	162
3.1.4.1	Exemples de réemploi et réutilisation pour les travaux publics	162
3.1.4.2	Exemples de réemploi et réutilisation pour le bâtiment	163
3.1.4.3	La question du réemploi structurel	167
3.2	Les indicateurs de potentiel de réemploi.....	172
3.2.1	Définition du potentiel de réemploi.....	172
3.2.2	Paramètres caractérisant le potentiel de réemploi	174
3.2.3	Indicateurs existants.....	176
3.3	Développement d'un indicateur de potentiel de réemploi	184
3.3.1	Cadre de l'indicateur	184
3.3.1.1	Objectifs.....	184
3.3.1.2	Présentation de l'indicateur	185
3.3.2	Critères et niveaux des critères pour les caractéristiques intrinsèques de l'élément (calcul de IPrés).....	188
3.3.2.1	État et contrôle de la qualité (durabilité).....	190
3.3.2.2	Performances (dont résistance résiduelle)	192
3.3.2.3	Synthèse	195
3.3.3	Critères et niveaux des critères pour les caractéristiques externes (calcul de ICext).....	195
3.3.3.1	Caractéristiques techniques	197
3.3.3.2	Caractéristiques juridiques.....	207
3.3.3.3	Caractéristiques économiques	209
3.3.3.4	Caractéristiques environnementales et de santé	212
3.3.3.5	Caractéristiques sociales et sensibilisation des acteurs du chantier.....	215
3.4	Tests de l'indicateur de potentiel de réemploi développé	219
3.4.1	Application sur des cas d'étude et calibration	219
3.4.1.1	Calibration	219
3.4.1.2	Analyse des résultats pour ICext	222
3.4.1.3	Analyse des résultats pour le potentiel de réemploi (PR) dont IPrés	228
3.4.2	Analyses de sensibilité.....	229
3.4.2.1	Analyse de sensibilité pour l'indice IPrés	229
3.4.2.2	Analyse de sensibilité pour l'indice ICext	231

3.4.2.3	Synthèse à l'échelle du potentiel de réemploi	232
3.5	Conclusion du chapitre 3	234
Chapitre 4. Application au réemploi d'éléments de structure en béton armé issus de la déconstruction		236
4.1	Présentation des cas d'études.....	238
4.1.1	« Chantier de Paris » à Levallois Perret (92).....	238
4.1.2	« Chantier de Lyon » à Champagne au Mont d'Or (69).....	242
4.1.3	Conclusion	246
4.2	Faisabilité technique du réemploi du béton armé	246
4.2.1	La démarche du réemploi.....	246
4.2.2	Diagnostic technique du potentiel de réemploi.....	249
4.2.2.1	Modélisation mécanique théorique	249
4.2.2.2	Test de vérification de la résistance du béton	253
4.2.2.3	Mesure du front de carbonatation.....	256
4.2.3	Essais de caractérisation de la capacité portante résiduelle des éléments de structure 258	
4.2.3.1	Objectifs de l'essai	258
4.2.3.2	Protocole et dispositif d'essai.....	259
4.2.3.3	Instrumentation.....	261
4.2.4	Résultats	263
4.2.4.1	Essai des poutres PuP1 et PuP2 à l'ENPC	263
4.2.4.2	Ouverture : Essai de flexion 4 points du poteau PL1 à l'ENTPE	272
4.2.4.3	Perspectives.....	274
4.3	ACV comparative des méthodes de valorisation du béton armé	279
4.3.1	Cadre de l'étude	279
4.3.1.1	Objectif de l'étude.....	279
4.3.1.2	Unité fonctionnelle.....	279
4.3.1.3	Système et frontières	280
4.3.1.4	Hypothèses et limites de l'étude.....	284
4.3.1.5	Base de données et méthode d'impact.....	285
4.3.1.6	Scénarios pour l'étude 1 : les valorisations du béton, réflexions sur l'approvisionnement	285
4.3.1.7	Scénarios pour l'étude 2 : réflexion autour de l'extension des frontières, cycle de la matière 286	
4.3.1.8	Scénarios pour l'étude 3 : réflexions autour de l'allocation entre des bénéfiques... 288	

4.3.1.9	Dimension des poutres.....	289
4.3.2	Inventaire du cycle de vie.....	291
4.3.2.1	Poutre de réemploi $P_{réem}$	291
4.3.2.2	Poutres neuves (P_{rec} et P_{vier})	296
4.3.3	Résultats	300
4.3.3.1	Étude 1 : comparaison de l’approvisionnement en matière.....	301
4.3.3.2	Étude 2 : extension des frontières, le cycle de la matière	307
4.3.3.3	Étude 3 : réflexion sur les allocations.....	311
4.3.4	Perspectives et analyse de sensibilité	314
4.3.4.1	Sensibilité sur la perte de résistance de la poutre de réemploi.....	314
4.3.4.2	Sensibilité sur l’amortissement du disque de scie	315
4.3.4.3	Méthode des stocks et méthode d’impact évité.....	316
4.4	Synthèse sur l’élément béton armé	318
4.4.1	Indicateur de circularité appliqué à la poutre de réemploi	318
4.4.2	Intérêt du réemploi d’une poutre en béton armé	321
4.5	Conclusion du chapitre 4.....	323
	Conclusion générale	324
	Bibliographie.....	328
	Table des sigles et abréviations.....	346
	Liste des figures.....	348
	Liste des Tableaux	358
	Annexes	364
I.	Historique de l’ACV (Jolliet et al., 2015)	364
II.	Les déchets du BTP.....	365
III.	Les types de ciment.....	367
IV.	Inventaire du cycle de vie du processus de recyclage des granulats, du bâtiment A et du bâtiment B.....	367
V.	Extrait du CCTP Démolition Désamiantage pour un chantier de la métropole du Grand Paris 368	
VI.	Feuille de calcul des paramètres de performance pour l’indice de performance résiduelle (pour le calcul de l’indicateur de potentiel de réemploi).....	369
VII.	Types de connexions définis par (Durmisevic, 2006)	372
VIII.	Extrait de la feuille de calcul Excel utilisée pour la mesure de la résistance sous flexion 3 et 4 points des poutres et poteaux issus de la déconstruction. Poutre PuP1.....	372
IX.	Résultat des essais de compression sur éprouvette de béton.....	375

X.	Paliers des essais PuP1 et PuP2 et relevé du déformètre à bille	376
XI.	Résultats numériques des impacts environnementaux évalués pour l'étude 1	378
XII.	Résultats numériques des impacts environnementaux évalués pour l'étude 2	378
XIII.	Résultats numériques des impacts environnementaux évalués pour l'étude 3	378
XIV.	Résultats numériques des indicateurs de flux évalués pour l'étude 3.....	380

INTRODUCTION GENERALE

Il ne fait plus de doute que le changement climatique est réel. Ce changement se traduit par un dérèglement de la température sur toute la surface du globe (IPCC, 2021). En parallèle, on assiste progressivement au dépassement de l'ensemble des limites planétaires. Les limites planétaires, introduites par (Rockström et al., 2009) puis complétées par (Steffen et al., 2015), sont au nombre de neuf (Figure 1) et définissent un « espace de développement sûr et juste pour l'humanité, fondé sur des processus biophysiques qui régulent la stabilité de la terre »¹. Par conséquent, franchir ces limites impacte la durabilité de l'environnement. Or, six de ces neuf limites ont été franchies, les dernières l'ayant été tout récemment : en janvier 2022 pour l'*Introduction d'entités nouvelles dans la biosphère* et en mai 2022 pour le *Cycle de l'eau douce - Eau verte* d'après (Wang-Erlandsson et al., 2022).

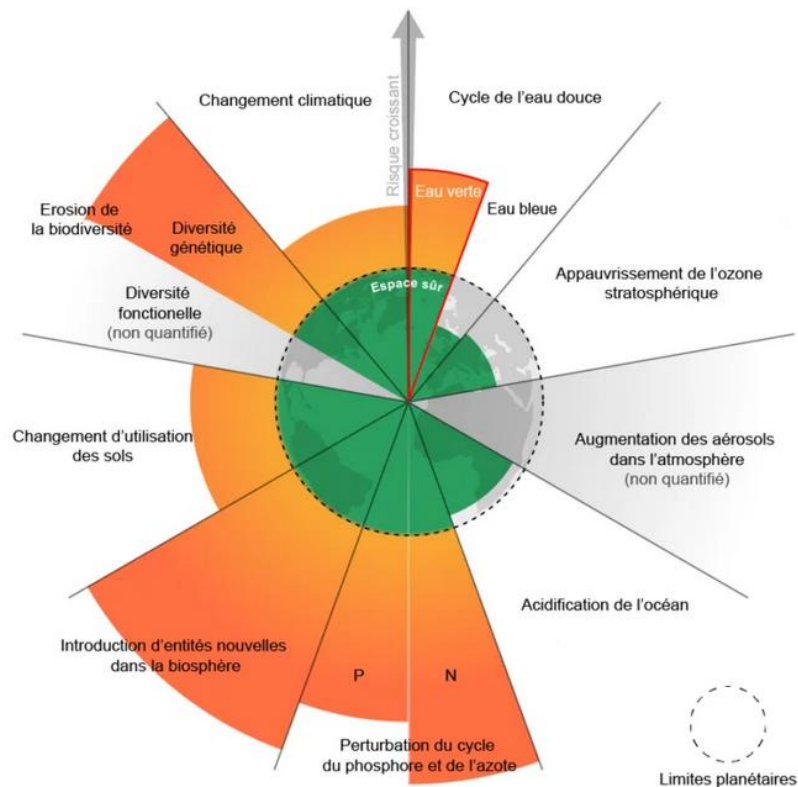


Figure 1 : Les limites planétaires (Source : Stockholm Resilience Center, 2022 Trad : Sydney Thomas pour Bon Pote)

De plus, le sable est, après l'eau, la deuxième ressource la plus exploitée dans le monde (UNEP, 2019). Dans le domaine de la construction, le sable entre dans la composition du béton et du verre. Son extraction augmente fortement et a atteint entre 40 et 50 milliards de tonnes en 2019 (UNEP, 2019).

¹ <https://www.notre-environnement.gouv.fr/rapport-sur-l-etat-de-l-environnement/themes-ree/defis-environnementaux/limites-planetaires/concept/article/presentation-du-concept-des-limites-planetaires> consulté en juillet 2022

Le secteur du Bâtiment et des Travaux Publics (BTP) est ainsi responsable de la moitié des extractions des matières premières et de la consommation d'énergie à l'échelle européenne, mais également de la production de 46 millions de tonnes de déchets en 2014 en France, dont 23 issus de la démolition (MTECT, 2020a). Par ailleurs, en France, le secteur du Bâtiment représente 43 % des consommations énergétiques et 23 % des émissions de gaz à effet de serre (MTECT, 2020b). L'ensemble de ces éléments chiffrés montre l'urgence d'agir sur nos consommations et modes de production. Aussi, dans leur rapport (UNEP, 2022), les nations unies recommandent de reconnaître le sable comme une ressource stratégique et d'intégrer des politiques pour un avenir circulaire (promotion de l'usage efficace de la ressource et de la circularité de la ressource).

Face au constat du changement climatique et de la finitude des ressources, ce travail de thèse se pose la question de la réduction de l'impact (sur l'environnement et les ressources) de la construction notamment pour les éléments en fin de vie. Ainsi, nous nous intéressons aux enjeux du réemploi des éléments du bâtiment afin d'en comprendre les gains face aux autres méthodes de valorisation, dans le cadre d'une économie circulaire. À l'échelle de la construction en béton armé, nous cherchons à développer l'usage du réemploi de ses éléments de structure.

Ce travail a été réalisé et financé dans le cadre du Lab Recherche Environnement, programme de recherche scientifique entre le groupe VINCI et trois écoles d'ingénieurs de ParisTech (MinesParis, AgroParisTech et PontParisTech), visant à soutenir la recherche sur la performance environnementale des bâtiments, des quartiers et des infrastructures. Ce dernier permet le développement et la diffusion des connaissances sur les enjeux environnementaux, en lien avec les métiers du groupe VINCI, dans une démarche d'intérêt général et dans le respect de l'indépendance des chercheurs. Ce partenariat est l'occasion de partager des moments d'échange lors de groupes miroirs, réunions régulières permettant de discuter avec les collaborateurs, directement intéressés par le sujet, sur les interrogations qu'ils se posent, sur ce qu'ils pourraient apporter à la thèse, et sur ce qu'ils pourraient en extraire.

Ce travail de thèse se veut multidisciplinaire, afin de donner une vision globale sur le réemploi de structure en abordant les problématiques structurelles, les problématiques environnementales et des problématiques organisationnelles.

Ce travail de thèse est structuré en 4 chapitres.

- Le premier chapitre aborde les éléments de contexte des pratiques actuelles de la fin de vie des ouvrages de la construction : les méthodes de déconstruction, les typologies de déchets de la construction, les méthodes de tri et de traitement. L'évaluation environnementale de la fin de vie des bâtiments (la déconstruction des bâtiments et la valorisation des éléments de structure) sera faite via la méthode multicritères et multi-étapes de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV).
- Le deuxième chapitre présente la notion d'économie circulaire et sa mesure. Certains indicateurs de circularité seront appliqués à un cas d'étude précis et leur comportement analysé. En fonction des lacunes des indicateurs existants, un indicateur modifié sera présenté.
- Le troisième chapitre présente le niveau actuel de maturité du réemploi comme pratique de valorisation des éléments du bâtiment. Les observations réalisées serviront au développement d'un indicateur caractérisant la capacité d'un élément de construction à être réemployé.
- Le dernier chapitre s'intéresse plus spécifiquement au réemploi des éléments de structure en béton armé. Il s'attache à démontrer la faisabilité mécanique d'un tel réemploi en étudiant la résistance résiduelle d'un élément issu de la déconstruction. De plus, il quantifie l'impact environnemental de ce réemploi.

Chapitre 1. LA FIN DE VIE DU BATIMENT

Avec les premiers chiffres donnés en introduction, nous avons vu que le secteur de la construction, et à plus large échelle celui du bâtiment et des travaux publics, est responsable d'une grande consommation d'énergie et de matériaux (Ipsen et al., 2021). La présente thèse s'intéressant à la fin de vie du bâtiment et des infrastructures, il est nécessaire de connaître les procédés et produits de cette étape de fin de vie. Ainsi, au cours de ce chapitre, nous abordons les caractéristiques des déchets produits par le secteur du BTP et la gestion de ces déchets puis nous réalisons un focus sur la structure en béton : son diagnostic, sa démolition et son recyclage. Enfin, une analyse du cycle de vie autour de deux cas d'étude de déconstruction de bâtiment est réalisée afin d'en comprendre l'enjeu environnemental. Cette étude de cas est précédée d'une analyse bibliographique sur la méthode de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), méthode multicritères et multi-étapes.

1.1 UN SECTEUR PRODUCTEUR DE DECHETS

Dans cette section, nous nous attachons à comprendre le type et les caractéristiques des matériaux utilisés par le bâtiment puis rejetés en fin de vie. Ainsi, nous réalisons une revue de littérature concernant les déchets produits par le secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP).

L'article L541-1-1 du Code de l'environnement définit un déchet comme une substance, un objet « ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se débarrasser » (Légifrance, n.d., pp. 541-1-1). Par ailleurs, l'article L541-4-2 précise qu'un produit ou 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. »

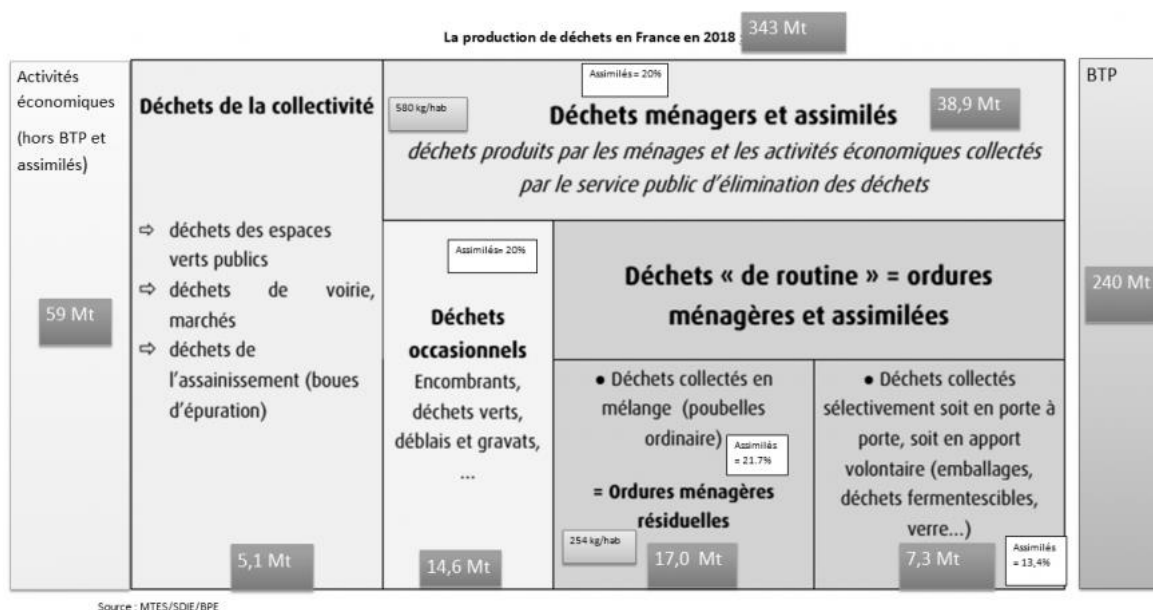


Figure 2 : Répartition de la production des déchets en France en 2018 entre les différents secteurs économiques (Ministère de la transition écologique et solidaire, 2021)

Ainsi, avec cette définition, la France est responsable en 2018 de la production de 343 millions de tonnes de déchets dont la répartition est présentée en Figure 2. On peut noter que le secteur du BTP représente 240 millions de tonnes soit 70 % de la masse totale.

Cette partie expose dans un premier temps les typologies et caractéristiques principales des déchets du BTP tout en mettant en avant l'importance de la minimisation de leur production. Dans un second temps, les techniques de gestion des déchets en France seront présentées.

1.1.1 Les déchets du BTP

Sur toutes les phases de son cycle de vie, que ce soit lors de sa phase de construction, de maintenance ou encore de démolition, un bâtiment ou une infrastructure est susceptible de subir des actions productrices de déchets.

1.1.1.1 Typologie des déchets

Une grande variété de déchets existe. Ceux-ci peuvent être classés de différentes manières telles qu'en fonction :

- Du producteur de déchets ;
- Du propriétaire du déchet ;
- Du secteur où est produit le déchet ;
- De la nature du déchet ;
- Des objectifs : catalogue européen des déchets, nomenclature statistique européenne des déchets, nomenclature combinée des douanes...

Le classement des déchets retenu dans le cadre de ce travail est le classement selon la nature des déchets. En effet, celle-ci semble la plus adaptée pour comprendre les interactions possibles avec l'environnement, la nature de l'élément permettant de déterminer certaines propriétés physiques des matériaux qui pourront alors donner des indications sur le comportement de ces matériaux sur l'environnement. Le code de l'environnement (Légifrance, 2020, pp. 541–8) divise les propriétés (*i.e.* les natures) des déchets en deux catégories :

- **Les déchets dangereux (DD)** qui désignent « tout déchet qui présente une ou plusieurs des propriétés de dangers énumérées à l'annexe III de la directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives. Ils sont signalés par un astérisque dans la liste des déchets mentionnée à l'article R. 541-7 ». Ce type de déchets présente des risques pour la santé humaine ainsi que pour l'environnement. Ils nécessitent des installations de traitement spécifiques. Parmi ces déchets dangereux, on peut citer par exemple les déchets comburants (H2), toxiques (H6), cancérigènes (H7)... Dans le secteur du BTP, on retrouve encore aujourd'hui de l'amiante sous différentes formes (flocage, amiante ciment, enrobé amiante) ou du plomb (peinture, canalisations). On peut mentionner également, parmi les produits encore employés aujourd'hui, les HFC (hydrofluorocarbures) utilisées notamment comme fluides frigorigènes et le mercure dans les lampes et les tubes fluorescents.
- **Les déchets non dangereux (DND)** qui correspondent au complémentaire des déchets dangereux *i.e.* tous les déchets qui ne sont pas considérés comme dangereux au sens de la directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008. On distingue dans cette catégorie :
 - o *Les déchets inertes (DI)*, également appelés déchets minéraux qui correspondent à « 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 ». Dans le secteur du BTP, on trouve principalement dans cette catégorie le béton, la brique, la céramique, la pierre, le verre, la terre et les enrobés (ni amiantés ni goudronnés car ce sont alors des déchets dangereux).

- *Les déchets non dangereux et non inertes (DNDNI)* qui correspondent aux autres déchets non dangereux non inclus dans les déchets inertes. Ils sont également appelés déchets banals. Dans cette catégorie, on peut mentionner les métaux (dont l'acier de ferrailage), le plâtre, le bois, le PVC et une partie des DEEE (déchets d'équipement électriques et électroniques, certains de ces DEEE pouvant faire partie des déchets dangereux).

1.1.1.2 Répartition des déchets du BTP

Nous avons vu précédemment que le secteur du BTP est un important producteur de déchets. La dernière enquête portant sur la répartition des déchets la plus exhaustive pour ce secteur date de 2014. Elle a été menée par le Service des données et des études statistiques (SDES). C'est à partir de cette enquête (Service de l'observation et des statistiques, 2017) qu'une majorité des données concernant les types de déchets sera extraite. Les dernières données globales concernant la production de déchets sont notées dans le Tableau 1. On peut observer que la production de déchets par le BTP est relativement stable depuis 2008, la baisse de 2014 étant à rapprocher de la baisse d'activité durant la période 2008-2014. Ces chiffres montrent que la question de la quantité des déchets de construction est toujours d'actualité et est un enjeu majeur pour ce secteur.

Tableau 1 : La production de déchets du BTP (*par rapport à la dernière donnée antérieure disponible)

Années	2008	2012	2014	2016	2018
Quantité de déchets du BTP (millions de tonnes)	254,5	247	227,5	224,4	240,2
Évolution*	/	-3%	-7,9%	-1,4%	+7,1%
Sources	(CGDD and SOeS, 2010)	(Ministère de la transition écologique et solidaire, 2021)	(Service de l'observation et des statistiques, 2017)	(Ministère de la transition écologique et solidaire, 2021)	(Ministère de la transition écologique et solidaire, 2021)

Le secteur du BTP est communément divisé en deux sous-secteurs. Le premier est celui du bâtiment qui englobe la construction neuve, la réhabilitation et la démolition des bâtiments publics, privés résidentiels ou tertiaires. Le second est celui des travaux publics qui prend en compte la construction, la maintenance et la démolition des infrastructures de type routes, ponts, tunnels, voies ferroviaires et réseaux divers. Le Tableau 2 et le Tableau 3 présentent la quantité de déchets produite par sous-secteur du BTP respectivement pour 2008 et 2014 en France. La Figure 3 illustre les tableaux précédents en montrant la répartition par type de déchets produits et par sous-secteur du BTP en France en 2008 et 2014. Ainsi, parmi les 227,5 millions de tonnes produites en 2014, seulement 42,2

millions de tonnes (soit 18,5 %) sont produites par le bâtiment, le reste (81,5 %) étant généré par les travaux publics. Ceci nous montre la disparité des sources de déchets. Sur ces tableaux, nous pouvons voir également que le gros œuvre compte pour 73 % des déchets du bâtiment (et 13,6 % du total des déchets du BTP). Par ailleurs, les quantités pour le bâtiment sont en augmentation depuis 2008, contrairement à celles des travaux publics. Il y a donc une réflexion à mener sur les déchets du bâtiment et notamment du gros œuvre.

Tableau 2 : Production de déchets du BTP par sous-secteur en 2008 (inspiré de (CGDD and SOeS, 2010))

Secteurs et sous-secteurs	Quantité totale de déchets		Répartition par type de déchet (en %)		
	En Mt	Part du total	DI	DNDNI	DD
Bâtiment	38,2	15 %	72,4	26,1	1,5
Gros Œuvre	28,1	11 %	80,8	18,0	1,2
Second Œuvre	10,1	4 %	49,0	48,6	2,4
Travaux publics	216,3	85 %	97,6	1,5	0,9
Total	254,5	100 %	93,8	5,2	1,0

Tableau 3 : Production de déchets du BTP par sous-secteur en 2014 (inspiré de (Ministère de la transition écologique et solidaire, 2021; Service de l'observation et des statistiques, 2017))

Secteurs et sous-secteurs	Quantité totale de déchets		Répartition par type de déchet (en %)		
	En Mt	Part du total	DI	DNDNI	DD
Bâtiment	42,2	18,5 %	74,5	23,0	2,5
Gros Œuvre	31,0	13,6 %	80,6	16,6	2,8
Second Œuvre	11,2	4,9 %	57,6	40,7	1,7
Travaux publics	185,3	81,5 %	97,0	2,0	1,0
Total	227,5	100 %	92,8	5,9	1,3

Nous remarquons de plus que, lorsque l'on s'intéresse aux types de déchets que ce soit pour le bâtiment ou les travaux public, les déchets inertes sont majoritaires (92,8 % en 2014 et 93,8 % en 2008). Au vu de ces informations, il est donc intéressant de se focaliser sur les déchets inertes.

Regardons maintenant plus en détail les déchets produits. Les Figure 4, Figure 5 et Figure 6 présentent les principaux déchets produits par le secteur du BTP en 2014 en France respectivement les déchets inertes, les déchets non dangereux non inertes et les déchets dangereux. Les valeurs sont présentées en Annexe II.

D'après la Figure 4, nous remarquons que les principaux déchets inertes recensés sont : les terres et matériaux meubles non pollués (54 %), les graves et matériaux rocheux (12 %), les béton (9 %), les mélanges de déchets inertes (9 %), les enrobés et produits à base de bitume (5 %), les autres matériaux de chaussées (6 %). Ainsi, on peut trier ces matériaux en trois catégories : les matériaux naturels terrestres meubles, les matériaux issus des chaussées et voiries et les matériaux inertes massifs. Ces deux dernières catégories sont les deux principaux enjeux à traiter pour le BTP car ce sont des

matériaux transformés. De par leur quantité, leur caractère massif et leur forte présence dans le bâtiment, nous nous intéresserons au cours de cette thèse principalement à la dernière catégorie et notamment au matériau béton.

Les principaux déchets non dangereux non inertes sont (Figure 5) : les matériaux isolants (18 %), les mélanges de DND avec peu de DI (15 %), les mélanges de métaux ferreux et non ferreux (13 %), les bois bruts ou faiblement traités (12 %), les mélanges de DND avec une majorité de DI (11 %), les autres DND (10 %), les métaux ferreux (8 %).

Ainsi, on peut réaliser deux observations. La première est que les DND présentent une diversité plus grande de catégories et une répartition plus homogène. La seconde est qu'à part certains isolants, bois et métaux, beaucoup de catégories sont des mélanges entre DND. Cela nous indique qu'un effort sur la séparation et le tri des éléments DND est à réaliser lors des chantiers.

Enfin, les principaux déchets dangereux sont (Figure 6) : les terres et cailloux pollués (49 %), les matériaux amiantés (21 %), les matériaux goudronnés (14 %)

Pour rappel, les DD dans le BTP ne représentent qu'entre 1 et 2 % en masse des déchets du BTP. Néanmoins, ils peuvent poser problème d'un point de vue administratif ou technique.

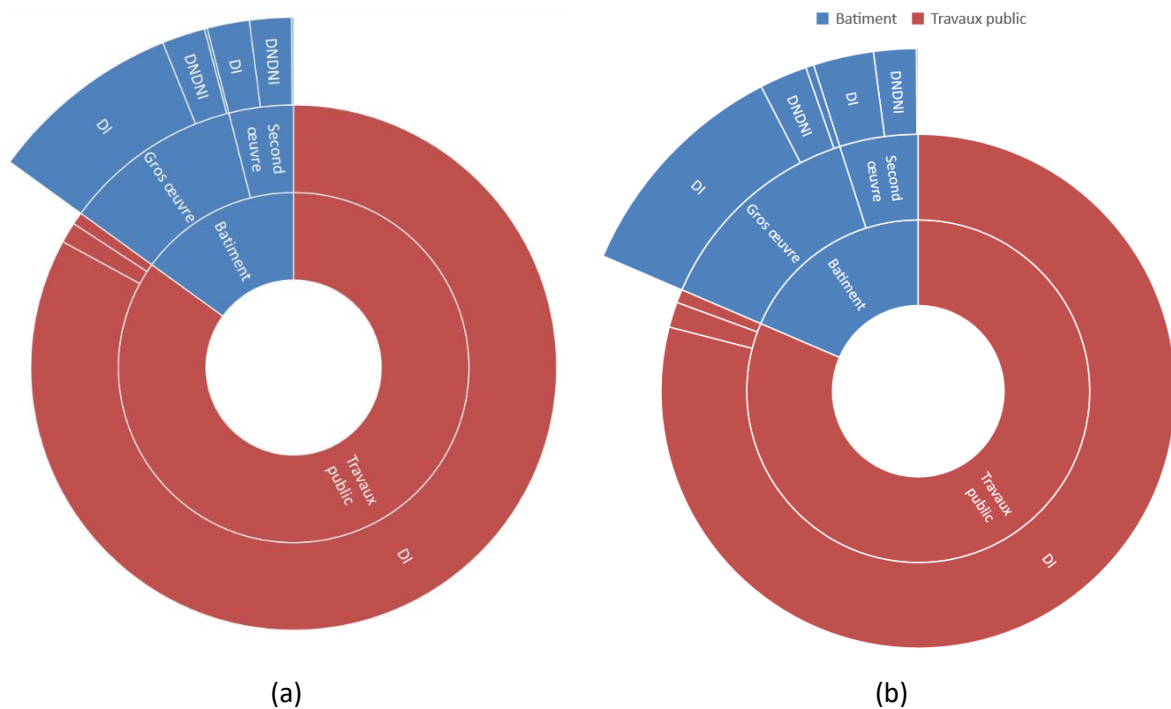


Figure 3 : Diagramme soleil pour le type de déchets par secteur du BTP en France en 2008 (a) et en 2014 (b). Ce diagramme présente la répartition des déchets pour chaque sous-secteur et sous-sous-secteur. Pour rappel DNDNI= déchets non dangereux et non inertes ; DI = déchets inertes ; DD= déchets dangereux. Les parties non légendées pour les travaux publics sont des DD et DNDNI. Les parties non légendées pour le Bâtiment sont des DD.

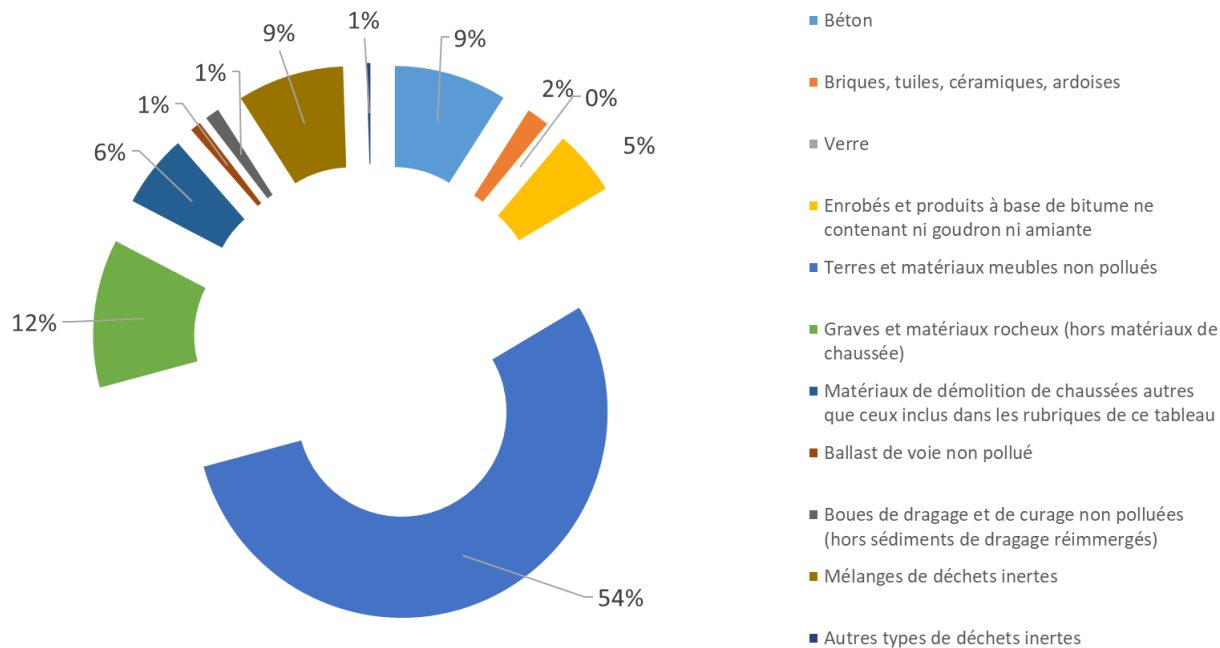


Figure 4 : Diagramme présentant les principaux déchets inertes produits en 2014 par le secteur du BTP en France. Données issues de (Service de l'observation et des statistiques, 2017)

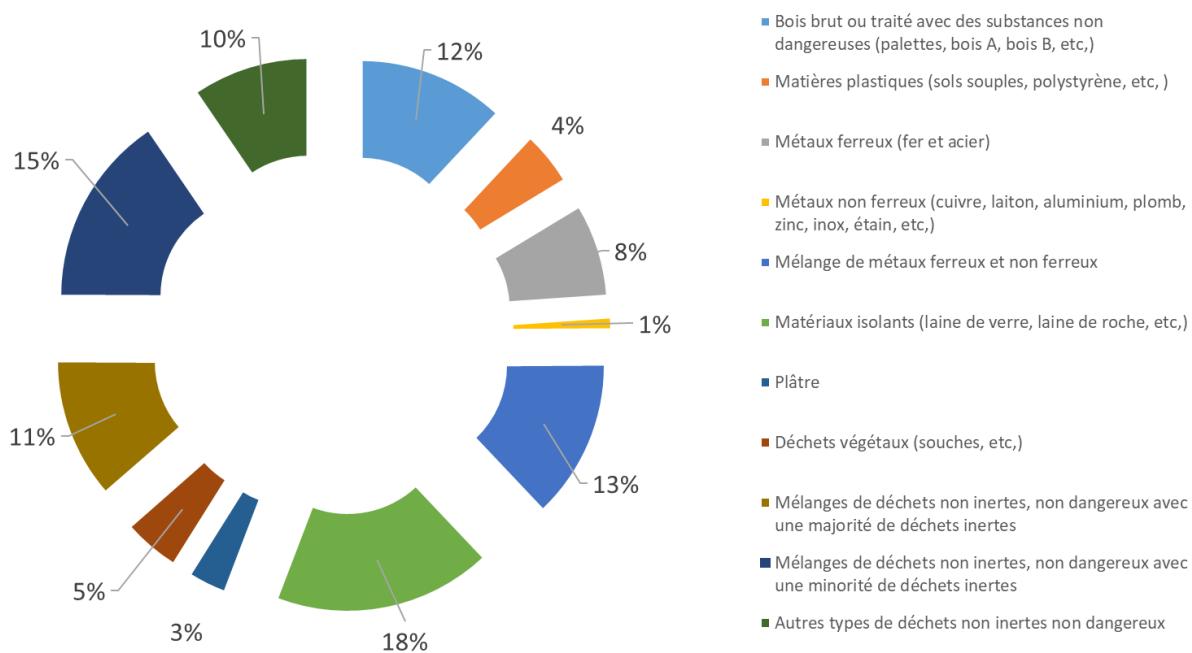


Figure 5 : Diagramme présentant les principaux déchets non dangereux et non inertes pour 2014 par le secteur du BTP en France. Données issues de (Service de l'observation et des statistiques, 2017)

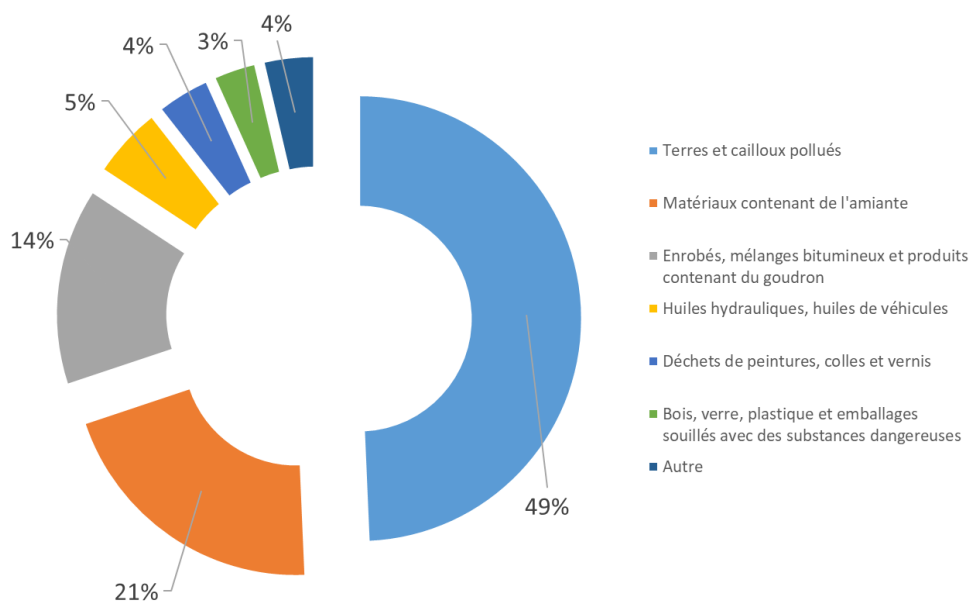


Figure 6 : Diagramme présentant les déchets dangereux produits en 2014 par le secteur du BTP en France. Données issues de (Service de l'observation et des statistiques, 2017)

1.1.1.3 Intérêts de la minimisation de la production des déchets

Les bénéfices potentiels de la réduction des déchets sont nombreux. (El Hagggar, 2007) affirme qu'une mise en place adaptée de la gestion et de la minimisation peut amener à des bénéfices économiques. (Wilson, 2007) met également en avant plusieurs arguments en faveur de la minimisation des déchets, notamment la protection de l'environnement, la santé publique, le maintien de la valeur de la matière, les questions concernant la gestion et responsabilité des déchets. Pour sa part, (Ogunmakinde, 2019) regroupe plusieurs des facteurs pouvant permettre une gestion plus durable des déchets. Ceux-ci sont présentés dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Les moteurs pour une minimisation et une gestion durable des déchets (traduit de (Ogunmakinde, 2019), adapté de (Agamuthu et al., 2009; Wilson, 2007)

Catégorie	Facteur
Environnemental	<ul style="list-style-type: none"> - Changement climatique - Efficacité des ressources
Économique	<ul style="list-style-type: none"> - Socio-économie - Faire des déchets une valeur
Institutionnel	<ul style="list-style-type: none"> - Développement et recherche scientifique - Image des institutions - Gains financiers
Humain	<ul style="list-style-type: none"> - Augmentation de la population mondiale et question de la production accrue des déchets - Santé et sécurité - Sensibilisation de la population - Géo et socio politique
Législation	<ul style="list-style-type: none"> - Loi et réglementations - Directives - Incitations

Tous les bénéfices, qu'ils soient environnementaux, sociétaux et économiques découlent des moteurs mentionnés dans le Tableau 4.

Néanmoins, il faut faire face à des obstacles de différents types :

- **Sociétaux** : les acteurs occupés par le projet ne donnent pas nécessairement la priorité à la gestion et minimisation des quantités de déchets. Les acteurs peuvent également ne pas disposer des compétences adaptées (ADEME et al., 2016).
- **Économiques** : (Crawford et al., 2017) mettent en avant l'importance de l'incitation financière pour favoriser la minimisation des déchets du BTP en montrant les problèmes engendrés par l'absence de telles subventions.
- **Politiques** : la réglementation sur les déchets est essentielle pour pousser les entreprises à agir. Il est donc important de définir des règles claires et spécifiques aux déchets issus du BTP. Par exemple, (Kartam et al., 2004) montrent que l'absence au Koweït de réglementation claire n'incite pas à minimiser les déchets, ayant pour conséquence la production d'un grand volume de déchets pour le BTP.
- **Techniques** : des freins peuvent à la fois exister au niveau de la technique seule, comme par exemple savoir séparer deux matériaux collés, mais aussi de la garantie technique de la performance (ADEME et al., 2016). La question qui se pose ainsi est de savoir si un pool d'éléments à priori uniforme aura effectivement les mêmes caractéristiques techniques résiduelles en fin de vie.

La minimisation des déchets implique d'utiliser tous les procédés permettant la réduction des déchets (U.S. EPA, 2016). Cela passe par ailleurs par deux mécanismes principaux, définis dans l'article L541-1 du code de l'environnement (Légifrance, n.d.) :

- **La prévention**, à savoir « toutes mesures prises avant qu'une substance, une matière ou un produit ne devienne un déchet, lorsque ces mesures concourent à la réduction d'au moins un des items suivants :
 - La quantité de déchets générés, y compris par l'intermédiaire du réemploi ou de la prolongation de la durée d'usage des substances, matières ou produits ;
 - Les effets nocifs des déchets produits sur l'environnement et la santé humaine ;
 - La teneur en substances dangereuses pour l'environnement et la santé humaine dans les substances, matières ou produits » ;
- **Le réemploi**, à savoir « 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 » (Légifrance, n.d.). Plus de détails sur le réemploi est donné dans le Chapitre 3 qui se concentre sur ce procédé.

Ces deux mécanismes permettent aux produits de ne pas passer par le statut de déchet. D'après (Osmani, 2012, 2011), la minimisation des déchets de construction est rendue possible dans un premier temps par l'identification des causes pour, dans un second temps, les réduire à la source. Il peut s'agir d'appliquer des stratégies et des techniques au moment de la conception et de la phase de construction. De nombreuses études abordent cette problématique (Bertin, 2020; Brière, 2016; Durmisevic, 2006; Küpfer and Fivet, 2021; Ogunmakinde, 2019). Des projets tels que BAMB² ou DEMODULOR³ proposent des solutions constructives multi matériaux conçues pour être démontées.

² <https://www.bamb2020.eu/>

³ <https://mecd.fr/demodulor/>

(Durmisevic, 2006) s'intéresse aux méthodes d'analyse de la flexibilité des assemblages et propose des stratégies pour la conception de structures transformables. (Küpfer and Fivet, 2021) réalisent un état des lieux des recherches actuelles sur les leviers pour améliorer la gestion des déchets et la qualité de la déconstruction sélective en Suisse ; ils abordent par la suite plusieurs études de cas à propos de solutions constructives réversibles. Ces recherches font partie des démarches « design for disassembly » et « design for reuse ». Il est également possible d'agir à des échelles plus larges, comme par exemple l'échelle des politiques territoriales. À titre d'exemple, (Ogunmakinde, 2019) intègre le concept d'économie circulaire dans la mise en place d'un modèle de minimisation des déchets pour le Nigeria sur toutes les phases d'une construction. Ses objectifs sont d'identifier les pratiques et attitudes des entreprises de construction nigérianes, de recenser les différentes approches de minimisations des déchets qui existent aujourd'hui puis d'identifier les mesures législatives et politiques.

Parmi les études sur l'écoconception et la minimisation des déchets, on peut mentionner également les thèses réalisées au sein du laboratoire Navier par (Brière, 2016) et (Bertin, 2020).

(Brière, 2016) s'intéresse à l'identification des causes et conséquences des déchets de la construction. Il mesure notamment l'impact de la démolition et des déchets qu'elle produit sur l'environnement via l'analyse du cycle de vie. Il s'attarde également sur le transport des déchets ainsi que sur la modélisation des installations de stockage. Enfin, il propose des solutions pour réduire la production des déchets en abordant le réemploi dans la construction.

(Bertin, 2020) se concentre sur l'éco-conception et aborde notamment la question de la conception réemployable. Elle développe un portique avec une armature adaptée à sa déconstruction puis à son emploi sur un nouveau projet. Elle explore les possibilités du BIM (Building Information Modeling) comme outil à l'optimisation de la matière dans le bâtiment, en créant une nouvelle génération de bâtiment aux éléments facilement réemployables dans le futur. Cette approche est complémentaire à celle retenue ici qui vise à valoriser les bâtiments existants.

Ce travail de thèse s'inscrit à la suite de ces précédents travaux.

1.1.2 La gestion des déchets du BTP en France

Nous avons vu dans la partie précédente la définition du déchet. Que devient-il ensuite ? Il faut savoir qu'un déchet n'a pas vocation à rester éternellement un déchet (en tout cas au sens de la loi). Effectivement, l'article L541-4-3 du code de l'environnement ajoute qu'un « déchet cesse d'être un déchet après avoir été traité et avoir subi une opération de valorisation, notamment de recyclage ou de préparation en vue de la réutilisation, s'il remplit l'ensemble des conditions suivantes :

- La substance ou l'objet est 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. »

Ainsi, si les conditions sanitaires économiques et techniques le permettent, le déchet sera valorisé. Dans le cas contraire, il sera éliminé par différentes manières que nous détaillerons au cours de cette partie.

La question de la production de déchets combinée à la réglementation a permis le développement d'une filière de gestion des déchets. La gestion d'un déchet prend en compte les étapes suivantes : « le tri à la source, la collecte, le transport, la valorisation, y compris le tri, l'élimination des déchets et plus largement, toute activité participant de l'organisation de la prise en charge des déchets depuis leur production jusqu'à leur traitement final, y compris la surveillance des installations de stockage de déchets après leur fermeture, conformément aux dispositions relatives aux installations classées pour la protection de l'environnement, ainsi que les activités de négoce ou de courtage et la supervision de l'ensemble de ces opérations » (Légifrance, n.d.).

Les déchets non valorisables (dont les parties non valorisables des déchets valorisés) sont appelés déchets ultimes. Ils sont définis par la loi du 13 juillet 1992 comme : « un déchet résultant ou non d'un traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans des **conditions techniques et économiques** du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux ».

D'autre part, face aux différentes méthodes de prise en charge des déchets, l'article L 541-1 du code de l'environnement établit une hiérarchie dans la gestion des déchets :

- **Prévention** : « prévenir et 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 » ;
- **Réutilisation** : « toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui sont devenus des déchets sont utilisés de nouveau » ; l'opération peut être par exemple un contrôle, un nettoyage ou une réparation ;
- **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 remblayage ne peuvent pas être qualifiées d'opérations de recyclage » ;
- **Autres valorisations (dont énergétique)** : cela correspond à toutes les autres valorisations : soit valorisation matière, soit valorisation énergétique. La valorisation énergétique comprend la valorisation thermique, le retraitement en matière destinée à servir de combustible ;
- **Élimination** : « toute opération qui n'est pas de la valorisation même lorsque ladite opération a comme conséquence secondaire la récupération de substances, matières ou produits ou d'énergie ».

Cette partie aborde ainsi les différentes techniques de traitement des déchets du BTP et de tri en France, le cadre réglementaire de la prévention des déchets ainsi que des nouvelles filières de traitement pour la construction avec notamment le diagnostic déchet.

1.1.2.1 Les techniques de tri

Avant toute valorisation, il est nécessaire de réaliser un tri des déchets. (Bouzidi, 2021; FNADE, 2012; Récyllum et al., 2016) présentent les points forts de la collecte et du tri ainsi que les différentes filières de traitement des déchets. Il existe deux lieux où effectuer le tri :

- Directement sur le chantier, appelé **tri à la source** : des conteneurs spécifiques présents sur le chantier permettent de trier directement les matériaux recyclables ;
- En **centre de tri** : les déchets sont collectés en mélange et ensuite triés dans un centre de tri. À cause du mélange des déchets, la qualité du tri est susceptible d'être altérée.

En pratique, les deux méthodes peuvent être employées sur un même chantier (Récyllum et al., 2016). Le choix de la méthode est lié aux contraintes propres au chantier. Cela est fonction notamment de la place disponible pour accueillir les bennes de tri (Philie Marcangelo-Leos, 2021), de l'ampleur du chantier ou encore des contraintes économiques et d'organisation. Toutefois, depuis le Décret n°2016-288 du 10 mars 2016 portant diverses dispositions d'adaptation et de simplification dans le domaine de la prévention et de la gestion des déchets (Légifrance, 2016), cinq flux de matériaux (papier, métal, plastique, verre et bois) doivent être obligatoirement triés à la source. Le Décret n°2021-950 du 16 juillet 2021 relatif au tri des déchets (Légifrance, 2021) ajoute deux matériaux à cette obligation (plâtre et déchet de fraction minérale comme les gravats, le béton, la brique, etc.) et durcit les conditions de dérogation (principalement pour les chantiers limités par la place, par exemple en zone urbaine dense). Ceci est valable pour toutes les activités économiques et donc le BTP.

La Figure 7 présente un exemple de tri des déchets. Cette illustration est issue du projet Démoclès (Récyllum et al., 2016) qui est une plateforme collaborative d'acteurs de la construction cherchant à améliorer les pratiques de prévention et de gestion des déchets du second œuvre. Ce projet a été financé conjointement par l'ADEME et l'éco-organisme Ecosystem. Un rapport présentant les constats de la filière ainsi que des recommandations a été publié en 2016 en se basant sur un groupe de travail d'experts et des chantiers d'observation. La Figure 7 nous donne un aperçu des types de déchets, leur méthode de tri ainsi que leur valorisation possible sur un chantier de construction ou déconstruction.

Il existe plusieurs méthodes de tri (Bouzidi, 2021) qui peuvent être, en fonction des équipements, soient réalisables sur chantier soient en centre de tri :

- **Tri manuel** : les ouvriers séparent eux-mêmes les éléments avec un outillage simple. En centre de tri cela peut être des agents qui réalisent le travail sur une chaîne manuelle ;
- **Tri mécanique** : ce type de tri est réalisé à l'aide de machines comme par exemple une pelle ou un concasseur. D'après (FNADE, 2012), l'usage de la pelle hydraulique est le plus courant en France dans les centres de tri. Ce type de tri peut être réalisé par réduction de taille (fragmentation), par criblage ou encore par déchiquetage (shredding) ;
- **Tri aéraulique** : cela fait appel à la différence de caractéristique aérodynamique des éléments et de la gravité. Un courant d'air permet de séparer les éléments plus légers des éléments plus lourds ;
- **Tri hydraulique** : à l'instar du tri aéraulique celui-ci utilise une phase aqueuse et met en jeu la densité et la viscosité des déchets dans le fluide ;
- **Tri par séparation balistique** : cette méthode de tri est basée sur le mouvement de projectiles. Les objets sont lancés et acquièrent ainsi une trajectoire qui leur est propre.
- **Tri magnétique** : cela permet d'extraire les parties métalliques ferreuses d'un flux de déchets. Cette méthode est utilisée entre autres pour le ferrailage et les objets métalliques des déchets de construction ;
- **Tri des déchets par courant de Foucault** : c'est un phénomène qui se produit lorsqu'un conducteur métallique traverse un champ magnétique, le déchet métallique est alors ralenti. Cela permet de trier les éléments métalliques des autres éléments, même les éléments non ferreux. Ainsi, ceci est utile pour séparer par exemple l'aluminium. Cette technique est notamment utilisée pour le tri des mâchefers à la sortie des centrales d'incinération ;

- **Tri optique des déchets** : cette technique utilise des caméras qui examinent la forme, la taille, la couleur notamment la lumière réfléchiée dans le visible, l'ultraviolet (UV) ou l'infrarouge (IR). Cela est très utile pour différencier les plastiques des cartons.

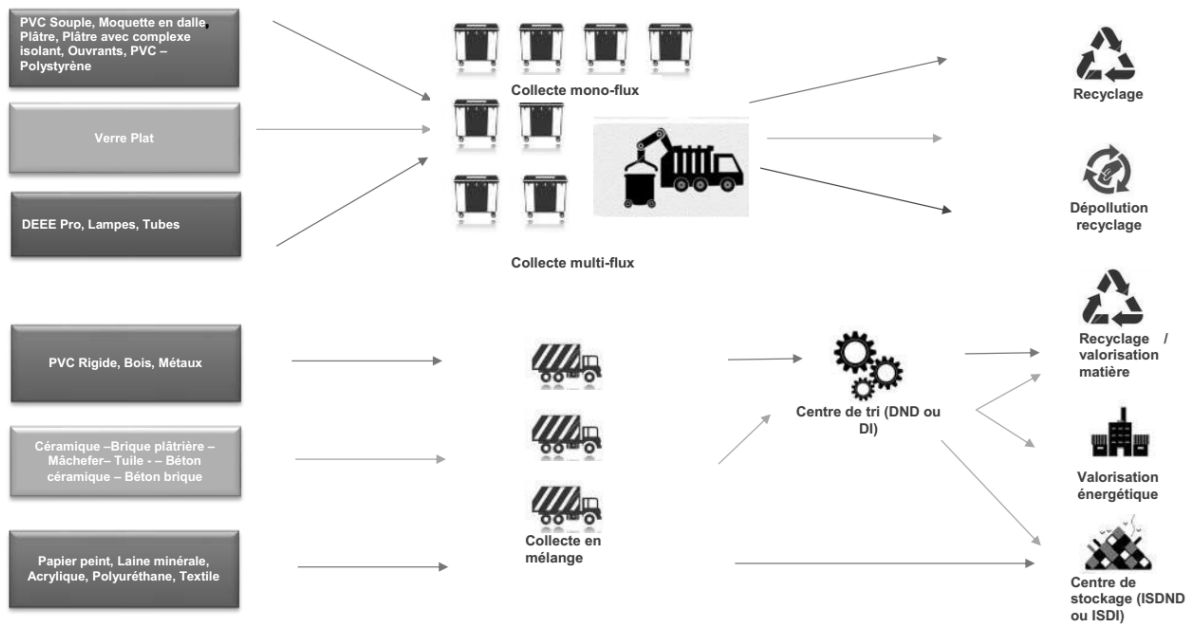


Figure 7 : Exemple de méthodes de tri des déchets de la construction (Récyclum et al., 2016).

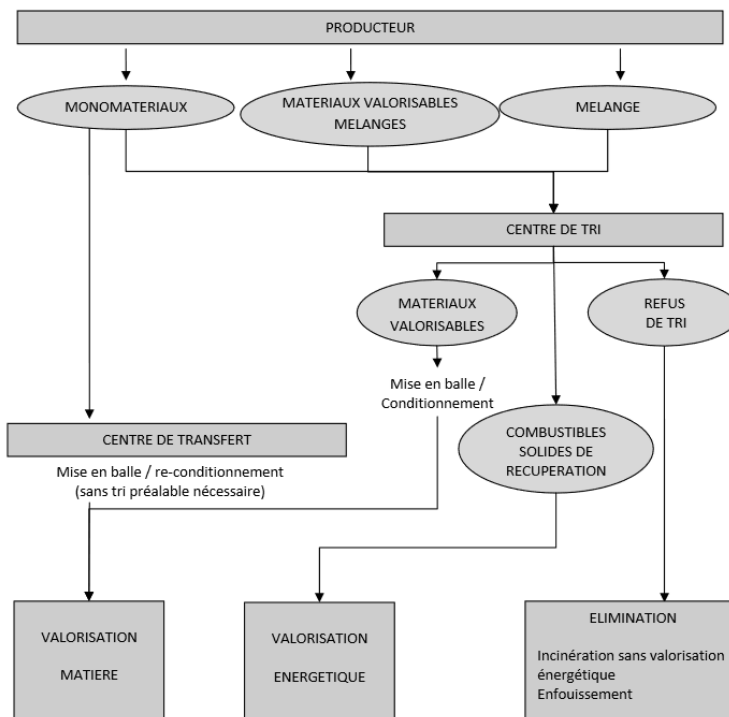


Figure 8 : Fonctionnement général de la filière des déchets non dangereux (FNADE, 2012)

Après avoir sélectionné la méthode de tri, il est nécessaire de traiter les déchets en fonction de la hiérarchie des traitements. La Figure 8 (FNADE, 2012) est un schéma présentant les différentes possibilités de tri et de traitement des déchets. On observe que la collecte par mono-flux permet une limitation des intermédiaires ainsi qu'une possibilité accrue de valorisation matière. L'enjeu d'une bonne valorisation est de préserver autant que possible l'intégrité de l'objet ou *a minima* de la matière.

1.1.2.2 Les filières de traitement

Dans cette section, nous abordons les principales filières de traitement pour les matériaux du BTP. La valorisation par le réemploi et la réutilisation sera présentée ultérieurement et ne fait pas l'objet de cette partie ce sont des procédés moins développés et plus spécifiques.

Le projet Démoclès (Récyclum et al., 2016) présente un tableau synthétique du cahier des charges des filières de valorisation (notamment recyclage et valorisation énergétique). Sur la base de ce document nous présenterons le devenir des principaux matériaux issus du BTP.

Plusieurs notions sont importantes concernant les déchets et leur valorisation :

- Valorisation en **boucle fermée** : cela qualifie une valorisation où le produit du traitement est utilisé pour le même type d'objet qu'avant traitement. Par exemple dans le cas du recyclage des bouteilles plastiques, si le procédé de valorisation permet de produire de la matière première pour la création de nouvelles bouteilles alors c'est un recyclage en boucle fermée ;
- Valorisation en **boucle ouverte** : cela qualifie une valorisation où le produit du traitement est utilisé pour un autre type d'objets que l'objet initial avant traitement. Dans l'exemple précédent, le recyclage des bouteilles plastiques pour créer des vêtements en polaire correspond à une valorisation en boucle ouverte.

La Figure 9 illustre ces deux notions.

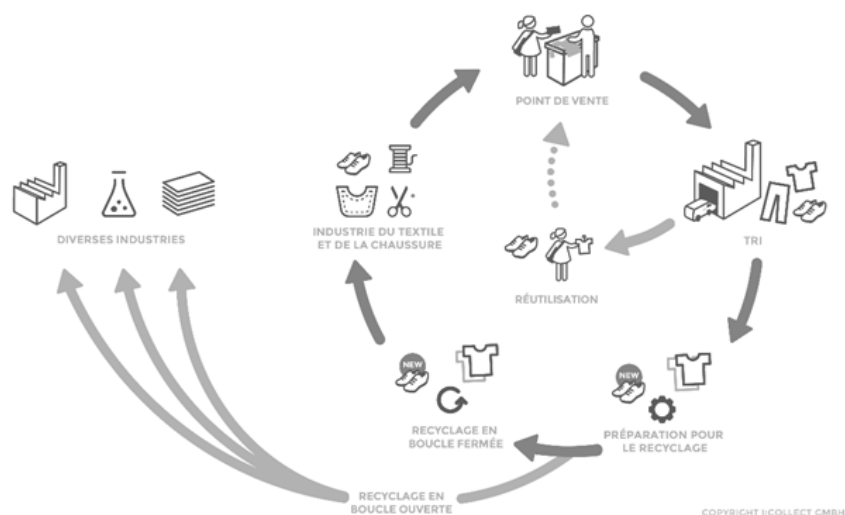


Figure 9 : Schéma illustrant la valorisation en boucle ouverte et la valorisation en boucle fermée (image : collect CMBH⁴)

Lorsque l'on étudie les déchets, il se pose également la question des caractéristiques des objets qui deviennent des déchets et de leur état. Les bâtiments et les ouvrages des travaux publics ayant été construits il y a plusieurs décennies (voire siècles), il peut être difficile de connaître tous les composants d'un produit. Par ailleurs, l'objet peut être soumis au cours de sa vie en œuvre à des intempéries, des accidents ou encore une détérioration physique provoquant une baisse de qualité de la matière ou

⁴ <https://www.ico-spirit.com>, consulté le 13/10/2021

une modification des propriétés initiales. Ce sont autant de points qui peuvent freiner la valorisation de certains déchets.

Le plastique

Il faut en réalité parler des plastiques car il en existe plusieurs types. Dans un bâtiment, on trouve principalement le PVC (rigide ou souple), le polyéthylène et le polystyrène. Le PVC, bien que présent dans de nombreux objets du bâtiment (menuiseries, sols souples, canalisations) ne représente que 0,3 % en masse des déchets du bâtiment selon le projet ANR ASURET mené par le BRGM (Michel et al., 2010). Ainsi, bien que recyclable, l'aspect économique (tri et transport) peut freiner sa valorisation matière. Néanmoins, les plastiques thermodurcissables ne pouvant être refondus, ils sont plus difficiles à recycler, ils sont soit enfouis en centre de stockage (Installation de Stockage des DND : ISDND) soit valorisés énergétiquement en incinération ou comme CSR (combustible solide de récupération ; des CSR sont des déchets non dangereux triés, n'ayant pas pu subir une valorisation matière et préparés pour être utilisés comme combustible). Les plastiques thermodurcissables sont les composés qui « sous l'action d'un catalyseur [...] voient leurs résines se transformer en objets finis infusibles et insolubles » lors de leur fabrication⁵. On trouve dans cette catégorie les aminoplastes (Formica), le polyuréthane, le polyoranolsiloxane (silicone). Ces plastiques sont à distinguer des thermoplastiques (polystyrènes, polyvinyles, polypropylène, PVC...) qui sont des plastiques où « la structure et la viscosité peuvent être modifiées par chauffage et refroidissement successifs, de façon réversibles » (Paprec Group, n.d.). Ils sont donc potentiellement recyclables.

Le plâtre

Le plâtre est recyclable. Néanmoins, ce sont principalement les déchets issus de la phase construction qui sont recyclés car ils sont propres/neufs et de composition connue. Il est plus difficile de recycler les déchets issus de la démolition car leur tri est plus complexe (Brière, 2016). Toutefois, avec l'engagement pour la croissance verte relatif au recyclage du plâtre en 2016, ratifié par le syndicat national des industries du plâtre, le développement du recyclage du plâtre est soutenu par les industriels. Ils accompagnent et encouragent les entreprises pour améliorer la qualité du tri.

Pour la part des déchets ultimes de plâtres (si contaminés par d'autres éléments non dangereux), ces derniers vont en ISDND ou ISDI (installation de stockage de déchets inertes). Toutefois, à cause du risque de relargage de sulfates, ces déchets de plâtre doivent être stockés dans une alvéole close et contrôlée. C'est pourquoi, la présence de plâtre dans les déchets inertes doit être minime.

Le bois

On distingue le bois traité (DD) et le bois non traité (DND). Le bois traité, considéré dangereux (bois à la créosote), est envoyé en ISDD (installation de stockage des déchets dangereux). Le bois non traité peut être recyclé en papier par exemple ou bien en compost. Il peut être également valorisé énergétiquement en CSR (combustibles solides de récupération) ou cimenterie et incinérateurs. À noter que lors de son cycle d'usage dans le bâtiment, l'historique du bois peut être difficile à retracer, il est susceptible alors d'être considéré comme dangereux.

Les matériaux inertes (béton, brique, céramique)

Ces matériaux sont initialement déposés en ISDI. Toutefois, des techniques de valorisation ont été développées et étudiées (Ben Fraj and Idir, 2017; IREX, n.d.). Dans les études citées précédemment, il

⁵ Site web (Paprec Group, n.d.)

est question de recycler les déchets inertes en granulats et de les incorporer à la fabrication du béton. Nous détaillerons plus précisément ces projets dans la partie 1.2.3. En dehors de ce recyclage, il est possible de valoriser ces déchets comme remblais, sous couche de chaussée ou réaménagement de carrière. En raison des grandes quantités de déchets inertes produites par le BTP (section 1.1.1), l'étude de leur valorisation, objet de ce travail, est très intéressante.

Les matériaux inertes (verre)

Dans le bâtiment, les déchets de verre proviennent principalement des fenêtres. Le verre est considéré comme un déchet inerte, il peut donc être traité de la même façon que les autres matériaux inertes. Il existe en outre une filière spécifique au verre plat, soit en boucle fermée (*i.e.* pour le même usage) pour refaire du verre plat, soit en boucle ouverte (*i.e.* pour un usage différent) pour produire de la laine de verre ou verre creux. À la marge, il peut être recyclé en peinture routière ou en additif dans le béton. Cependant, les conditions de tri du verre plat sont très contraignantes car il ne doit pas y avoir d'autres matériaux. Les verres spéciaux (vitrocéram, anti-feu) ne sont pas recyclables actuellement.

Les isolants

Les principaux isolants dans la construction sont les polystyrènes expansés (PSE), les laines minérales et le polyuréthane.

Le PSE peut être recyclé en boucle fermée ou en boucle ouverte (bétons allégés, cintres...). Il peut être également valorisé énergétiquement. Néanmoins, les déchets PSE issus de la démolition ne sont pas recyclés à cause de leurs caractéristiques inconnues ou bien en raison du caractère souillé. Ils sont alors soit incinérés, soit stockés en ISDND.

Le polyuréthane contient dans sa mousse un gaz d'expansion (CFC ou HCFC) très impactant pour l'environnement car ce sont des gaz à effet de serre. Lors de son traitement, le gaz est récupéré et traité comme DD. Le polyuréthane en lui-même sera soit recyclé soit incinéré et valorisé énergétiquement. Néanmoins, le recyclage n'est actuellement réalisé que pour les panneaux sandwich tôle-polyuréthane.

La laine minérale ou laine de verre, à l'instar du polystyrène, peut techniquement être recyclée. Néanmoins, cela concerne principalement les retours de chantier de construction *i.e.* les retours de laine propre et en bon état. Par exemple, l'industriel Armstrong dispose d'une filière de recyclage en interne pour les plafonds acoustiques.

Les déchets issus de la démolition ne sont actuellement pas recyclés notamment à cause des questions concernant la composition mais également la propreté des éléments. Ainsi, ces éléments sont enfouis en ISDND (s'ils ne présentent pas de produits dangereux).

Une filière plus structurée est amenée à se développer suite à la *loi n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire* pour l'ensemble du secteur du BTP, ce qui inclut donc la filière des isolants.

Les métaux

La filière de recyclage des métaux est peut-être la filière la plus mature et la mieux implantée, du fait de la valeur économique de la matière première. Les métaux principaux du BTP sont les armatures

métalliques, l'aluminium, le cuivre, l'acier et la fonte. Ces métaux sont triés notamment grâce aux tris magnétique et par courant de Foucault, méthodes présentées précédemment.

Les matériaux dangereux (le plomb et l'amiante)

Le plomb peut être présent sous plusieurs formes dans le bâtiment (peinture, canalisations, couverture). Le plomb massif est recyclé pour être réutilisé dans les secteurs où cela est autorisé (plomberie d'art, batterie, cristallerie...). La peinture au plomb est stockée en ISDD.

L'amiante lié (ex. amiante béton) est traité en ISDD. L'amiante friable (ex. flochage) peut être vitrifié (neutralisé) et donc potentiellement valorisé sans pour autant le rendre inerte selon le CSTB (centre scientifique et technique du bâtiment) (SENAT, 2005). Il n'existe qu'un seul centre de vitrification en France (Morcenx, Landes) ce qui entraîne des problèmes économiques et environnementaux vis-à-vis des distances de transport. Il est également possible de déposer les déchets amiantés en ISDD.

1.1.3 Cadre réglementaire

1.1.3.1 Responsabilité élargie des producteurs (REP)

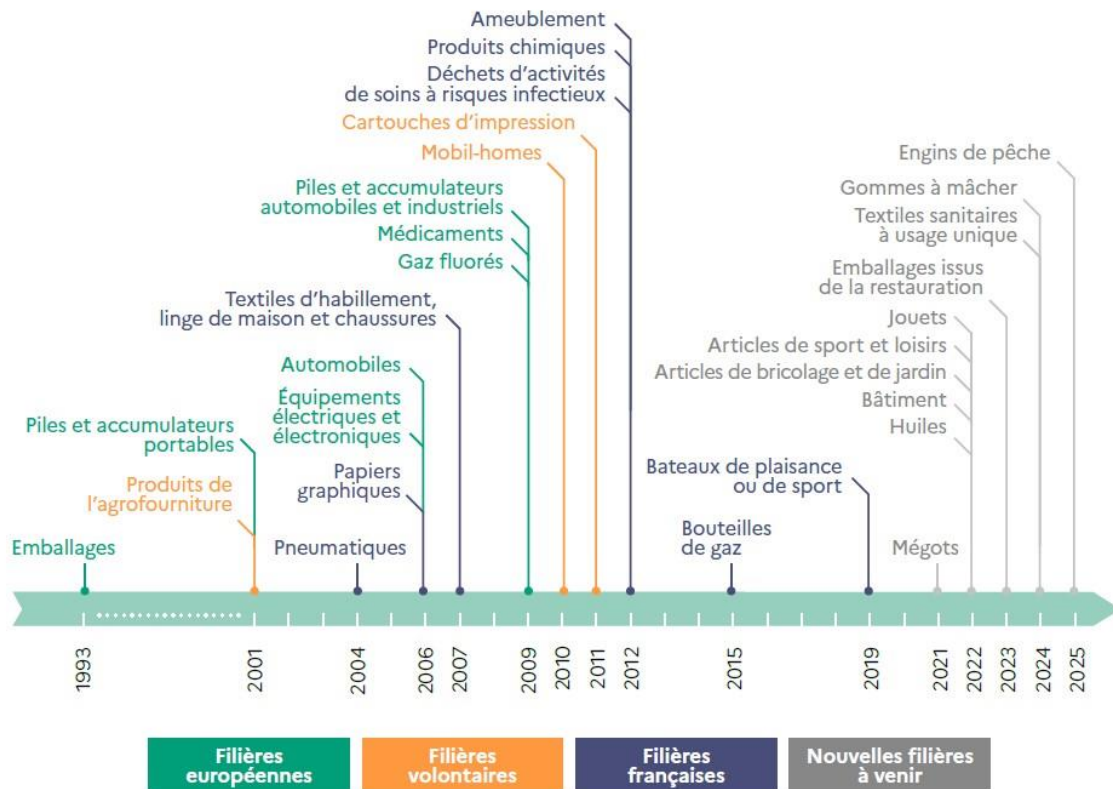
En France, la responsabilité élargie des producteurs (REP) est décrite dans la loi depuis 1975 (article L541-10 du code de l'environnement) : « Il peut être fait obligation aux producteurs, importateurs et distributeurs de ces produits ou des éléments et matériaux entrant dans leur fabrication de pourvoir ou de contribuer à l'élimination des déchets qui en proviennent ».

La REP permet d'agir sur l'ensemble du cycle de vie d'un produit. Dans le cadre de la REP, « les fabricants, distributeurs pour les produits de leurs propres marques et importateurs, qui mettent sur le marché des produits générant des déchets, doivent prendre en charge la gestion de ces déchets, notamment financièrement » (ADEME, n.d.).

Les objectifs de la REP concernent principalement le traitement des déchets produits. Toutefois, les enjeux de la REP sont élargis à la prévention avec la parution de la loi de transition énergétique pour la croissance verte en 2015 puis de la feuille de route pour l'économie circulaire en 2018 et enfin la loi anti-gaspillage pour une économie circulaire (n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire) votée en février 2020. La loi anti-gaspillage met en avant l'importance de la prévention et de la gestion des déchets. Elle stipule notamment (JORF n°0035 du 11 février 2020, 2020) :

- L'interdiction des emballages en plastique à usage unique à l'horizon 2040 ;
- L'interdiction de destruction des invendus non-alimentaires ;
- La création de fond pour le réemploi ;
- Le développement de la réparation avec la mise en place d'un indice de réparabilité ;
- La mise en place de nouvelles filières pollueurs-payeurs.

Ces points doivent donc également s'appliquer à l'industrie du BTP et aux filières de valorisation. Ainsi, dans ce contexte, la REP a subi des évolutions. Le gouvernement, l'ADEME et toutes les parties prenantes concernées par la prévention des déchets ont élaboré un nouveau plan national de prévention des déchets pour la période 2021-2027 mettant en place de nouvelles filières REP (Figure 10) et notamment une filière REP pour le bâtiment en 2022.



Filières REP et dates de mise en œuvre opérationnelle*

* Date du premier agrément ou date de fonctionnement opérationnel de l'organisation ou date de prise en charge des produits usagés



Figure 10 : Les filières de la REP et les chiffres clefs de la REP (données de 2019) (ADEME, n.d.)

1.1.3.2 Le diagnostic déchet pour la déconstruction

La loi du 12 juillet 2010 (Grenelle 2) instaure une obligation de diagnostic déchet préalablement à la déconstruction (JORF n°0012 du 14 janvier 2012, n.d.) dans certaines conditions (de taille et d'usage du bâtiment déconstruit). Suite à la publication de la loi anti-gaspillage (article 51 et article 130), des modifications ont été effectuées sur le diagnostic déchet (cas d'applications, méthode et réalisation). Le Décret n° 2021-821 du 25 juin 2021 relatif au diagnostic portant sur la gestion des produits, équipements, matériaux et des déchets (PEMD) issus de la démolition ou de la rénovation significative de bâtiments fixe les nouvelles modalités. Ce texte est entré en vigueur au 1^{er} janvier 2022. Ce nouveau diagnostic permet de distinguer les produits réemployables et les déchets qui devront être traités. Le diagnostiqueur devra disposer d'une formation certifiante proposée par le CSTB. Ce décret fixe le périmètre d'application, notamment :

- Les catégories de bâtiment,
- Le cas de la réhabilitation,
- Les modalités du diagnostic,

- La télé-déclaration et le recouplement post-déconstruction.

Le diagnostic s'applique aux opérations de réhabilitation ou démolition de bâtiments dont la surface de plancher cumulée est supérieure à 1000 m² ou, dans le cas où le bâtiment accueille au moins une activité agricole, industrielle ou commerciale, qui abrite une ou plusieurs substances dangereuses.

Les objectifs du diagnostic sont de connaître la nature, la quantité et la localisation des déchets d'un bâtiment (matériaux, produits de construction, équipements, autres déchets) et d'avoir des indications sur les filières de gestion des déchets locales (élimination, valorisation et potentiellement réemploi). Ainsi, cela permet d'identifier les matériaux et les déchets à risque mais également d'identifier et de déterminer la meilleure valorisation pour chaque matériau/déchet présent sur le chantier. Avec le nouveau décret, le volet réemploi est renforcé. En effet, une « estimation de l'état de conservation des produits », des « indications sur les possibilités de réemploi » et « l'estimation de la nature et de la quantité des produits qui peuvent être réemployés » doivent être mentionnés.

Par ailleurs, les préconisations des filières de valorisation doivent suivre la hiérarchie des déchets, dans le but d'optimiser leur valorisation. La Figure 11 présente un extrait du diagnostic (décret de 2011). On peut notamment y voir le quantitatif et les préconisations de traitement.

Ce nouveau diagnostic déchet vise à pallier les faiblesses du précédent datant de 2011. En particulier, il insiste plus sur le réemploi et la réutilisation et oblige sa réalisation par du personnel formé. Cela permet d'avoir un diagnostic plus précis.

Certaines questions persistent : ce diagnostic incite-t-il à innover dans la gestion des déchets ? Sera-t-il plus complet et permettra-t-il une exploitation approfondie par les entreprises et maîtres d'ouvrage ? Le décret d'application ainsi que les retours d'expériences des chantiers à venir permettront progressivement de répondre à ces questions.

TYPES ET QUANTITES DE PRODUITS CONSTITUTIFS DU BATIMENT

NB : les informations mentionnées dans le tableau sont des exemples fictifs.

	Détail des composants et des matériaux	Localisation des matériaux dans les bâtiments	Quantité ⁵			Observations concernant les opérations particulières à envisager lors du curage et de la déconstruction	Observations concernant les éventuelles possibilités de réemploi sur le site ou hors site, de recyclage ou à défaut d'élimination, en regard des filières locales
			Unités (ml, m ² , u)	Tonnes	m ³⁶		
Ex : dalle béton armé ep 20 cm	Béton,	Sol et planchers	2000 m ²	960	400	Aucune (pas de peinture au plomb, d'amiante ou de plâtre)	Recyclage, site labellisé Qualirecycle à 15 km
	armature acier	Sol et planchers	2000 m ²	8	/		Recyclage, site labellisé Qualirecycle à 15 km
Ex : câbles							
Ex : bardage bois							
Ex : cloisons panneaux sandwichs PUR							
Ex : fenêtres bois	Bois					Dépose manuelle des vantaux. Conserver l'intégrité des vantaux y compris vitrage	Entreprise d'insertion dans la même localité qui reprend les vantaux d'anciennes fenêtres bois moyennant le cahier des charges ci-joint.
	Vitrage						

Figure 11 : Extrait du diagnostic déchet préalable à la démolition selon l'Arrêté du 19/12/11 relatif au diagnostic portant sur la gestion des déchets issus de la démolition de catégories de bâtiments. Extrait provenant de Diagademe⁶.

⁶<https://martinique.ademe.fr/sites/default/files/diagnostic-dechets-deconstruction-rehabilitation-batiment.pdf> consulté en Août 2022

1.2 FOCUS SUR LE MATERIAU BETON

Le béton est un matériau fortement utilisé dans le monde, en particulier dans le domaine de la construction. En France en 2018, plus de 40 millions de mètres cube de béton prêt à l'emploi (BPE) ont été produits, soit 6,8 % de plus qu'en 2010 (UNICEM and SNBPE, 2020). Par ailleurs, il est estimé que le BPE représente plus de 60 % de la consommation de ciment. La Figure 12 présente l'évolution de la consommation de BPE depuis 1996. Nous pouvons remarquer qu'après une baisse de production au début des années 2000, on observe actuellement une augmentation de la production et donc de la consommation.

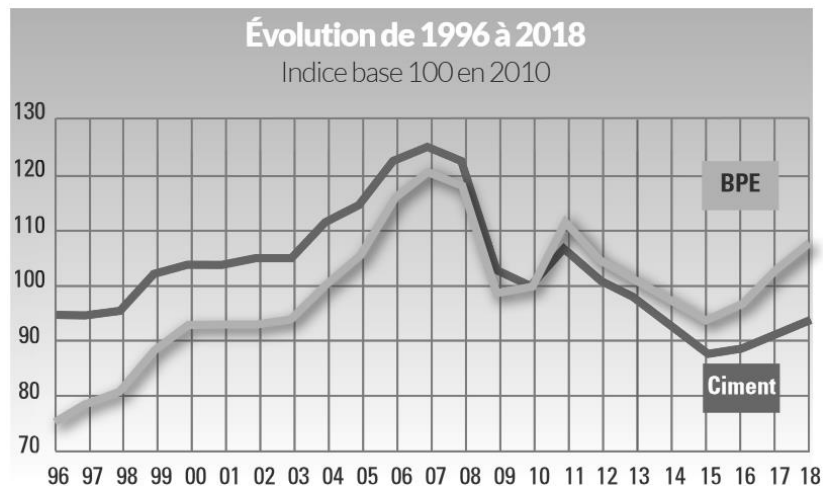


Figure 12 : Évolution de la production de béton prêt à l'emploi de 1996 à 2018 (indice base 100 par rapport à 2010) (UNICEM and SNBPE, 2020)

Impact environnemental du béton

La littérature scientifique montre que le secteur des matériaux de construction est le troisième secteur industriel le plus émetteur de CO₂ dans le monde et dans l'Union européenne (Bertin et al., 2022; Deshayes, 2012; Habert et al., 2010). (Parrot, 2002) précise que le secteur des matériaux est responsable de 10 % du total des émissions de gaz à effets de serre (GES) anthropiques, parmi lesquelles une majorité est liée à la fabrication du béton.

L'impact fort du béton sur le changement climatique est lié à la production du ciment. En effet, une analyse du cycle de vie du ciment montre que 95 % de ce CO₂ est émis lors de sa production (Fishedick et al., 2014), et en particulier de :

- La **combustion** du combustible qui permet de chauffer le calcaire, l'argile et le sable à 1450°C, pour 40 % environ (Fishedick et al., 2014),
- La **décarbonatation** des composantes lors du chauffage permettant de former du clinker, pour 50 % environ. L'émission des GES liée à cette étape est inévitable car ils résultent de la réaction de transformation.

De nos jours, il existe plusieurs produits permettant en partie de se substituer au clinker tels que les laitiers de hauts fourneaux et les cendres volantes. De nouvelles formulations de ciment émergent utilisant ces nouveaux produits (annexe III). La Figure 13 présente l'effort de réduction pour l'impact sur le changement climatique pour plusieurs formulations de béton courantes (Lachat, 2019) utilisant des ciments différents. Le calcul est réalisé pour 1 m² de voile béton de 20 cm d'épaisseur de même résistance et pour trois classes d'expositions différentes. On peut observer qu'avec les méthodes et

formulations actuelles, il est possible de réduire au plus 40 % des émissions de GES. Des réflexions supplémentaires sont donc à mener afin de limiter l'impact des bétons sur l'environnement.

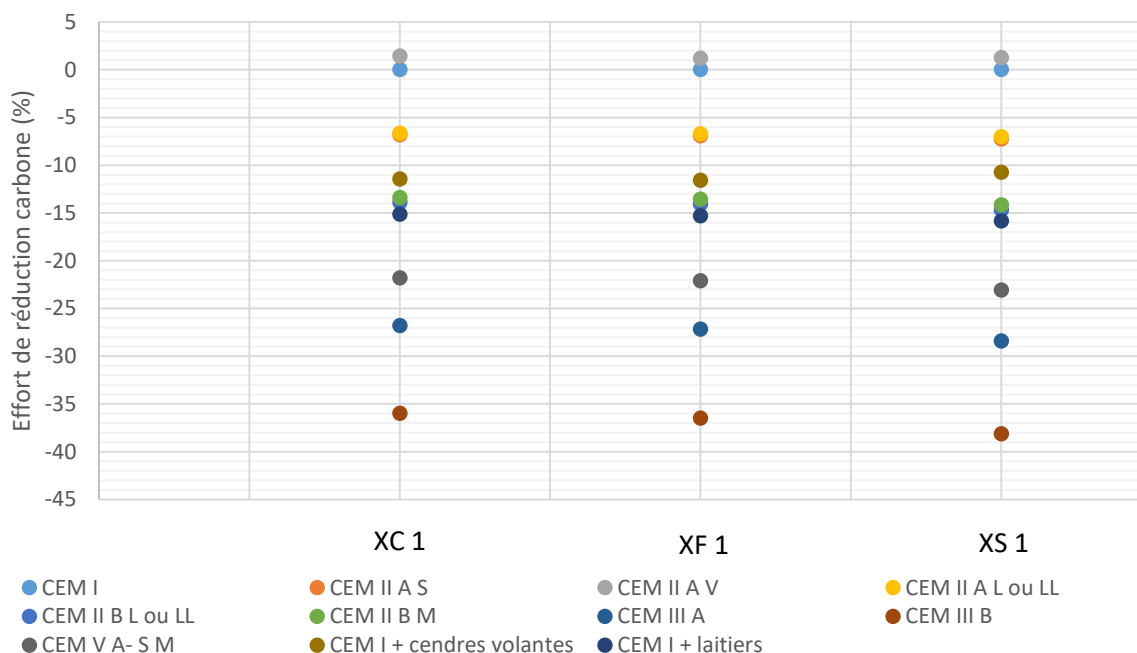


Figure 13 : Réduction de l'impact carbone du ciment pour différents bétons par rapport au CEM I (ciment portland) (Lachat, 2019) pour trois classes d'exposition pour 1 m² de voile d'épaisseur 20 cm.

Face à ce constat, nous nous intéressons dans cette partie au matériau béton. Nous aborderons dans un premier temps la question du diagnostic des structures existantes en présentant les principales techniques. Dans un second temps, nous étudierons les procédés de déconstruction et démolition du bâtiment et notamment des structures en béton. Enfin, la démolition menant à la production de gravats, nous détaillerons la méthode de valorisation (recyclage) de ces gravats en granulats recyclés pour la création d'un nouveau béton.

1.2.1 Les techniques de diagnostic

De par la longue durée de vie d'un bâtiment, le contexte exact de conception, mise en œuvre et vie en œuvre des éléments de structure du bâtiment ne sont pas tous connus. Ainsi en cas de réhabilitation, rénovation, réparation, il est nécessaire de disposer de méthodes de diagnostic et de contrôle précises et souples. Pour répondre à cette nécessité, plusieurs méthodes et protocoles ont été développés ces dernières années notamment pour les ouvrages d'art. Par exemple, (LCPC, 2005) présente les techniques de diagnostic adaptées pour un béton qui a été soumis à un incendie ; (Breyse and Abraham, 2005) détaillent la méthodologie d'évaluation non destructive des ouvrages en béton ; de même le cahier interactif d'auscultation des ouvrages d'art de l'Ifsttar⁷ traite de l'auscultation d'un ouvrage dans sa globalité. Ce dernier présente les méthodes d'auscultations et de diagnostic pour connaître l'état des ouvrages.

Le diagnostic d'ouvrage est composé de trois degrés d'analyse détaillés dans les parties suivantes.

⁷ <https://www.ifsttar.fr/collections/CahiersInteractifs/CI1/apropos-presentation.html> consulté en Août 2022

1.2.1.1 Inspection visuelle

Cette inspection consiste à l'identification et au repérage de témoins qui pourraient rendre compte d'une pathologie. Cette inspection permet notamment d'observer les écaillages ou gonflements, la présence de corrosion ou d'armature visible (Figure 14 (a)), la présence de fissures ou porosité (Figure 14 (b)) ou encore de contamination biologique ou d'efflorescence. L'inspection visuelle ne permet pas de détecter les problèmes cachés (parties non accessibles) et les problèmes internes. De plus, cette méthode ne permet que de mettre en lumière des pathologies mais ne permet pas de comprendre la structure et les caractéristiques d'un élément sain ou endommagé.



Figure 14 : Corrosion des aciers en milieu marin à gauche (images CEBTP <https://www.experts-cebtpti.org>) et réaction d'alcali-granulat dans un sommier de pont à droite (Mommer et al., 2004).

1.2.1.2 Essais non destructifs et instrumentation

Afin de compléter l'inspection visuelle, plusieurs méthodes d'essais non destructifs ont été développées. C'est un ensemble de méthodes « permettant de contrôler certaines propriétés [et] caractéristiques du béton sans compromettre son intégrité » (technobeton, 2016). (Leshchinsky et al., 1990) récapitulent dans leur article les avantages des essais non destructifs et notamment le gain de temps à la fois pendant l'essai et pour préparer l'essai ainsi que l'absence (ou la limitation) de dommage à l'ouvrage.

Tableau 5 : Tableau présentant les avantages et les inconvénients du contrôle non destructif. Inspiré de (Breyse and Abraham, 2005; Leshchinsky et al., 1990; Radhia et al., 2018; technobeton, 2016; Yagoub, 2009)

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">- Réalisation rapide et facilité de mise en œuvre,- Sur ouvrages neufs ou anciens,- Test fiable directement sur le terrain,- Possibilité de suivi régulier (sans modification de structure),- Plus de sécurité et plus économique.	<ul style="list-style-type: none">- Techniques récentes donc freins sociaux et freins liés au manque de formation pour l'interprétation,- Existence de facteurs externes pouvant influencer la fiabilité des résultats (températures, bruits de mesures...)

Ainsi actuellement, le diagnostic de l'état des armatures repose principalement sur les tests non destructifs électrochimiques (Andrade and Alonso, 2004; Bouteiller et al., 2012). Par exemple, (Cremona et al., 2011) étudient dans le cadre du projet de recherche APPLLET une série d'échantillon en béton armé soumis à différentes conditions environnementales. Ils analysent par la suite l'état des

éléments par les techniques électrochimiques. Cela leur permet de comprendre comment mieux interpréter les caractérisations électrochimiques.

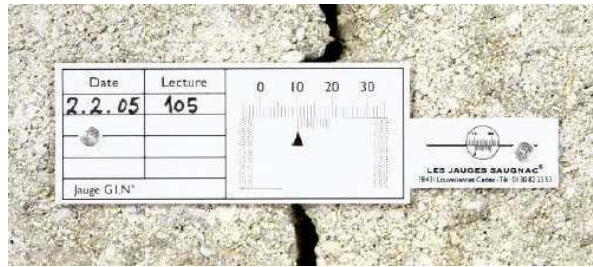
Une synthèse des principaux avantages et inconvénients des méthodes non destructives est présentée dans le Tableau 5.

Ce type de contrôle peut être mis en œuvre à chaque étape de la vie d'un béton que ce soit lors de la production, la mise en œuvre sur chantier ainsi que à l'état durci. Il existe des essais faisant appel à la thermique, l'électromagnétisme, l'électrochimie ou l'acoustique. Les principaux essais sont les suivants (certains outils et résultats de mesure sont présentés en Figure 15) :

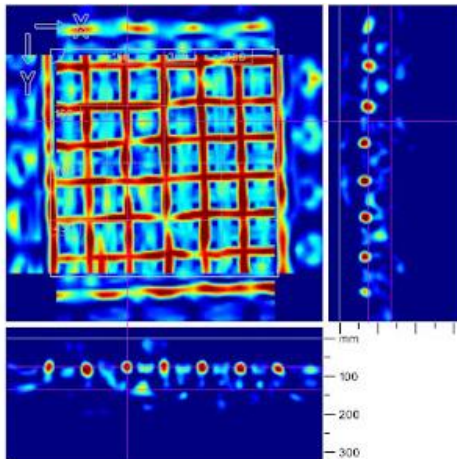
- **Détermination de la résistance/densité du béton :**
 - **Essais au scléromètre :** également appelé marteau de Schmidt, cet outil permet de mesurer l'indice de rebondissement, cela permet d'évaluer la résistance du béton et sa variabilité spatiale. L'essai consiste en s'appuyant contre l'élément d'étude à obtenir un rebond en projetant un poids au sein de l'appareil. Le rebond du poids comprime un ressort et donne ainsi une valeur en N/mm^2 . Il est nécessaire de réaliser la mesure à plusieurs endroits et de façon homogène afin d'obtenir un résultat représentatif. Cet essai peut mettre en évidence des bulles d'air ou des nids de graviers.
 - **Essais aux ultrasons :** cet essai mesure la vitesse des ultrasons à travers l'élément d'étude. Effectivement la vitesse de propagation de l'onde varie en fonction du module d'élasticité du béton. L'essai consiste à installer sur la surface de l'élément d'étude un émetteur d'un côté de la paroi et un récepteur de l'autre, un terminal d'acquisition permet de traiter les données. Cet essai permet notamment d'évaluer spatialement la densité du béton (plus précisément que le scléromètre), de déterminer la profondeur des fissures ou encore l'impact/la profondeur de pénétration d'un incendie.
- **Détection des armatures :**
 - Le **Pachomètre** : également appelé Ferroscan, il repose sur la variation du champ électromagnétique provoquée par l'armature dans le béton. Cet outil permet de déterminer le positionnement des armatures, la profondeur et le diamètre.
 - Le **radar de structure** : il permet de repérer des délaminations, des couches successives de matériaux et de sonder plus profondément. Cette dernière méthode ne permet, cependant, pas de déterminer la taille de l'armature, l'outil détectant le centre de masse.
- **Détection de la corrosion :** la mesure du potentiel de corrosion est réalisée à partir « d'une différence de potentiel entre une armature (dans son électrolyte) et une électrode de référence en surface du béton » (Lozinguez and Barthelemy, 2017). Cette méthode nécessite de s'ancrer à l'armature de l'élément ; cela induit donc une intrusion locale mais sans conséquence sur la capacité structurelle. Le potentiel est ainsi mesuré le long de l'armature en déplaçant l'électrode de référence. Les variations de résistivité impliquent une variation de la qualité de l'armature et donc potentiellement une corrosion (Figure 15, (d)). Cette méthode permet de connaître plus précisément l'état d'une armature.
- **Suivi des fissurations :** les méthodes d'essai aux ultrasons et pachomètre permettent également de détecter des fissures. Cependant, toute fissure n'est pas dangereuse, cela dépend de son évolution dans le temps. Ainsi, il peut être nécessaire d'en réaliser un suivi. Cela peut se faire par des jauges et capteurs, de façon automatisée ou non, à l'instar de la jauge Saugnac.



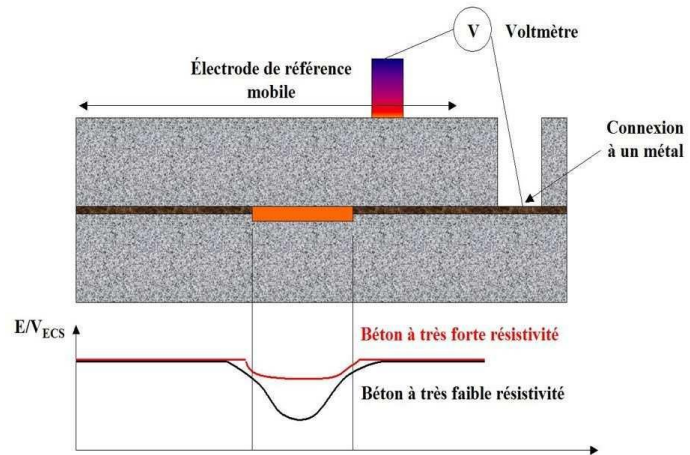
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 15 : Illustration d'outils ou résultats de mesure pour le diagnostic non destructif et l'instrumentation. (a) un scléromètre (<https://www.es-france.com>) ; (b) une jauge de mesure de fissuration (<https://www.saugnac-jauges.fr>) ; (c) un résultat de Ferroskan (<http://www.ccstructures.com>) ; (d) principe de la mesure du potentiel de corrosion des armatures (Loziquez and Barthelemy, 2017).

1.2.1.3 Essais destructifs et essais complémentaires

Enfin, il est également possible d'effectuer des essais destructifs pour les caractéristiques manquantes. Cela ne permet toutefois que d'avoir une valeur pour un échantillon, la généralisation au matériau ou à l'élément de structure pouvant être plus compliquée à établir. (Prassianakis et al., 2003) utilisent des essais destructifs en compléments des méthodes non destructives. Cela leur permet notamment de mesurer la résistance à la compression d'un béton âgé de 30 ans.

Les principaux tests destructifs pour le béton sont destinés à la caractérisation physique (masse volumique, adsorption d'eau) et mécanique du matériaux (résistance à la compression, à la traction, module d'élasticité...). Ce sont des essais normés, réalisés en laboratoire, sur des carottes prélevées sur le bâtiment ou l'ouvrage et ne sont pas spécifiques aux bétons âgés.

À l'échelle de la structure, il est possible de réaliser un essai de flexion sur un élément complet. Cet essai permet de faire ressortir les caractéristiques de résistance du béton. Cet essai est totalement destructif pour l'ouvrage testé mais permet néanmoins, par analogie, d'obtenir un ordre de grandeur de la résistance pour les éléments similaires.

Par ailleurs, pour compléter le diagnostic d'un ouvrage, certains tests chimiques peuvent être conduits :

- **Carbonatation** : le test de carbonatation permet de disposer ponctuellement de la profondeur/ le front de carbonatation du béton de l'ouvrage. La carbonatation rend le milieu

moins basique (pH de 8,5 au lieu de 12,5) provoquant un risque de dépassivation des armatures et donc d'initiation de la corrosion des armatures. L'essai consiste en un test du pH après fendage d'une carotte de béton. De la phénolphthaléine est aspergée sur le béton et va venir se colorer si le pH de celui-ci est supérieur à 9,2. Ainsi la partie de l'échantillon qui reste violet (Figure 16) est bien alcalin. Par contre la partie incolore traduit une perte d'alcalinité du béton et donc une carbonatation.

- **Teneur en chlorure** : ce test peut être utile pour les ouvrages exposés aux ions chlorures (sels marin, sels de déverglaçage). À l'instar du test précédent, cet essai permettra de déterminer la profondeur de pénétration des ions chlorures, susceptibles d'initier la corrosion des armatures.
- **Composition du ciment** : Cette analyse permet d'identifier la composition d'un béton et plus particulièrement du ciment. Il est possible d'identifier le type de ciment utilisé ainsi que d'avoir une idée du dosage en ciment.

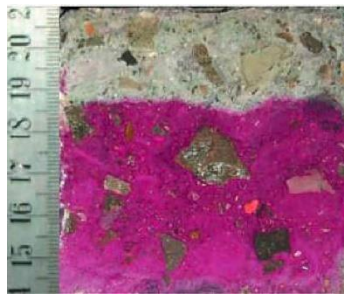


Figure 16 : Test à la phénolphthaléine d'une carotte de béton (image de <https://www.groupe-licef.fr> consulté en septembre 2021)

1.2.2 Les techniques de démolition

Les bâtiments de la seconde moitié du XX^e siècle atteignent actuellement leur fin de vie. Or ils n'ont pas été conçus pour être directement réemployables ou réutilisables. Le développement des techniques de démantèlement revêt une grande importance dans le domaine de la construction. (Kamrath, 2013) classe ainsi les solutions en trois catégories : la rénovation/réhabilitation ou le réemploi de la structure, la démolition et la déconstruction également appelée démolition sélective.

Dans cette partie nous allons nous focaliser sur la démolition et la déconstruction, dont nous présenterons les caractéristiques et techniques associées.

1.2.2.1 Déconstruction et démolition

(Philip et al., 2006), dans leur *guide pratique de la démolition des bâtiments*, définissent la **démolition** comme « l'ensemble des actions visant à décomposer une structure, un ouvrage, en éléments suffisamment réduits pour être évacués, éventuellement recyclés, dans les meilleures conditions de sécurité, en mettant en œuvre les procédés et les méthodes les mieux adaptés ». Ainsi, la démolition d'un bâtiment consiste à détruire de manière indissociée le second œuvre et le gros œuvre. Aucun (ou à la marge) tri préalable n'est effectué. Le résultat de cette démolition est un amas de matériaux mélangés.

La **déconstruction** est le terme employé pour une démolition où un tri (total ou partiel) des matériaux présents dans le bâtiment est effectué. La déconstruction nécessite une étape de curage consistant à

enlever et trier le second œuvre de l'ouvrage. Par la suite les matériaux de la structure sont triés (tuiles, bois, acier, béton). C'est, de manière utopique, le processus de construction à l'envers.

Plusieurs études ont été menées afin de déterminer les avantages de la déconstruction par rapport à la démolition (ADEME, 2003; Brière, 2016; Coelho and De Brito, 2013; Elias-Ozkan, 2014; Queheille et al., 2019; Thomsen et al., 2011). (Thomsen et al., 2011) opposent les deux termes en précisant que la déconstruction est le fruit d'une planification contrôlée qui permet de récupérer des matériaux et éléments valorisables d'une manière plus qualitative, limitant le « downcycling » (usage postérieur de l'élément moins qualitatif que pour l'usage antérieur). (Coelho and De Brito, 2013) comparent les aspects techniques et économiques. Ils mettent en avant l'importance de la séquence de déconstruction et soulignent que le surcoût lié à la mise en œuvre de la déconstruction est balancé par le coût plus élevé du traitement pour la démolition. Les auteurs utilisent l'exemple du Portugal où un déchet (gravat) propre coûte seulement 5,5 €/tonne contre 129 €/tonne pour un déchet de construction contaminé (pas nécessairement avec un déchet dangereux). (ADEME, 2003) publie des retours techniques et analyses de 10 chantiers avec divers degrés de déconstruction. Ces données forment une base pour le travail de (Brière, 2016) qui mesure et analyse les avantages environnementaux de plusieurs chantiers de déconstruction via la méthode d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) guidée dans la construction par la norme NF EN 15804 (voir section 1.3 pour plus de détails). Sur son cas d'étude, « la démolition sélective présente des impacts moindres » pour la majorité des indicateurs environnementaux sélectionnés. Par exemple, sur son cas d'étude de démolition de 40 logements, il montre que la démolition sélective permet un gain de 8 % pour le changement climatique mais surtout un gain de 57 % pour l'indicateur d'épuisement des ressources et 40 % pour l'acidification. En tout, 8 catégories d'impact sur 13 présentent un impact moindre pour la déconstruction sélective. À cela s'ajoute le gain de matière ou d'énergie suite à la récupération et au recyclage des matériaux. En effet, (Brière, 2016) indique que le recyclage permet un bénéfice sur 6 des 10 indicateurs.

1.2.2.2 La déconstruction de la structure

Après avoir mis à nu les éléments de la structure de l'ouvrage suite au curage (Figure 17 (a) et (c)), il est alors possible de déconstruire et de trier les matériaux du gros œuvre (Figure 17 (b) et (c)). Nous allons dans cette partie décrire les principales techniques d'abattage de la structure lors de la déconstruction d'un bâtiment.

Le projet de l'ANR ASURET (Michel et al., 2010) présente les techniques de déconstruction et démolition. Les techniques existantes sont décrites dans la suite.

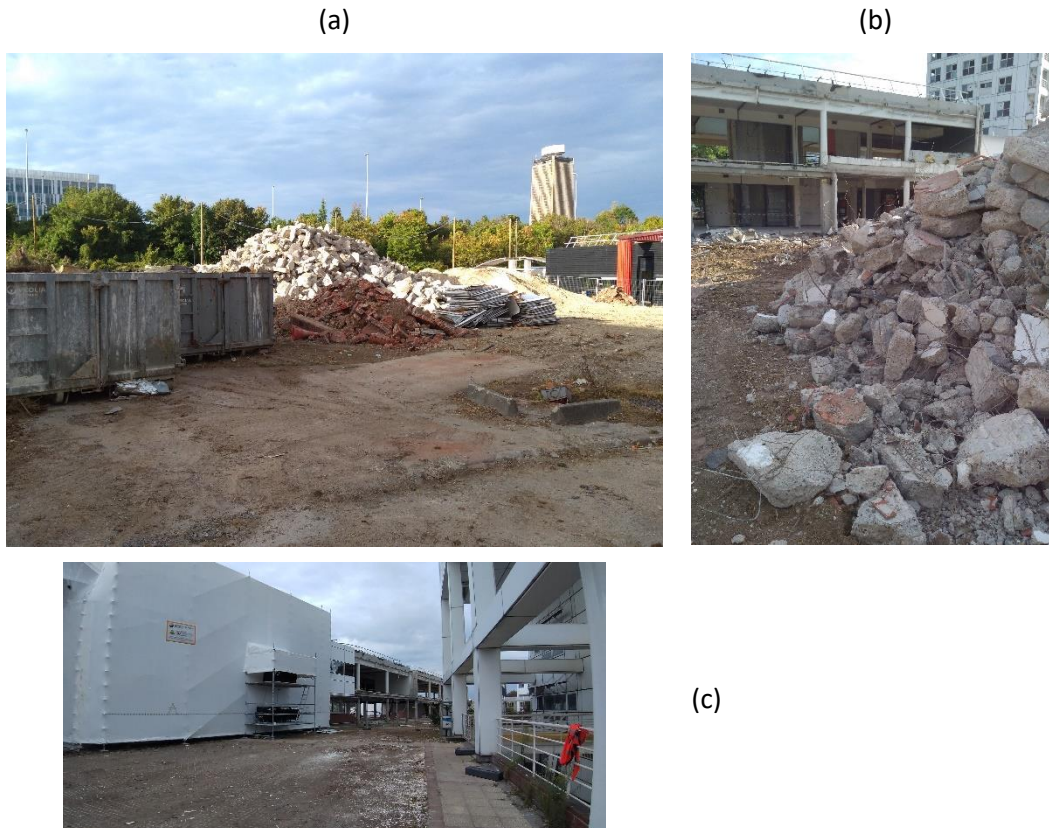


Figure 17 : (a) Bâtiment en phase de désamiantage et curage à gauche, bâtiment curée du second œuvre et de la façade rideau au milieu, bâtiment en attente de déconstruction à droite. (Image LACHAT, chantier CARDEM) ; (b) Tri des matériaux du gros œuvre (Image LACHAT, Chantier CARDEM) ; (c) Bâtiment en phase de curage et tas de déblais suite à la démolition de la structure d'un bâtiment (Image LACHAT, Chantier CARDEM)

Déconstruction manuelle

Les méthodes manuelles sont des méthodes « lowtech » qui nécessitent des outils manu-portables. Des outils électriques ou thermiques (marteaux piqueurs) portables peuvent être utilisés. Cette méthode est encore utilisée notamment pour l'écèlement des bâtiments anciens en maçonnerie. Cela permet de pouvoir récupérer proprement les briques et pierres de tailles.

Techniques mécaniques

Ces techniques nécessitent l'usage d'engins lourds telles que des pelleteuses. On peut mentionner les procédés suivants :

- Procédé par chocs répétés : C'est la méthode la plus emblématique de la démolition. Le principe consiste à utiliser l'inertie d'une masse pour réaliser des chocs puissants et répétés. L'image d'Epinal associée est le boulet où une boule mécanique est suspendue à un câble. Cette méthode comprend également les marteaux piqueurs et perforateurs ainsi que les BRH (brise roche hydraulique) dont une image est présentée Figure 18 (a). On peut inclure dans cette partie l'usage de pince béton hydraulique ;
- Procédés par éclatement : Également appelés procédés par dislocation, ce sont des procédés dont le principe est de faire « éclater le matériau en introduisant de fortes contraintes de traction à l'aide d'un ou plusieurs pistons » (Brière, 2016). Les démolisseurs utilisent des écarteurs hydrauliques ;

- Procédés par découpe : Cette méthode utilise principalement des scies avec notamment des lames diamantées (Figure 18 (b) et (c)). Il s'agit de scier des blocs ou parties d'éléments puis de les déposer avec une grue ou un palan. Il est possible d'inclure pour d'autres matériaux notamment l'acier, le procédé de découpe par cisaillement hydraulique (Figure 18 (b)) qui consiste à couper les poutres puis à les trier au sol (Figure 18 (d)).



Figure 18 : (a) Démolition au Brise Roche Hydraulique (BRH) (<https://www.blanchard-tp.com> consulté le 01/10/2021) ;(b) Méthode de coupe à la pince hydraulique d'éléments en acier (photo : Ambroise LACHAT) ; (c) Méthode par découpage d'une poutre à la scie diamantée (photo : Ambroise LACHAT) ; (d) Tri des éléments acier après découpe (photo : Ambroise LACHAT)

Procédés explosifs ou par gaz

Ces procédés comprennent tous les types de démolition nécessitant des explosifs ou décompression de gaz. Ils consistent à déstabiliser le bâtiment pour qu'il s'effondre soit sur lui-même dans le cas du foudroyage lent ou intégral (Figure 19), soit par basculement.

Nous pouvons inclure dans cette catégorie les procédés par vérinaages (Figure 20) consistant également à faire écrouler le bâtiment sur lui-même. Les murs de contreventement dans une direction sont détruits et remplacés par des poteaux bois (sans contreventement) sur deux étages. Des vérins hydrauliques transversaux permettent de faire translater les étages du dessus par rapport aux étages du dessous. Le second rang de vérin, situé à un autre étage, translate également les étages mais dans le sens opposé afin que les étages supérieurs tombent à l'aplomb des étages inférieurs.



Figure 19 : Tours démolies par foudroyage, Saint Quentin, Ginger Deleo (<https://www.ginger-deleo.com> consulté le 01/10/2021)

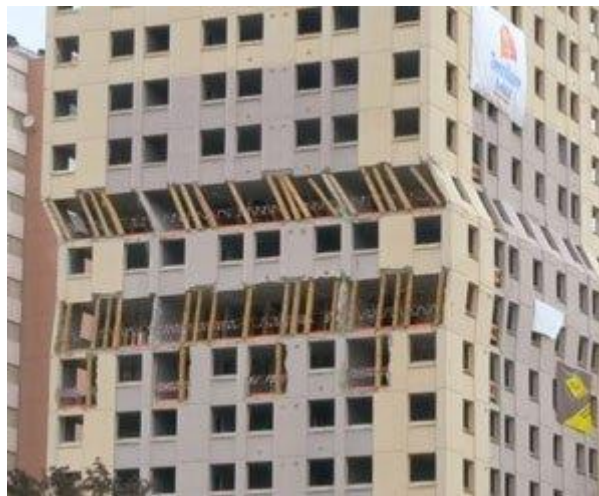


Figure 20 : Vérinage de deux tours (Premys-Ferrari démolition)

Procédés thermiques et haute pression

Les procédés thermiques consistent en l'application d'une chaleur forte via une combustion ou en l'application de contraintes internes liées à des ondes.

- La lance à oxygène et le chalumeau à poudre, sont deux outils dont le principe est similaire. Dans le cas de la lance à oxygène, de l'oxygène est injectée dans un tube métallique ; l'extrémité est allumée ce qui permet « la découpe et le perçage rapide de presque tous les matériaux car les matériaux percés servent de combustible à l'oxygène de la lance » (Michel et al., 2010). Dans le cas du chalumeau à poudre, la combustion est liée à un mélange de poudre de fer et d'aluminium.
- Le générateur de micro-onde et l'électro fracture utilisent le principe du « chauffage par perte diélectrique » (Michel et al., 2010). Dans le cas du générateur à micro-onde, le béton va, lors de l'impulsion de micro-ondes, s'échauffer localement en induisant des contraintes internes et amenant à la rupture. De même, l'électro fracture consiste à exposer une structure à un courant haute-fréquence. En devenant conducteur le matériau s'échauffe et se fragilise.
- Hydro démolition : cette technique permet la destruction, le perçage ainsi que la découpe de béton. Cela fonctionne par projection d'eau à très haute pression (Figure 21). Un adjuvant peut être utilisé pour augmenter l'abrasion. Cette méthode est très utile pour réaliser rapidement la démolition du béton en surface sans impacter les armatures, pour démolir uniquement le

béton détérioré en minimisant l'impact sur le béton sain et pour enlever la rouille sur des armatures. Cette technique a par exemple été utilisée dans la thèse d'Ingrid Bertin (Bertin, 2020) pour déconstruire proprement le portique en vue de sa reconstruction.



Figure 21 : Hydro démolition (<https://www.diamantex.ca>, consulté le 01/10/2021)

Procédés chimiques

Ces derniers procédés « utilisent la pression d'expansion des produits chimiques à base de chaux vive hydratée (éclateurs chimiques) qui peut atteindre des valeurs de 30 à 40 MPa » (Michel et al., 2010).

Comparaison des techniques

Ainsi, il existe un panel important de techniques de démolition. Afin de mieux cerner les avantages et les inconvénients ainsi que les cas d'utilisation de chaque technique, le tableau représenté en Figure 22 a été réalisé dans le cadre du projet ANR ASURET (Michel et al., 2010).

Technique	Type d'ouvrage							Précision et contrôle des opérations*	Sécurité pour les travailleurs	Nuisances sur chantier**	Qualification de la main d'œuvre	Durée	Coût	Coût global estimé***
	Ossature acier	Ossature béton armé	Ossature bois	Dalles ou parois de forte épaisseur	Dalles ou parois de faible épaisseur	Ouvrages massifs en béton armé	Immeubles de Grande hauteur							
Déconstr. manuelle	++	+	+++	+	++	+	+	+++	++	+	++	+++	++	++
Mécanique : découpage (outils diamantés)	+	+++	+	+++	+++	+++	+	+++	+++	++	+++	++	++	++
Autres Mécaniques	+	+	+++	++	+++	+	+	+	++	+++	+	+	+	+++
Explosifs et détonants de gaz	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+	+	+++	+++	+	++	+++
Thermique	++	+++	+	++	+++	+	++	+++	+++	++	+++	++	++	++
Chimique	+	+	+	+++	+++	+	+	++	++	+	+	+++	+++	++

* Plus la précision et le contrôle des opérations est importante, meilleure est la gestion des déchets produits (tri de déchets très efficace, réduction de la quantité, etc.) ; ** Poussières, Bruit, Vibrations, Fumées, etc. ; *** En prenant en compte le traitement des déchets ;

+ Faible ; ++ Moyen ; +++ Important

Figure 22 : Critères de choix d'une technique de déconstruction ou démolition (Michel et al., 2010)

Pour synthétiser, il est possible d'émettre les observations suivantes concernant les structures en béton armé :

- Les méthodes les plus adaptées en terme de rapport cout/rapidité/technique pour le béton armé sont les méthodes mécaniques (chocs répétés, dislocation et découpe), explosives et thermiques.
- Pour les éléments structuraux massifs, les méthodes mécaniques et par explosifs sont les plus adaptées en terme de rapidité ;
- Les méthodes explosives sont plus intéressantes pour les immeubles de grandes hauteurs mais cela crée plus de nuisances sur chantier et nécessite une main d'œuvre qualifiée ;
- Les méthodes mécaniques sont plus précises et moins dangereuses pour les travailleurs. Il y a moins de nuisances mais elles nécessitent tout de même une main d'œuvre qualifiée ;
- Parmi les méthodes mentionnées précédemment les méthodes par découpage se démarquent car contrairement aux autres méthodes, elles permettent d'obtenir des éléments intègres. Ce type de méthode permet d'envisager une filière de valorisation favorisant une réutilisation ou un réemploi (Benoit, 2018). Notons que l'hydro démolition permet de garder également l'armature intègre, toutefois, son usage pour des grands linéaires est limité.

1.2.3 Le granulat recyclé

L'exécution des travaux de génie civil nécessite une utilisation importante de ressources naturelles, telles que les granulats de construction (Mercante et al., 2012). En moyenne, de 2010 à 2017, la production française d'agrégats s'élevait à 367 Mt/an. En 2018, elle a atteint un pic significatif avec 429 Mt d'agrégats produits, soit 29 % de plus par rapport aux 331 Mt de 2015 (Deloitte and BRE, 2015).

Dans la partie précédente, nous avons vu qu'en sortie de la déconstruction, les structures en béton peuvent être sous deux formes : gravats ou éléments intègres suite à un découpage et un démontage. Le devenir de ces éléments est multiple (mise en décharge, comblement de carrières ou recyclage). Les éléments passent quasi systématiquement dans un premier temps par une étape consistant à séparer les armatures du béton. Le procédé de séparation a pour résultat de récupérer du ferrailage qui sera alors recyclé d'un côté et des gravats de bétons de l'autre. Par la suite, nous allons nous intéresser à ces gravats de béton.

1.2.3.1 Le procédé de transformation en granulat

Le procédé de transformation est assez similaire pour tous les centres de traitement. (Ben Fraj and Idir, 2017) présentent le processus d'une plateforme fixe de recyclage de granulat en région parisienne à partir de données collectées sur site. Les différentes étapes mises en œuvre sont présentées sur la Figure 23. Des concasseurs mobiles permettent d'être déplacés directement sur chantier ou bien sur le lieu de stockage des granulats (Figure 24).

La première étape consiste en un broyage puis une séparation des métaux avec un séparateur magnétique. Les granulats béton sont ensuite convoyés pour être lavés. Enfin, ils sont tamisés/triés par taille puis stockés.

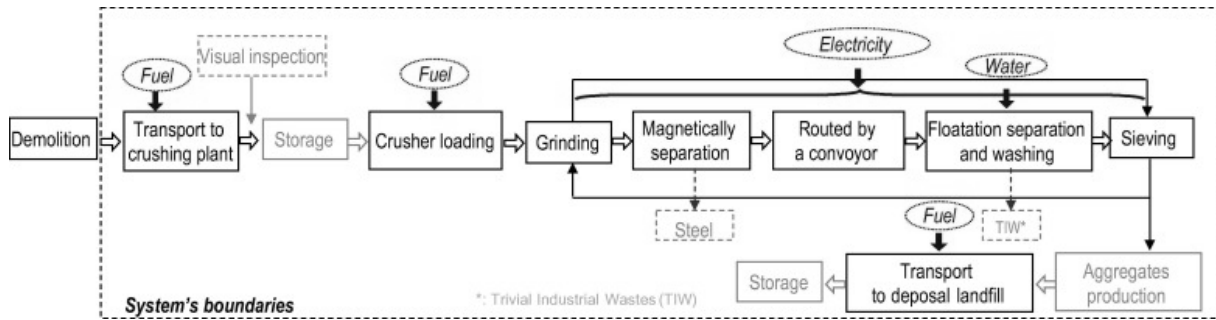


Figure 23 : Procédés de production des granulats recyclés (Ben Fraj and Idir, 2017)

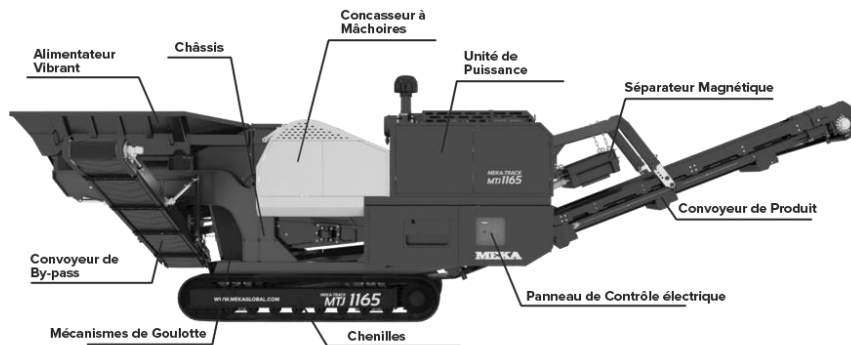


Figure 24 : Concasseur mobile sur chenilles marque MEKA (<https://www.mekaglobal.com>, consulté le 02/10/2021)

1.2.3.2 Le recyclage des granulats dans le béton

Le devenir de ces granulats est multiple (comblement de carrières, sous couche routière, béton). Nous nous intéressons ici à leur utilisation dans la fabrication d'un nouveau béton. Le développement de cette pratique est en pleine expansion (de Larrard and Colina, 2018; Deodonne, 2015; Lachat et al., 2021b; Nguyen et al., 2015; Omary et al., 2014; Tiruta-Barna and Barna, 2013). La démocratisation de telles initiatives a notamment été rendue possible par le projet national RECYBETON (de Larrard and Colina, 2018; IREX, n.d.) qui a mobilisé un grand nombre d'acteurs scientifiques et techniques de 2012 à 2018. Ce projet avait pour objectif dans un premier temps de trouver le moyen de « réutiliser l'intégralité des matériaux issus des bétons déconstruits, y compris des fractions fines, dans un nouveau béton ». Il est également question de recycler les matériaux béton comme « matière première pour la production de ciment [...] comme liants hydrauliques ».

L'usage de granulats recyclés dans le béton est décrit par la norme NF EN 206/CN qui précise les conditions et limites d'utilisation. Les granulats recyclés doivent notamment être conformes aux normes NF EN 12620+A1 et NF P18-545 (Infociments, 2020). Cette première norme précise le taux de substitution de granulat naturel maximum autorisé en fonction de la classe d'exposition et de la qualité du granulat recyclé. Dans le meilleur des cas (gravillons de très bonne qualité), la substitution peut aller jusqu'à 60 % pour une classe d'exposition de X0 (i.e. pour un béton armé en exposition très sec ou bien un béton non armé sans risque d'attaque chimique ou gel/dégel) (Infociments, 2020).

Toutefois, en recherche et notamment pour le PN Recybéton, des bétons ont été fabriqués avec un taux de granulat recyclé pouvant atteindre 100 %. Dans le livre « Handbook of recycled Concrete and

Demolition Waste », (Pacheco-Torgal, 2013), (Richardson, 2013) et (Agrela et al., 2013) mesurent les propriétés, la résistance et la durabilité du béton avec granulats recyclés. Leurs résultats peuvent être résumés comme suit :

- Il est techniquement possible de produire des bétons à haute résistance avec des granulats recyclés ;
- Il est nécessaire pour cela, soit d'augmenter la quantité de ciment, soit de diminuer le ratio eau/ciment par rapport à une formulation sans granulats recyclés ;
- D'autres paramètres mécaniques sont modifiés notamment le module d'élasticité, le fluage ou le retrait ;
- L'ajout de ciment ne permet pas de compenser les différences citées dans le troisième point. Ainsi la qualité du granulat recyclé est très importante.

Ces résultats sont corroborés par les résultats du PN Recybéton et d'autres études (de Larrard and Colina, 2018; Nguyen et al., 2015; Omary et al., 2014). Par ailleurs, (Akbarnezhad and Ong, 2013; Coelho and De Brito, 2013; Martín-Morales et al., 2013) précisent les processus de préparation et de séparation des granulats afin d'améliorer la qualité ainsi que le contrôle qualité à effectuer. Enfin, (Braymand et al., 2018) dans le PN Recybéton analysent l'impact environnemental du recyclage du béton en réalisant une Analyse du Cycle de Vie du processus. Les résultats de cette étude ne « démontrent pas clairement l'éco-respectabilité des bétons » de granulats recyclés, notamment du fait de l'ajout de ciment pour contrebalancer la perte de résistance mécanique due à la substitution des granulats. Néanmoins, l'intérêt d'utiliser des granulats recyclés est mis en évidence « par le calcul des impacts évités » (évitement de prélèvement de granulats naturels dans l'environnement). On peut aussi penser à la moindre consommation de surface de terrain liée à l'évitement de création de carrière. Par ailleurs, comme nous l'avons vu dans la partie sur l'impact du béton, le produit ayant le plus d'impact sur le changement climatique dans la composition du béton est le ciment en raison de la décarbonatation et de la température de production. On peut alors se demander s'il n'y aurait pas une méthode de valorisation plus efficace. Le réemploi pourrait être une solution.

1.3 L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE : UNE METHODE D'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE MULTICRITERES ET MULTI-ETAPES

1.3.1 Définition de l'ACV, historique et contexte normatif

1.3.1.1 Historique : du concept à la normalisation

S'intéresser aux effets des activités anthropiques passées et en devenir sur l'environnement est apparu comme un enjeu majeur au cours des XX^e et XXI^e siècles. Plusieurs méthodes de caractérisations ont alors émergé. Par exemple, dans le champ de l'agriculture, (Van Der Werf and Petit, 2002) recensent et comparent 12 méthodes d'évaluation environnementales en 2002. Parmi ces méthodes, ils citent notamment – en plus de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) – l'écobilan, l'écopoints et les indicateurs agro écologiques. Les auteurs mettent en avant l'importance d'une méthode proposant plusieurs indicateurs complémentaires et alliant des échelles globales et locales. C'est sur ce principe que s'appuie l'Analyse du Cycle de Vie (ACV).

(Jolliet et al., 2017, 2015) détaillent l'historique du développement de l'ACV (Annexe I). L'ACV a été développée à partir de la fin des années 1960 dans la même période que le rapport du Club de Rome *Limits to Growth* (Meadows et al., n.d.), rapport de référence sur la mise en lumière de l'impact de l'Homme sur son environnement, qui souligne l'impossibilité d'un développement basé sur la croissance dans un monde où les ressources sont finies. Dans l'optique de quantifier l'impact des activités humaines sur l'environnement, l'ACV est initialement orientée pour l'étude d'un produit. Afin de faciliter les comparaisons et l'interprétation des études, une harmonisation et une normalisation se sont progressivement mises en place. Tout d'abord, la SETAC (Society for Environmental Toxicology and Chemistry) en 1991 donne une première définition du cadre méthodologique (SETAC, 1991). Puis en 1997, l'organisation International de Normalisation (ISO) ainsi que le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) établissent quatre normes ISO 14040, 14041, 14042, 14043 explicitant le cadre méthodologique, les étapes de l'inventaire, l'évaluation des impacts puis l'interprétation des résultats. Ces normes ont évolué jusqu'à leur fusion en 2006 pour former les normes ISO 14040 et ISO 14044 (International Organization of standardization, 2006a, 2006b) qui définissent les principes ainsi que le contenu technique de l'ACV.

1.3.1.2 L'ACV une méthode multicritères et multi-étapes

La méthode ACV est une méthode d'évaluation des impacts environnementaux d'un service ou d'un produit de manière multicritères et multi-étapes. Elle prend en compte l'ensemble des étapes du cycle de vie (Figure 25) à partir de l'extraction de la matière première jusqu'au traitement à la fin de la vie (Guinée, 2001; Jolliet et al., 2017). Cette méthode est également multicritères car elle prend en compte plusieurs types d'impacts environnementaux. En effet, l'ACV met en évidence les transferts de pollution (d'une étape du cycle à l'autre ou bien d'un indicateur environnemental à l'autre).

Les grandes étapes du cycle de vie d'un objet d'étude (Figure 25) sont les suivantes :

- **L'extraction de la matière première** qui nécessite elle-même de la matière ainsi que de l'énergie ;
- La **fabrication** du produit qui peut nécessiter de même de la matière et de l'énergie ;
- L'ensemble des **transports** mis en jeu tels que le transport de l'usine de fabrication au lieu d'usage ou encore du lieu d'usage au lieu de traitement en fin de vie. Cela prend en compte notamment le type de transport ainsi que la distance ;

- L'**utilisation et l'entretien** du produit lors de toute sa phase d'utilisation ;
- Le **traitement en fin de vie**. Il peut notamment prendre en compte une phase de tri, de traitement destructif ou bien de remise en état.

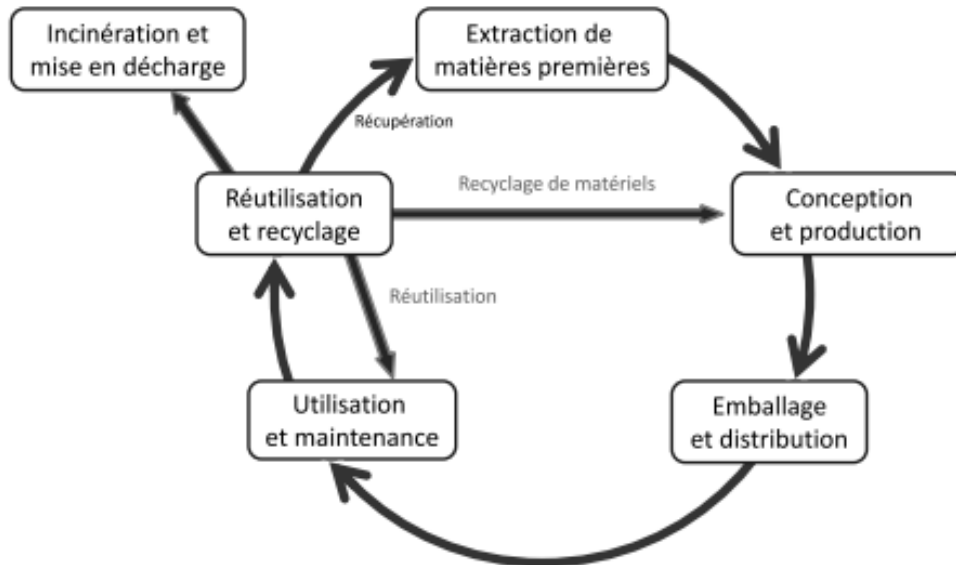


Figure 25 : Les étapes du cycle de vie d'un objet (Abdou, 2017; Benoît et al., 2010; Hoarau, 2017)

L'ACV est une approche multi sectorielles, c'est-à-dire qu'elle peut être appliquée dans tous les secteurs et domaines. Par exemple, elle est utilisée dans le secteur de la chimie (Piccinno et al., 2018; Sillero et al., 2021), du transport et des énergies (Kozlov et al., 2021), de l'agriculture (Abdou, 2017; Carlos Hernandez and Diaz Jimenez, 2021) et bien évidemment du bâtiment (Bertin, 2020; Brière, 2016; Campos da Cruz Rios et al., 2018; Fonseca i Casas and Fonseca i Casas, 2017; Frossard, 2020; Peuportier et al., 2013). (Peuportier et al., 2013) présentent une étude sur l'écoconception de bâtiments en prenant en compte à la fois une simulation thermique et l'analyse du cycle de vie globale. Une étude de sensibilité sur les scénarios d'occupation est notamment abordée. (Fonseca i Casas and Fonseca i Casas, 2017), quant à eux, explorent le langage de description et de spécification (LDS) (langage informatique usuellement utilisé en communication) à la représentation de l'ACV d'un bâtiment et d'une zone résidentielle.

L'ACV se veut être un outil d'aide à la décision en mettant en lien une action (extraction ou émission d'un flux) avec ses impacts. Il est ainsi possible de comparer des procédés et des alternatives entre eux. Il est également possible de mettre en avant les étapes les plus impactantes pour trouver des voies d'amélioration afin de réduire la pression environnementale (Jolliet et al., 2017; Piccinno et al., 2018).

L'adoption d'un cadre normatif (International Organization of standardization, 2006a, 2006b) assure une qualité uniforme entre chaque étude ainsi qu'une transparence dans sa conception. En complément des normes existantes et afin d'améliorer la qualité des études, l'ILCD (International Reference Life Cycle Data System) a publié en 2010 un guide de bonnes pratiques (Ekvall et al., 2016; Joint Research Centre., 2010).

Ainsi, l'ACV est une méthode multisectorielle, multicritères et multi-étapes adaptée pour l'aide à la décision et la comparaison de scénarios.

1.3.1.3 Description de la méthodologie

L'application de l'ACV s'effectue en 4 étapes précisées dans la norme ISO 14040 : 2006 (International Organization of standardization, 2006a) (Figure 26). Les étapes sont notées ci-dessous et seront détaillées dans les parties suivantes (sections 1.3.2 à 1.3.5) :

- i. Définition des objectifs et du champ d'étude (section 1.3.2),
- ii. Réalisation de l'inventaire (du cycle de vie, ICV) (section 1.3.3),
- iii. Évaluation des impacts (section 1.3.4),
- iv. Interprétation des résultats (section 1.3.5).

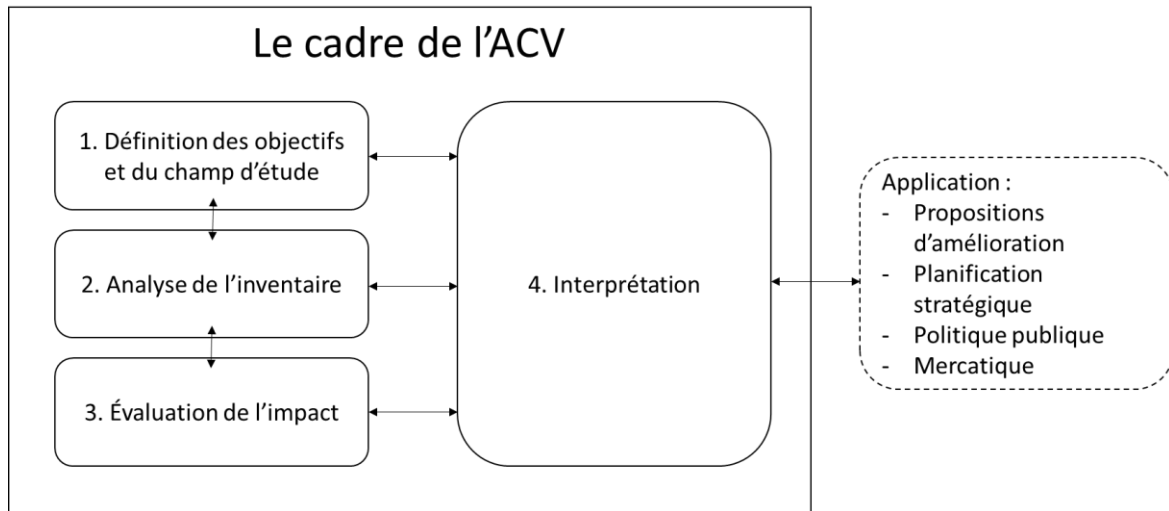


Figure 26 : Les étapes de réalisation de l'ACV selon la norme ISO 14040 : 2006 et exemples d'applications (ADEME, 2014)

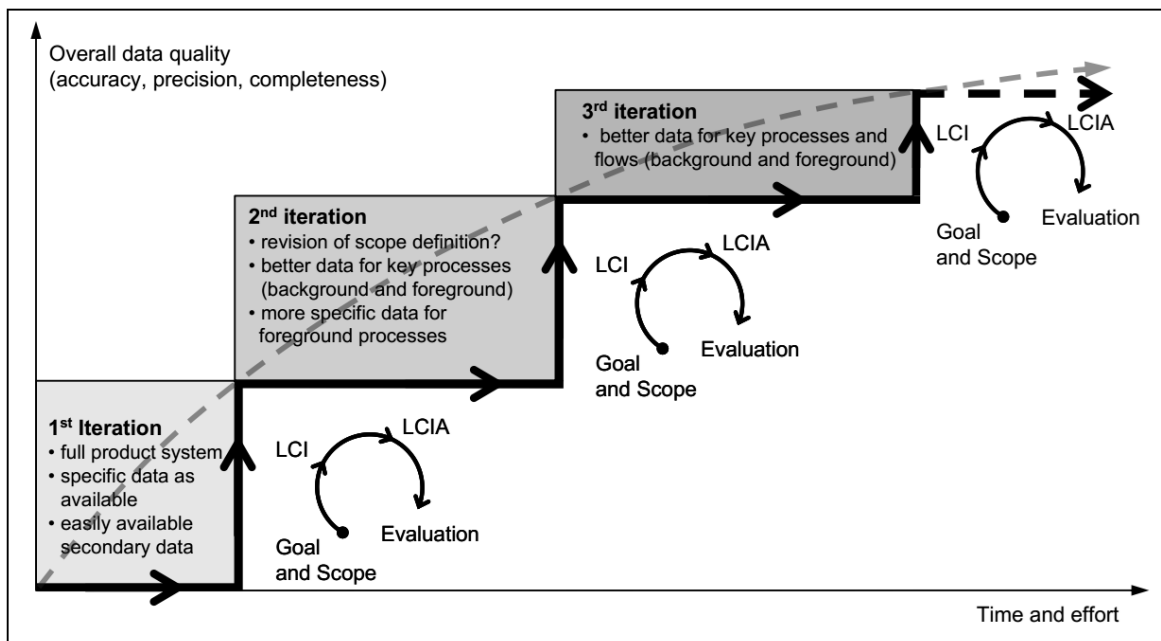


Figure 27 : Les itérations lors du processus de l'ACV selon l'ILCD (Frossard, 2020; Joint Research Centre., 2010)

Dans la Figure 26, on peut noter la présence de doubles flèches entre chaque étape. Cela invite à regarder chaque étape avec un regard critique, en n'hésitant pas à modifier, approfondir ou prendre un temps de réflexion au fur et à mesure de l'avancée de l'étude ACV. Il est également nécessaire de garder en tête l'ensemble des hypothèses de travail prises en compte lors de la phase d'interprétation

des résultats. La méthode de l'ACV est itérative : au fur et à mesure que les informations disponibles gagnent en précision, il est nécessaire d'avoir un retour critique à propos de l'interprétation (Figure 27).

1.3.2 Définition des objectifs et du champ d'étude

L'objectif de cette étape est de détailler le cadre d'utilisation de l'étude, le contexte, le public visé, la précision souhaitée pour répondre à l'objectif. Cette phase pose le cadre de l'ensemble de l'étude et assure la fiabilité des résultats (reproductibilité, comparaison) ainsi que l'utilité de l'étude (exploitation des résultats). Pour définir les objectifs et le champ de l'étude plusieurs éléments sont à préciser :

- L'objectif de l'étude, la fonction du système ainsi que l'unité fonctionnelle (UF) ;
- Le système et ses frontières avec notamment la question des règles d'allocation ;
- Les hypothèses prises et les limites de l'étude ;
- Les catégories et indicateurs d'impact ainsi que la méthode d'évaluation des impacts.

1.3.2.1 La notion d'unité fonctionnelle

Un point clef de l'ACV consiste à définir la fonction du système étudié. Un système est caractérisé par sa ou ses fonctions.

L'unité fonctionnelle est l'unité du produit ou du service qui permettra l'analyse et la comparaison de l'impact environnemental. Cette unité est classiquement exprimée en terme de quantité de produit nécessaire pour réaliser une fonction donnée (Jolliet et al., 2017; Muñoz Ortiz, 2006). L'objet peut répondre à plusieurs fonctions : on sélectionnera alors la ou les fonctions principales et on en retiendra les aspects à la fois quantitatifs et qualitatifs. L'unité fonctionnelle doit répondre aux questions suivantes : Quoi ? Comment ? Combien ? Pour quelle durée ? Associé à l'unité fonctionnelle, on trouve le flux de référence qui servira de référence pour le calcul de l'ensemble des flux composant le produit. Il est classiquement défini comme une quantité de produit.

Le choix de l'unité fonctionnelle est crucial pour la comparaison de scénarios. Pour illustrer cette notion, comparons par exemple deux véhicules : une moto et une voiture. La fonction principale de ce type de véhicule est de transporter des personnes d'un point A à un point B. Ainsi l'unité fonctionnelle pourrait être « transporter un passager sur une distance d'un kilomètre ». Le flux de référence sera alors « 1 p.km » c'est-à-dire que l'on réalisera l'ACV de la moto et de la voiture pour le transport d'une personne sur 1 km. Si par exemple, le kilométrage actuel de la moto et de la voiture est différent (respectivement 50000 et 100000 km), il serait inadapté de réaliser l'ACV complète et de comparer les résultats bruts entre eux car les distances parcourues ne sont pas les mêmes. C'est pourquoi il est nécessaire de calculer l'impact relatif pour 1 p.km et pour une vie complète. Pour des véhicules de kilométrage et de consommation en carburant équivalents, on peut à priori conclure que la moto aura un impact environnemental plus faible. Toutefois, la conclusion peut être modifiée si les véhicules présentent des fonctions secondaires différentes. En effet, la voiture peut être plus confortable et plus sécurisante car c'est un lieu clos et moins sujet aux aléas environnementaux (pluie, stabilité, adhérence, chauffage...). Par ailleurs, les deux véhicules peuvent avoir une fonction de transport de marchandise/bagages mais leur capacité est très différente. Ou encore, la moto peut être vue comme moins encombrante et plus agile dans le trafic.

Ainsi, on peut comprendre que la définition de l'unité fonctionnelle d'un objet ou d'un service peut poser certaines interrogations et critiques dans certaines études à forts enjeux politiques. Ces choix influent directement sur l'interprétation de l'étude.

1.3.2.2 Le système et ses frontières

La seconde étape consiste à définir le système et ses frontières. Il est nécessaire de délimiter l'ensemble des procédés et flux inclus dans le système, qui participent au calcul de l'impact environnemental de l'unité fonctionnelle. Le système est habituellement représenté sous la forme d'un arbre de processus (Figure 28). Les frontières du système définissent la séparation entre le « système » et « l'écosystème ». Ces deux éléments ont des interactions entre eux. On distingue ainsi les frontières (Hoarau, 2017; Trocmé and Peuportier, 2008) :

- **Physiques** : l'ensemble des éléments compris dans l'objet étudié. Pour un bâtiment cela serait par exemple le complexe d'isolation, les équipements de chauffage, la structure... ;
- **Flux** : l'ensemble des flux entrants et sortants du système. Ce sont des flux directement en interaction avec l'écosystème. Pour le bâtiment, cela peut être de l'eau potable, des eaux usées, des fumées, de la chaleur (énergie)... ;
- **Temporelles** : cela concerne aussi bien les étapes du cycle de vie prises en compte dans l'étude que la durée de chaque phase du cycle de vie. Par exemple pour un bâtiment, on peut décider de prendre en compte seulement la phase de vie en œuvre ; il est également possible de fixer la durée de cette phase à 50 ans (durée d'utilisation préconisée pour les bâtiments dans l'Eurocode 0).

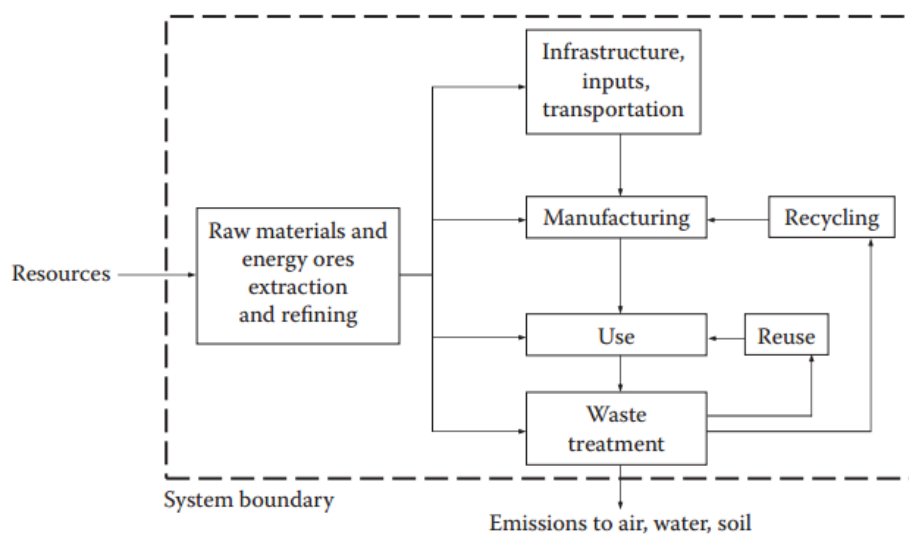


Figure 28 : Diagramme (flowchart) présentant le système et ses frontières. le système est composé de procédés et étapes du cycle de l'objet d'étude (Jolliet et al., 2015)

(Teo and Lin, 2010) mentionnent dans leur rapport bibliographique plusieurs frontières temporelles génériques ; les plus courantes sont explicitées ci-dessous et illustrés sur la Figure 29 :

- **Cradle to grave** : du berceau à la tombe, qui prend en compte toutes les phases depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la mise en décharge des déchets ;
- **Cradle to site** ou **cradle to gate** : du berceau au site (respectivement à la sortie de l'usine), qui prend en compte les phases comprises entre l'extraction des ressources et la livraison sur le site (respectivement à la sortie de l'usine) qui nous intéresse ;

- **Construction phase** : qui ne prend en compte qu'une seule phase, en l'occurrence la phase de construction ;
- **Cradle to cradle** : du berceau au berceau, qui prend en compte l'ensemble des phases depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la valorisation des matières primaires pour créer de la matière première secondaire.

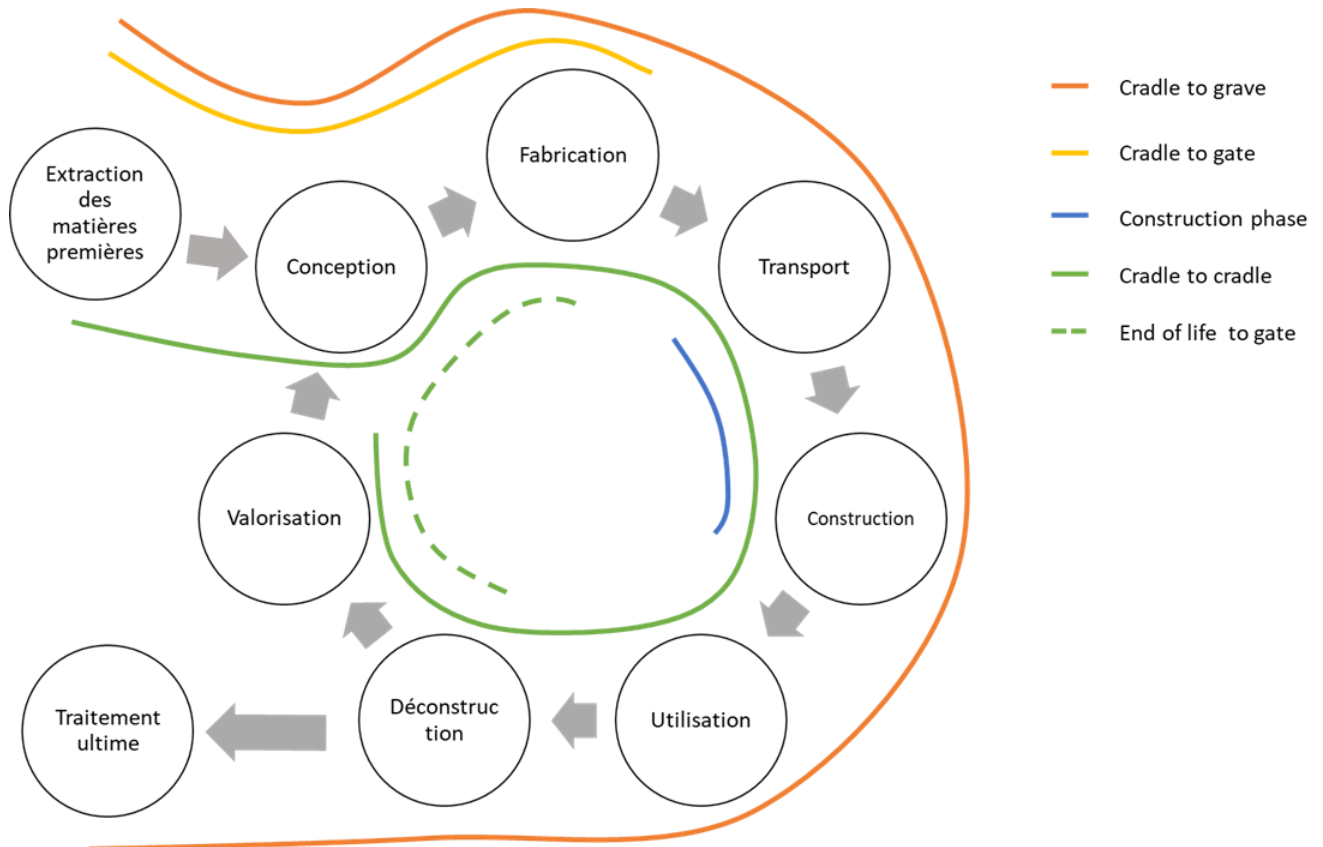


Figure 29 : Présentation des différentes limites temporelles, le scénario en pointillé correspond aux éléments abordés principalement au cours de la thèse.

Il existe une infinité de combinaisons. Il pourrait être envisageable de prendre en compte plus de cycles consécutifs mais cela augmenterait les sources d'incertitudes et induirait des difficultés de comparaison avec d'autres études. En effet, plus une étude est spécifique et atypique, plus l'exploitation de l'étude à visée de comparaison ou par mimétisme est difficile.

On peut noter toutefois que l'ACV s'étant développée sur le principe de l'économie linéaire, les études se limitent majoritairement au cycle de vie de l'objet et non au cycle de vie de la matière, comme nous pouvons le voir sur les limites temporelles mentionnées dans les normes ISO 14040 et EN 15804.

Pour compléter cette notion de frontière du système, (Jolliet et al., 2017) proposent trois bonnes pratiques :

- Le système doit recouvrir la même réalité fonctionnelle ;
- Les étapes identiques dans les différents scénarios peuvent être exclues à condition que les flux de référence affectés par ces processus soient strictement égaux ;
- Une règle de coupure peut être mise en place en fixant un seuil en deçà duquel les processus sont exclus du système. Ce seuil peut s'exprimer en pourcentage (1 % par exemple) de la masse des intrants, de la consommation énergétique ou encore des émissions d'un polluant. .

1.3.2.3 Hypothèses et limites de l'étude

Pour l'étape suivante de l'inventaire du cycle de vie, un recueil de données sera nécessaire. La quantité (précision) et la qualité des données varient en fonction de l'objectif et du contexte de l'étude. Il est donc primordial de définir en amont ces objectifs :

- **Objectif de l'étude** : l'ACV d'une construction peut être menée pour comparer des systèmes constructifs, comprendre les phases du cycle de vie les plus impactantes, demander un label, se soumettre aux contraintes réglementaires (exemple de la Réglementation Environnementale RE 2020 pour le bâtiment) ou encore pour éco-concevoir. Par ailleurs, la précision des données disponibles varie fortement selon que l'on soit en début de projet, en fin de projet ou bien 50 ans après le projet ;
- **Raisons de l'étude** : liées à l'objectif, les raisons peuvent déterminer le niveau d'exigence ou influencer la démarche utilisée. Par exemple, une démarche d'écoconception est plus rigoureuse et demande plus de précision et de réflexion qu'une ACV réglementaire qui est généralement circonscrite à l'application de la méthode mentionnée dans le référentiel réglementaire ;
- **Commanditaire, exécuteur et public ciblé** : les entités en jeu dans le processus de réalisation de l'ACV influenceront également sur le type d'ACV, la qualité des données et les hypothèses. Par exemple, la réalisation d'une prestation par un laboratoire indépendant est favorable à la fiabilité de l'étude. Néanmoins, l'implication du commanditaire est importante – si celui-ci est impliqué dans le processus de fabrication du produit – pour faciliter l'accès à des données de qualité. Enfin, le public cible peut avoir une influence sur les objectifs et les raisons de l'étude.

Ainsi, toutes les données précises ne sont pas toujours disponibles (ni nécessaires). Des hypothèses devront être posées. Pour une transparence et donc une répliquabilité de l'étude, il est nécessaire de noter, justifier et expliciter les hypothèses faites au cours de l'étude. Celles-ci pourront intervenir sur les données (quantité et sources), sur les frontières du système ainsi que sur les règles d'allocations. Cette question sera abordée à la fin de cette section.

La connaissance des limites de l'étude permet d'apprécier la fiabilité. Selon (Jolliet et al., 2017), les ACV ont des limites pratiques et conceptuelles. Les limites pratiques sont liées à la recherche des informations et des données qui nécessite un temps considérable, ces dernières n'étant parfois pas disponibles du tout. Elles sont également liées au niveau de détail et à la subjectivité des choix relatifs au cadre de l'ACV et aux hypothèses. Concernant les aspects conceptuels, nous pouvons mentionner l'aspect global d'une ACV. Effectivement, l'ACV attributionnelle *i.e.* la méthode présentée jusqu'à maintenant, calcule les impacts environnementaux globaux. Elle ne prend donc pas en compte de manière précise le contexte géographique (le lieu d'émission, le lieu d'extraction) ou encore la temporalité. Face à cela, de nouvelles méthodes ont été développées, notamment l'ACV conséquentielle (Roux, 2016) ou encore l'ACV dynamique. Ces deux méthodes seront abordées dans la partie 1.3.5.2.

Le dernier élément à traiter dans la définition du champ de l'étude concerne les règles d'allocation qui sont des règles de répartition des impacts entre les produits et coproduits issus d'un même procédé industriel. Par exemple, une centrale de valorisation énergétique permet de brûler des déchets. Sa fonction première est donc de traiter des déchets mais, avec un système de récupération d'énergie, elle peut produire de l'énergie (thermique et/ou électrique). Un autre exemple concerne la production d'acier par hauts fourneaux. L'aciérie produit de l'acier mais également du laitier qui peut être utilisé comme substitut au clinker pour la fabrication du ciment. Dans ces deux exemples, se pose donc la question de l'allocation des impacts du procédé de fabrication aux produits et/ou aux services rendus.

La norme ISO 14044 : 2006 (International Organization of standardization, 2006b; Jolliet et al., 2017) présente les différents comportements à adopter par ordre de priorité :

- **Éviter l'allocation** : en subdivisant les processus, c'est-à-dire en isolant les données propres à la fonction choisie. Si cela n'est pas possible, il faut envisager une extension des frontières c'est-à-dire augmenter le champ d'étude afin d'englober les coproduits ou co-services. Pour retourner à la fonction initiale, il est possible de substituer des impacts équivalents à la fonction additionnelle. Par exemple, pour étudier le traitement des déchets seul, on peut calculer l'ensemble de l'impact du procédé de traitement dont on soustrait l'impact du produit recyclé équivalent mais fait à partir de matière primaire ;
- **Allocation par unité physique** : si l'allocation ne peut pas être évitée, il est nécessaire de recourir à une allocation par prorata d'une unité particulière. L'unité choisie doit être pertinente vis-à-vis des deux produits. Cela peut être par exemple le potentiel énergétique, le volume, la quantité de polluant, la masse... La masse est souvent l'unité choisie par défaut mais elle n'est pas toujours adaptée. Par exemple (librement inspiré de (Jolliet et al., 2017)), la paille est un coproduit de la culture de certaines céréales. L'indice de récolte pour une céréale (rapport entre le poids de matière sèche des grains et le poids total des organes aériens) varie fortement avec une moyenne de 0,26 pour le millet ou 0,41 pour le blé (Fageria et al., 2006). Ainsi, en masse, il y a plus de paille produite que de grain. Or, d'après Agribalyse et (Arvalis, 2020), « le marché de la paille étant [actuellement] peu structuré, les données concernant la valeur économique sont peu fiables. En conséquence, aucune valeur n'a été attribuée à la paille ». L'allocation massique reviendrait à allouer une grande partie de l'impact à la paille alors que celle-ci n'est pas l'objet principal de la culture de céréale.
- **Allocation non physique** : cela désigne principalement l'allocation économique, c'est-à-dire que l'on alloue l'impact en fonction du prix de vente du produit ou du service. Il est alors considéré que le produit le plus onéreux est celui qui incite à la production. Il peut néanmoins y avoir d'autres méthodes d'allocation non physique. On pourrait imaginer baser l'allocation sur le pourcentage de satisfaction du client ou encore le temps de stockage du produit... Toutefois au final cela revient principalement à un rapport économique. Dans l'exemple de la paille, présenté au point précédent, c'est l'allocation économique qui a été retenue dans le cadre de la base de données Agribalyse. Cette allocation a été choisie car elle est la plus représentative de l'intérêt actuel porté sur les composants de la céréale : fort intérêt pour le grain, faible intérêt pour la paille.

1.3.3 Réalisation de l'inventaire du cycle de vie (ICV)

La seconde étape de l'ACV, définie dans la norme ISO 14040, consiste à établir l'*Inventaire du cycle de vie* (ICV). Cette étape correspond à la collecte des données de l'ensemble des procédés inclus dans le système étudié (*i.e.* à l'intérieur des frontières définies dans l'étape précédente). Il est nécessaire de répertorier les flux entrants et sortants de l'ensemble des processus et sous-processus. Ce schéma, appelé *arbre de processus* ou *flowchart* en anglais, permet de réfléchir à la structure de l'ACV qui englobera les procédés de chaque étape du cycle de vie (section 1.3.1.2). La Figure 30 présente un exemple de schéma qui répertorie les flux entrants et sortants de chaque processus élémentaire pour l'ACV d'une ampoule d'éclairage. Le flux de référence, dans ce cas, est un nombre d'ampoules et l'unité fonctionnelle est d'éclairer pendant 5 000 h pour une certaine intensité lumineuse. Afin de mesurer l'impact d'une ampoule, il est nécessaire de recenser les processus pour sa fabrication : fabrication du culot, du filament... Ces processus vont permettre de créer des flux intermédiaires (un culot, un

filament...). Il faut également mesurer l'électricité nécessaire pour sa phase d'utilisation puis enfin le processus de traitement en fin de vie. Pour chaque processus, il est possible d'avoir des sous-processus comme par exemple le moulage, la fonderie pour le culot. À chaque étape, le processus est susceptible d'émettre ou de prélever de la matière (gaz, liquide, solide) dans l'environnement directement, ce sont les flux élémentaires.

Dans le cas d'un système complexe, la quantité de données peut rapidement devenir importante. C'est pourquoi, il existe des bases de données pour certains processus unitaires qui contiennent tous les flux entrants et sortants pour le procédé en question.

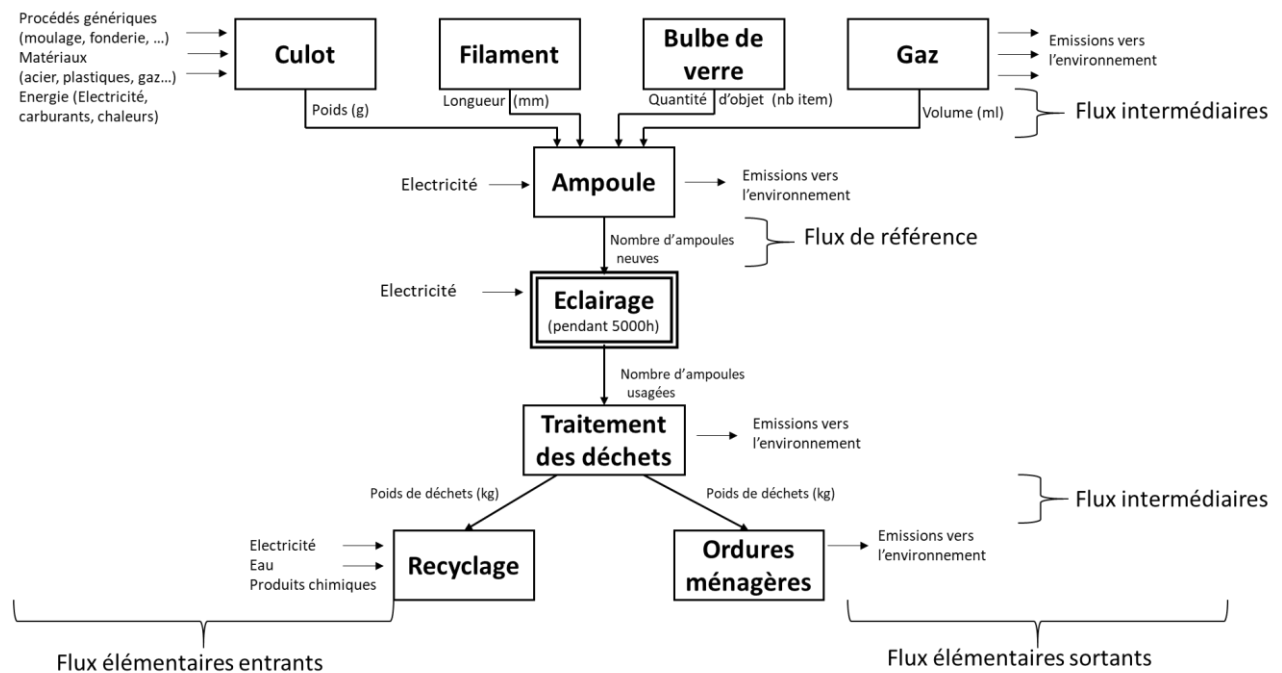


Figure 30 : Flowchart de l'ACV d'une ampoule pour la réalisation de l'Inventaire du cycle de vie (ICV) (cours ACVMU, VET, Ecole des Ponts Paristech 2020). En fonction du type d'éclairage, les quantité d'éléments ainsi que les processus peuvent varier.

Les données sont indispensables au calcul des impacts du système d'étude. Le choix et la qualité des données influencent directement la qualité et la précision des résultats de l'ACV. Plusieurs facteurs doivent être pris en compte (International Organization of standardization, 2006a, 2006b; Joint Research Centre (European Commission) et al., 2016) :

- **Représentativité géographique** : la donnée utilisée doit représenter ce qui se fait sur le territoire d'étude. La donnée peut inclure à plus ou moins grande échelle le territoire concerné ou bien être adaptée à partir des données (modification de certains flux) plus représentatives du lieu concerné ;
- **Représentativité temporelle** : une donnée trop ancienne peut s'avérer obsolète (informations non disponibles à l'époque de sa création ; évolution de la technologie ; optimisation de certains processus...)
- **Représentativité technologique** : cela concerne le type de technologie utilisé dans la donnée et le type de technologie réel du système. La technologie de la donnée peut être spécifique ou un mix représentatif d'un ensemble de technologies, ou d'une moyenne pour un marché précis. Si aucune donnée n'est disponible pour une certaine technologie, alors il est possible de sélectionner une donnée proche qui sera adaptée par la suite.

À défaut de données primaires (i.e. mesurées ou collectées directement par des enquêtes), il est possible d'utiliser des données secondaires, issues notamment de bases de données. Pour l'exemple de l'éclairage (Figure 30), il est possible de mesurer l'électricité consommée par l'ampoule mais le processus de production de l'électricité ne nous est pas connu dans les détails. Ainsi, pour modéliser ce processus, il est possible de se baser sur une base de données ou sur une publication où les auteurs auraient créé ou modifié une donnée. À la marge, il est possible de se baser sur un dire d'expert.

Il existe plusieurs bases de données en ACV. Ces bases couvrent des secteurs géographiques et technologiques différents ; certaines donnent directement l'impact d'autres donnent un inventaire de flux. Cela permet de réaliser l'*Analyse de l'impact du cycle de vie* (AICV) de la manière la plus adaptée aux objectifs souhaités. L'usage peut également différer d'une base à l'autre (secteur cible, acteur cible). Parmi ces bases, on peut citer par exemple la base française INIES (Alliance HQE-GBC and AIMCC, n.d.) gratuite, centrée sur les produits de construction à destination des praticiens de l'ACV en bureau d'étude dans le cadre de la réglementation environnementale 2020 et présentant directement les catégories d'impacts selon la norme NF EN 15804. On peut citer également US Life Cycle Inventory (NREL, n.d.) qui est une base de données états-unienne gratuite concernant les produits industriels en lien avec les États-Unis d'Amérique. On peut enfin citer deux bases de données payantes très couramment utilisées : Ecoinvent (Frischknecht et al., 2007, 2005) mise au point à partir des années 2000 par plusieurs instituts de recherche et organisations fédérales suisses et GABI ("GaBi Databases," n.d.). Ces deux dernières bases sont des bases de données d'inventaire. Notons que les procédés de la base de données INIES sont pour la plupart créés par des études ACV utilisant des données Ecoinvent.

1.3.4 Évaluation des impacts (Analyse de l'impact du cycle de vie (AICV))

L'*Analyse de l'impact du cycle de vie* (AICV) consiste à traduire l'ICV en différents indicateurs d'impacts. Ces impacts concernent l'environnement, la santé humaine et la biodiversité. Cette étape permet d'identifier les potentiels impacts environnementaux liés à la charge des flux quantifiés lors de l'ICV. Ainsi, l'AICV a pour objectif de faciliter l'évaluation de la charge environnementale en convertissant les données en catégories d'impacts tels que l'acidification des sols, l'écotoxicité, le changement climatique... La Figure 31 présente un schéma du déroulement de l'AICV. Les étapes successives sont détaillées brièvement ci-dessous (Gala, 2015; International Organization of standardization, 2006a; Jolliet et al., 2015) :

- **Classification** : Il s'agit d'associer chaque flux élémentaire de l'inventaire de cycle de vie à une (ou des) catégorie(s) d'impacts à laquelle le flux contribue. Par exemple, pour le bien connu indicateur de changement climatique, il est dû aux Gaz à Effet de Serre (GES). Ainsi sans que cela soit exhaustif, les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) et de méthane (CH₄) sont classées dans cette catégorie ;
- **Caractérisation** : L'objectif de cette étape est de quantifier l'impact des substances au préalable classées pour chaque catégorie d'impact. L'unité sera commune à toutes les substances y contribuant. Pour cela, un facteur de caractérisation est utilisé. Ce facteur permet de quantifier la contribution relative d'une substance par rapport à l'unité de référence (substance de référence). Pour l'exemple précédent du changement climatique, l'unité de référence est, dans la plupart des méthodes, le « kgCO₂ équivalent » correspondant à l'équivalent de l'impact d'1 kg de CO₂ émis dans l'air. Ainsi pour le CO₂, le facteur de caractérisation est de 1 ; pour le méthane dans la méthode RECIPE 2016 (Huijbregts et al., 2017), le facteur à 100 ans est de 34 kgCO₂ eq. i.e. pour l'émission d'1 kg de méthane, l'impact

sur le changement climatique est 34 fois plus important que le CO₂. La norme ISO ne précisant pas les facteurs de caractérisation, plusieurs méthodes ont été développées au cours du temps. Un focus sera fait sur quelques méthodes dans la suite de cette partie ;

- **Normalisation** : Cette étape est optionnelle. Elle consiste à relativiser l'impact issu de la caractérisation par rapport à une référence plus explicite. Cela peut être la moyenne nationale pour un type d'émission, la moyenne pour un citoyen ou encore par rapport à une valeur monétaire ;
- **Pondération** : Cette étape est également optionnelle. Elle permet de convertir l'ensemble des catégories d'impact en un seul et même impact afin de faciliter la prise de décision. Cela correspond à la dernière colonne de la Figure 31. Des facteurs de pondération sont mis en place. Ils sont basés sur un jugement subjectif et fonction de l'objectif de l'étude. Les choix sont principalement politiques ce qui a pour effet d'augmenter fortement l'incertitude. La pondération trouve son intérêt lors d'une comparaison entre de nombreux scénarios.

On peut noter que tous les impacts ne sont pas concernés nécessairement par les mêmes flux élémentaires, il est tout à fait possible qu'un flux participe à plusieurs indicateurs. Le facteur de caractérisation sera différent.

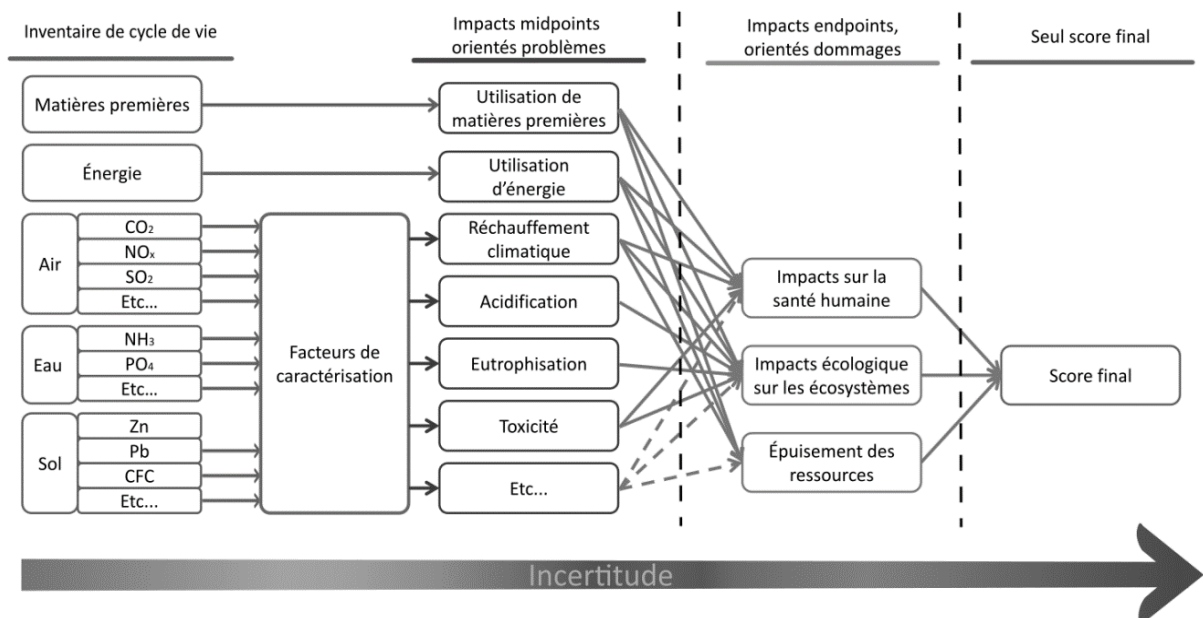


Figure 31 : Schéma de principe de l'analyse de l'impact du cycle de vie (extrait de (Abdou, 2017) selon (International Organization of standardization, 2006a))

(Jolliet et al., 2017) précisent qu'il existe deux types de catégories d'impact (Figure 31) :

- **Catégories orientées problèmes (midpoint)** qui reflètent principalement les conséquences sur l'environnement des substances émises. On peut mentionner par exemple *l'acidification des sols*, le *changement climatique* ou *l'eutrophisation des cours d'eau*. Ces problèmes ont été engendrés directement par l'émission de substances.
- **Catégories orientées dommages (endpoint)** qui représentent les dommages/effets secondaires des catégories orientées problèmes. Chaque midpoint contribue à une ou plusieurs des catégories endpoint. Classiquement, les trois catégories ultimes sont : *l'impact sur la santé humaine*, *l'impact écologique sur les écosystèmes* et *l'épuisement des ressources*. Il peut y avoir d'autres catégories en fonction des méthodes et des objectifs de l'étude ACV.

Le choix des catégories d'impacts doit se faire en relation avec les objectifs de l'étude. Par ailleurs, si les catégories orientées dommages permettent d'avoir un résultat plus clair, l'incertitude liée à la mesure de ces catégories est plus forte car elle nécessite une étape supplémentaire (passer par les catégories problèmes) donc des hypothèses supplémentaires. De même, pour obtenir un score unique final, il faudra ajouter des hypothèses et donc augmenter les incertitudes.

D'après la norme ISO 14044, il existe trois critères de sélection des indicateurs pour l'élaboration d'une méthode :

- La **complétude** des impacts, c'est-à-dire que l'on doit sélectionner l'ensemble des catégories qui seront intéressantes pour l'étude ;
- La **redondance** des impacts, c'est-à-dire que les impacts ne doivent pas être redondants mais au contraire les plus indépendants possibles. Néanmoins selon les objectifs de l'étude, il peut être intéressant de comparer des méthodes d'impacts entre elles ;
- La **validité**, c'est-à-dire que le modèle de caractérisation doit être reconnu et validé scientifiquement (soit par plusieurs publications et applications du modèle, soit par l'ILCD). Une nouvelle fois, si l'étude concerne le développement méthodologique de modèles, il peut être utile de les comparer en prenant en compte les limites et hypothèses que cela implique.

Les principales méthodes de caractérisation sont rapidement présentées dans le Tableau 6 ci-dessous. Ces méthodes ont été sélectionnées afin de montrer la diversité possible et également présenter les méthodes les plus récentes et les méthodes utilisées dans cette thèse. Cette liste n'est pas exhaustive et reflète l'état actuel des connaissances car ces méthodes sont mises à jour régulièrement. Notons que l'ILCD (International Life Cycle Data system) conseille pour plusieurs types d'impacts la méthode qui leur semble la plus pertinente (Joint Research Centre. and Institute for Environment and Sustainability, 2012).

Tableau 6 : Présentation non exhaustives des méthodes de caractérisation existantes

Méthode	Description	Sources
CML	Pour limiter les incertitudes, cette méthode se limite aux catégories midpoints. Elle a été développée en 2001 par l'institut de science environnementale à Leiden (Pays-Bas). Sa dernière mise à jour mineure date de 2016. La méthode évalue plus de 55 indicateurs.	(de Bruijn et al., 2002)
LIME	Cette méthode a été construite en 2000 pour prendre en compte la situation japonaise. En 2003, elle évaluait 11 indicateurs midpoints (plus que 9 à partir de 2016) et 4 indicateurs endpoints. Sa dernière mise à jour date de 2016 avec LIME-3.	(Inaba and Itsubo, 2018; Itsubo and Inaba, 2003)
Cumulative Energie Demand (CED)	Spécialisée dans les flux énergétiques, cette méthode évalue 6 indicateurs midpoints. Elle a été développée en 2007.	(Frischknecht et al., 2015)
USEtox	Spécifique aux questions de toxicité, cette méthode prend en compte de manière plus détaillée la toxicité humaine et l'écotoxicité. Elle évalue 3 indicateurs midpoints.	(Rosenbaum et al., 2008)
NF EN 15804+A1	Cette méthode sert principalement pour le calcul des FDES et DEP (fiches déclaration produits). Celle actuellement utilisée date de 2012. Des évolutions ont eu lieu avec le nouvel amendement de 2019 (A2). Elle prend en compte et adapte des indicateurs et facteurs d'impact d'autres méthodes comme par exemple la méthode CML.	(AFNOR, 2019)
Recipe 2016	Cette méthode peut être vue comme une fusion de la méthode CML 2001 et Ecoindicator 99. Créée en 2010, elle dispose de 3 échelles de temps : Individualist mesurée à 20 ans, Hierarchist mesurée à 100 ans et Egalitarian mesurée à 1000 ans. Elle évalue 18 indicateurs midpoints et 3 endpoints. La dernière mise à jour majeure date de 2016. C'est actuellement l'une des méthodes les plus utilisées et reconnues (Jolliet et al., 2017).	(Huijbregts et al., 2017)
Impact World +	C'est une méthode régionalisée c'est-à-dire qui prend en compte les lieux géographiques où les émissions ont lieu. Les catégories sont divisées en temps long (500 ans) et temps courts (100 ans). Cette méthode évalue 18 indicateurs midpoints et 25 indicateurs endpoints (incluant long et court termes). Elle est basée sur la mise à jour de la méthode Impact 2002+ (Jolliet et al., 2003), LUCAS et EDIP. Avec Recipe 2016, c'est l'une des méthodes les plus reconnues actuellement.	(Bulle et al., 2019)

1.3.5 Interprétation des résultats

L'interprétation est la dernière étape de l'ACV. Il s'agit d'analyser les résultats tout en tenant compte des objectifs de l'étude, afin d'en sortir des observations, conclusions et recommandations. C'est une démarche itérative avec les trois autres phases de l'ACV car les résultats doivent être étudiés en cohérence avec les hypothèses du système, la nature des données et les méthodes d'impact. L'interprétation doit aborder les limites de l'étude et perspectives d'amélioration. Cette phase doit permettre d'apporter des informations claires pour la prise de décision.

À ce niveau de l'étude, il est possible de réaliser une analyse d'incertitude (section 1.3.5.1) et une ou plusieurs analyses de sensibilité pour mesurer la fiabilité de l'étude, déceler les sources d'incertitudes et, le cas échéant, améliorer la précision. Les sources d'incertitudes sont multiples et présentes à chaque étape de l'ACV. Une analyse de sensibilité consiste à « tester la robustesse des résultats et leur sensibilité aux données, hypothèses et modèle utilisés » (Jolliet et al., 2017). En d'autres termes, il s'agit d'étudier l'importance d'une hypothèse sur le résultat. Ainsi, pour les paramètres inconnus ou peu connus, il est possible d'analyser la conséquence sur le résultat d'une variation de leur valeur.

1.3.5.1 Fiabilité et incertitudes en ACV

La procédure de l'ACV ainsi que la réalisation de l'ICV sont itératives c'est-à-dire qu'à mesure de l'avancée du recueil des données, des difficultés d'acquisition de ces données peuvent apparaître et de nouvelles hypothèses peuvent alors être faites. Il convient de les inclure dans l'étape de cadrage de l'étude et de les expliciter dans les rapports d'ACV. Par ailleurs, il faudra également mesurer les conséquences d'une telle hypothèse lors de l'analyse et l'interprétation des résultats. Ainsi à chaque étape de l'ACV, des pertes ou des gains de fiabilité peuvent survenir.

Afin de renforcer la fiabilité d'une étude ACV, il est possible de réaliser une revue critique du travail effectué. Cette revue critique est obligatoire dès lors que l'objectif implique règlementairement la norme ISO 14044 (International Organization of standardization 2006b). Cette dernière propose de faire relire le document par un expert ou un groupe d'experts en interne ou en externe chargé d'exprimer ses remarques et d'établir des recommandations.

Comme nous avons déjà pu le mentionner, les incertitudes en ACV sont nombreuses et complexes à mesurer. Tout d'abord au niveau du cadrage de l'étude, des incertitudes dans les frontières du système peuvent apparaître (inclusion ou non de procédés, oubli de procédés, choix de l'unité fonctionnelle). Au moment de l'ICV, le regroupement et la collecte des données, les estimations des flux sortants et entrants ou la qualité des données sont sources d'incertitudes. Enfin, lors de l'AICV, le choix de la méthode est également important car les flux pris en compte et les facteurs de caractérisation peuvent varier d'une méthode à l'autre (si un flux émis ou consommé en proportion importante n'est pas pris en compte dans la méthode d'AICV, il y a un risque de sous-estimer les résultats). Par ailleurs, les méthodes de caractérisation contiennent leurs propres incertitudes.

Plusieurs articles et thèses proposent de quantifier ou à minima de qualifier l'incertitude d'une étude ACV (Hoxha, 2015; Leroy and Lasvaux, 2013; Reap et al., 2008a, 2008b). Des méthodes qualitatives ont ainsi été développées pour mesurer la fiabilité des données (Ciroth et al., 2016; Joint Research Centre (European Commission) et al., 2016; Muller et al., 2016a, 2016b), notamment sous forme de matrices permettant de déterminer un score d'incertitude en notant plusieurs critères :

- (Joint Research Centre (European Commission) et al., 2016) a publié une matrice où pour plusieurs critères une note est donnée. La moyenne donne une note qui permet de qualifier la qualité des données entre « très bon, bon, juste, faible, très faible ». Cette matrice est représentée et traduite sur le Tableau 7. Un cas d'application sera effectué dans la section 1.4.

Tableau 7 : Matrice de qualification de la qualité des données selon le JRC pour l'étude d'un PEF (product environmental footprint) (Joint Research Centre (European Commission) et al., 2016) pour chaque procédé inclus dans l'ACV une note de 1 à 5 est donnée pour chaque critère puis une moyenne est effectuée par critère puis pour l'étude complète. Les niveaux des critères peuvent évoluer selon le type d'étude ACV.

Niveau de qualité	Note	Définition	Critères de qualité des données					
			Représentativité			complétude	méthodologie	Incertitude du paramètre
			Technologique	Géographique	Temporelle			
Très bon	1	Correspond très bien au critère sans besoin d'amélioration	Par exemple, c'est le même procédé. Pour l'électricité cela peut correspondre au mix spécifique du pays.	Données spécifiques au pays du procédé réel	Données inférieures à 3 ans	Très bonne complétude des procédés (supérieure à 90 %)	Totalement conforme aux exigences avec le guide PEF (product environmental footprint)	Très Faible incertitude (<7%)
Bon	2	Correspond bien au critère avec un petit besoin d'amélioration	Technologie moyenne du mix de consommation du pays	Données spécifiques à une grande zone géographique avec une certaine unité (union européenne, Europe...) qui inclut le lieu du procédé réel en question	Données de 3 à 5 ans	Bonne complétude (supérieure à 80%)	Méthode basée sur l'ACV attributionnelle et prenant en compte les trois exigences du PEF : 1. Multifonctionnalité, 2. Modélisation de la fin de vie, 3. Frontières du système	Faible incertitude (<10%)
Fiable/équitable	3	Correspond au critère mais mérite des améliorations	Technologie moyenne du mix de production du pays ou bien du mix de consommation par exemple à l'échelle européenne	Mix de l'union européenne ou bien données d'un autre pays sensiblement similaire au pays d'étude	Données de 5 à 10 ans	Complétude honnête (supérieure à 70 %)	Prenant en compte deux des trois exigences mentionnées précédemment	Incertitude <15%
Faible	4	Ne correspond pas suffisamment au critère, nécessite des améliorations	Technologie moyenne du mix de consommation d'un groupe de produits similaires	Données pour un autre continent ou pays très différent au pays concerné	Données de 10 à 15 ans	Faible complétude (supérieure à 50 %)	Prenant en compte une seule des trois exigences du PEF	Forte incertitude (<25%)
Très faible	5	Ne correspond largement pas au critère, des améliorations sont impératives	Autres procédés, ou procédés non disponibles ou inconnus	Données mondiales ou inconnues	Données supérieures à 15 ans	Très faible (inférieure à 50 %)	Prise en compte d'aucune des exigences du PEF	Très forte incertitude (>25%)

- La base de données Ecoinvent a mis en place une matrice dite « de pédigrée ». Celle-ci, plus quantitative que la précédente, se base sur le travail de (Weidema and Wesnæs, 1996) et (Ciroth et al., 2016). L'incertitude du résultat est quantifiée par une valeur caractéristique à 95 % (SD95) *i.e.* 95 % des données seront incluses dans l'intervalle de confiance. La formule est retranscrite dans l'Équation 1 (Brière, 2016; Weidema and Wesnæs, 1996). Notons que la base de données DIOGEN (pour les données d'impact des ouvrages de génie civil) utilise un dérivé de cette matrice.

Équation 1

$$SD95 = e^{\left(\sqrt{\ln(U1)^2 + \ln(U2)^2 + \ln(U3)^2 + \ln(U4)^2 + \ln(U5)^2 + \ln(U6)^2}\right)}$$

Avec U_i les facteurs d'incertitudes suivants :

- U_1 : le facteur d'incertitudes sur la fiabilité ;
- U_2 : le facteur d'incertitudes sur l'exhaustivité ;
- U_3 : le facteur d'incertitudes sur la corrélation temporelle ;
- U_4 : le facteur d'incertitudes sur la corrélation géographique ;
- U_5 : le facteur d'incertitudes sur la corrélation technologique ;
- U_6 : le facteur d'incertitudes sur la taille de l'échantillon.

La matrice de pédigrée d'Ecoinvent donne les valeurs des facteurs en fonction de la qualité. Le Tableau 8 présente cette matrice. Plus la valeur est élevée plus l'incertitude est grande.

Tableau 8 : Matrice de pédigrée Ecoinvent d'après (Ciroth et al., 2016) inspirée de (Brière, 2016).

U1 Fiabilité	Données vérifiées basées sur des mesures	Données vérifiées basées sur des hypothèses Ou bien des données non vérifiées basées sur des mesures	Données non vérifiées partiellement basées sur des dires d'experts	Données à dire d'experts ou sur des informations théoriques	Estimation par une personne non qualifiée
	1,00	1,05	1,10	1,20	1,50
U2 Exhaustivité	Données représentatives du marché considéré sur une période de temps suffisamment longue pour intégrer les fluctuations normales	Données représentatives de plus de 50% des sites sur le marché considéré sur une période de temps suffisamment longue pour intégrer les fluctuations normales	Données représentatives de quelques sites uniquement (<50%) Ou bien >50% sur une période plus courte	Données représentatives venant d'un seul site Ou bien plusieurs sites mais sur une période courte	Exhaustivité inconnue
	1,00	1,02	1,05	1,10	1,20
U3 Corrélation temporelle	Moins de 3 ans de différence	Moins de 6 ans de différence	Moins de 10 ans de différence	Moins de 15 ans de différence	Plus de 15 ans de différence ou âge inconnu
	1,00	1,03	1,10	1,20	1,50
U4 Corrélation géographique	Données issues de la zone étudiée	Données moyennes d'une zone plus grande que la zone étudiée (comprenant la zone étudiée) (ex : Europe)	Données d'une zone plus petite que la région étudiée		Zone inconnue ou très différente
	1,00	1,01	1,02		1,10
U4 Corrélation technologique	Données de la technologie utilisée		Données sur des matériaux ou process proches de la même technologie ou bien mêmes matériaux mais issus de technologies différentes	Données de matériaux et process proches de technologies différentes ou bien données à l'échelle d'un laboratoire et de même technologie	Données de process ou matériaux proches issus de laboratoire avec des technologies différentes
	1,00		1,20	1,50	2,00
U6 Taille de l'échantillon	Supérieure à 100	Supérieure à 20	Supérieure à 10	Supérieure à 2	Inconnue
	1,00	1,02	1,05	1,10	1,20

1.3.5.2 Les autres méthodes d'ACV (dynamique et conséquentielle)

La méthode jusqu'à maintenant décrite est une ACV qui a une approche attributionnelle. C'est l'approche la plus utilisée en analyse du cycle de vie. Cette approche, comme on a pu le voir, décrit un système statique et utilise des données moyennes de procédés et technologies. Le contexte technologique et environnemental est fixe. Or, il existe des variantes de l'ACV comme par exemple l'approche dynamique et l'approche conséquentielle.

L'**approche dynamique de l'ACV** consiste à prendre en compte la temporalité des émissions, c'est-à-dire à quel moment ces émissions ou consommations sont survenues. Cela permet de mettre en place un profil temporel d'impact (Peuportier, 2021). Par ailleurs, il est possible de prendre en compte des données issues de prospectives pour avoir des données plus cohérentes. Ainsi, le mix énergétique est amené à varier très fortement ; les sources d'énergie seront très différentes dans 50 ans. Il est également possible de faire des évolutions du modèle à court terme. Ainsi, pour reprendre l'exemple du mix énergétique, celui-ci n'est pas le même en hiver qu'en été. Dans la suite logiciel Pléiade développée par IZUBA, il est possible de coupler l'ACV avec la simulation thermique dynamique d'un bâtiment. (Roux et al., 2016) montrent que les variations temporelles sont importantes et peuvent influencer jusqu'à 44 % le résultat de l'ACV par rapport à l'ACV statique (pour un contexte français et pour l'étude de la prise en compte de la différenciation du mix électrique pour un pas horaire). Par ailleurs, il existe différents degrés de détails d'ACV dynamique (Negishi, 2019). Il est en effet possible d'appliquer une logique d'ACV dynamique sur tous les indicateurs ou seulement le changement climatique (comme fait dans la RE 2020). Il est également possible de faire varier des processus à l'échelle du mois, du jour, de l'heure, etc. (Peuportier, 2021; Roux et al., 2016).

Actuellement, une méthode d'ACV dynamique est proposée pour la Règlementation Environnementale des bâtiments 2020 qui est entrée en vigueur le 1^{er} janvier 2022 pour les bâtiments d'habitation et le 1^{er} juillet 2022 pour le tertiaire et les locaux d'enseignement primaire et secondaire. Il s'agit d'optimiser la conception énergétique du bâtiment tout en limitant l'impact sur le changement climatique (MTE, 2021). L'approche envisagée à l'origine était une approche attributionnelle mais le gouvernement a proposé une approche dynamique (uniquement pour l'impact changement climatique) afin notamment de prendre en compte le stockage du carbone pendant la vie du bâtiment. Avec cette approche, une émission précoce a plus d'impacts qu'une émission tardive. La valeur de pondération dépend notamment de l'horizon temporel choisi (100 ans pour la RE 2020). Contrairement à la méthode du GIEC qui fait l'objet d'un consensus scientifique en considérant un horizon glissant de 100 ans, l'ACV dynamique utilisée dans la RE 2020 est à horizon fixe, ce qui sous-estime les impacts sur les générations futures (Peuportier, 2021). (Ventura and Feraille, 2021) précisent que la différence de durée d'observation (durée d'intégration de l'impact liée à une émission) entre une émission en début de vie ou durant la vie du bâtiment « ne permet plus de faire des comparaisons ». (Ventura, 2022) rappelle que l'une des bases de l'ACV consiste à fixer un horizon d'intégration de l'impact (Horizon de Temps de l'Impact, HTI) qui ne dépende pas du temps et qui doit être le même pour chaque émission.

L'objectif d'une **Analyse du cycle de vie conséquentielle** est de prendre en compte les impacts consécutifs à un changement dans la sphère technico-économique. Il existe donc une notion temporelle et une notion de cause/conséquence. Il faut prendre en compte la période de temps nécessaire pour que le cycle de vie du produit étudié passe de l'état A à l'état B (Dandres, 2012). Ainsi, l'approche conséquentielle cherche à identifier les conséquences d'une décision sur l'écosystème. Ces changements sont dus à une interaction économique, politique ou comportementale entre le système

d'étude et les systèmes périphériques (Frossard, 2020). L'intérêt d'une telle méthode est de pouvoir mettre en lumière des impacts non pris en compte dans l'approche attributionnelle (Roux, 2016).

Par exemple, la production de biocarburants à base de betterave à sucre modifie le mix énergétique mais également les cultures. L'ACV conséquentielle impose de réfléchir aux conséquences de ces changements. L'augmentation de biocarburant pourrait augmenter les importations de nourriture et les distances de transport ou encore favoriser les grignotages des surfaces forestières donc modifier des types de sol. Ainsi, avec ces conséquences, l'impact de la production de biocarburant peut ne pas être aussi bénéfique qu'attendu avec une approche attributionnelle.

Le Tableau 9 présente les principales différences entre l'ACV attributionnelle et l'ACV conséquentielle.

Tableau 9 : Principales différences entre l'ACV conséquentielle et l'ACV attributionnelle (traduit et inspiré de (Brander, M et al., 2008; Roux, 2016))

	ACV Attributionnelle	ACV conséquentielle
Questionnement	Quels sont les procédés et émissions directement utilisés dans le cycle de vie du produit ?	Quelles sont les conséquences sur les émissions globales d'un changement marginal de la production (consommation et fin de vie) d'un produit ?
Application	Cette méthode est applicable pour comprendre les émissions directes associées à un produit. Elle est également appropriée pour comptabiliser les émissions basées sur la consommation. Elle n'est pas appropriée pour quantifier les changements dans les émissions globales suite à des choix politiques.	Cette méthode est utilisable pour informer les consommateurs et les décideurs sur les conséquences d'une prise de décision politique sur les émissions globales. Mais elle n'est pas appropriée pour compter les émissions basées sur la consommation.
Frontières du système	Les procédés et flux sont directement liés au cycle de vie du produit.	Tous les procédés et flux sont directement ou indirectement affectés par un changement marginal dans le cadre du cycle de vie du produit.
Double comptage	Il n'y a pas de double comptage des émissions. Une émission est propre à son produit et ne peut pas être utilisée par un autre produit.	Présence de double comptage car le champ d'étude avec d'autres produits ou études peut se recouper.
Donnée moyenne ou marginale	Cette méthode tend à utiliser des données moyennes notamment pour l'électricité.	Cette méthode tend à utiliser des données marginales.
Effet du marché	Ne considère pas d'évolution du marché.	Les changements dans le marché (production, consommation...) sont pris en compte.

Méthode d'allocation	Les allocations des coproduits sont basées sur une valeur physique ou économique.	Cette méthode utilise l'expansion du système pour englober les effets des coproduits sur les émissions.
Effets indirects	Ne considère pas d'effets indirects.	Cette méthode doit considérer les effets indirects tels que l'interaction avec des politiques existantes ou encore l'impact sur la R&D de l'efficacité de production d'autres produits.
Temporalité	L'étude s'effectue pour un temps et une époque donnés.	Il est nécessaire de spécifier l'échelle de temps où seront étudiés les changements et conséquences.
Incertitudes	Cette méthode a « peu » d'incertitudes car les relations entre les intrants et sortants sont en général stœchiométriques	Grandes incertitudes car le modèle est complexe puisqu'il tente de représenter des systèmes socio-économiques complexes, notamment avec des boucles de rétro actions et des évènements aléatoires.

1.3.6 L'ACV appliquée au bâtiment, les étapes et normes

Le secteur de la construction, et à plus large échelle celui du bâtiment et des travaux publics, est responsable d'une grande consommation d'énergie et de matériaux (Ipsen et al., 2021). Dans leur étude, (Leonardon et al., 2019) montrent que le bâtiment neuf est responsable de la consommation de 51 millions de tonnes de matériaux en 2015 ; la Figure 32 présente la répartition de ces matériaux. Par ailleurs en 2017, le secteur de la construction a été responsable de 39 % des émissions de gaz à effet de serre liées à l'énergie (IEA, 2018). En permettant une caractérisation environnementale fine, l'ACV est donc un outil à utiliser dans le secteur de la construction, de l'architecture et de l'ingénierie (Campos da Cruz Rios et al., 2018; Parrish and Chester, 2014) en vue de réduire son impact sur l'environnement. On peut mentionner par exemple (Citherlet and Defaux, 2007) qui comparent 3 variantes de maisons individuelles en Suisse. L'ACV concerne également les systèmes et composantes des bâtiments ; (Osman and Ries, 2004) étudient les équipements de cogénération des bâtiments commerciaux en comparant plusieurs scénarios appliqués à un bâtiment type pour les États Unis. Par ailleurs, face à l'augmentation des quantités de produits de construction pour limiter la consommation d'énergie en phase d'usage, plusieurs études s'intéressent à l'intégralité du cycle de vie qui comprend par conséquent les phases de construction et de traitement des déchets. Ces deux dernières phases prennent une place de plus en plus importante par rapport au cycle de vie complet (Dixit et al., 2010; Hoxha et al., 2021; Thormark, 2002).

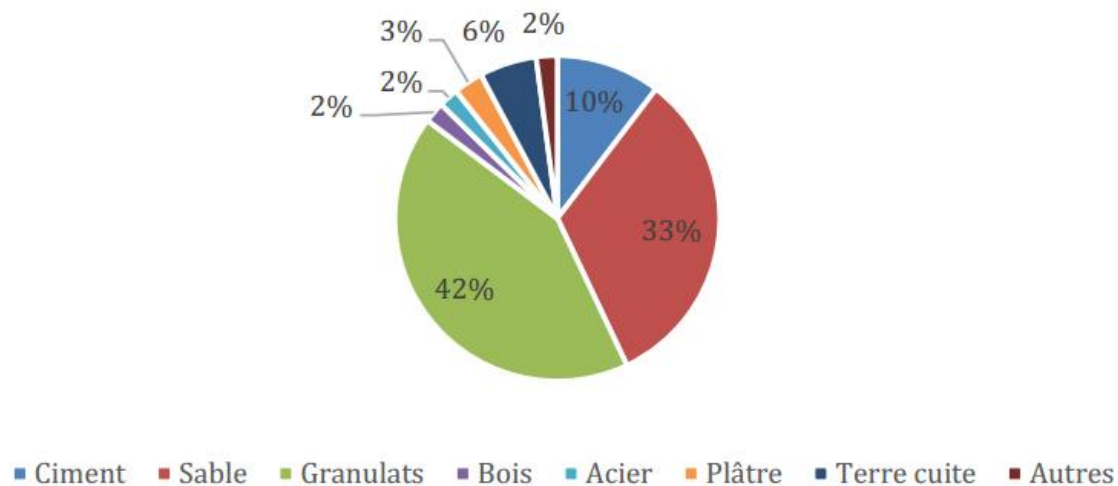


Figure 32 : Consommation de ressources du logement et tertiaire neuf en 2015 (Leonardon et al., 2019)

Dans le bâtiment, l'ACV est principalement utilisée à des fins d'aide à la décision, d'obtention d'un label ou de validation réglementaire, de recherches pour l'écoconception, de développement d'outils et de bases de données spécifiques ou de développement méthodologique (Frossard, 2020).

Historiquement, l'ACV a été développée pour analyser un produit industriel. Son application à la construction, et notamment à des ensembles bâtis complets, est relativement récent (Buyle et al., 2013; Cabeza et al., 2014; Polster, 1995). L'ACV d'un bâtiment est plus complexe que celle d'un produit, notamment pour les raisons suivantes :

- Il existe un grand nombre d'options constructives, il est alors difficile de multiplier les scénarios alternatifs ;
- La durée de vie d'un bâtiment est longue et même indéterminée. Il est difficile d'évaluer les véritables interventions de maintenance ainsi que la fin de vie de ces derniers. Les technologies peuvent fortement changer entre la construction et la fin de vie d'un bâtiment ;
- Chaque étape de la vie d'un bâtiment fait intervenir un grand nombre d'équipements, de composants, d'acteurs. Les incertitudes peuvent être alors élevées. La notion d'incertitude sera discutée dans les parties suivantes ;
- Le cadre méthodologique de l'ACV ainsi que la définition du système peuvent être sujet à des interprétations différentes d'un évaluateur à un autre.

Au vu de ces particularités, des normes spécifiques au bâtiment ont été développées. Les normes européennes EN 15978, EN 15804 et EN 16970 ont été rédigées respectivement en 2011, 2014 et 2016 (AFNOR, 2019, 2016, 2012). Elles mettent en place un cadre méthodologique pour la réalisation de l'ACV d'un bâtiment. La norme EN 15804 (actuellement avec l'amendement A2 (AFNOR, 2019) publiée en 2019) intitulée « Contribution des ouvrages de construction au développement durable – Déclarations environnementales sur les produits – Règles régissant les catégories de produits de construction » normalise les étapes de la vie du bâtiment présentées sur la Figure 33.

- Les modules **A4 à A5** concernent la phase du chantier de construction ;
- Les modules **B1 à B7** concernent la phase de vie en œuvre *i.e.* d'utilisation du bâtiment ;
- Les modules **C1 à C4** concernent la phase de fin de vie du bâtiment ;
- Le module **D** traite des bénéfices et charges au-delà des frontières du système. Ce module permet de prendre en compte les valorisations matières et énergétiques.

Toutefois, le module D est un peu à part car il ne fait pas partie du cycle de vie du produit (le cycle étant mentionné par « Building Life Cycle Information » sur la Figure 33).

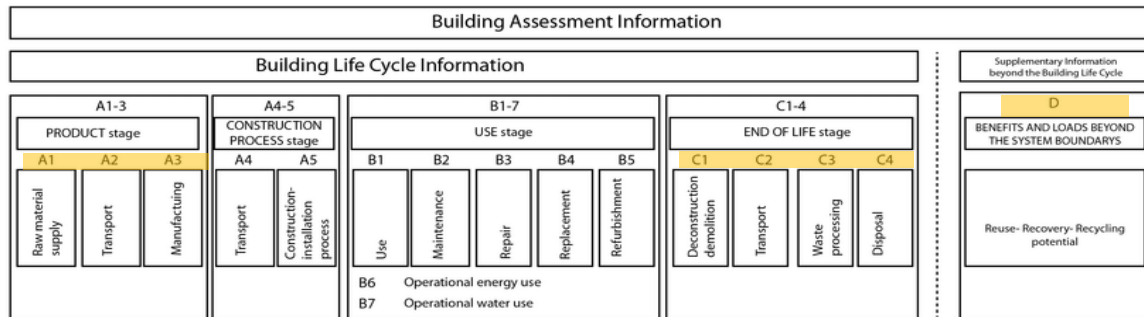


Figure 33 : Modules de la vie d'un bâtiment pour l'ACV selon la norme EN 15804 (AFNOR, 2019, 2012; Joint Research Centre (European Commission) et al., 2018; Vilches et al., 2017). Les étapes surlignées correspondent aux étapes particulièrement étudiées dans cette thèse.

Dans notre cas, nous nous intéressons plus particulièrement aux phases de fin de vie du bâtiment (C1 à C4) et également au module D. Notre travail se concentre en effet sur la valorisation de la matière et donc à son passage vers le cycle suivant. Nous modélisons le cycle de vie du bâtiment comme une boucle et serons ainsi amenés à aborder les modules A1 à A3 qui concernent la création d'un nouveau produit à partir notamment de matière secondaire, tout l'enjeu de la thèse visant à articuler la fin de vie d'un cycle avec le début de vie du cycle suivant.

Les phases sur lesquelles nous nous focalisons au cours de la thèse sont détaillées ci-dessous.

- **C1** : Démolition et déconstruction du bâtiment. Incluant l'ensemble des installations, le curage et la démolition du gros œuvre ;
- **C2** : Transport des déchets et ou des produits résultant de la démolition vers leur espace de traitement (élimination, recyclage, stockage) ;
- **C3** : Traitement des déchets. Cela peut être sous forme de tri puis remise en état pour une réutilisation, un recyclage, un compostage... ;
- **C4** : Élimination finale des déchets non valorisables. Prend en compte le management des sites et prétraitements ;
- **(D)** : Mesure les bénéfices et les charges de la valorisation de la matière ou valorisation sous forme énergétique. Ce n'est pas en soi une phase de la vie du bâtiment mais un bonus/malus supposé pour la valorisation (énergie ou matière) ;
- **A1** : Approvisionnement en matière brute pour la production d'un produit ou élément de bâtiment. Cela peut être des matériaux primaires *i.e.* extraits directement de l'environnement par exemple issus de l'industrie minière, agriculture, sylviculture... Le matériau peut être secondaire c'est-à-dire issu de la filière de valorisation (recyclage, réemploi, réutilisation) ;
- **A2** : Transport de matériaux nécessaires à la confection du produit. Par exemple de la mine à la fonderie ou bien de la fonderie à l'usine de fabrication ou encore de la centrale de traitement/plateforme de recyclage à l'usine de recyclage ;
- **A3** : Phase de fabrication du produit. Cela peut être un produit intermédiaire ou bien directement le produit qui sera intégré au bâtiment.

Pour ce travail de thèse, la méthode utilisée sera principalement la NF EN 15804 + A1, car c'est la méthode utilisée pour les fiches de déclaration produit et les fiches de déclaration environnementale et sanitaire (FDES). Avec cette méthode, l'étude sera donc facilement comprise par le financeur et les industriels car plus facilement comparable aux autres données. La base de données Ecoinvent sera utilisée pour l'ensemble du travail de cette thèse car elle est considérée comme l'une des bases les plus adaptées à la recherche mais également les plus complètes (Jolliet et al., 2017). Enfin, nous nous concentrerons principalement sur la fin de vie et la valorisation de la matière. Ainsi on pourrait nommer les frontières temporelles que nous utilisons : « End of Life to grave » et « end of life to gate », ou « end of life to cradle », cette dernière constituant une partie de la démarche cradle to cradle.

1.4 ANALYSE ENVIRONNEMENTALE SUR LA FIN DE VIE DES BATIMENTS ET SUR LA CREATION DE GRANULATS RECYCLES

Nous avons vu dans les deux parties précédentes la diversité des déchets produits par le secteur du bâtiment et des travaux publics. Nous avons également vu les méthodes de valorisation existantes et les réglementations actuelles pour réduire la quantité de déchets ultimes. Nous nous plaçons maintenant à une échelle plus macro : celle du bâtiment. Pour évaluer et comprendre les impacts environnementaux de la fin de vie du bâtiment, nous prenons en compte ainsi les procédés de déconstruction et le procédé de valorisation.

Le travail présenté dans cette partie a fait l'objet d'une publication intitulée « From Buildings' end of Life to aggregates Recycling under a Circular Economic Perspective : A Comparative Life Cycle Assessment Case Study » publié dans la revue Sustainability (MDPI) dans le cadre du « Special Issue Sustainable Concrete Materials for a Clean Energy Management » (Lachat et al., 2021b).

1.4.1 Objectifs et champ de l'étude

1.4.1.1 Cas d'études

Cette étude sur la fin de vie des bâtiments se base sur deux chantiers de déconstruction, pour lesquels les données sont suffisamment disponibles pour réaliser une analyse du cycle de vie.

La **première opération** de démolition se situe dans le sud de la France (Département des Alpes Maritimes (06)). Elle a été réalisée en 2016. Pour la suite de la thèse, nous appellerons cette opération par le nom « **bâtiment A** » ou « **chantier A** » indistinctement. Cette opération comprend trois constructions :

- Un bâtiment résidentiel sur deux niveaux (+ cave) d'environ 10 m x 10 m de côté, disposant d'une charpente en bois et d'une toiture en tuile (Figure 34, (i) et (ii)) ;
- Un bâtiment annexe d'environ 5,5 m de côté par 18 m de long sur un seul niveau et de construction semblable au premier bâtiment (Figure 34 (i)) ;
- Un abri pour les vélos, ce dernier n'étant pas inclus dans l'analyse de par sa spécificité.

La surface de plancher totale des deux bâtiments s'élève à **300 m²**. La démolition du second œuvre a été réalisée manuellement. La démolition du gros œuvre s'est effectuée à la pelleuse. L'accès au bâtiment est facilité par la présence de routes principales et de parkings.

Ce chantier de démolition a produit 388 tonnes de déchets de construction et de démolition, dont **273 tonnes de gravats**. Les différents déchets produits sont les suivants : des déchets amiantés, du bois, des déchets ménagers, du métal, des matériaux inertes comme de la pierre, des tuiles et du béton de structure. Pour l'étude, il est considéré que les déchets inertes (gravats comprenant des pierres, du béton et des briques) sont recyclés pour produire des granulats recyclés.

L'inventaire du cycle de vie est basé sur le travail de collecte de données réalisé par le Cerema (Getas, 2016).



(i)



(ii)

Figure 34 : Bâtiment A : (i) Bâtiment principal en arrière-plan et annexe en premier plan, (ii) Bâtiment principal

La **seconde opération** de démolition se situe dans l'ouest de la France (Côtes-d'Armor (22)). Les travaux se sont déroulés en 2017. Pour la suite de la thèse, nous appellerons cette opération « **bâtiment B** » ou « **chantier B** » indistinctement. Cet ensemble immobilier est constitué de deux bâtiments :

- Un immeuble résidentiel de type « barre » sur 4 niveaux (+ caves) (Figure 35 (i)) ;
- Un immeuble résidentiel de type « tour » sur 5 niveaux (+ caves) (Figure 35 (ii)).

La surface de plancher totale pour ces deux bâtiments est de **5487 m²**. Ces deux bâtiments sont construits à partir d'éléments en béton préfabriqué. Leur toiture est constituée d'une charpente en bois et d'une toiture en tuiles. Le chantier est facile d'accès.

La quantité totale de déchets de démolition produits est de 7115 tonnes. Les différents déchets produits sont : des déchets amiantés (plinthes, dalles de sol, colle, joints de brides, asphalte), du bois, des déchets inertes (béton, tuiles), des armatures, de la fonte et des déchets industriels ordinaires. Parmi ceux-ci, **6738 tonnes** (environ 95 % de la quantité de déchets) sont des gravats pouvant être utilisés pour la production de granulats recyclés.

L'inventaire du cycle de vie est basé sur le travail de collecte de données réalisé par le Cerema (Desbois et al., 2020).



(i)



(ii)

Figure 35 : Bâtiment B : (i) barre de logement à 4 étages, (ii) tour de logement à 5 étages

1.4.1.2 Objectifs

L'objectif de cette étude est double :

(1) Le premier concerne la quantification des impacts environnementaux de la fin de vie des deux bâtiments et la réalisation d'une analyse des contributeurs principaux afin d'identifier quelles étapes de la phase de fin de vie des bâtiments sont les plus impactantes.

(2) Le second, en élargissant l'échelle de l'étude, concerne la quantification des impacts environnementaux provenant de la production de granulats recyclés, à partir des déchets de construction et de démolition, alors considérés comme une ressource. En outre, plusieurs analyses de sensibilité sont réalisées dans la partie 1.4.4 ; une attention particulière est portée sur la problématique d'allocation d'un cycle à un autre.

1.4.1.3 Unité fonctionnelle

Pour cette étude, deux unités fonctionnelles, correspondant aux deux objectifs, sont utilisées :

(1) « Démolir 1 m² de surface de plancher d'un bâtiment » : centrée sur la fin de vie du bâtiment, cette unité fonctionnelle permet d'étudier les impacts environnementaux de la phase de déconstruction. Elle rend notamment possible la comparaison des deux opérations de déconstruction présentées précédemment. En raison de la complexité pour séparer les données du désamiantage (consommation, transport du personnel...) des autres étapes, les données de l'amiante ont été incluses dans notre étude (désamiantage, tri, transport et traitement). Nous discuterons des conséquences d'un tel choix dans la partie résultats (1.4.3).

(2) « Produire 1 t de granulats » : centrée sur la production du granulat, cette unité fonctionnelle permet de mettre en avant l'impact de la production de granulats et de comparer les granulats recyclés à partir des déchets inertes des deux bâtiments avec la production de granulats vierges.

Pour exprimer les résultats avec ces deux unités fonctionnelles, nous calculons dans un premier temps l'ensemble des impacts liés aux déconstructions des bâtiments puis nous divisons ces impacts par la surface de plancher pour l'unité fonctionnelle **(1)**, notée UF1, ou par la quantité de granulats produits pour l'unité fonctionnelle **(2)**, notée UF2. Par conséquent, nous pouvons dire qu'il existe une relation entre les deux unités fonctionnelles pour un même bâtiment. Cette relation est celle notée ci-dessous (Équation 2). Comme le rapport surface sur masse varie d'un bâtiment à l'autre, les résultats sont ainsi différents d'une unité fonctionnelle à l'autre et d'un bâtiment à l'autre.

Équation 2

$$FU2(X) = FU1(X) * \frac{S(X)}{M(X)}$$

X : Bâtiment étudié

$FU1(X)$: Impact pour le bâtiment X pour l'unité fonctionnelle (1)

$FU2(X)$: Impact pour le bâtiment X pour l'unité fonctionnelle (2)

$S(X)$: Surface de plancher pour le bâtiment X

$M(X)$: Masse de granulats produits pour le bâtiment X

1.4.1.4 Frontières du système

Les limites du système sont représentées sur la Figure 36. Cette étude porte sur la fin de vie et le recyclage, c'est-à-dire les phases C1 à C4 et D selon la norme NF EN 15804 + A1. Par conséquent, nous avons pris en compte les flux suivants :

- Transport de l'installation de chantier (base vie du chantier pour les ouvriers) (C1),
- Consommation d'électricité (C1),
- Consommation d'eau (C1),
- Transport et production des matériaux utilisés sur le site (remblais) (C1 et C2),
- Transport et production de consommables (C1 et C2),
- Transport et production des fournitures à usages limités (C1 et C2),
- Transport sur site et consommation des engins de chantier (C2),
- Transport du personnel (C2),
- Transport (C2) et traitement des matériaux issus de la démolition (C3 et C4).

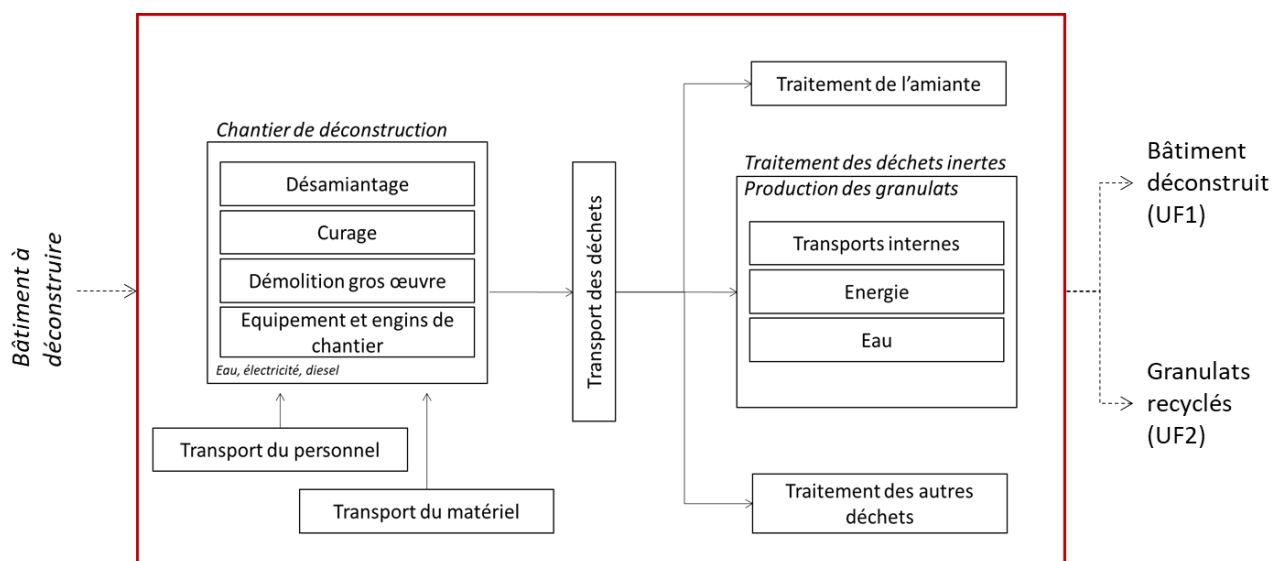


Figure 36 : Frontières du système. Le système étudié est entouré en rouge

1.4.1.5 Règle de coupure

Les éléments suivants n'ont pas été modélisés en l'absence de données :

- Production des fournitures et des consommables à usages limités,
- Production des engins de chantier,
- Service administratif,
- Production de l'installation de chantier (base vie du chantier pour les ouvriers),
- Production des consommables pour le processus de recyclage des granulats.

Ces procédés sont néanmoins considérés comme négligeables à dire d'expert.

1.4.1.6 Outils et méthode

Les calculs sont effectués grâce au logiciel OpenLCA (v.1.10) créé en 2006 par GreenDelta, avec la base de données Ecoinvent (version 3.5 cut off).

Afin de pouvoir comparer nos résultats à la MIE de la production des granulats vierge de l'UNPG (Union Nationale des Producteurs de Granulats)⁸, nous utilisons les indicateurs de la norme NF EN 15804 + A1. Nous avons décidé de retenir sept des neuf **indicateurs d'impacts de la norme**, listés ci-dessous ; nous avons décidé d'écarter l'indicateur de *pollution de l'eau* et de *pollution de l'air* du fait des critiques vives subies dans la sphère scientifique de ces deux indicateurs :

- Acidification des sols et des eaux (kg SO₂ eq.),
- Appauvrissement de la couche d'ozone (kg CFC-11 eq.),
- Eutrophisation (kg PO₄³⁻ éq.),
- Création d'ozone photochimique (kg éq. Éthylène),
- Changement climatique (kg éq. CO₂),
- Épuisement des ressources abiotiques (fossiles) (MJ, pouvoir calorifique inférieur),
- Épuisement des ressources abiotiques (éléments) (kg Sb éq.).

Pour la clarté du travail, parmi les dix-neuf **indicateurs de flux** de la norme six d'entre eux ont été retenus (les autres retournant un résultat nul) :

- Consommation de ressources énergétiques renouvelables (MJ),
- Consommation de ressources énergétiques non renouvelables (MJ),
- Déchets radioactifs (kg),
- Déchets dangereux (kg),
- Déchets non dangereux (kg),
- Eau douce (m³).

La compatibilité de la méthode avec le logiciel OpenLCA a été établie par Tiffany Desbois⁹.

1.4.1.7 Collecte des données

Les données ont été collectées à partir de mesures *in situ*, d'entretiens avec le personnel et d'enquêtes via un *Formulaire de collecte de données* rempli par les entreprises en charge des démolitions (un extrait du formulaire est présenté en Annexe IV). Les données collectées ont été reportées sur des documents internes du Cerema. Elles ont fait l'objet de vérification et validation par les entreprises impliquées dans toutes les étapes ainsi que par les experts du Cerema (Getas, 2016). Les données sont spécifiques à chaque chantier à l'exception du traitement des gravats en granulats recyclés.

1.4.2 Inventaire du cycle de vie des cas d'étude

1.4.2.1 Structure du modèle

Nous présentons les processus que nous utilisons pour réaliser les deux modèles ACV de chantier de déconstruction. Afin de faciliter la comparaison des deux chantiers de démolition, nous structurons ces modèles d'ACV de sorte à avoir la même organisation. Ainsi, nous divisons l'inventaire du cycle de vie en 5 grandes catégories :

⁸ <https://www.unpg.fr/accueil/dossiers/environnement/analyse-de-cycle-de-vie-des-granulats/>

⁹ Méthode implémentée dans openLCA par Tiffany Desbois-Cerema/DTerOuest/Laboratoire de Saint-Brieuc, septembre 2016 pour les catégories d'impacts et janvier 2017 pour les indicateurs de flux. Les détails sont mentionnés dans le 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 », daté du 4 décembre 2017.

- Transport du personnel,
- Transport de l'équipement,
- Transport et traitement de l'amiante,
- Transport et traitement des autres déchets,
- Phase chantier.

La phase chantier comprend l'utilisation des engins de chantier, des fluides, de l'électricité, des consommables et des remblais utilisés pendant le chantier de démolition. La Figure 37 résume les éléments inclus pour chaque catégorie.

Par convention, les procédés Ecoinvent sont – pour cette partie et pour l'ensemble de la thèse – écrits en italique lorsqu'ils sont repris bruts ou en police romaine s'ils sont en partie modifiés.

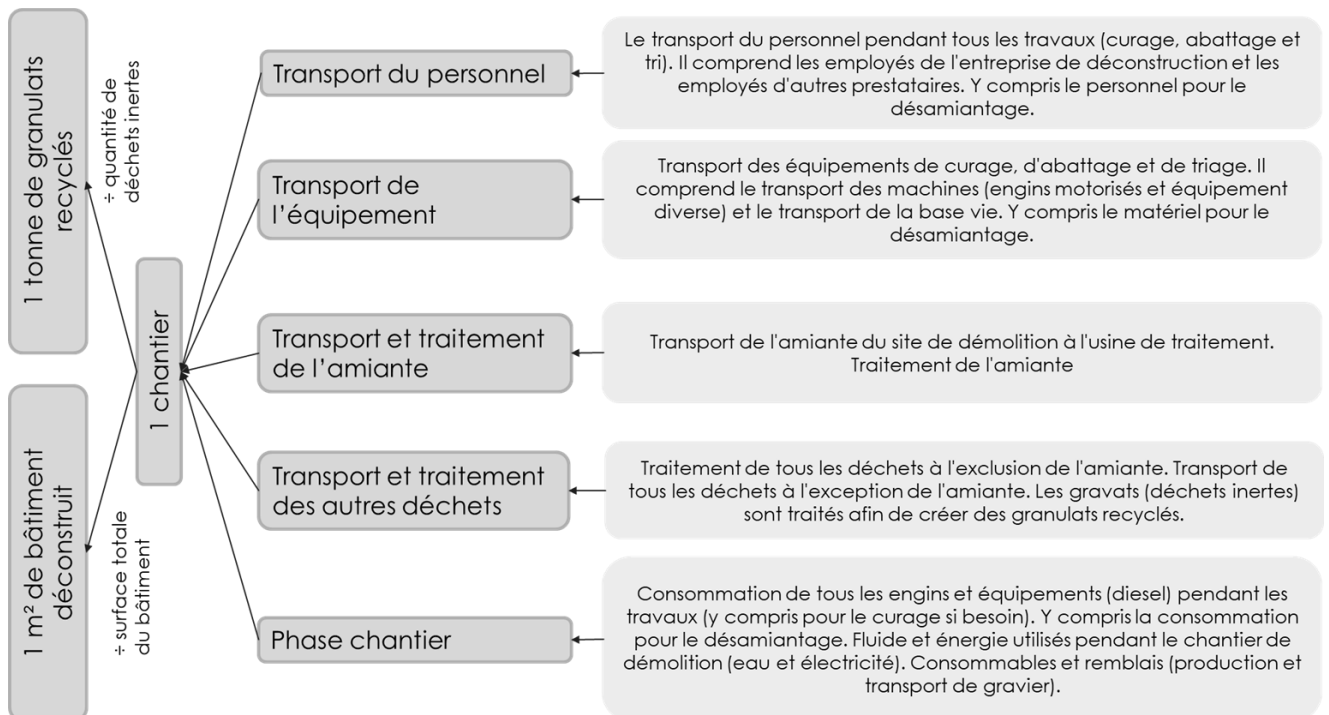


Figure 37 : Diagramme présentant les éléments inclus dans le modèle de la démolition

1.4.2.2 Transport du personnel

Pour cette catégorie, nous regroupons les trajets domicile/travail de l'ensemble du personnel intervenant sur le chantier. Pour le chantier A, trois principaux moyens de transport sont utilisés : le train, la voiture particulière et les camionnettes. Le Tableau 10 présente les procédés Ecoinvent utilisés et leurs quantités associées. Pour le chantier B, les trois principaux modes de déplacement sont les camionnettes, les voitures particulières et les camions. Le Tableau 11 présente les procédés et quantités utilisés pour le bâtiment B.

Tableau 10 : Procédés pour le transport du personnel Bâtiment A

Nom du flux Ecoinvent	Quantité	Information	Provider ¹⁰
<i>transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 5</i>	2 580 km	Transport du personnel, y compris le personnel chargé du désamiantage, en camionnette	Cutoff, U - RER
<i>transport, passenger car, small size, diesel, EURO 5</i>	1 332 km	Transports du personnel en voiture particulière	Cutoff, U - RER
<i>transport, passenger train</i>	720 p.km	Transports du personnel par train	Cutoff, U - FR

Tableau 11 : Procédés pour le transport du personnel Bâtiment B

Nom du flux Ecoinvent	Quantité	Information	Provider
<i>transport, passenger car, large size, diesel, EURO 4</i>	6 268 km	Transport du personnel pour divers services, en camionnette	Cutoff, U - RER
<i>transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4</i>	45,5 t.km	Transport du personnel pour divers services, par camion	Cutoff, U - RER
<i>transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO4</i>	47,6 t.km	Transport du personnel de l'entreprise au chantier, par camion	Cutoff, U - RER
<i>transport, passenger car, large size, diesel, EURO 4</i>	3 934 km	Transport du personnel de l'entreprise au chantier, par camionnette	Cutoff, U - RER
<i>transport, passenger car, small size, diesel, EURO 4</i>	812 km	Transport du personnel de l'entreprise au chantier en voiture particulière	Cutoff, U - RER

1.4.2.3 Transport de l'équipement

Dans cette catégorie, nous prenons en compte le transport de la base vie et des outils dont les engins et matériels de déconstruction. Les données comprennent les équipements utilisés pour le désamiantage. Les masses des équipements ont été estimées par avis d'expert. Les Tableau 12 et Tableau 13 présentent les procédés et leur quantité respectivement pour le chantier A et le chantier B.

¹⁰ Provider = précise le procédé utilisé pour produire le flux Ecoinvent. Cutoff= règle de coupure, U= Unit, RER= pays européens, FR= France, RoW = ensemble des autres pays mondiaux.

Tableau 12 : Procédés pour le transport de l'équipement pour la déconstruction du bâtiment A

Nom du flux Ecoinvent	Quantité	Information	Provider
<i>transport, freight, lorry > 32 metric ton, EURO5</i>	14 792 t.km	Transport du matériel lourd	Cutoff, U - RER
<i>transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5</i>	1 514 t.km	Transport des outils et de la base vie	Cutoff, U - RER

Tableau 13 : Procédés pour le transport de l'équipement pour la déconstruction du bâtiment B

Nom du flux Ecoinvent	Quantité	Information	Provider
<i>transport, freight, lorry > 32 metric ton, EURO4</i>	840 t.km	Transport du matériel lourd	Cutoff, U - RER
<i>transport, freight, lorry 7.5- 16 metric ton, EURO4</i>	67,8 t.km	Transport du matériel de taille moyenne	Cutoff, U - RER
<i>transport, freight, lorry 3.5- 7.5 metric ton, EURO4</i>	53,7 t.km	Transport du matériel léger	Cutoff, U - RER
<i>transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4</i>	4 415 t.km	Transport du matériel lourd	Cutoff, U - RER
<i>transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4</i>	188,6 t.km	Transport de la base vie	Cutoff, U - RER

1.4.2.4 Transport et traitement de l'amiante

La quantité et la présence de déchets amiantés varient fortement d'un chantier à un autre. C'est pourquoi nous avons décidé de séparer les déchets amiantés des autres déchets. Pour le chantier A, les déchets contenant de l'amiante ont été transportés par camion sur 255 km afin d'être enfouis en centre de stockage adapté. Pour le chantier B, les déchets ont été transportés par semi-remorque sur 670 km afin d'être vitrifiés. Néanmoins, dans les deux cas nous avons utilisé le seul procédé de traitement de l'amiante disponible sur la base Ecoinvent qui est un procédé d'enfouissement dans une ancienne mine de sel allemande. Les Tableau 14 et Tableau 15 présentent les flux et quantités utilisés respectivement pour le chantier A et chantier B.

Tableau 14 : Procédés pour le transport et le traitement des déchets amiantés pour le bâtiment A

Nom du flux Ecoinvent	Quantité	Information	Provider
<i>hazardous waste, for underground deposit</i>	9 t	Traitement des déchets amiantés	Cutoff, U - RoW
<i>transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5</i>	2 295 t.km	Transport des déchets amiantés par camion	Cutoff, U - RER

Tableau 15 : Procédés pour le transport et le traitement des déchets amiantés pour le bâtiment B

Nom du flux Ecoinvent	Quantité	Information	Provider
<i>hazardous waste, for underground deposit</i>	146,1 t	Traitement des déchets amiantés	Cutoff, U - RoW

<i>transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4</i>	3 229 t.km	Transport des déchets amiantés issus du bâtiment, par semi-remorque	Cutoff, U - RER
<i>transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4</i>	1 130 t.km	Transport des déchets amiantés issus de la voirie, par semi-remorque	Cutoff, U - RER

1.4.2.5 Transport et traitement des autres déchets

Recyclage des déchets inertes

Pour les besoins de l'étude, nous considérons que l'ensemble des déchets inertes est envoyé en filière de recyclage. Pour modéliser le recyclage des déchets inertes en granulats, nous nous basons sur le travail de (Ben Fraj and Idir, 2017) qui ont réalisé une comparaison environnementale d'un béton de classe C 30 (résistance à la compression de 30 MPa à 28 jours) à base de granulats recyclés et d'un béton de classe C 30 avec granulats vierge, dans la région parisienne. Le procédé utilisé pour modéliser le recyclage du granulats est présenté sur la Figure 23.

Le processus de recyclage est commun aux deux études de cas. Il est considéré que 1 tonne de gravats (déchets inertes pour produire des granulats recyclés) produit 1 tonne de granulats recyclés. Ce chiffre est cohérent avec le module d'information environnemental (MIE)¹¹ de l'UNPG. Les procédés utilisés pour l'ACV d'1 tonne de déchets inertes des bâtiments A et B sont présentés dans le Tableau 16. Les quantités pour chaque chantier sont respectivement 276 tonnes pour le chantier A et 6738 tonnes pour le chantier B.

Tableau 16 : Procédés pour le recyclage des granulats. Quantités pour le traitement d'une tonne de déchets inertes.

Nom du flux Ecoinvent	Quantité	Information	Provider
<i>diesel, burned in building machine</i>	2,75 MJ	Chargement dans le concasseur	Cutoff, U - GLO
<i>tap water</i>	67,7 kg	Séparation et lavage par flottaison	Market, Cutoff, U – Europe without Switzerland
<i>transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4</i>	0,1 t.km	Transports interne	Cutoff, U - RER
<i>electricity, medium voltage</i>	1,5 kWh	Utilisation d'électricité	Market, Cutoff, U - FR

Traitement des autres déchets

Pour le chantier du bâtiment A, les autres déchets sont envoyés en centre de stockage pour déchets non dangereux (ISDND). Les déchets sont transportés à l'aide de camions de 17 t et 25 t. Les autres déchets n'étant pas triés, nous utilisons le procédé « *inert waste, for final disposal* » bien que les déchets comprennent également des déchets non dangereux et non inertes. Pour le chantier B, un tri est effectué entre le bois, l'acier et les autres déchets ; leurs procédés de traitement sont donc spécifiques. Concernant l'acier et la fonte, en raison du manque de données précises, nous considérons que les métaux sont des aciers d'armature (« *reinforced steel* »). Notre étude ne porte pas

¹¹ <https://www.unpg.fr/accueil/dossiers/environnement/analyse-de-cycle-de-vie-des-granulats/>

spécifiquement sur l'impact du transport pour le recyclage des granulats. Ainsi, pour ne pas créer un biais, nous considérons une distance chantier/centre de recyclage des granulats moyenne basée sur les distances réelles du chantier A. Les flux et les quantités sont présentées dans le Tableau 17 pour le chantier A et dans le Tableau 18 pour le chantier B.

Tableau 17 : Procédés pour le transport et le traitement des autres déchets pour le bâtiment A

Nom du flux Ecoinvent	Quantité	Information	Provider
<i>inert waste, for final disposal</i>	112 t	Traitement de tous les déchets, à l'exception des déchets inertes éligibles au recyclage	Cutoff, U - RoW
<i>transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5</i>	4 125 t.km	Transport des déchets vers les centres de traitement	Cutoff, U - RER
<i>transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5</i>	4 635 t.km	Transport des déchets vers les centres de traitement	Cutoff, U - RER

Tableau 18 : Procédés pour le transport et le traitement des autres déchets pour le bâtiment B

Nom du flux Ecoinvent	Quantité	Information	Provider
<i>inert waste, for final disposal</i>	155,92 t	Déchets industriels ordinaires mis en décharge	Cutoff, U - RoW
<i>transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO4</i>	1 247,2 t.km	Transport des déchets ordinaires	Cutoff, U - RER
<i>wood chips, from post-consumer wood, measured as dry mass</i>	51,1 t	Traitement des déchets bois	treatment, sorting and shredding Cutoff, U - RoW
<i>transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4</i>	468,1 t.km	Transport du bois vers le centre de traitement	Cutoff, U - RER
<i>waste reinforcement steel</i>	45,84 t	Traitement de l'acier et de la fonte recyclés	Treatment, recycling Cutoff, U - RoW
<i>transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4</i>	435,5 t.km	Transport des déchets métalliques	Cutoff, U - RER
<i>transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4</i>	131 795 t.km	Transport de déchets inertes vers le centre de recyclage	Cutoff, U - RER

1.4.2.6 Phase du chantier de déconstruction

Le bâtiment A étant plus petit, sa démolition a été plus simple que pour le bâtiment B : les consommables sont négligeables et il n'y a pas eu besoin de remblai. Concernant le chantier du bâtiment B, certains consommables ne sont pas pris en compte. C'est le cas notamment du bois, des lames de scie, du béton, des équipements de sécurité individuels, des filtres à air et des sangles autobloquantes. Néanmoins, leur transport est pris en compte et assuré par une camionnette considérée comme une voiture particulière de grande taille. L'énergie nécessaire au désamiantage est

incluse dans l'utilisation des engins de déconstruction. Les procédés pour les deux chantiers sont présentés dans les Tableau 19 et Tableau 20.

Tableau 19 : Procédés pour la phase chantier, pour la démolition du bâtiment A

Nom du flux Ecoinvent	Quantité	Information	Provider
<i>diesel, burned in building machine</i>	49 466 MJ	Utilisation des engins de déconstruction	Cutoff, U - GLO
<i>tap water</i>	500 kg	Consommation d'eau pendant le chantier de démolition	Market, Cutoff, U – Europe without Switzerland

Tableau 20 : Procédés pour la phase chantier, pour la démolition du bâtiment B

Nom du flux Ecoinvent	Quantité	Information	Provider
<i>diesel, burned in building machine</i>	353 398 MJ	Utilisation des engins de déconstruction	Cutoff, U - GLO
<i>gravel, crushed</i>	20,89 t	Consommables	Gravel production Cutoff, U - RoW
<i>transport, passenger car, large size, diesel, EURO 4</i>	2 164 km	Transport des consommables	Cutoff, U - RER
<i>transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4</i>	115,4 t.km	Transport des consommables	Cutoff, U - RER
<i>electricity, medium voltage</i>	29 639 MJ	Électricité utilisée pendant le chantier	Market, Cutoff, U - FR
<i>tap water</i>	37 000 kg	Consommation d'eau durant le chantier	Market, Cutoff, U – Europe without Switzerland
<i>gravel, crushed</i>	2 522 t	Graviers pour les remblais	Gravel production Cutoff, U - RoW
<i>transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4</i>	27 514 t	Transport des graviers	Cutoff, U - RER
<i>transport, passenger car, large size, diesel, EURO 4</i>	57 km	Transport des autres éléments	Cutoff, U - RER

1.4.2.7 Qualité des données

Toutes les données nécessaires à l'étude ont été collectées en tant que données primaires sur le chantier et en tant que données secondaires auprès des producteurs des matériaux, de données web ou de la littérature scientifique. Les informations sur la source et la qualité des données de chaque étape et de chaque matériau sont présentées dans le Tableau 21. Ce tableau est réalisé conformément aux lignes directrices de la Commission européenne (Joint Research Centre (European Commission) et al., 2016) concernant l'évaluation de la qualité des données.

Le type et la source des données ont été évalués. Les exigences de qualité prises en considération sont :

- La représentativité technologique,
- La représentativité géographique,

- L'âge de la donnée,
- L'exhaustivité,
- La pertinence et la cohérence méthodologiques,
- L'incertitude.

Pour cette étude, nous obtenons un score global de 2,62. Cela correspond à un niveau de qualité des données entre moyen et bon. La représentativité technologique et géographique ainsi que l'âge de la donnée sont les paramètres qui influencent le plus la qualité des données. Ils sont ici dégradés par l'absence de données Ecoinvent précises pour certains processus, comme par exemple les processus de traitement des déchets (Tableau 21).

Tableau 21 : Matrice d'analyse de qualité des données appliquées à l'étude

Data	Type	Source	Data Quality Requirements						Resulting Data Quality Rating (DQR)
			Technological	Geographical	Time-Related	Completeness	Methodological Appropriateness and Consistency	Parameter Uncertainty	
Fuel consumption (demolition phase)	Primary	Reported data and ecoinvent*	1	4	4	3	2	2	2.67
Water consumption (demolition phase)	Primary	Reported data and ecoinvent*	3	3	3	2	2	1	2.33
Electricity consumption (demolition phase)	Primary	Reported data and ecoinvent*	3	2	3	2	2	1	2.17
Consumables (gravel)	Primary	Reported data and ecoinvent*	4	4	4	2	3	1	3.00
Means of transport and distances (staff, materials)	Primary	Reported data and ecoinvent*	2	3	4	2	2	1	2.33
Disposal and other waste processing	Secondary	Reported quantity, assumption for the treatment	4	4	4	1	2	4	3.17
Internal transport (production plant)	Secondary	Amor Ben Fraj, Rachida Idir 2017, and ecoinvent*	2	3	4	3	1	3	2.67
Water consumption (production plant)	Secondary	Amor Ben Fraj, Rachida Idir 2017, and ecoinvent*	3	3	3	3	1	3	2.67
Fuel consumption (production plant)	Secondary	Amor Ben Fraj, Rachida Idir 2017, and ecoinvent*	1	4	4	3	1	3	2.67
Electricity consumption (production plant)	Secondary	Amor Ben Fraj, Rachida Idir 2017, and ecoinvent*	3	2	3	3	1	3	2.50
TOTAL AVERAGE									2.62

Technological: specific technology or technology mix; **geographical:** geographical area from which data for unit processes should be collected to satisfy the goal of the study; **time-related:** age of data and the minimum length of time over which data should be collected; **completeness:** percentage of flow that is measured or estimated; **methodological appropriateness and consistency:** qualitative assessment of whether the study methodology is applied uniformly to the various components of the analysis; **parameter uncertainty:** uncertainty of the information (e.g., data, models, and assumptions). **Scoring:** 1 = very good, 2 = good, 3 = fair, 4 = poor, 5 = very poor.

1.4.3 Évaluation des impacts et interprétation

Nous présentons les résultats sous les deux prismes : celui de la fin de vie du bâtiment (1) et celui de la production de granulats recyclés (GR) (2). Pour chaque objectif, nous procéderons d'abord à l'analyse des résultats des indicateurs d'impact sur l'environnement suivie de celle des indicateurs de flux.

1.4.3.1 Résultats à l'échelle de la démolition

Pour rappel, l'unité fonctionnelle sélectionnée pour étudier la fin de vie du bâtiment est 1 m² de bâtiment démolé (UF1).

Indicateurs d'impact

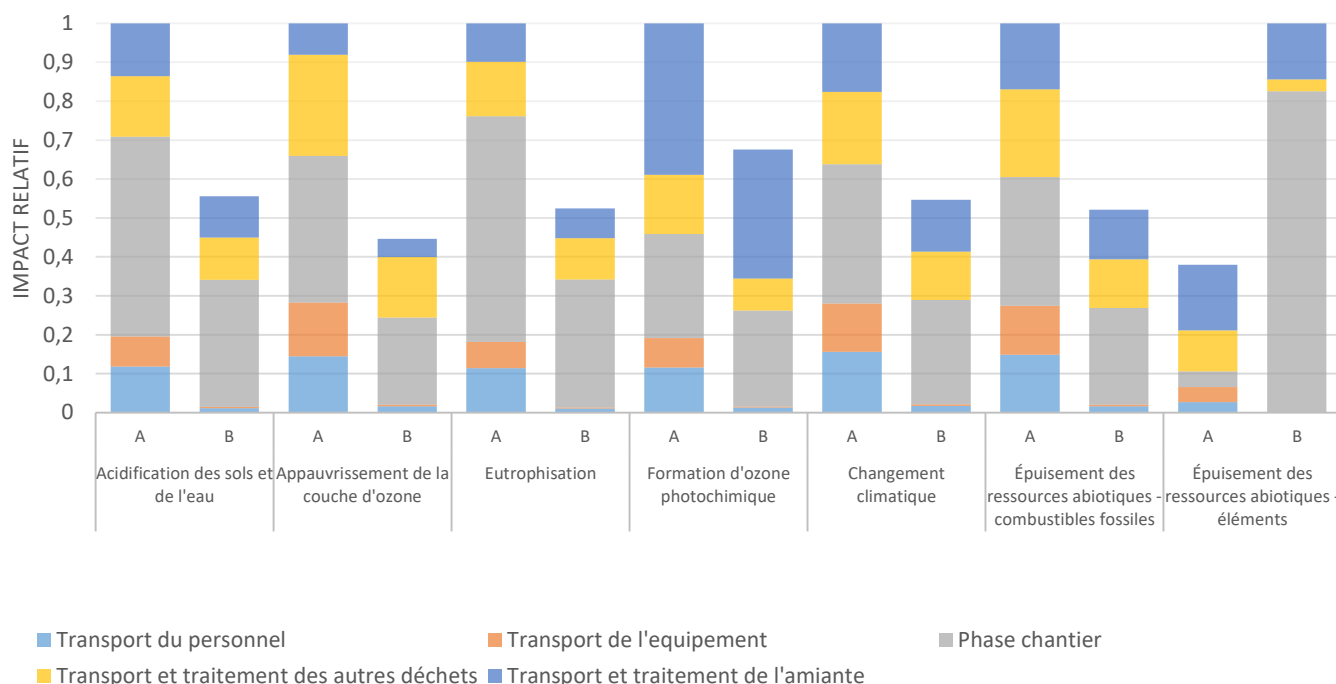
Les valeurs des indicateurs d'impact de la fin de vie du bâtiment sont indiquées dans le Tableau 22. La Figure 38 montre la distribution des impacts relatifs selon les différentes catégories détaillées précédemment.

Nous pouvons observer dans le Tableau 22 que les impacts des deux études de cas sont très différents. Le chantier de démolition du bâtiment A a un impact presque deux fois plus important que le chantier du bâtiment B. Tous les indicateurs d'impact du bâtiment B représentent en effet entre 43 % et 49 % de ceux du bâtiment A, à l'exception de l'épuisement des ressources abiotiques – éléments où la situation est inversée. Toutefois, cela se justifie par la présence de remblai pour le chantier B, contrairement au chantier A, qui impacte donc fortement la consommation de ressources minérales (abiotiques). L'impact des remblais sur cet indicateur est en effet de $3,94 \times 10^{-5}$ kg Sb eq. (pour l'ensemble du chantier B) ce qui correspond à 80 % de l'impact total de l'épuisement des ressources abiotiques – éléments ($4,89 \times 10^{-5}$ kg Sb eq. au total).

Tableau 22 : Valeurs des indicateurs d'impacts environnementaux pour 1 m² de bâtiment démolé. Comparaison entre les bâtiments A et B

Indicateur d'impact	Unité de référence	GR Bâtiment A (pour 1 m ²)	GR Bâtiment B (pour 1 m ²)
Acidification des sols et de l'eau	kg SO ₂ eq.	$2,24 \times 10^{-1}$	$1,24 \times 10^{-1}$
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC-11 eq.	$7,28 \times 10^{-6}$	$3,25 \times 10^{-6}$
Eutrophisation	kg PO ₄ ³⁻ eq.	$4,28 \times 10^{-2}$	$2,25 \times 10^{-2}$
Formation d'ozone photochimique	kg ethylene eq.	$1,13 \times 10^{-2}$	$7,61 \times 10^{-3}$
Changement climatique	kg CO ₂ eq.	$4,22 \times 10^1$	$2,31 \times 10^1$
Épuisement des ressources abiotiques - combustibles fossile	MJ, net calorific value	$6,59 \times 10^2$	$3,44 \times 10^2$
Épuisement des ressources abiotiques - éléments	kg Sb eq.	$3,38 \times 10^{-9}$	$8,91 \times 10^{-9}$

Figure 38 : Impacts relatifs et répartition entre les catégories des bâtiments A et B pour les différents indicateurs d'impact.



En outre, la Figure 38 nous montre que les cinq grandes catégories qui composent la fin de vie du bâtiment ont toutes un impact global significatif sur tous les indicateurs d'impact. Néanmoins, trois catégories prédominent :

- Le **désamiantage** (transport et traitement de l'amiante) jusqu'à 38 % pour le bâtiment A (atteint pour l'indicateur de *formation d'ozone photochimique*) ;
- Le **traitement et le transport des autres déchets** (gros œuvre et second œuvre) jusqu'à 26 % pour le bâtiment A (atteint pour l'indicateur d'*appauvrissement de la couche d'ozone*) ;
- La **phase chantier** jusqu'à 58 % pour le bâtiment A (atteint pour l'indicateur d'*eutrophisation*).

Le transport des équipements et du personnel est très faible pour le bâtiment B, ce qui tend à s'expliquer par une économie d'échelle due à la surface de plancher beaucoup plus importante et à la compacité plus grande du bâtiment B (4-5 étages, 5487 m²) par rapport au bâtiment A (2 étages, 300 m²).

La répartition des impacts par catégorie semble similaire d'un bâtiment à un autre. Par exemple, pour le *changement climatique*, dans les deux études de cas, l'impact de la phase chantier (36 % pour A, 27 % pour B) est plus élevé que l'impact du transport et du traitement des déchets amiantés (18 % pour A et 13 % pour B) ou du transport et du traitement des autres déchets (19 % pour A et 12 % pour B), eux-mêmes plus élevés que la catégorie du transport du personnel (16 % pour A, 2 % pour B), et enfin plus élevé que la catégorie du transport des équipements (12 % pour A, <1 % pour B).

Indicateurs de flux

Les valeurs des indicateurs de flux pour les deux bâtiments A et B sont présentées dans le Tableau 23. La Figure 39 illustre l'impact relatif et la distribution des catégories de fin de vie pour chaque indicateur de flux.

Tableau 23 : Tableau présentant les valeurs des indicateurs de flux pour les bâtiments A et B

Indicateurs de Flux	Unité de référence	GR Bâtiment A (pour 1 m ²)	GR Bâtiment B (pour 1 m ²)
Consommation de ressources énergétiques renouvelables	MJ	$3,20 \times 10^1$	$3,10 \times 10^1$
Consommation de ressources énergétiques non renouvelables	MJ	$7,01 \times 10^2$	$3,79 \times 10^2$
Déchets radioactifs	kg	$4,19 \times 10^{-3}$	$2,21 \times 10^{-3}$
Déchets dangereux	kg	$3,11 \times 10^1$	$2,75 \times 10^1$
Déchets non dangereux	kg	$3,95 \times 10^2$	$4,11 \times 10^1$
Eau douce	m ³	$9,33 \times 10^{-2}$	$1,23 \times 10^{-1}$

Contrairement aux indicateurs d'impact, les indicateurs de flux appliqués aux deux cas d'étude varient d'un bâtiment à un autre et d'un indicateur à l'autre. En effet, certains indicateurs sont sensiblement les mêmes pour les deux bâtiments, comme la *consommation de ressources énergétiques renouvelables* avec 32,04 MJ et 31,03 MJ (respectivement pour le bâtiment A et le bâtiment B) ou les *déchets dangereux* avec 31,05 kg et 27,48 kg.

À l'inverse, certains indicateurs présentent une différence importante d'un bâtiment à un autre. C'est le cas notamment de la *consommation de ressources énergétiques non renouvelables* et des *déchets non dangereux* avec jusqu'à 90 % de différence.

Pour comprendre ces variations, il est possible d'étudier la distribution des impacts en fonction des catégories. On observe une disparité significative des proportions de chaque catégorie d'un indicateur à l'autre et d'un bâtiment à l'autre. Sans grande surprise, l'amiante est le contributeur majoritaire pour les *déchets dangereux*. Inversement, les autres déchets contribuent aux *déchets non dangereux*.

La quantité de *déchets non dangereux* largement plus faible pour le bâtiment B par rapport au bâtiment A confirme la meilleure compacité du bâtiment B (optimisation de la surface au sol pour un même volume de construction). C'est donc la géométrie du bâtiment qui guide ces indicateurs. En revanche, le ratio de la quantité d'amiante en fonction de la surface est presque le même (0,030 kg/m² pour le bâtiment A et 0,027 kg/m² pour le bâtiment B). Effectivement, la quantité presque similaire en *déchets dangereux* pour les deux bâtiments s'explique par une utilisation forte d'amiante pour le bâtiment B (présence d'amiante dans l'enrobé qui est inclus dans le chantier de déconstruction). Cet indicateur dépend donc de la présence d'amiante et de la compacité. Il est susceptible de varier grandement d'un chantier de déconstruction à un autre. Cela confirme l'intérêt d'avoir utilisé une catégorie dédiée pour les déchets amiantés.

Concernant l'indicateur d'*eau douce*, nous pouvons observer que, contrairement à ce qui était attendu, le contributeur majoritaire concerne le traitement des autres déchets (56 % pour le bâtiment A et 71 % pour le bâtiment B) ; l'eau utilisée sur chantier ne compte que pour 5 % pour le bâtiment B et 1,7 % pour le bâtiment A. Le reste de l'eau douce consommée lors de la phase chantier provient majoritairement des remblais utilisés pour le bâtiment B (13 %).

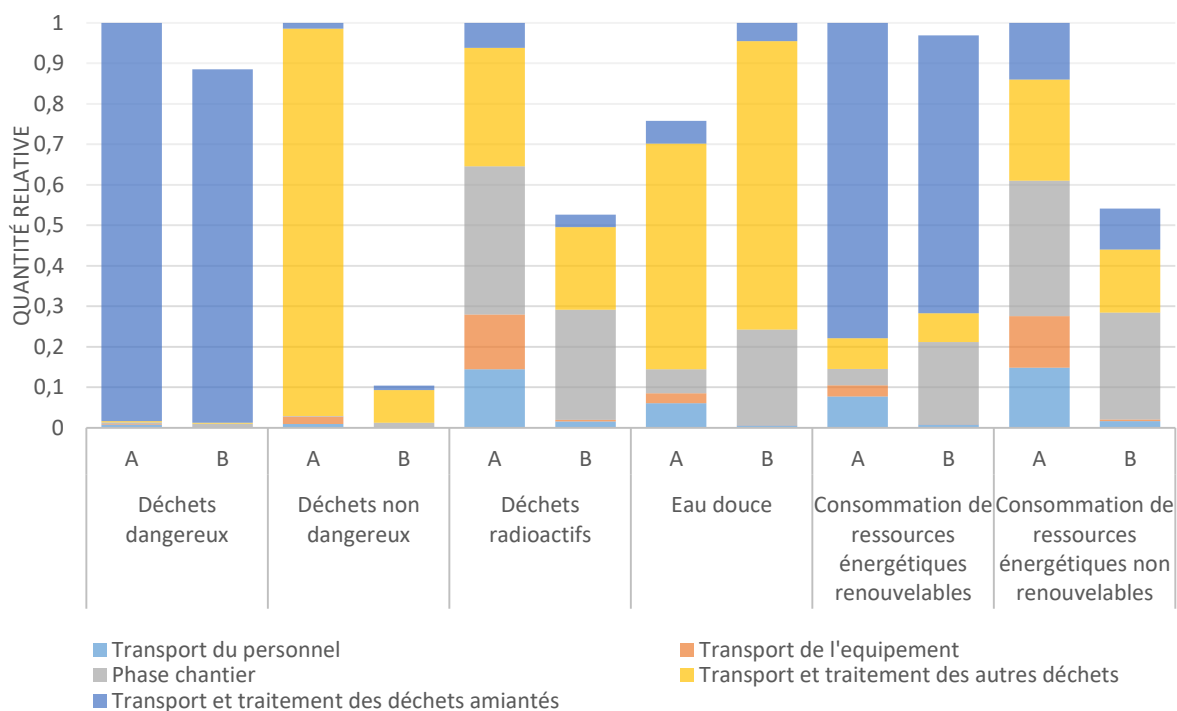


Figure 39 : Impacts relatifs et répartition entre les catégories des bâtiments A et B pour les indicateurs de flux. Pour 1 m² de bâtiment démolé

Pour conclure sur l'échelle du chantier de démolition, nous pouvons dire que l'impact d'une déconstruction peut varier fortement d'un chantier à l'autre. Néanmoins, pour les indicateurs d'impacts, si la valeur absolue dépend du chantier, les proportions des contributeurs principaux sont sensiblement les mêmes. La différence en valeur absolue des indicateurs d'impact semble liée principalement à la compacité du bâtiment ou à l'efficacité fonctionnelle (conception optimisée en matériaux). Cela suggère une économie d'échelle. Les éléments les plus impactants sont le traitement des déchets produits par les bâtiments (y compris l'amiante), suivis par l'utilisation d'énergie pour les engins de construction et dans une moindre mesure, le transport du personnel et des équipements. Pour les indicateurs de flux, les résultats varient plus indistinctement. En effet, la quantité de *déchets non dangereux* dépend de la compacité du bâtiment alors que la quantité en *déchet dangereux* dépend plus de l'utilisation d'amiante à l'époque de la construction. Enfin, concernant les fluides et principalement la consommation d'eau douce, l'eau consommée directement sur le chantier semble presque négligeable face aux consommations d'eau nécessaires pour le traitement des déchets et la fabrication de remblais.

Toutefois, ces interprétations sont réalisées suite aux observations sur ces deux cas d'études. Il serait nécessaire d'approfondir ce travail en effectuant une analyse statistique sur un échantillon plus grand.

1.4.3.2 Résultats à l'échelle du granulat recyclé

Nous nous intéressons ici à la seconde unité fonctionnelle, qui porte sur la production d'une tonne de granulats (UF2).

L'étude macro de la répartition des cinq grandes catégories est semblable à l'étude à l'échelle de la fin de vie du bâtiment. En effet, il s'agit simplement du ratio entre les deux unités fonctionnelles comme présenté dans la section 1.4.1 (Équation 2). Néanmoins, nous avons vu précédemment que deux

catégories (exceptée l'amiante) avaient un impact majeur : la *phase chantier* et le *transport et traitement des autres déchets*. Afin d'en comprendre les raisons, nous regardons plus en détail ces deux catégories pour les indicateurs d'impact.

La catégorie *phase chantier* est détaillée dans la Figure 40. La catégorie *transport et traitement des autres déchets* est détaillée dans la Figure 41.

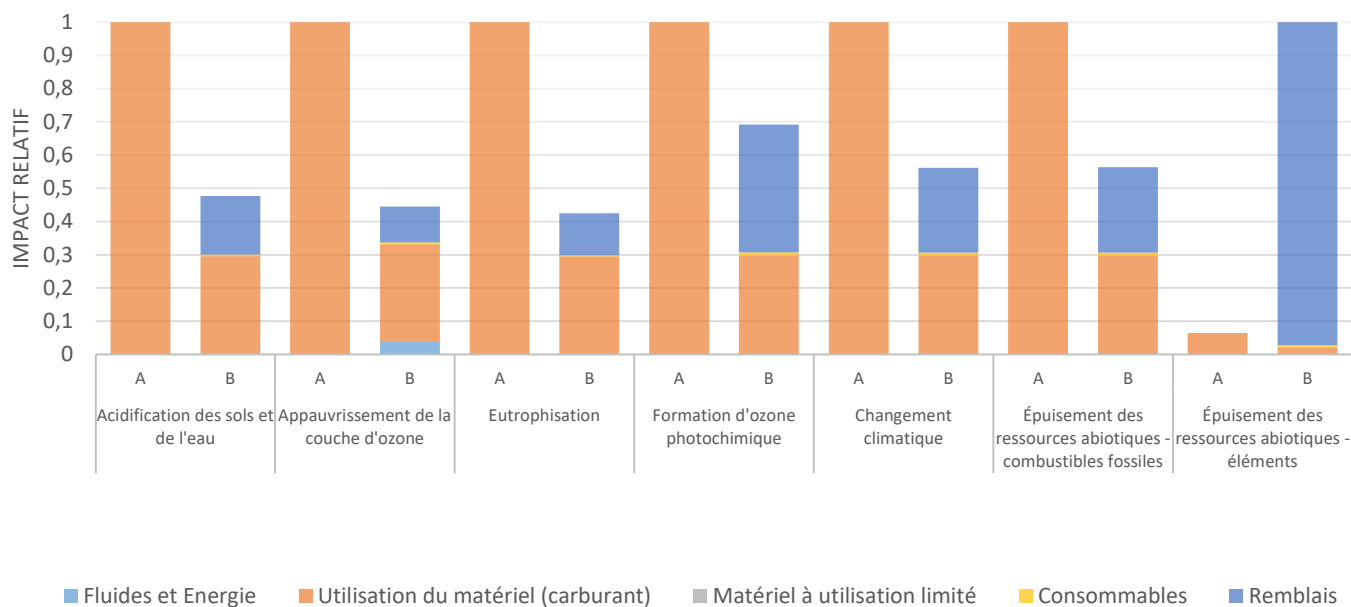


Figure 40 : Impact relatif de la phase chantier de démolition des bâtiments A et B pour les indicateurs d'impact

Nous observons, pour la *phase chantier*, que le principal contributeur est la consommation de diesel par les engins de démolition pour tous les indicateurs d'impact à l'exception de l'indicateur *épuisement des ressources abiotiques (éléments)*. Pour le bâtiment B en particulier, le remblai a un impact important : jusqu'à 97 % pour l'indicateur *épuisement des ressources abiotiques (éléments)* et au minimum 24 % pour l'*appauvrissement de la couche d'ozone*. Ainsi, les remblais ne sont pas négligeables et doivent être comptés avec précision. On peut se demander s'il aurait été possible d'améliorer le résultat du chantier sur tous les indicateurs d'impacts environnementaux en auto-consommant les granulats recyclés produits à la place de l'utilisation de remblais vierges (sachant que

2522 tonnes de remblais ont été consommés pour ce chantier et que 6738 tonnes de granulats recyclés auraient pu être produits). Un focus sur l'autoconsommation est ainsi réalisé.

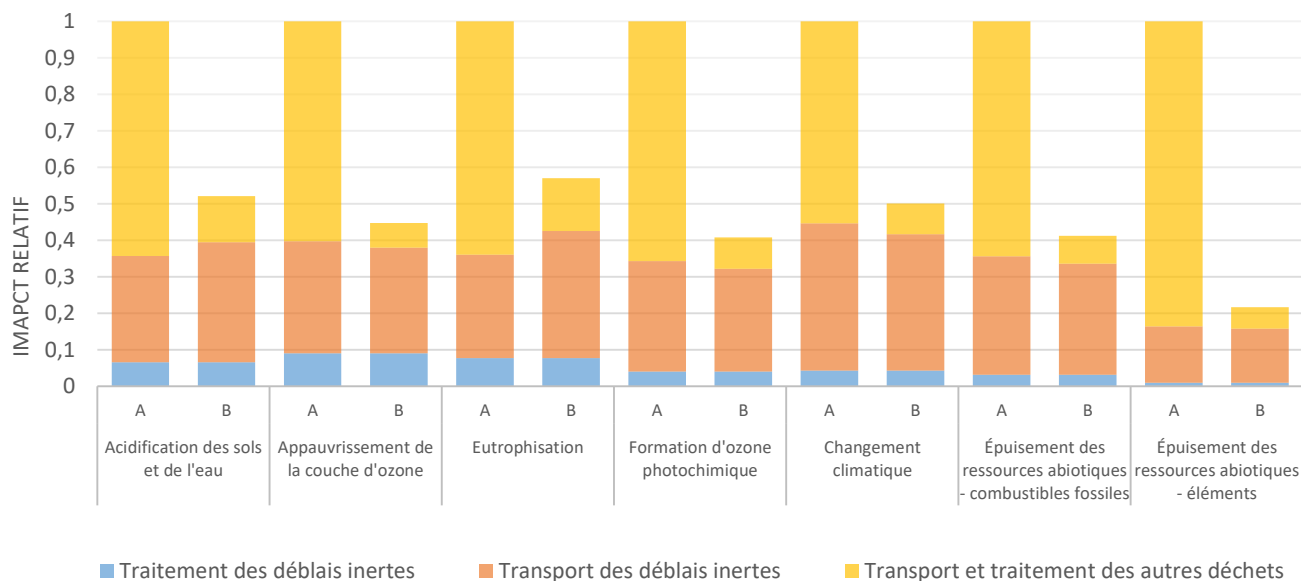


Figure 41 : Impact relatif du traitement des déchets et de la phase de transport (hors amiante) pour les bâtiments A et B pour les indicateurs d'impact.

Pour le *transport et le traitement des autres déchets* (Figure 41), le procédé de transport et le procédé de traitement des gravats (déchets inertes qui ont été recyclés en agrégats) sont par construction les mêmes pour les deux bâtiments. C'est pourquoi, les impacts sont sensiblement les mêmes pour tous les indicateurs. La variation est liée au transport et notamment à la taille des camions utilisés. Cette variation ne dépasse pas les 5 % entre les deux bâtiments. On peut observer que, sans être dominant, le transport a un impact non négligeable (jusqu'à 10 % pour le bâtiment A et 20 % pour le bâtiment B pour l'indicateur *appauvrissement de la couche d'ozone*). Concernant le *transport et le traitement des autres déchets* on observe que la proportion de l'impact varie fortement d'un bâtiment à un autre. La part de cette sous-catégorie est notamment très faible pour le bâtiment B. Par exemple, pour l'indicateur de *formation d'ozone photochimique*, la part pour le bâtiment B n'est que de 20 % contre 65 % pour le bâtiment A. Ceci nous confirme le meilleur amortissement de l'impact de la déconstruction par une production plus grande de granulats recyclés pour le bâtiment B en comparaison au bâtiment A. Cela participe au faisceau d'indices suggérant un effet d'échelle lié à une forte différence de compacité des bâtiments.

Encart autoconsommation

Étudions rapidement les conséquences de l’autoconsommation de granulats. On considère que l’ensemble des remblais utilisés pour le bâtiment B est constitué de granulats recyclés à partir des déchets inertes du chantier, ce qui correspond à 2522 tonnes. Il reste donc 4215 tonnes de granulats produits. Pour modéliser l’autoconsommation, il faut effectuer deux modifications dans le modèle. Ces modifications ainsi que les résultats sont présentés dans le Tableau 24. Pour la concision de l’étude, seul l’impact sur le *changement climatique* est étudié, la dynamique sur les autres indicateurs étant similaire.

On observe qu’au global, en valeur absolue (pour le chantier complet), autoconsommer une partie des granulats permet de réduire l’impact de 22 % (spécifique à notre cas d’étude). Toutefois, dans une logique de « bâtiment producteur » où il serait considéré que la déconstruction du bâtiment permet de produire des granulats, on observe que les granulats avec autoconsommation sont plus impactants de 19 %. Nous sommes face à une singularité où le gain de l’impact n’est pas suffisant par rapport à la diminution de quantité produite. C’est en cohérence avec les observations que nous effectuerons plus tard sur la Figure 42.

Tableau 24 : Tableau comparatif de deux scénarios sur le **bâtiment B** (avec ou sans autoconsommation des granulats recyclés). Comparaison des modifications sur le modèle et comparaison des impacts sur le *changement climatique* pour l’échelle fin de vie et l’échelle granulat

	Sans autoconsommation des GR	Avec autoconsommation des GR
Éléments d’intérêt		
Entrant (remblais)	Transport sur 11 ou 6 km des 2522 tonnes remblais du centre de production au chantier	Transport sur 19,56 km des 2522 tonnes de GR du centre de traitement au chantier
Quantité de GR produits (non auto-consommés)	6738 t	4215 t
Résultats (changement climatique, en kg Co2 eq.)		
Pour le chantier complet	126 517	98 313
Pour 1 m² SDP	23	20
Pour 1 tonne de GR	19	23

Enfin, nous faisons la **comparaison des granulats recyclés obtenus dans le cadre de ce travail avec les données sur le granulat vierge (GV) et le granulat recyclé (GR) issus de l'UNPG** – Union Nationale des Producteurs de Granulats. Les données UNPG sont issues des deux modules d’informations environnementales (MIE) mis à disposition en 2012. Elles prennent en compte les éléments du berceau à la sortie de l’usine *i.e.* de la carrière à la sortie d’usine pour le granulat vierge et de l’arrivée des déblais sur la plateforme à la sortie d’usine pour le granulat recyclé. Il est important de noter que nous considérons ici la même qualité des granulats qu’ils soient naturels ou recyclés. Or, le rapport Recybéton (IREX, n.d.) met en avant une légère perte de qualité pour le granulat recyclé notamment pour un usage dans un nouveau béton. Nous ne prenons pas en compte cette fonctionnalité annexe

car l'usage de ce granulat n'est pas exclusivement destiné à la fabrication de béton. Le Tableau 25 présente les indicateurs d'impact environnementaux pour les quatre granulats (granulat recyclé bâtiment A, granulat recyclé bâtiment B, granulat recyclé UNPG et granulat vierge UNPG). Il faut noter que le système diffère entre les granulats de notre étude (bâtiments A et B) et la MIE de l'UNPG du granulat recyclé. En effet, pour la donnée de l'UNPG, il est pris parti de commencer le système à l'arrivée des gravats sur site de recyclage. Cela rejoint la réflexion sur l'allocation (section 1.4.4.2).

Tableau 25 : Impact environnemental d'une tonne de granulat recyclé provenant du bâtiment A et du bâtiment B et d'une tonne de granulat recyclé et de granulat vierge provenant de l'UNPG (l'appauvrissement de la couche d'ozone pour les granulats UNPG n'est pas calculée dans la MIE).

Indicateur d'impact	Unité de référence	GR Bâtiment A (pour 1 t)	GR Bâtiment B (pour 1 t)	GR UNPG (pour 1t)	GV UNPG (pour 1 t)
Acidification des sols et de l'eau	kg SO ₂ eq.	$2,43 \times 10^{-1}$	$1,01 \times 10^{-1}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$4,23 \times 10^{-2}$
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC-11 eq.	$7,91 \times 10^{-6}$	$2,64 \times 10^{-6}$	////	////
Eutrophisation	kg PO ₄ ³⁻ eq.	$4,66 \times 10^{-2}$	$1,83 \times 10^{-2}$	$5,32 \times 10^{-3}$	$1,05 \times 10^{-2}$
Formation d'ozone photochimique	kg ethylene eq.	$1,22 \times 10^{-2}$	$6,20 \times 10^{-3}$	$3,98 \times 10^{-4}$	$5,17 \times 10^{-4}$
Changement climatique	kg CO ₂ eq.	$4,59 \times 10^1$	$1,88 \times 10^1$	$2,97 \times 10^0$	$2,42 \times 10^0$
Épuisement des ressources abiotiques - combustibles fossile	MJ, net calorific value	$7,17 \times 10^2$	$2,80 \times 10^2$	$2,74 \times 10^0$	$3,16 \times 10^0$
Épuisement des ressources abiotiques - éléments	kg Sb eq.	$3,67 \times 10^{-9}$	$7,25 \times 10^{-9}$	$6,92 \times 10^{-6}$	$5,69 \times 10^{-6}$

La Figure 42 illustre l'impact relatif des 4 granulats. Comme nous avons pu le voir précédemment, les résultats ont une forte variabilité en fonction du type de granulat considéré ; ceci est encore plus flagrant face au granulat vierge et au granulat recyclé de l'UNPG. Le granulat issu du bâtiment A a le plus fort impact pour tous les indicateurs d'impact à l'exception de l'indicateur *épuisement des ressources abiotiques (éléments)*. Les granulats du bâtiment B ont un impact inférieur d'environ 70 % par rapport au granulat du bâtiment A (au minimum 50 % pour l'indicateur *formation d'ozone photochimique* ; au maximum 75 % pour l'indicateur *appauvrissement de la couche d'ozone*).

Cependant, ces deux granulats recyclés sont eux-mêmes beaucoup plus impactants que les granulats naturels/vierges et les granulats recyclés de l'UNPG. En effet, les granulats vierges représentent au maximum 23 % des granulats du bâtiment A (*eutrophisation*) et n'ont quasi aucun impact (0,004 %) pour l'*épuisement des ressources abiotiques (fossiles)*. Le seul indicateur où les granulats vierges et les granulats recyclés de l'UNPG sont prépondérants est l'*épuisement des ressources abiotiques*

(éléments). Ces deux procédés étant des procédés « system »¹², nous ne disposons donc pas des éléments pour comprendre d'où vient cette singularité ; cette prépondérance pourrait témoigner d'un procédé additionnel non compté ou non applicable dans nos deux cas d'études.

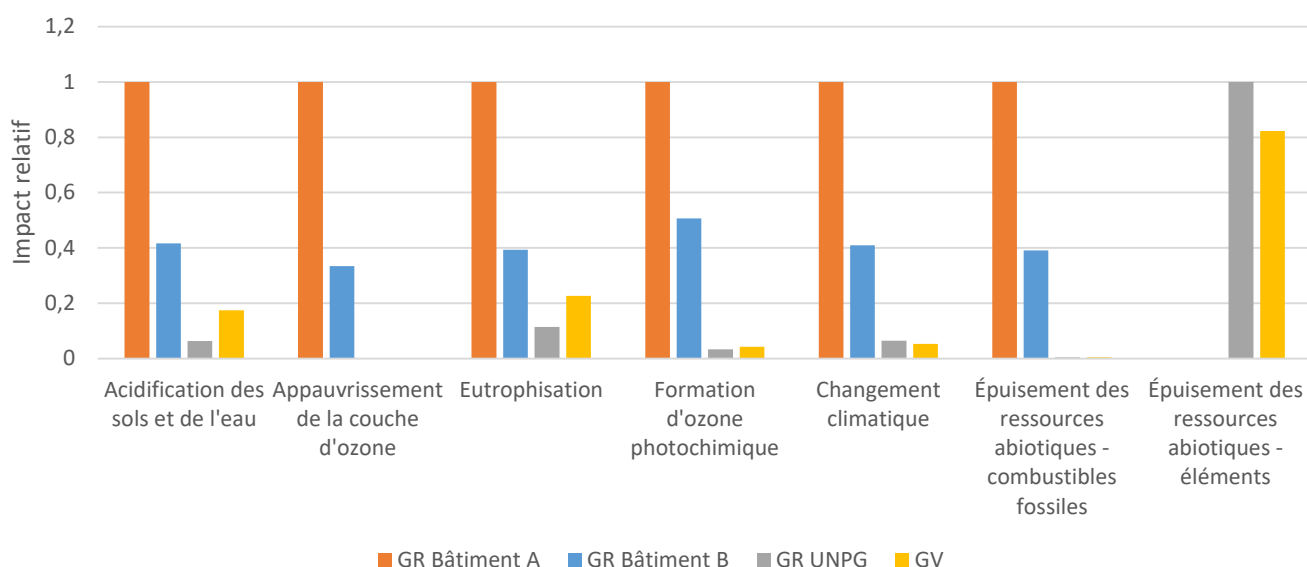


Figure 42 : Impact relatif d'une tonne de granulat recyclé provenant du bâtiment A et du bâtiment B et d'une tonne de granulat recyclé et granulat vierge provenant de l'UNPG.

Pour les indicateurs de flux, les résultats sont légèrement différents à l'instar des résultats pour UF1. Le Tableau 26 présente les valeurs des indicateurs de flux et la Figure 43 montre les quantités relatives pour les indicateurs de flux des quatre granulats. Pour tous ces indicateurs, une tonne de granulat provenant du bâtiment B a moins d'impact qu'une tonne de granulat provenant du bâtiment A (de 27 % d'amélioration pour la *consommation d'énergie renouvelable* à 93 % d'amélioration pour les *déchets non dangereux*, à l'exception de l'indicateur *eau douce* où la valeur est à peu près équivalente). Le granulat vierge et le granulat recyclé de l'UNPG semblent avoir un meilleur résultat, sauf pour l'indicateur *eau douce* où ils sont tous les deux beaucoup plus impactants. Cette différence entre les valeurs des cas d'études et les valeurs de MIE peut indiquer l'utilisation de données et de procédés différents et spécifiques. Par ailleurs, il est important de garder à l'esprit que les valeurs pour les cas d'études sont fortement influencées par la fin de vie d'un bâtiment qui, elle, n'est pas comprise dans les données de l'UNPG.

¹² Un procédé « system » est un procédé disposant de l'inventaire du cycle de vie total sans séparation des sous composants du procédé, à l'inverse des procédés « unit » qui renvoient aux différents procédés composants le procédé étudié.

Tableau 26 : Impact d'une tonne de granulat recyclé provenant du bâtiment A et du bâtiment B et d'une tonne de granulat recyclé et granulat vierge provenant de l'UNPG

Indicateurs de Flux	Unité de référence	GR Bâtiment A (1 tonne)	GR Bâtiment B (1 tonne)	GR UNPG (1 tonne)	GV UNPG (1 tonne)
Consommation de ressources énergétiques renouvelables	MJ	$3,48 \times 10^1$	$2,53 \times 10^1$	$0,00 \times 10^0$	$0,00 \times 10^0$
Consommation de ressources énergétiques non renouvelables	MJ	$7,62 \times 10^2$	$3,09 \times 10^2$	$6,12 \times 10^0$	$2,89 \times 10^1$
Déchets radioactifs	kg	$4,56 \times 10^{-3}$	$1,80 \times 10^{-3}$	$0,00 \times 10^0$	$0,00 \times 10^0$
Déchets dangereux	kg	$3,38 \times 10^1$	$2,24 \times 10^1$	$0,00 \times 10^0$	$0,00 \times 10^0$
Déchets non dangereux	kg	$4,29 \times 10^2$	$3,35 \times 10^1$	$0,00 \times 10^0$	$0,00 \times 10^0$
Eau douce	m ³	$1,01 \times 10^{-1}$	$1,00 \times 10^{-1}$	$1,44 \times 10^1$	$2,91 \times 10^0$

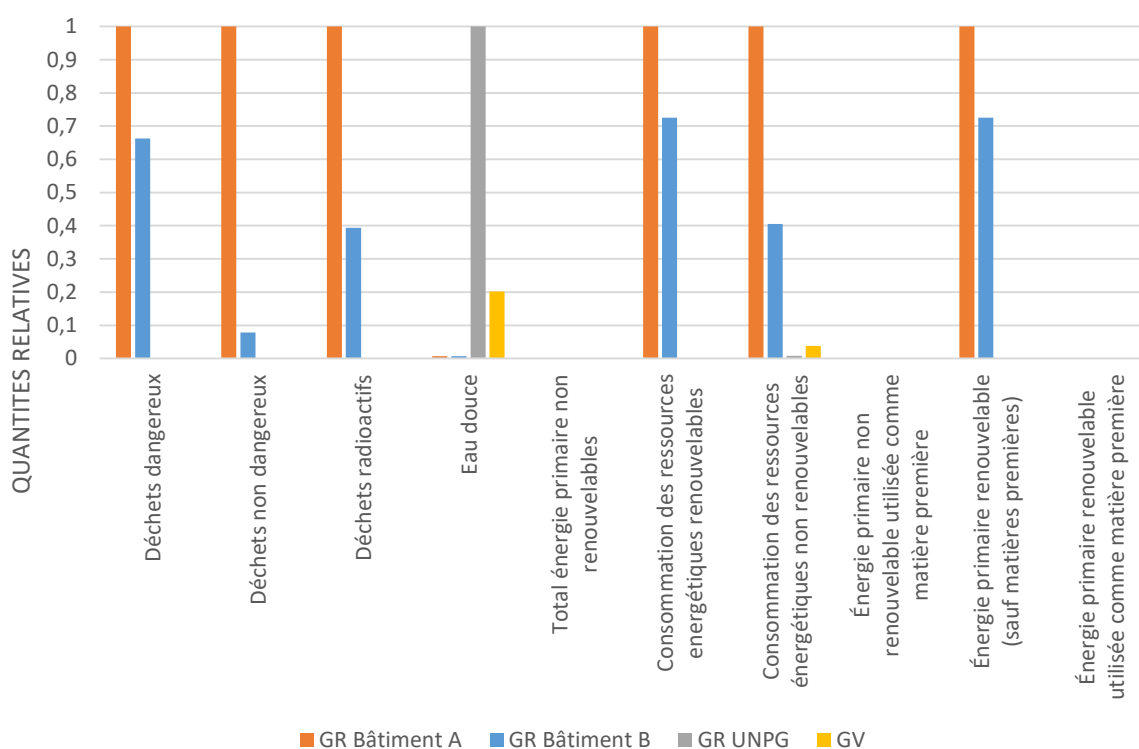


Figure 43 : Flux relatifs d'une tonne de granulat recyclé du bâtiment A, et du bâtiment B et d'une tonne de granulat recyclé et granulat vierge provenant de l'UNPG

1.4.4 Discussion

Les observations réalisées mettent en avant la différence qui existe entre le bâtiment A et le bâtiment B. Le bâtiment B est moins impactant sur la plupart des indicateurs comparativement au bâtiment A. Cette différence d'impact est principalement due à la quantité relative des déchets par rapport à la surface du bâtiment (UF 1) ou quantité de granulat produite (UF 2) mais aussi à l'utilisation de carburant pour les équipements de démolition. Lorsque l'on ajoute à la comparaison les granulats vierges, l'avantage du recyclage n'est pas évident car les granulats vierges ont les résultats les plus faibles pour les principaux indicateurs, à l'exception de l'épuisement des ressources abiotiques

(éléments) et de l'eau douce. L'un des principaux avantages du recyclage semble être la préservation des ressources. Toutefois, les résultats suggèrent que les données UNPG sont très différentes de nos cas d'études. Les cas d'études choisis et le procédé de traitement des déchets inertes sont peut-être trop spécifiques pour être comparés aux données UNPG où une homogénéisation est réalisée pour être représentatif de l'ensemble des adhérents (sachant que l'UNPG représente 900 entreprises sur plus de 1500 entreprises de productions de granulats recensées en 2019, tous types d'extractions confondues (UNICEM, 2021)). L'UNPG représente en effet plus de la moitié des entreprises et 85 % du chiffre d'affaire¹³. Ainsi, on peut dire que la donnée est plutôt représentative du marché français.

Nous pouvons néanmoins tempérer les observations compte tenu du fait que jusqu'à présent, l'impact de la fin de vie de tous les bâtiments est attribué à la production de granulats recyclés. Ce choix méthodologique a une conséquence sur l'impact du granulat. Une étude de sensibilité sur ce point est réalisée dans la section 1.4.4.2.

Au vu de ces résultats, quelques remarques et discussions sont abordées. Tout d'abord, ce travail présente des faits intéressants sur la fin de vie des bâtiments. En effet, l'étude nous permet d'affirmer, notamment, que l'impact environnemental varie beaucoup en fonction du bâtiment. Ceci est lié à la méthode de construction et de démolition, à la typologie du bâtiment, à la taille du bâtiment, etc. Ainsi, dans une perspective d'économie circulaire où la fin de la vie réelle d'une structure/infrastructure n'est pas la fin de la vie potentielle, connaître l'impact de la démolition est essentiel. Basée principalement sur des données primaires, cette étude fournit des données précises sur la démolition pour un site spécifique. Un point d'amélioration de la présente étude ACV serait de mettre à jour certains processus Ecoinvent utilisés de manière à ce qu'ils soient plus spécifiques et représentatifs des cas d'étude.

Lors d'une opération de recyclage, l'articulation entre le cycle actuel et le cycle suivant est un point clé de l'économie circulaire. En effet, dans le paradigme d'une économie circulaire, les déchets de certains objets sont les ressources des autres. Par conséquent, un certain impact du cycle précédent doit être pris en compte. Une analyse de sensibilité est réalisée dans la section suivante afin de mieux comprendre les approches d'allocation. De plus, dans ce travail, nous avons considéré pour simplifier que les déchets inertes sont les seuls matériaux considérés comme des produits de la démolition des bâtiments, or d'autres déchets peuvent être recyclés ou réemployés ; une étude plus approfondie doit donc prendre en compte l'allocation entre les coproduits.

Des recherches futures pourraient également être menées pour optimiser l'impact de la fin de vie en améliorant les catégories les plus conséquentes présentées dans cette étude (comme le transport, l'utilisation du moteur, etc.).

1.4.4.1 Analyse de sensibilité sur l'usage des engins de démolition

Précédemment, nous avons observé que la *phase chantier* et plus exactement l'usage des engins de démolition a un impact significatif sur tous les indicateurs environnementaux. Pour étudier les conséquences d'une telle hypothèse nous réalisons une étude de sensibilité en faisant varier le temps d'utilisation de ces engins. Nous réalisons cette étude pour le bâtiment A. Nous créons deux scénarios :

- Scénario 1 : les engins sont utilisés 10 % (soit 4 heures) de plus ;
- Scénario 2 : les engins sont utilisés 10 % (soit 4 heures) de moins.

¹³ <https://www.unpg.fr/>

La Figure 44 présente l'impact relatif de la valeur de référence et des deux scénarios alternatifs à l'échelle du bâtiment démolit.

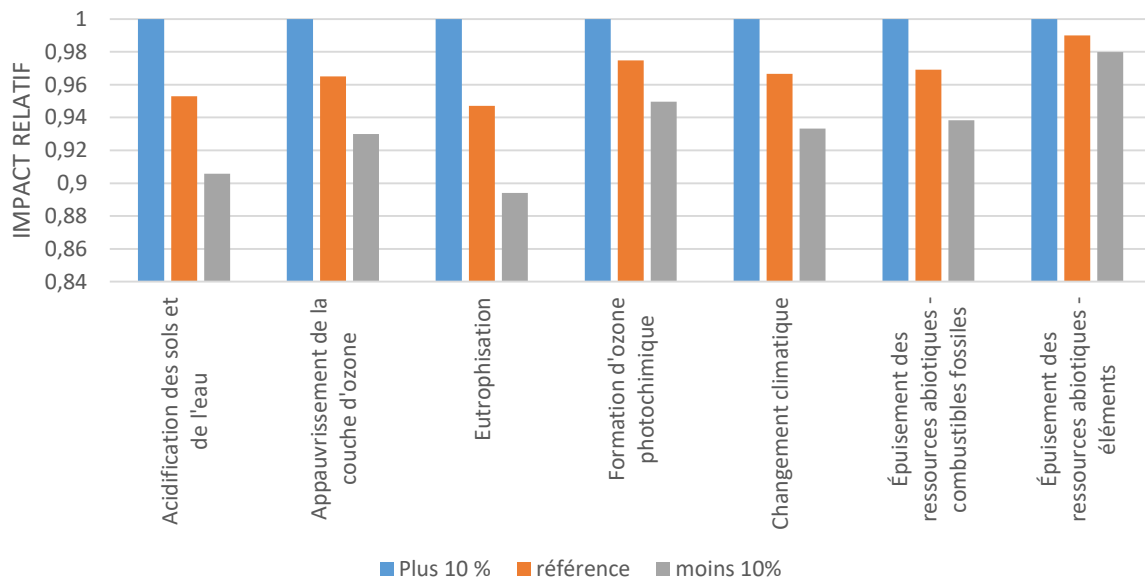


Figure 44 : Étude de sensibilité de l'impact relatif de l'utilisation des engins de démolition à +10 % ou -10 % pour le chantier complet du bâtiment A

Nous observons sur certains indicateurs tels que l'*eutrophisation*, et l'*acidification des sols et de l'eau* une différence significative. En effet, on observe une forte variation (plus de 10 %) sur ces indicateurs pour une relativement faible variation d'utilisation (seulement 20 %). Ceci nous montre l'importance de récolter des données précises concernant l'utilisation des engins.

1.4.4.2 Analyse de sensibilité sur les allocations

Dans la section précédente, nous avons vu que le granulat recyclé de notre étude (bâtiments A et B) semble avoir plus d'impact que le granulat vierge pour presque tous les indicateurs. Ceci est lié à l'allocation de la fin de vie du bâtiment. Pour comprendre ce phénomène, nous réalisons une analyse de sensibilité concernant les approches d'allocation. Nous réalisons **trois scénarios d'allocation** (Tableau 27). Pour tous les scénarios, le transport et le traitement des gravats (déchets inertes qui permettent de fabriquer des granulats) ont été attribués aux granulats recyclés car ils leur sont directement imputables. L'impact des autres éléments a été partagé : le *transport du personnel*, le *transport des équipements*, le *traitement et le transport de l'amiante*, la *phase de chantier*, et le *transport et le traitement des autres déchets* (sans les gravats).

Les indicateurs d'impact environnementaux sont calculés pour tous ces scénarios. Pour des raisons de concision, les indicateurs de flux n'ont pas été représentés. Par ailleurs, nous avons observé précédemment que les granulats vierges avaient une valeur nulle pour un grand nombre d'indicateurs de flux. Par conséquent, les granulats recyclés ne sont pas compétitifs par rapport aux granulats vierges lorsque les indicateurs de flux sont analysés. Les résultats normalisés sont présentés sur la Figure 45. Sur ce graphique, les scénarios 0/100 sont en couleur unie, les scénarios 50/50 sont hachurés, et 100/0 sont quadrillés. Les granulats vierges sont en bleu foncé lorsque la valeur est connue.

Tableau 27 : Tableau présentant la part d'impact attribuée au bâtiment déconstruit et au granulat recyclé pour trois scénarios d'allocation. * Impact de la fin de vie du bâtiment sans transport et traitement des gravats

Approche d'allocation	Part de l'impact alloué au bâtiment déconstruit			Part de l'impact alloué au granulat recyclé		
	Transport des gravats à la plateforme de traitement	Traitement des gravats	Autres impacts *	Transport des gravats à la plateforme de traitement	Traitement des gravats	Autres impacts *
0/100	0%	0%	0%	100%	100%	100%
50/50	0%	0%	50%	100%	100%	50%
100/0	0%	0%	100%	100%	100%	0%

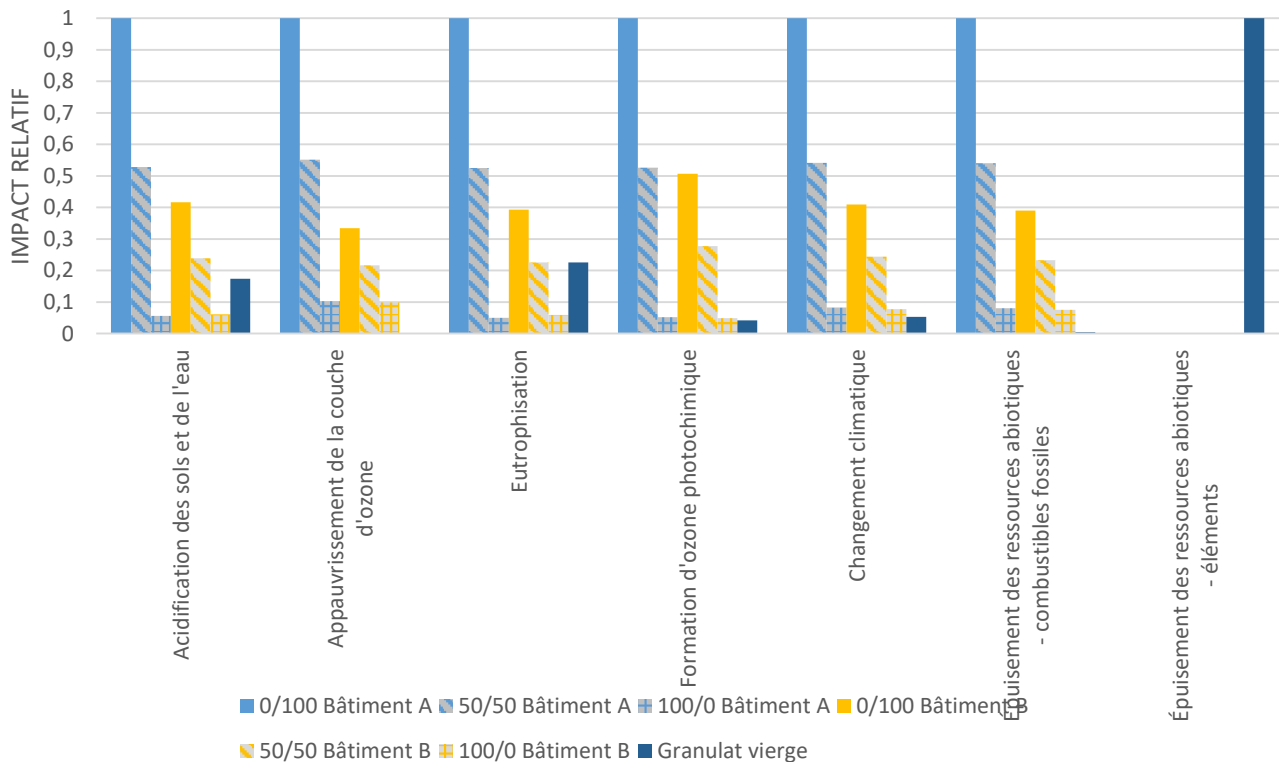


Figure 45 : Impacts relatifs de la production de granulat recyclé pour trois scénarios d'allocation (0/100, 50/50, 100/0) et impact du granulat vierge (UNPG). Pour l'appauvrissement de la couche d'ozone, l'impact du granulat vierge n'est pas disponible. Pour l'épuisement des ressources abiotiques (éléments), les valeurs des granulats recyclés sont trop faibles pour être visible sur le graphique.

Nous pouvons observer que la production de granulats recyclés devient compétitive pour certains indicateurs avec les approches d'allocation 50/50 (uniquement pour le bâtiment B) et 100/0 (pour les deux bâtiments). Effectivement, pour l'eutrophisation, l'impact des granulats recyclés 50/50 bâtiment B est le même que celui des granulats vierges, c'est-à-dire 22,6 % (par rapport aux granulats vierges du bâtiment A).

Pour le scénario 50/50 du bâtiment B, 1 indicateur sur 8 (l'appauvrissement de la couche d'ozone a été exclu) est inférieur à celui du granulat vierge (l'appauvrissement des ressources abiotiques (éléments)) et 3 indicateurs sur 8 présentent une différence inférieure à 10 %.

Pour le scénario 100/0 du bâtiment A ou B, 4 indicateurs sur 8 sont inférieurs (plus de 10 % de différence) au granulat vierge et 4 sur 8 étaient assez similaires (moins de 10 % de différence).

Ainsi, on peut affirmer que le granulat avec le scénario 100/0 est compétitif face au granulat vierge. Néanmoins, pour l'indicateur du *changement climatique*, le granulat vierge reste moins impactant que le granulat recyclé (5,3 % de l'impact max pour le granulat vierge et 7,7 % pour le bâtiment B avec l'allocation 100/0). L'intérêt de l'aspect multicritères de l'analyse du cycle de vie est donc mis en évidence.

Notons qu'en terme d'analyse sur le cycle de vie complet, l'approche d'allocation choisie n'a pas d'influence sur l'impact global de l'ensemble du cycle de vie, du moment que la même allocation pour la construction et la démolition du bâtiment est utilisée. En effet selon l'allocation choisie, l'impact est juste reporté au cycle "n + 1" ou appliqué au cycle "n". Il faut garder à l'esprit l'aspect multi-étapes de l'ACV.

Néanmoins, les approches d'allocation ont un rôle décisionnel et politique car elles permettent de mettre en concurrence des procédés qui peuvent mener au développement de nouveaux procédés plus vertueux sur le plan environnemental. Pour la production de granulats recyclés, plusieurs points de vue peuvent être évoqués pour justifier les différentes méthodes d'allocation (pour rappel, toutes les approches d'allocation considèrent les gravats comme le seul produit de la démolition ce qui est discutable). En outre, nous nous positionnons dans un contexte où les bâtiments sont déjà construits :

- Approche 0/100 : Avec ce type d'approche, la démolition est mise au même niveau que la réhabilitation ou la conservation c'est-à-dire qu'elle n'a pas d'impact. La démolition n'est pas incitée mais elle n'est pas non plus empêchée. Ainsi, on peut dire que la production du granulat recyclé est favorisée. Cependant, le fort impact du granulat recyclé qui en découle n'encourage pas son utilisation ce qui, par défaut d'acheteur, mènerait les maîtres d'ouvrages à éviter la démolition. Associée à une réglementation sur la limitation de l'extraction de granulats vierges, cette approche pourrait être pertinente pour limiter les nouvelles constructions et ainsi limiter l'acte de démolition. Cette approche est particulièrement adaptée dans un stade avancé de l'économie circulaire afin de limiter au plus les démolitions.
- Approche 50/50 : Cette méthode est un compromis entre l'approche précédente et l'approche suivante. Elle répartit équitablement l'impact de la démolition sur l'ancien bâtiment et le granulat recyclé. Cette méthode ne permet pas actuellement de promouvoir l'utilisation de granulats recyclés car l'impact est toujours plus élevé que celui des granulats vierges sur certains sites de démolition. Néanmoins, elle pourrait permettre de sélectionner uniquement les démolitions les plus efficaces.
- Approche 100/0 : Cette approche est la méthode où le granulat recyclé est le plus compétitif. Elle incite à l'utilisation de granulats recyclés à condition que l'indicateur sur le changement climatique ne soit pas le seul indicateur visé. À défaut de restrictions environnementales, cette approche incite à la démolition des bâtiments même si la démolition aurait pu être évitée.

1.4.4.3 Conclusion de l'étude

Cette étude donne une évaluation quantitative des impacts environnementaux des granulats recyclés obtenus à partir des déchets inertes issus de la démolition d'un bâtiment en fin de vie. L'analyse est basée sur deux chantiers de démolition de bâtiments résidentiels : un petit bâtiment résidentiel (bâtiment A) de 300 m² de surface au sol situé dans le sud de la France et un plus grand bâtiment résidentiel (bâtiment B) de 5487 m² de surface au sol situé dans l'ouest de la France. Une ACV est conduite sur ces deux chantiers. Comme les gravats constituent la majeure partie (en masse) des déchets, il a été décidé d'étudier le recyclage en granulats recyclés à partir des déchets issus de la démolition. L'analyse est réalisée suivant deux échelles : l'une permettant de mesurer l'impact de la

déconstruction d'un m² de bâtiment et l'autre la production d'une tonne de granulats recyclés. Cette étude met en évidence :

- À l'échelle de la **démolition des bâtiments** : les impacts environnementaux de la fin de vie des bâtiments varient beaucoup d'un bâtiment à l'autre. Par exemple, 23,1 kgCO₂éq. sont émis pour le bâtiment B et 42,2 kgCO₂éq. pour le bâtiment A pour 1 m² de surface de plancher de bâtiment démolit. La valeur est presque doublée du bâtiment B au bâtiment A pour l'indicateur du *changement climatique*. Cela semble dépendre de la nature du bâtiment, comme sa taille et d'autres paramètres qui restent à déterminer en utilisant un pool de cas d'étude plus grand et varié. Cela tend à démontrer une économie d'échelle.
- Concernant la **production de granulats recyclés** : les impacts des granulats recyclés sont fortement supérieurs à ceux des granulats vierges pour tous les indicateurs, à l'exception de *l'épuisement des ressources abiotiques (éléments)* et de *l'appauvrissement de la couche d'ozone* (ce dernier n'a pas été calculé pour les granulats vierges). Avec cette méthode d'allocation, les granulats recyclés ne sont pas compétitifs face au granulats naturel.
- Aux deux échelles, l'analyse des contributeurs principaux met en évidence que toutes les parties de la fin de vie ont un impact non négligeable. Toutefois la *phase chantier* et le *transport et le traitement des déchets* sont prépondérants. Par exemple, ils correspondent tous deux à environ 35 % de l'indicateur de *changement climatique* pour le bâtiment A. Cela est justifié par la consommation de carburant des machines de construction et au transport des déchets. En outre, l'importance de la typologie du bâtiment est renforcée, confortant l'idée d'une économie d'échelle.
- Une analyse de sensibilité avec différentes approches d'allocation a été réalisée. Il s'avère que les granulats recyclés ne sont pas significativement moins impactants sur tous les indicateurs, même avec l'allocation la plus favorable, surtout sur le *changement climatique* où le granulats vierge reste moins impactant. Ces observations soulignent l'intérêt de l'aspect multicritères de l'analyse du cycle de vie.
- L'optimisation des processus de traitement des déchets est cruciale dans le cadre d'une gestion raisonnée des déchets. Par ailleurs, le *traitement de l'amiante* a un impact très important.
- L'optimisation de la géolocalisation des sites de démolition et de l'usine de traitement est également essentielle. En effet, l'étape du transport a un impact significatif et une planification minutieuse des itinéraires de transport est nécessaire pour minimiser les impacts sur l'environnement.

1.5 CONCLUSION DU CHAPITRE 1

Le secteur du BTP est un fort producteur de déchets avec plus de 70 % en masse des déchets produits en France. Les déchets du BTP sont classés en trois catégories : les déchets dangereux, les déchets non dangereux non inertes et les déchets non dangereux inertes, ces derniers constituant la majorité des déchets produits (92 % en masse). Il est donc intéressant de se focaliser sur la valorisation de ce type de déchets. Une hiérarchie de valorisation est définie dans le code de l'environnement. Il s'agit de privilégier le réemploi au recyclage car cela permet de conserver l'intégrité de la matière et de l'objet.

Le béton est un matériau fortement utilisé dans le monde, notamment dans le secteur du BTP et représente (béton prêt à l'emploi) en France plus de 40 millions de mètres cube en 2018. Il dispose d'un fort impact sur le changement climatique lié à la fabrication du ciment (clinker). Tout au long de la vie de la structure, il existe diverses méthodes de diagnostic afin de déterminer l'état d'une structure en béton. Les méthodes peuvent être non destructives (ferroscan, scléromètre) ou destructives et à réaliser en laboratoire (essai de compression). Principalement utilisé en génie civil pour suivre le vieillissement des ouvrages d'art, le diagnostic pourrait également être utilisé et développé pour analyser les structures du bâtiment en fin de vie et orienter vers la valorisation la plus adaptée. En fin de vie, il existe plusieurs méthodes pour déconstruire une structure en béton armé. Certaines méthodes, comme par exemple le foudroyage ou le procédé par éclatement, permettent d'obtenir des blocs de béton cassés. D'autres permettent de scinder plus facilement les éléments telles que la découpe à l'aide d'une scie diamantée ou encore l'hydro démolition. Ces dernières permettent d'obtenir des éléments (en apparence) intègres.

L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode de calcul des impacts des activités anthropiques multicritères et multi-étapes, c'est-à-dire qu'elle s'intéresse à un ensemble de polluants et d'impacts sur l'environnement mais également à toutes les étapes du cycle de vie du service ou élément étudié. Elle vise à prendre en compte le risque de transfert d'impact que ce soit par transfert de pollution d'une étape à l'autre ou par transfert d'un impact à un autre. Codifiée par les normes ISO 14040 et ISO 14044 dans le cadre général et par la norme EN 15804 pour le secteur du BTP, cette méthode nous permet de comparer les solutions de fin de vie des bâtiments et de valorisation des déchets en béton issus du BTP.

Le premier niveau de valorisation des déchets inertes issus du béton est son recyclage. Actuellement la méthode de valorisation la plus développée pour ces matériaux est le concassage du béton pour obtenir des granulats recyclés qui pourront servir dans la formulation de nouveaux bétons. Afin de mieux comprendre les impacts environnementaux de la déconstruction, nous avons réalisé l'ACV de deux déconstructions de bâtiment (un grand collectif et un petit collectif) puis nous avons analysé les avantages environnementaux de la valorisation par recyclage des granulats. Ainsi, l'impact de la déconstruction varie fortement (presque du simple au double pour nos cas d'études) d'un chantier à un autre, probablement en raison d'un effet d'échelle. Le transport et le traitement des déchets issus de la déconstruction sont des contributeurs majeurs à l'impact de la déconstruction. Par ailleurs, à l'échelle du granulat, la production de granulat recyclé n'est pas significativement bénéfique sur les indicateurs de l'ACV. Quelle que soit l'allocation retenue, le granulat vierge est le moins impactant. Pourtant de manière intuitive on peut se dire que le recyclage procure un avantage en terme de consommation de ressources car il permet d'éviter d'extraire la ressource naturelle. On peut alors se demander si la question de l'économie circulaire pourrait retranscrire ce bénéfice et dans quelle mesure ; cette réflexion fait l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 2. LA MESURE DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

Dans un contexte de crise environnementale, de finitude des ressources et de grande production de déchets, le concept d'économie circulaire (EC) fait désormais partie du discours politique, professionnel et académique (Kirchherr et al., 2017). Il est notamment cité de manière croissante dans les publications scientifiques (Figure 46).

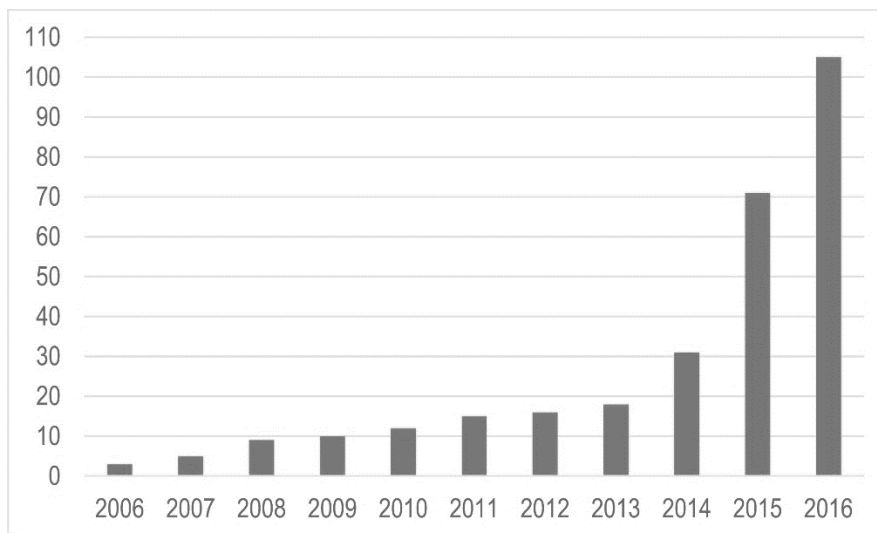


Figure 46 : Nombre d'articles et documents scientifiques issus du web-of-science par année pour le sujet de l'économie circulaire (Geissdoerfer et al., 2017)

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la définition et à la mesure de l'économie circulaire (EC). Ce chapitre se découpe en trois parties. La première partie constitue une recherche bibliographique sur la définition, le principe et la mesure de l'EC. La deuxième porte sur l'application d'une sélection de ces indicateurs (mesures) de l'EC à un cas d'étude afin de comprendre leur comportement et d'identifier leurs limites. Enfin, dans une troisième partie, on se propose de faire évoluer un indicateur basé sur ceux existants, mais permettant de dépasser les limites identifiées.

2.1 L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

Le concept d'économie circulaire (EC) est apparu dès les années 1960 (Appendino et al., 2018; Reike et al., 2018) mais c'est seulement à partir des années 1990 que celui-ci prend de l'importance (Murray et al., 2017). Le terme apparaît pour la première fois dans l'ouvrage *Economics of Natural Resources and the Environment* (Pearce et al., 1990). Depuis, différentes définitions ont été données et le principe a été explicité.

2.1.1 Définition de l'économie circulaire

Comme mentionné par (Appendino et al., 2018), il existe une « multitude de définitions possibles » de l'économie circulaire et « le terme d'EC est associé à celui d'économie collaborative, d'économie de la fonctionnalité ou encore d'économie sociale et solidaire, démontrant le caractère évolutif de la notion ». Le Tableau 28 regroupe différentes définitions issues de la bibliographie. (Kirchherr et al., 2017) analysent notamment 114 définitions tandis que (Prieto-Sandoval et al., 2018) proposent une vision consensuelle des bases du concept de l'EC à partir d'une revue systématique de la littérature.

La diversité des définitions reflète la variété des visions du concept d'EC. Par exemple, (Appendino et al., 2018) mettent en avant que : (Geissdoerfer et al., 2017) s'intéressent au bouclage matière-énergie, (Ma et al., 2014) à la protection de l'environnement, (Prieto-Sandoval et al., 2018) à la relation homme-nature, (Stahel, 2016) au recyclage des déchets et (European Commission, 2015) à l'innovation.

À l'échelle nationale, on retrouve une définition de l'économie circulaire au sein de la loi de transition énergétique pour la croissance verte du 17 Août 2015 (Code de l'environnement, L.110-1-1, (Légifrance, 2015)). Ainsi, l'économie circulaire est présentée comme « un modèle économique dont l'objectif est de produire des biens et des services de manière durable, en limitant la consommation et les gaspillages de ressources ainsi que la production de déchet ». L'objectif est de rompre avec le modèle de l'économie linéaire (extraire, fabriquer, consommer, jeter) pour adopter un modèle économique circulaire.

À partir de cette définition, on peut faire ressortir trois termes majeurs :

- La production de biens, liée à la notion de croissance,
- La consommation des ressources,
- La production de déchets.

En parallèle, on peut noter trois notions qui nécessitent d'être explicitées :

- La manière durable,
- La limitation,
- La rupture.
- La définition de l'EC de l'ADEME complète celle de la LTECV avec une composante sociale et une composante ouvertement environnementale : « L'économie circulaire peut se définir comme un système économique [...] qui, à tous les stades du cycle de vie des produits [vise] à diminuer l'impact sur l'environnement tout en développant le bien être des individus ». Cette définition intègre le développement durable au sein de l'économie circulaire. L'ADEME définit en complément 3 domaines et 7 piliers (Figure 47). Les piliers détaillent les acteurs concernés et les étapes clés de la vie d'un produit (la conception, la fabrication, l'usage, la fin de vie).

Cette définition permet de prendre en compte le « **caractère systémique** de l'EC » (Appendino et al., 2018) en intégrant « la diversité des acteurs économiques (acteurs économiques, acteurs publics, citoyens) et la diversité des problématiques environnementales en allant au-delà des seules questions de ressources matérielles et énergétiques ».

Tableau 28 : Plusieurs définitions d'économie circulaire (extrait, traduit et adapté de (Appendino et al., 2018; Prieto-Sandoval et al., 2018))

Source	Définition de l'économie circulaire
(Kirchherr et al., 2017)	« Une économie circulaire décrit un système économique basé sur des modèles commerciaux qui remplacent le concept de "fin de vie" par la réduction, la réutilisation alternative, le recyclage et la récupération des matériaux dans les processus de production/distribution et de consommation, opérant ainsi au niveau micro (produits, entreprises, consommateurs), au niveau méso (parcs éco-industriels) et au niveau macro (ville, région, nation et au-delà), dans le but d'accomplir un développement durable, ce qui implique de créer une qualité environnementale, une prospérité économique et une équité sociale, au profit des générations actuelles et futures. »
(Prieto-Sandoval et al., 2018)	« L'économie circulaire est un système économique qui représente un changement de paradigme dans la façon dont la société humaine est en relation avec la nature et vise à prévenir l'épuisement des ressources, à fermer les boucles d'énergie et de matériaux et à faciliter le développement durable par sa mise en œuvre aux niveaux micro (entreprises et consommateurs), méso (agents économiques intégrés en symbiose) et macro (ville, régions et gouvernements). Atteindre ce modèle circulaire nécessite des innovations environnementales cycliques et régénératrices dans la manière dont la société légifère, produit et consomme. »
(Geissdoerfer et al., 2017)	« Un système régénérateur dans lequel l'apport de ressources et les déchets, les émissions et les fuites d'énergie sont minimisés en ralentissant, en fermant et en réduisant les boucles de matériaux et d'énergie. Cet objectif peut être atteint par une conception durable, l'entretien, la réparation, la réutilisation, le ré-usinage, la remise à neuf et le recyclage. Deuxièmement, nous définissons la durabilité comme l'intégration équilibrée de la performance économique, de l'inclusion sociale et de la résilience environnementale, au profit des générations actuelles et futures. »
(Stahel, 2016)	« Une "économie circulaire" transformerait les biens en fin de vie en ressources pour d'autres, en fermant les boucles des écosystèmes industriels et en minimisant les déchets. Elle changerait la logique économique car elle remplace la production par la suffisance : réutiliser ce que l'on peut, recycler ce qui ne peut pas être réutilisé, réparer ce qui est cassé, re-manufacturer ce qui ne peut pas être réparé. »
(European Commission, 2015)	« Dans une économie circulaire, la valeur des produits et des matériaux est maintenue aussi longtemps que possible. Les déchets et l'utilisation des ressources sont réduits au minimum, et lorsqu'un produit arrive en fin de vie, il est réutilisé pour créer une valeur supplémentaire. Cela peut apporter des avantages économiques majeurs, en contribuant à l'innovation, à la croissance et à la création d'emplois. »
(Ma et al., 2014)	« Une économie circulaire est un mode de développement économique qui vise à protéger l'environnement et à prévenir la pollution, facilitant ainsi un développement économique durable. »
(Légifrance, 2015)	« 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. »



Figure 47 : Les 3 domaines et 7 piliers de l'économie circulaire selon l'ADEME. Source : ADEME¹⁴

La diversité des définitions provient, selon le professeur Dominique Bourg, de la « plasticité sémantique » donnée aux termes désignant l'écologisation de la société. En effet, dans le MOOC de l'UVED (UVED, n.d.), il précise :

« Il en va de l'expression "économie circulaire" à peu près comme de toutes les autres expressions qui ont essayé de signifier l'écologisation de la société. Cette écologisation est relativement mal vue, donc la stratégie est souvent d'adopter un terme, de lui donner un sens relativement élastique. Par exemple, le développement durable, on oscille entre durabilité faible et durabilité forte.

On a aujourd'hui la même chose avec la transition. C'est assez classique et on va le retrouver avec l'économie circulaire. On va lui donner des acceptions relativement différentes. On va passer d'une certaine forme de mollesse à quelque chose de beaucoup plus exigeant. »

Ce niveau d'exigence est caractérisé par la dernière composante définissant l'économie circulaire : **l'échelle d'analyse**. En effet, (Yuan et al., 2006) repris par la suite par (Kirchherr et al., 2017; Prieto-Sandoval et al., 2018) parlent de mise en œuvre aux niveaux :

- **Micro** (= « individual firm level ») : où l'économie circulaire (= theory of cleaner production) s'effectue à l'échelle de l'entreprise qui agit par l'utilisation d'équipements de production plus modernes (moins polluants et moins consommateurs) et l'éco-conception des produits ;
- **Méso** (= « second level ») : où se développe un réseau d'industries qui va bénéficier des échanges de flux d'une industrie à une autre ; cette approche est permise notamment par les partages d'énergie, d'infrastructure, des coproduits et des déchets ;

¹⁴ ADEME, agence de la transition écologique, <https://www.ademe.fr/expertises/economie-circulaire>, Les principaux domaines d'action de l'économie circulaire, consulté en Juin 2020

- **Macro** (= « third level ») : où se développe une « éco-ville », une « éco-région » ; ainsi on ne s'intéresse pas seulement à la production d'un produit ou d'un service mais également à la consommation de ce produit ou service, l'effort étant intégré à la chaîne de valeurs du producteur au consommateur.

(Yuan et al., 2006) précisent finalement que des efforts aux trois niveaux permettent d'aboutir au véritable concept d'EC.

Ces niveaux mentionnés précédemment font écho aux trois niveaux de l'économie circulaire définis par (Bourg, 2018) (classés par ordre d'exigence croissant) :

- L'économie **circulaire** comme nous l'entendons de nos jours, est le niveau le moins exigeant. Il est même qualifié de « niveau -1, niveau propédeutique ». Il se limite à un objet ou un service vu individuellement par rapport aux autres. C'est une réflexion à l'échelle d'un bien ou d'une entreprise. Cette économie circulaire est très peu efficace car il y a un risque d'effet rebond. Par exemple, un consommateur risque de consommer plus à cause du sentiment d'être éco-responsable du fait d'acheter le produit en question. Il y a également un risque de transfert de pollution. Ce niveau peut correspondre au niveau micro.
- L'économie **authentiquement circulaire** passe à une échelle supérieure, à l'échelle d'une société, où sont intégrés dans une politique globale les stocks et extractions de ressources pour chaque secteur et chaque ressource en lien avec le seuil de croissance. Ce niveau peut correspondre à plus large échelle au niveau méso et macro.
- L'économie **permacirculaire**, consiste à prendre en compte tous les flux terrestres et à analyser leurs impacts sur l'écosystème. Dans cette politique globale il faut en outre tenir compte des limites planétaires (cf. Steffen et al. 2015) *i.e.* diminuer les flux, diminuer la démographie, être attentif aux interactions Terre/activité.

Pour synthétiser, l'économie circulaire est le terme contemporain qui recouvre la prise en compte de la problématique environnementale dans l'économie des sociétés actuelles. Elle s'intéresse notamment aux ressources (extractions et stocks) ainsi qu'à la fin de vie des biens, avec la prise en compte de la production des déchets. Toutefois, à l'heure actuelle, le terme reste imprécis quant aux résultats attendus et à la libre appréciation des personnes (utilisateurs, concepteurs, scientifiques). Face à l'urgence climatique et aux problèmes environnementaux, il serait nécessaire de mettre en œuvre une économie circulaire à une échelle macro et de s'inscrire dans une économie permacirculaire.

2.1.2 Principe de l'économie circulaire

Maintenant que nous avons donné les points clefs de la définition de l'EC, nous allons nous concentrer plus spécifiquement sur la façon dont celle-ci s'intéresse à l'aspect **gestion des déchets** (Figure 47). Dans un modèle circulaire, « les déchets des uns font les ressources des autres » et idéalement « les déchets issus d'un objet font les ressources pour recréer ce même objet ».

L'économie linéaire

L'économie linéaire peut être modélisée par le schéma Figure 48. La ville représente la société, le lieu où est transformé et utilisé une matière. Les « stocks concentrés de matières premières » correspondent à la matière à l'état naturel, par exemple dans le sous-sol ou la forêt. Dans le cadre d'une économie linéaire, la matière première vierge est la seule source de matière pour la création de

biens. Lors de la phase d'utilisation, le « + » correspond à l'ajout de matière transformée dans le stock (dans la société), le « - » correspond aux éléments en fin de vie qui vont sortir du stock et devenir des déchets, la différence entre ces deux flux correspond à « l'addition nette aux stocks » (accroissement ou décroissance du stock de matières transformées). Une fois les biens en fin de vie, ils sont considérés comme des déchets et sont jetés en décharge ou incinérés : le « stockage de déchet » correspond à l'endroit où l'on dépose les déchets qui n'ont plus d'utilisation, lorsqu'ils sont rejetés dans la nature, par exemple une décharge.

L'impact sur l'environnement est fort car il y a consommation de ressources, utilisation des sols, émissions de polluant et déchets potentiellement à toutes les phases de la vie.

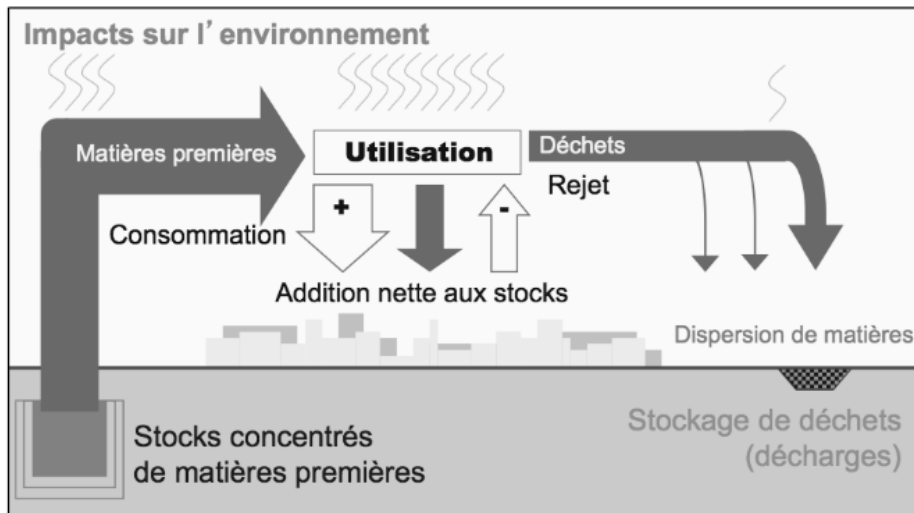


Figure 48 : Principe de l'économie linéaire. Extrait de (UVED, n.d.) d'après F. Grosse (Forcity)

L'économie circulaire

En parallèle, l'économie circulaire au stade 1 (échelle micro ou économie circulaire selon (Bourg, 2018)) peut être schématisée de la même façon (Figure 49). Au schéma précédent s'ajoute alors une flèche modélisant le recyclage (à comprendre au sens large *i.e.* tout type de valorisation matière). Celle-ci permet de réintroduire de la matière ou de l'énergie, qui était considérée comme un déchet, en début de chaîne de production. La matière sera de nouveau consommée puis utilisée et s'ajoutera aux stocks.

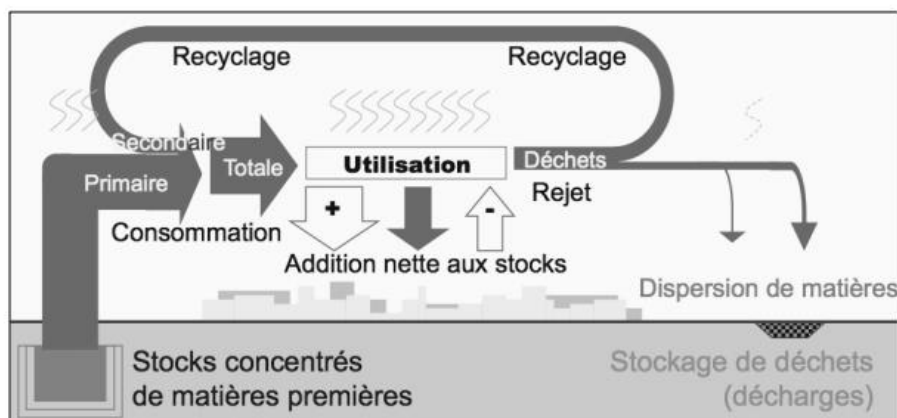


Figure 49 : Principe de l'économie en partie circulaire. Extrait de (UVED, n.d.) d'après F. Grosse (Forcity)

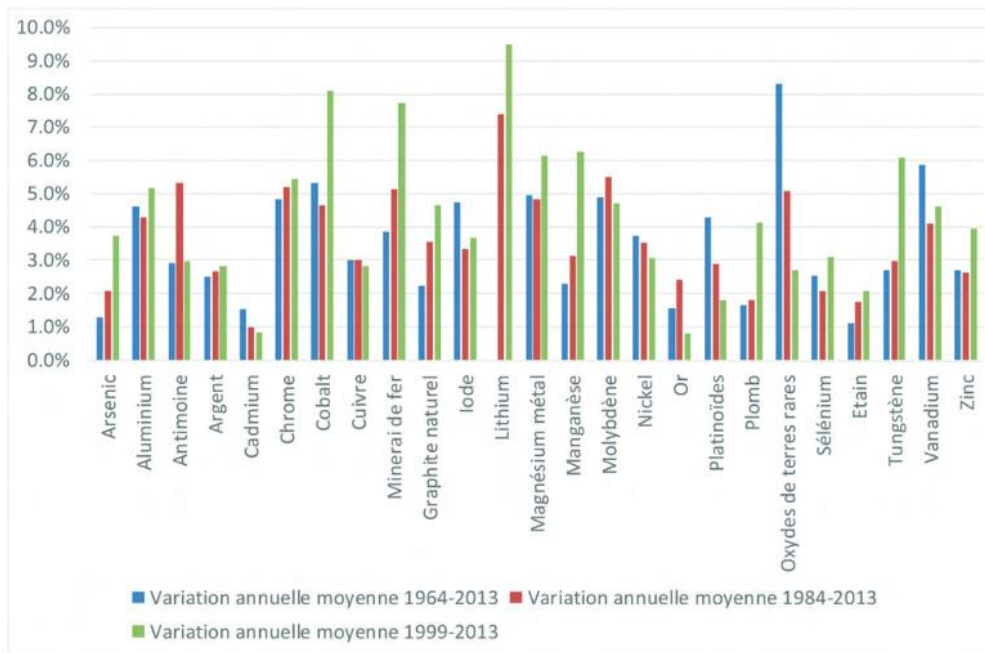


Figure 50 : Évolution au cours de trois périodes (1964-2013 : 50 ans, 1984-2013 : 30 ans, et 1999-2013 : 15 ans) de la production annuelle moyenne d'une sélection de matières premières minérales. Extrait de (Christmann, 2016) données : USGS Data Series 140 et World Mining Data.

Toutefois, (Grosse, 2010a) montre qu'avec par exemple une croissance de la demande de matière première de 3,5 % (estimation faite à partir de l'évolution de la production pour une sélection de minéraux illustrés en Figure 50) et un taux de recyclage de 50 %, la durée de vie de la ressource serait prolongée de seulement 20 ans. Ainsi, l'effet du recyclage est minime lorsque la croissance de la demande est supérieure à 3 %.

D'après (Grosse, 2011), pour atteindre le stade authentiquement circulaire tout en ayant de la croissance de la production, il faudrait réunir les trois conditions suivantes pour toutes les matières (Figure 51) :

- Une croissance de la demande de la matière inférieure à 1 %,
- Un taux de recyclage de la matière supérieur à 80 %,
- Une accumulation faible dans le stock de la société (< 20 %) signifiant une production de déchet (à valoriser ou matière en fin de vie) supérieure à 80 % de la consommation.

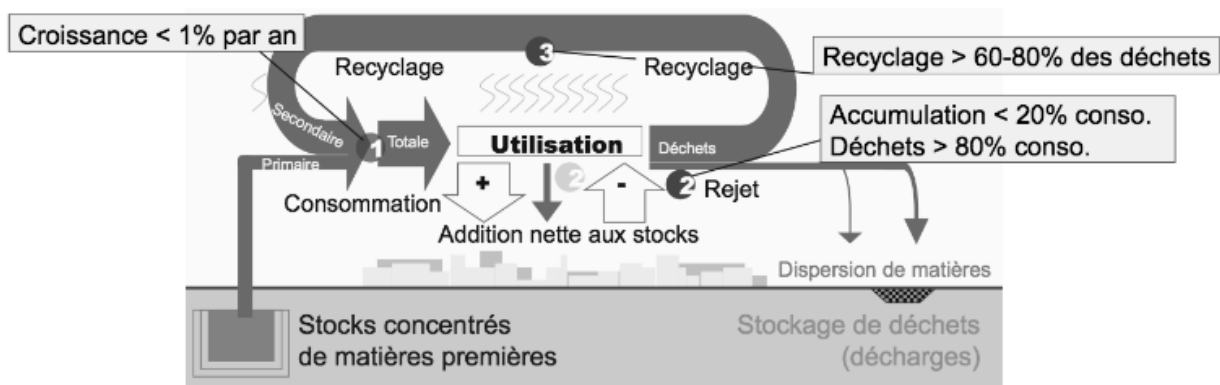


Figure 51 : Contraintes pour obtenir une économie circulaire. Extrait de (UVED, n.d.) d'après F. Grosse (Forcity)

En effet, pour mettre en place une économie circulaire (avec de la croissance), une grande part de la matière à transformer doit provenir du recyclage. Pour cela il faut donc une valorisation matière importante des déchets mais aussi paradoxalement une production importante de déchets (*i.e.* une addition nette au stock minimale) afin que la quantité de matière nécessaire en entrée de processus soit équivalente à la quantité de matière rejetée. L'objectif est ainsi d'extraire un minimum de matière première, tout en maintenant une croissance positive.

Cependant, si ce principe permet la préservation de la ressource, qui est l'objectif principal de l'économie circulaire, il est important de noter qu'afin que ce processus soit bénéfique pour l'environnement, en permettant notamment de limiter le changement climatique (ou tout autre problème environnemental), il est nécessaire que, pour chaque étape (et pour une utilisation identique), les émissions de produits dans l'environnement liées au processus de valorisation matière soient moins impactantes que celles liées à l'extraction, dispersion et stockage de cette même matière.

Si on s'intéresse par exemple à la production de granulats pour le BTP, on peut observer en Figure 52 que la production des dernières années est plutôt stable (baisse vers 2009 liée à la crise de 2008). Sur les 3 dernières années (2017, 2018, 2019), la croissance est comprise entre 2 % et 3 % (UNICEM, 2021). En parallèle, en 2019, 28 % de la production est issue de la valorisation des déchets du BTP (UNICEM, 2021). Ainsi, on peut dire que le secteur du granulat n'a pas encore atteint une production durable (en termes de ressource/matière). En effet, si la croissance de la production est limitée, la quantité de granulat recyclé reste faible. Par ailleurs, l'étude réalisée dans la section 1.4 et le rapport du Projet National Recybéton (IREX, n.d.) nous montrent que l'avantage environnemental en terme d'émission n'est pas évident. En effet, pour l'indicateur de changement climatique, le béton à partir de granulat neuf et à partir de granulat recyclé semble avoir un impact équivalent voire supérieur pour l'alternative recyclée (inclue dans l'incertitude) (pour la seconde unité fonctionnelle étudiée où l'on s'intéresse à la production d'une tonne de granulat). Par conséquent, il est important de continuer à chercher des alternatives plus durables pour ce secteur pour anticiper l'évolution future. La question du réemploi pourrait être une première réponse à cette problématique (Chapitre 3 et Chapitre 4).

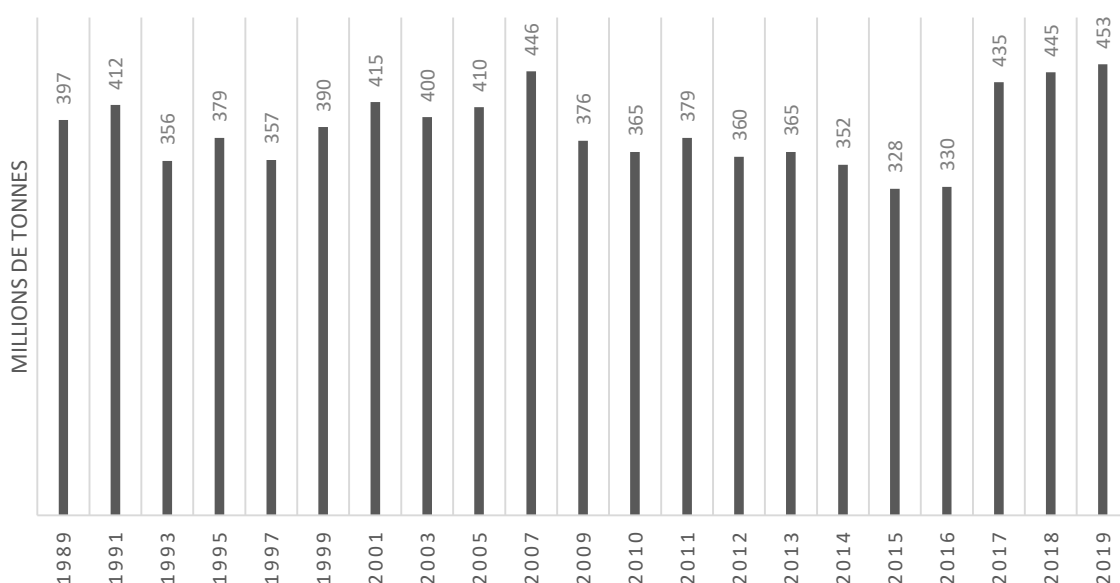


Figure 52 : Évolution de la production de granulats. Données : UNPG

Stratégies opérationnelles

Afin de parvenir à une économie circulaire, plusieurs stratégies ont vu le jour ces dernières années. À noter que toutes les stratégies présentées dans cette partie sont complémentaires les unes des autres et non spécifiques au secteur du bâtiment.

Une première réflexion est celle de l'**écologie industrielle**. Frédérique Vincent¹⁵ (UVED, n.d.) mentionne que « l'écologie industrielle propose un cadre conceptuel [...] vaste qui vise la totalité des flux entrants et surtout de matières et d'énergies transitant dans le système y compris les translocations ». Ainsi, tous les besoins et rejets de matières sont pris en compte et étudiés (même ceux non commercialisés) afin de créer un système maillé entre plusieurs entreprises d'échange des flux. Le « déchet » (matière ou énergétique) d'une entreprise peut alors devenir la matière première d'une autre. En exemple, nous pouvons citer le parc éco-industriel de Kalundborg au Danemark, qui est l'un des pionniers ; les échanges de flux se font sous forme d'énergie (vapeur, réseau de chaleur...), d'eau (eau de refroidissement, eau de mer...) ou de matière (gypse, sulfure, bioéthanol...). En France, on peut citer Organic'vallée en Occitanie, qui met en réseau des industries utilisant la matière organique telle que les déchets alimentaires pour faire du compost. Cette première stratégie s'inscrit dans le troisième domaine de l'économie circulaire selon l'ADEME : « gestion des déchets » (Figure 47).

Une deuxième stratégie opérationnelle est l'**économie de la fonctionnalité**. Béatrice Bellini¹⁶ (UVED, n.d.) propose la définition suivante : c'est la « substitution de la vente d'un produit par la vente de son usage », c'est-à-dire que le bien reste la propriété de l'entreprise (ou de l'industriel). Pour que cette démarche s'inscrive dans le cadre de l'économie circulaire, la durée de vie du produit doit être la plus longue possible (avec l'usage le plus grand). Ainsi, le propriétaire du bien s'occupe de la maintenance et fait en sorte que le produit puisse être réparable et/ou être mis au goût du jour, avec par exemple des mises à jour. Il convient de différencier cette forme d'économie de la fonctionnalité, compatible avec l'économie circulaire, de la location basique avec un intérêt seulement pécuniaire telle que la course à l'innovation engagée dans le domaine de la téléphonie ou de l'automobile. Par exemple, pour les poids lourds, l'entreprise Michelin ne fixe pas un prix par pneu acheté mais par kilomètre parcouru, favorisant ainsi l'entretien et le rechapage de ses pneus. De même, l'entreprise Xerox propose l'achat d'un nombre de copies et non l'achat ou la location de l'imprimante ; Xerox intègre les réparations grâce à la conception de pièces de rechanges facilement remplaçables. Dans cette stratégie, il s'agit de découpler croissance et production de matière première (Grosse, 2010b). Elle s'inscrit dans le premier domaine de l'économie circulaire selon l'ADEME : « offres des acteurs économiques » (Figure 47).

La troisième stratégie, la plus immédiate, consiste à **promouvoir une consommation responsable**. Elle s'inscrit dans le deuxième domaine de l'économie circulaire selon l'ADEME : « demande et comportement des consommateurs » (Figure 47). Sandrine Gombert-Courvoisier¹⁷ (UVED, n.d.) précise que « bien que l'économie circulaire soit fréquemment abordée sous l'angle de la gestion des déchets d'une part, et sous l'angle de l'offre des acteurs économiques d'autre part, la demande et les comportements des consommateurs caractérisent le troisième domaine de l'économie circulaire ». Elle ajoute cinq axes de réflexion sur les comportements pour une consommation responsable :

- Prolongation de la durée de vie ;

¹⁵ Directrice de l'enseignement et de l'international à l'institut Mines Telecom

¹⁶ Maître de conférence à l'université Paris Nanterre

¹⁷ Maître de conférences en écologie et écologie humaine à l'ENSEGID

- Substitution ;
- Réduction de la consommation ;
- Autoproduction ;
- Partage et échange.

Néanmoins, des questions persistent concernant le bénéfice réel et la généralisation de ces comportements, notamment vis-à-vis des risques de transferts d'impacts ou d'effets rebonds. Il existe en outre des freins à ces nouveaux comportements tels que les freins économiques (le prix reste le plus souvent le premier critère de choix) et psychologiques, comme par exemple le sentiment d'impuissance, qui restreint le consommateur à ne pas chercher de solutions à son échelle, la conformité supérieure de soi, où le consommateur se croyant plus éco-responsable que les autres ne cherche pas à changer, ou encore l'optimisme comparatif, où le consommateur ne se croit pas (ou moins) vulnérable aux conséquences des dégradations de l'environnement (Figure 53).

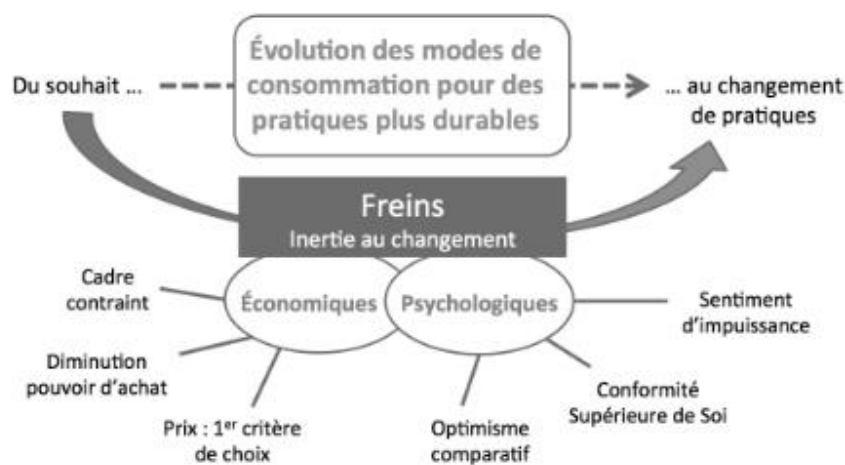


Figure 53 : Évolution des modes de consommations pour une pratique plus durable. Extrait de (UVED, n.d.) d'après S. Gombert -Courvoisier

Enfin, la dernière stratégie est de **lutter contre l'obsolescence programmée** (HOP, 2022). Le code de la consommation (article L 441-2) la définit comme : « le recours à des techniques, y compris logicielles, par lesquelles le responsable de la mise sur le marché d'un produit vise à en réduire délibérément la durée de vie ». L'obsolescence programmée est un délit en France, qui est l'un des seuls pays à la reconnaître comme tel. L'association Halte à l'Obsolescence Programmée (HOP, 2022) et Vincent Aurez¹⁸ (UVED, n.d.), précisent qu'il existe trois types d'obsolescence : esthétique, technique et logicielle. L'obsolescence reste une notion juridique complexe à prouver, nous ne détaillerons pas plus cette stratégie.

Les conditions du succès

Pour synthétiser cette section, nous allons donner des axes de réflexions pour permettre une bonne mise en œuvre des stratégies opérationnelles et ainsi aboutir à une économie circulaire.

Le premier levier est **politique**. Il consiste à se donner des ambitions à toutes les échelles de la société concernant les trois axes de l'économie circulaire (déchets, fabrication, utilisations). Ainsi actuellement, nous pouvons noter l'existence d'un « paquet européen sur l'économie circulaire », de l'engagement pour la croissance verte à l'échelle nationale et par exemple du livre blanc de l'économie

¹⁸ Expert à l'institut National de l'économie circulaire

circulaire du Grand Paris à l'échelle de la métropole. Une des mesures du paquet européen par exemple est d'atteindre un seuil de 65 % de recyclage des déchets municipaux d'ici 2030.

Le deuxième levier est **économique** et se scinde en 4 mesures explicitées par Romain Ferrari¹⁹ (UVED, n.d.) :

- Mesures *incitatives*, comme par exemple la TVA circulaire, consistant à baisser la TVA d'un produit plus performant que les autres, ou l'appel d'offres au coût du cycle de vie dans le secteur du BTP qui permet de prendre en compte l'entièreté du cycle de vie et non pas seulement le coût du chantier initial. Pour compenser le manque à gagner de l'État avec la TVA circulaire il est envisagé, à l'instar de l'appel d'offres au coût du cycle de vie, d'étudier un produit aux coûts induits à la collectivité pendant son cycle de vie. Par exemple, si un produit est facilement recyclable, la collectivité devra payer moins cher le traitement des déchets issus du produit. La limite de ces mesures réside dans la prise en compte d'une hypothèse incertaine sur le futur, le retour financier n'étant pas direct ;
- Mesures *contraignantes* ou *contributives*, via une augmentation des taxes sur les matières polluantes et les déchets et, à l'échelle du ménage, la mise en place d'une tarification incitative par exemple en fonction du poids. Ces mesures nécessitent une harmonisation à minima au niveau européen afin de ne pas créer des concurrences entre les pays. Plus exactement, il ne faut pas qu'un pays, de par ses absences de taxes, soit un lieu où amener les déchets ou bien soit le lieu de la fabrication de produits contenant des polluants limités ou interdits dans les autres pays ;
- Mesures *limitatives*, qui donnent des échéances non négociables, par exemple une programmation de l'arrêt de la mise en décharge ou encore un seuil ou un niveau d'incorporation de produits recyclés. Elles visent à pousser le secteur industriel à innover et le rendre économiquement circulaire ;
- Mesures *sociales*, par exemple implémenter un revenu de transition écologique pour les acteurs de l'économie circulaire et notamment favoriser la réinsertion sociale. L'aspect social est complémentaire à l'économie circulaire.

Le troisième et dernier levier est **technologique**. Il nécessite la maturité des systèmes technologiques sans tomber dans la complexité de la géo-ingénierie. Par exemple, il s'agit de mettre au point de nouvelles technologies telles que l'exploitation de la culture d'algues sur les façades de bâtiment afin de les utiliser pour le chauffage des logements. Il s'agit également de créer des produits facilement réparables comme le Fairphone dans le domaine de la téléphonie. Il peut s'agir enfin de mettre en commun l'outillage et les connaissances pour réparer des éléments du quotidien via des Makerspaces.

Pour réaliser une transition vers l'économie circulaire, la Figure 54 présente un schéma de synthèse proposé par Alain Geldron²⁰ (UVED, n.d.). Cela consiste notamment à concilier différents axes clefs : circuits courts, qualité, mise à l'échelle...

¹⁹ Président de la Fondation 2019

²⁰ Expert National Matière Première au sein de l'ADEME

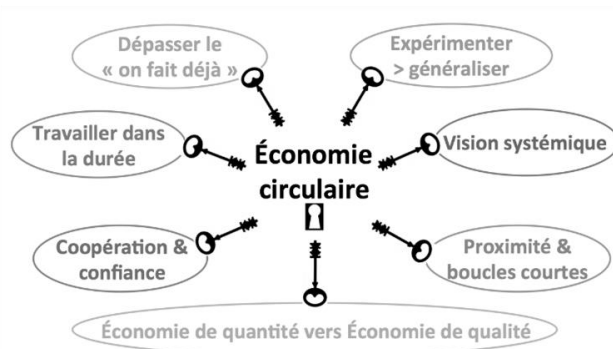


Figure 54 : Points clefs pour une transition vers l'économie circulaire. Source : A. Gendron (ADEME)

2.1.3 L'économie circulaire appliquée au bâtiment

À l'instar de l'ACV, l'application de l'économie circulaire au secteur du BTP connaît également un fort développement ces dernières années. En effet, (Benachio et al., 2020) montrent que le nombre de publications croît de manière exponentielle depuis 2017 (Figure 55). En réalisant un parallèle avec les publications pour l'économie circulaire en général de la Figure 46 (où l'on observe une forte croissance à partir de 2014), nous pouvons voir que le secteur de la construction s'est approprié le concept d'économie circulaire plus tardivement. Ceci est lié au fait que les bâtiments sont, dans la majorité des cas, des projets uniques nécessitant une chaîne d'approvisionnement qui ajoute de la complexité à l'opération (Pomponi and Moncaster, 2017). Ainsi les innovations prennent plus de temps pour s'intégrer à l'industrie de la construction.

Notons toutefois que, contrairement à l'ACV qui dispose d'un contexte normatif fort, l'économie circulaire est en plein développement méthodologique.

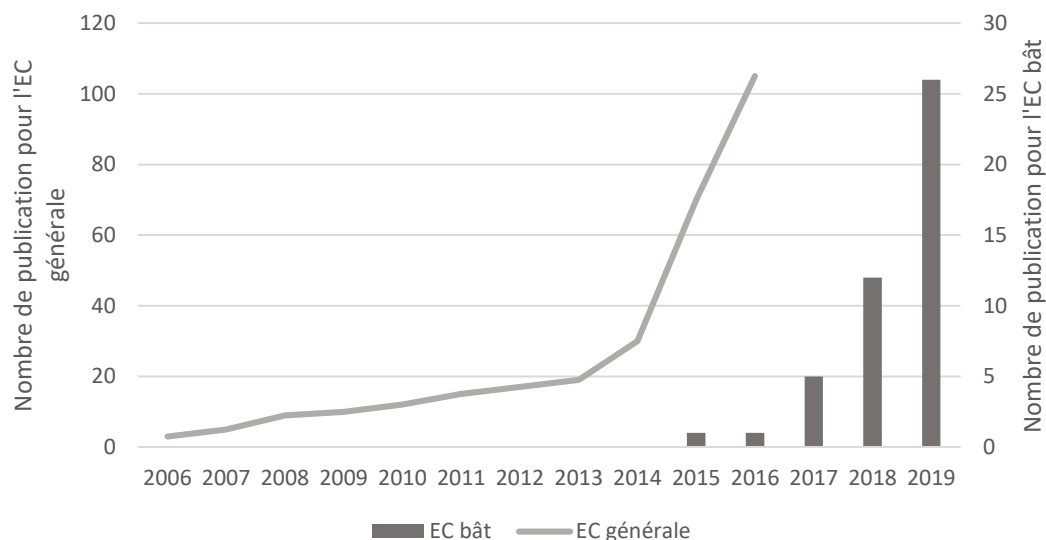


Figure 55 : Nombre de publication par année concernant l'économie circulaire appliquée au BTP (Benachio et al., 2020) et nombre de publication par année concernant l'économie circulaire en général (Geissdoerfer et al., 2017)

En se basant sur les revues de littérature réalisées par (Pomponi and Moncaster, 2017; Benachio et al., 2020; Osobajo et al., 2020), nous allons parcourir les points communs et particularités du concept d'économie circulaire appliqué au secteur de la construction.

2.1.3.1 Les définitions de l'économie circulaire appliquée au secteur de la construction

Selon (Osobajo et al., 2020), tous les articles étudiés s'accordent sur la nécessité pour l'industrie de la construction de passer d'un modèle d'économie linéaire à un modèle circulaire, afin d'obtenir un futur durable. Nous pouvons alors nous demander quelle est la définition de l'EC appliquée au secteur de la construction.

(Benachio et al., 2020) montrent que la plupart des articles qu'ils mentionnent se basent sur la définition générale donnée par la fondation Ellen Mac Arthur²¹ : « Un cadre de solutions systémiques qui s'attaque aux défis mondiaux tels que le changement climatique, la perte de biodiversité, les déchets et la pollution. Il repose sur trois principes, axés sur la conception : éliminer les déchets et la pollution, faire circuler les produits et les matériaux (à leur valeur maximale) et régénérer la nature. »²² Cette définition est en accord avec celles données dans la section 2.1.1. Il y aurait donc peu de différenciation entre le cas général et celui appliqué au bâtiment.

D'autres études adoptent une autre approche de l'économie circulaire qui se focalise sur l'avantage compétitif possible pour les entreprises : « l'approche [d'économie] circulaire permet de garder les ressources en usage productif dans l'économie aussi longtemps que possible » (Lacy and Rutqvist, 2015). Il n'y a donc, encore une fois, pas de différenciation.

Enfin, (Pomponi and Moncaster, 2017) se focalisent réellement sur le secteur de la construction. Leur définition permet de prendre en compte les approches des deux définitions précédentes. Les auteurs mettent en avant 6 dimensions (« six pillars framework ») de l'EC pour le secteur :

- Politique,
- Économique,
- Environnementale,
- Comportementale (comportement et demande des usagers),
- Sociétale (éducation et collaboration),
- Technologique (technique, mise en relation offre/demande, stockage...).

Les auteurs mettent en avant l'importance de la collaboration entre chaque pilier. Ainsi en prenant en compte tous les piliers, la circularité d'un bâtiment est vue comme l'élément d'analyse le plus global et complet (Figure 56), englobant la question du bâtiment durable (issu du développement durable) et du bâtiment vert (bâtiment prenant en compte la composante environnementale du bâtiment).

On peut noter que cette dernière définition se rapproche des piliers de l'ADEME (section 2.1.1).

²¹ <https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview> consulté en avril 2022

²² <https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/glossary> consulté en avril 2022

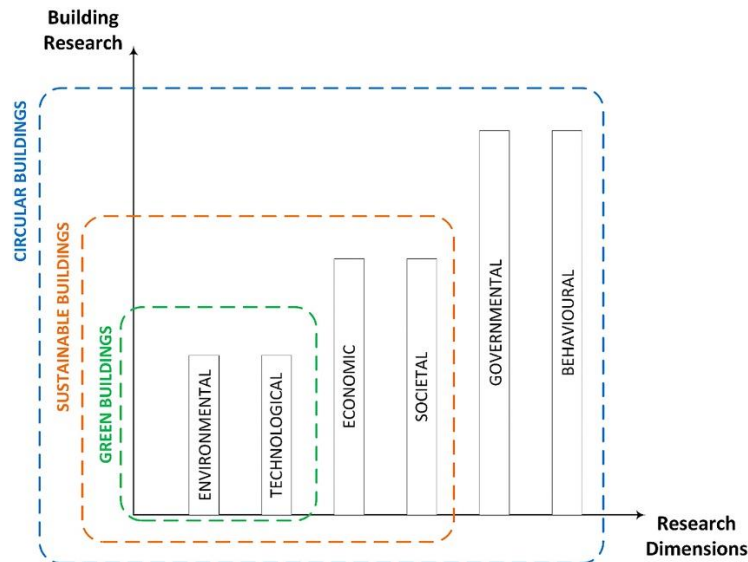


Figure 56 : Relations entre les six dimensions et les approches de recherche pour le bâtiment (Pomponi and Moncaster, 2017)

Pour compléter, le guide (platform CB'23, 2020) donne également une définition de l'économie circulaire pour le bâtiment : « une construction circulaire signifie le développement, l'usage et le réemploi de bâtiments ou infrastructures en limitant la consommation de ressources naturelles et la pollution de l'environnement ainsi qu'en limitant l'impact sur les écosystèmes ».

Ainsi, pour résumer, le concept d'économie circulaire pour le bâtiment repose sur les mêmes bases méthodologiques que dans le cas général. Le concept peut distinguer plusieurs degrés de précision, soit principalement environnementale, soit principalement économique, soit multidisciplinaire et transversale. Par ailleurs, selon (Pomponi and Moncaster, 2017), l'EC d'un bâtiment représente le plus haut degré de qualité d'un bâtiment, au-dessus de la notion de bâtiment vert ou de bâtiment durable.

Par cette analyse bibliographique succincte, nous pouvons voir que l'EC, même restreinte au secteur de la construction, souffre d'une définition très « élastique ». Il est alors nécessaire de donner une définition et de cadrer chaque étude portée sur l'EC.

2.1.3.2 Thèmes et phases du cycle de vie abordés

Sur les 45 références d'études analysées par (Benachio et al., 2020) et les 50 références analysées par (Osobajo et al., 2020), les thèmes principaux abordés concernent la réutilisation de la matière (respectivement 12 et 17 références) et la gestion des déchets (respectivement 13 et 15 références). Les autres études concernent la question des stocks de matières, d'écoconception et du modèle de l'EC.

Ainsi, la majorité des études se concentre sur l'aspect ressources de l'EC dont la question du traitement des matériaux en fin de vie. En effet, (Benachio et al., 2020) dénombrent 30 références considérant l'EC lors de la fin de vie d'un bâtiment contre 23 se concentrant sur la conception du projet. Seules 14 et 11 références respectivement s'intéressent à la production des matériaux et à la construction du bâtiment. (Benachio et al., 2020) mettent en lumière qu'un seul article prend en compte l'ensemble des phases du cycle de vie du bâtiment (Hossain and Ng, 2018), ce qui montre qu'il existe encore un travail important pour s'extraire de la vision classique de l'économie linéaire et passer à une analyse couvrant plusieurs cycles de vie. Selon (Benachio et al., 2020), cela montre également que la recherche actuelle se focalise « sur les pratiques d'économie circulaire dans des cas spécifiques [...] et non en ayant une vision globale du concept. Ce dernier point est le challenge des futures décennies. »

2.1.4 Les indicateurs de l'économie circulaire

2.1.4.1 Définition de l'indicateur d'économie circulaire

Grace à la place grandissante des questions liées à la préservation de l'environnement et à l'épuisement des ressources, la production soutenable et le bâtiment durable sont des enjeux majeurs pour les industries et plus largement pour le secteur de la construction (Calzolari et al., 2022). Face à cela, des outils d'aide à la décision concernant l'économie circulaire se sont développés (Bracquené et al., 2020; Leising et al., 2018; Madaster Services BV., 2018; platform CB'23, 2020; Zhang et al., 2021a).

Ces publications viennent confirmer la diversité de notions recouvertes par l'économie circulaire : certaines se concentrent sur l'aspect environnemental de la ressource (CtoCPII, 2020; Zaman and Lehmann, 2013), d'autres sur l'aspect économique et d'autres encore adoptent une vision multicritère (Calzolari et al., 2022; Zhang et al., 2021a). La mesure de l'économie circulaire retranscrit les points d'attention identifiés dans la définition du concept d'économie circulaire. Ainsi, il n'existe pas un indicateur unique mais autant de variations que de définitions.

(Zhang et al., 2021a) précisent que l'analyse de l'économie circulaire pour le secteur de la construction (*architecture, engineering and construction industry*) n'est pas définie de manière univoque et manque d'approche pratique. L'analyse de la circularité des bâtiments est, selon les auteurs, relativement sous explorée, les études se concentrant plutôt sur les produits industriels. Or, par nature, un bâtiment est un objet plus complexe avec de nombreux matériaux et une grande durée de vie.

Dans une revue de littérature à propos des indicateurs d'économie circulaire pour le secteur de la chaîne d'approvisionnement, (Calzolari et al., 2022) mettent en avant le manque de mise en commun et de standardisation de la mesure de l'économie circulaire. En effet, ne serait-ce que pour caractériser la performance environnementale, les auteurs dénombrent 77 indicateurs différents.

Il faut noter que l'usage d'indicateurs de circularité ne permet pas de remplacer une Analyse du Cycle de Vie. Ceux-ci procurent une vision complémentaire et simplifiée sur la consommation des ressources matérielles. (Pauliuk, 2018) préconise qu'un indicateur de circularité soit basé à la fois sur l'ACV, sur une analyse des flux et sur une analyse des coûts. Ces deux dernières analyses permettent de tracer la ressource en matière dont l'entreprise est responsable, alors que l'ACV permet de quantifier les impacts globaux de leur produit. En effet, comme indiqué par (Buyle et al., 2019), « l'accroissement de la circularité ne mène pas automatiquement à un produit ou bâtiment plus soutenable ». En se basant sur le travail de (Zink and Geyer, 2017), les auteurs montrent que l'introduction de « déchets » dans un procédé de production ne garantit pas une réduction de l'impact environnemental. Par ailleurs, selon (Hossain and Ng, 2018), l'ACV ne permet pas de prendre en compte la perte de matière en quantité et qualité et donc de retranscrire totalement la circularité d'un processus. Il est donc nécessaire de disposer d'un indicateur complémentaire pour couvrir ces aspects. La présence d'une ACV est importante car elle permet de garder un esprit critique sur la circularité matière.

2.1.4.2 Indicateurs génériques

Dans un premier temps, nous listons les principaux indicateurs de circularité génériques *i.e.* qui peuvent s'appliquer à tout objet. Cette liste d'indicateurs est extraite des recherches bibliographiques et des observations du projet de recherche PULSE-PARIS « Écoconception des projets urbains et lien avec la Stratégie économie circulaire de Paris » commandé par l'ADEME et visant à intégrer l'économie circulaire à un projet d'aménagement d'un quartier de manière complémentaire à l'ACV. Ce projet comprend notamment une analyse bibliographique des indicateurs d'EC existants (Appendino et al.,

2018; Saade-Sbeih et al., 2019) qui sont ensuite pour partie appliqués à des cas d'étude de rénovation/reconstruction de bâtiments (Pawlak et al., 2020).

Circular Material Use rate (CMU)

Le CMU a été développé par Eurostat²³ afin de mesurer la circularité de l'économie à l'échelle européenne. Il est défini comme le ratio entre l'utilisation circulaire de matière (quantité de déchets valorisés corrigée des imports et exports de déchets destinés à être traités) et l'utilisation totale de matériaux (Équation 3). On voit ainsi que cette définition s'applique principalement à l'échelle d'une société (pays, entreprise). À l'échelle d'un bâtiment ou d'un produit, il est possible d'utiliser le taux d'incorporation cité dans (ADEME, 2020) et défini comme le ratio entre la quantité de matériaux recyclés (ou réemployés) et la quantité de matériaux utilisés en totalité. Ces deux indicateurs nous donnent une information sur la circularité des matériaux en entrée de système (lors de la fabrication de l'élément).

Équation 3

$$CMU = \frac{U}{M} = \frac{(RCV_R - IMP_w + EXP_w)}{DMC + (RCV_R - IMP_w + EXP_w)}$$

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*)

Zero Waste Index (ZWI)

Développé principalement à l'échelle d'une ville, le ZWI (Équation 4) fournit des informations sur la performance du système de gestion des déchets et notamment sur la valorisation de matière potentielle (Zaman and Lehmann, 2013). Il est défini comme le potentiel de valorisation des déchets, en effectuant une projection de la quantité de matériaux pouvant être récupérés à partir des déchets pour remplacer des matériaux vierges.

Équation 4

$$ZWI = \frac{\sum_{i=1}^n (WMS_{ij} \times SF_{ij})}{\sum_1^n GWS}$$

WMS : quantité de déchets « i » (plastique, bois, ...) traités par la méthode « j » (incinération, compostage, ...)

FS : facteur de substitution basé sur l'efficacité de remplacement de matériaux vierges

GWS : la quantité totale de déchets

²³ https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/-/cei_srm030 consulté en avril 2022

Cet indicateur est adaptable à tout produit ou objet. Toutefois les facteurs de substitutions ne sont pas suffisamment détaillés pour une application à l'échelle d'un bâtiment.

Taux de valorisation matière (Tval)

Le taux de valorisation matière, également appelé le taux de valorisation déchets, est un indicateur de la quantité de déchets valorisés par rapport à la quantité totale de déchets (Équation 5). Contrairement à la définition du « déchet » du code de l'environnement (Art. L541-1-1), il est possible de prendre en compte la matière réemployée dans l'indice *Mval*. Ainsi, on entend par « valorisation des déchets » le réemploi, la réutilisation, le recyclage.

Équation 5

$$Tval = \frac{Mval}{(Mreb + Mval)}$$

Mval : masse de déchets valorisés (kg)

Mreb : masse de déchets mis en décharge ou incinérés (kg)

1 = circularité

0 = linéarité

Material Reutilisation Score (MRS)

Le MRS implémenté par le Cradle to Cradle Products Innovation Institute (CtoCPII, 2020), se calcule de la manière présentée dans l'Équation 6. Il prend en compte un indice *IR* mesurant la quantité de matière valorisable contenue dans l'objet et un indice *RC* mesurant la quantité de matière valorisée utilisée pour l'objet. Le MRS est un indicateur d'économie circulaire plutôt tourné vers la conception d'un produit. Il se base sur des taux théoriques (« ce qui se fait aujourd'hui ») pour la partie « fin de vie ». Ainsi, cet indicateur ne permet pas d'influer sur la manière de traiter les déchets. La notice indique qu'il est déconseillé de faire varier la méthode de traitement des déchets, *i.e.* la recyclabilité intrinsèque, par rapport à celle actuelle afin d'éviter une surestimation des avantages liés à un traitement bénéfique. Toutefois, dans un contexte de recherche académique, il est possible d'adapter la recyclabilité intrinsèque à chaque scénario de fin de vie. Cette recyclabilité intrinsèque (*IR*) de l'objet varie de 0 si le produit est destiné à l'incinération, à 1 s'il peut être recyclé à 100 %. S'il est incinéré à 60 % et réemployé à 40 % alors *IR* = 0,4.

Équation 6

$$MRS = \frac{IR \times 2 + RC \times 1}{3 \times 100}$$

IR : recyclabilité intrinsèque (recyclable, biodégradable, compostables)
(exprimé en pourcentage)

RC : contenu recyclé (réemploi, rénovation, réutilisation, recyclage)
(exprimé en pourcentage)

1 = circularité

0 = linéarité

Material Circularity Indicator (MCI)

Le MCI implémenté par la Fondation Ellen MacArthur²⁴ prend en compte les flux des matériaux vierges, recyclés, réemployés et non récupérés ainsi qu'un facteur d'utilité se rapportant à la durée de vie moyenne pour un produit similaire sur le marché (Équation 7). Le facteur d'utilité caractérise l'amortissement de l'objet pour sa durée de vie. Ce facteur distingue le MCI des autres indicateurs présentés précédemment. Ainsi, un objet peu utilisé ou avec une faible espérance de vie par rapport à la moyenne sera peu circulaire même si la matière est recyclée et recyclable.

Équation 7

$$MCI^* = 1 - LFI * F(X) \quad \left\{ \begin{array}{l} LFI = \frac{V + W}{2M + \frac{W_F - W_C}{2}} \\ F(X) = \frac{0.9}{X} \end{array} \right.$$

V : masse de matériaux vierges (kg)

W : masse totale de matériaux éliminés en décharge ou incinérés (kg)

W_F : déchets procédé de valorisation en incorporation (kg)

W_C : déchets procédé de valorisation en dépose (kg)

M : masse du produit (kg)

X : facteur d'utilité (adimensionnel)

LFI : 0 = circularité ; 1=linéarité

MCI : 0 = linéarité ; 1=circularité

$\Rightarrow MCI = \text{Max}(MCI^*; 0)$

2.1.4.3 Indicateurs adaptés pour le secteur de la construction

Le MCI est l'un des indicateurs les plus utilisés par les industriels (Zhang et al., 2021a). Les études de (Cottafava and Ritzen, 2021; Dräger et al., 2022) utilisent et analysent cet indicateur. De manière plus spécifique au secteur de la construction, la plateforme Madaster²⁵ reprend ce concept et réalise quelques ajustements en calculant un score pour trois phases du cycle de vie du bâtiment : production, usage et démolition. Cette plateforme permet de créer des « material passport » contenant des informations telles que la qualité, l'origine, la localisation ainsi que des informations sur la circularité et la valeur des matériaux utilisés dans une construction (Madaster Services BV., 2018). L'indicateur de circularité développé par Madaster reprend certains éléments du MCI tout en en écartant d'autres tels que la fonctionnalité de l'élément. (Heisel and Rau-Oberhuber, 2020) appliquent cet indicateur à un cas d'étude détaillé d'un bâtiment académique modulable (UMAR dessiné et construit par Werner Sobek). Les auteurs déplorent l'absence de certains indicateurs (dans ces *material passport*) tels que

²⁴ <https://ellenmacarthurfoundation.org/material-circularity-indicator> consulté en avril 2022

²⁵ <https://madaster.com/> consulté en avril 2022. Madaster est une plateforme d'archivage des données et documentations des matériaux de construction utilisés par les chantiers. Cela permet de rendre le réemploi plus facile et encourager la notion de « bâtiment réservoir de matériaux ».

l'énergie grise des matériaux ou encore la consommation d'eau. Néanmoins, ils soulignent l'intérêt de la plateforme pour faire des choix et évaluer les principes d'économie circulaire lors de la conception.

Plateform CB'23 pour circular construction 2023 est un regroupement d'industriels et d'acteurs de la construction néerlandaise (politiques et scientifiques) qui s'est engagé à rendre le secteur circulaire. L'équipe concernée par la mesure de la circularité a développé un modèle dans (platform CB'23, 2020) qui prône l'inclusion du « cycle biologique ». L'indicateur classe le matériau et calcule ensuite la circularité de chaque matériau à l'aide de plusieurs indicateurs (Zhang et al., 2021a). Le calcul de la circularité pour un matériau est noté dans l'Équation 8.

Équation 8

$$V_x = \frac{\sum_i (m_i \times m_{vi})}{\sum_i m_i}$$

V_x : pourcentage (d'un objet total ou du sous objet) de matériaux primaire (vierge) en entrée de processus

M_i : mass de l'objet ou sous objet (i)

M_{vi} : proportion (en masse) de matériaux vierges dans l'objet ou sous objet (i)

À partir de ces études, (Zhang et al., 2021a) proposent un modèle de circularité pour un bâtiment présenté en Figure 57. Il se base sur quatre aspects de l'économie circulaire : environnement, économie, social, technique. La mesure du cycle biologique s'appuie sur l'ACV, le cycle économique sur la méthode de LCC (Life Cycle Cost *i.e.* les coûts sur le cycle de vie) et le cycle technique sur plusieurs paramètres comme la gestion des flux et l'efficacité de valorisation. Le cycle social nécessite de plus amples recherches.

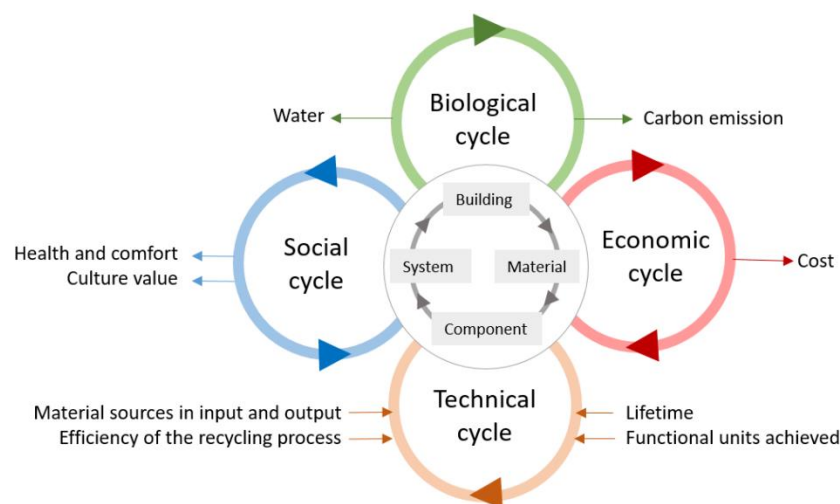


Figure 57 : Modèle de circularité pour l'élaboration d'un bâtiment circulaire (Zhang et al., 2021a)

En se focalisant sur la boucle technique, les auteurs incluent cinq indices :

- a. Matériaux entrant dans la phase de production,
- b. Matériaux sortant lors de la phase de déconstruction,
- c. Efficacité du procédé de recyclage ou de valorisation,

- d. Durée de vie de l'élément,
- e. Performance requise.

Ils introduisent également un facteur caractérisant la valorisation en fonction de la hiérarchie des déchets (les 5 R : Rethink, reduce, reuse, repair, recycle) (Figure 69, Chapitre 3), qui agit sur les indicateurs a, b et c. Toutefois, les auteurs ne proposent pas de quantification pour ces différents facteurs.

On trouve également dans la littérature d'autres indicateurs comme ceux de (Bracquené et al., 2020; Leising et al., 2018). (Bracquené et al., 2020) définissent la circularité comme la capacité à conserver à la fois la quantité et la qualité du matériau. Ainsi, ils ont développé le *Product Circularity Indicator* (PCI) dont l'objectif est de produire un Key Performance Indicator (KPI) (*i.e.* un indicateur clef de suivi de la performance d'un produit) pour un industriel dont ceux de la construction. Pour cet indicateur, les auteurs se basent sur le MCI développé par la fondation Ellen Mac Arthur. L'indicateur est présenté dans les Équation 9 et Équation 10. Cet indicateur diffère du simple MCI par la possibilité de moduler le facteur 1/2 (Équation 10) en fonction de la qualité de la ressource valorisée. Toutefois, aucun détail n'est donné pour déterminer les valeurs à appliquer au cas par cas.

Équation 9

$$PCI = 1 - \frac{LFI}{X}$$

PCI: Product Circularity Indicator

LFI: Linear Flow Index

X: Product utility during the use phase

Équation 10

$$LFI = \frac{V + W + \frac{1}{2}|R|}{M_{linear}}$$

LFI: Indice de flux linéaire

V: Matériaux vierges en entrée de processus (apport de matériaux vierges)

W: déchets en sortie (export de matériaux)

R: échange de matériaux recyclés avec d'autres produits

M_{linear}: quantité de matériaux traversant le système dans un cas théorique 100 % linéaire

1 → produit circulaire

0 → produit linéaire

Pour synthétiser, le Tableau 29 permet de noter les principales différences entre les indicateurs de circularité mentionnés précédemment. Le Tableau 30 se focalise sur les paramètres du cycle technique.

Tableau 29 : Synthèse concernant les indicateurs de circularité. Inspiré et complété de (Zhang et al., 2021a)

		CMU/ZWI/Tval	MRS/MCI/PCI	Madaster	CB'23	MFM*
Domaine d'application		Industrie de traitement	Toutes les industries	Industrie de la construction (IC)		
Cycle	Technique	Oui (partiel)	Oui	Oui	Oui	Oui
	Environnemental	Non	Non	Non	Oui	Oui
	Économique	Non	Non	Non	Non	Oui
	Social	Non	Non	Non	Non	Oui

*Material Flow Model de (Zhang et al., 2021a)

Tableau 30 : Synthèse concernant la partie technique des indicateurs de circularité. Inspiré de (Zhang et al., 2021a)

Indicateurs techniques	CMU	ZWI/Tval	MRS	MCI	PCI	Madaster	CB'23	MFM
Matériaux en entrée	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Matériaux en sortie	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Efficacité de la valorisation	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui
Durée de vie	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Oui
Performance requise	Non	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	Oui
Facteur de correction (qualité de valorisation)	Non	Non	Non	Oui (2)	Oui	Non	Oui (3)	Oui (5)

(2) : seulement reconditionnement et remanufacturage

(3) : pertes, incinération et mise en décharge

(5) : recyclage, reconditionnement, remanufacturage, réparation, réemploi

2.2 ÉTUDE DE CAS SUR LES INDICATEURS D'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

Pour rappel, le secteur du BTP est responsable de la moitié des extractions des matières premières et de la consommation d'énergie à l'échelle européenne (ADEME and Laurent, 2016). Il est également responsable de la production de 227 millions de tonnes de déchets en 2014 (soit 43 Mt pour le bâtiment en France dont 23 issus de la démolition (Inddigo et al., 2019)).

Par ailleurs, nous avons vu qu'afin de contrer le modèle vieillissant de l'économie linéaire (extraire, utiliser, jeter) et ainsi réduire la consommation des ressources et la production de déchets, le principe de l'économie circulaire a émergé. Dans cette étude, nous utilisons la définition issue de la LTECV, qui rejoint le domaine « gestion des déchets » de l'ADEME (section 2.1.1).

Nous avons vu que l'économie circulaire admettait une certaine plasticité dans sa définition, le plus haut niveau étant l'économie perma-circulaire. Or pour atteindre ce stade, les niveaux inférieurs doivent être bien définis, c'est ce qui est en développement actuellement. C'est pourquoi, afin de solidifier ce socle, nous nous concentrons sur l'aspect matière de l'économie circulaire. Nous n'abordons pas les questions de circularité énergétique ni les aspects économique et social. Nous parlons de valorisation matière pour tous types de traitement des matériaux en fin de vie d'un objet qui permettent de constituer un matériau de nouveau utilisable. Cela prend en compte le réemploi, la réutilisation, le recyclage. À l'opposé, l'incinération (avec récupération d'énergie ou non) ainsi que la mise en décharge ne sont pas des valorisations matière.

Pour mesurer la performance d'un projet du point de vue de l'économie circulaire, nous décidons de nous concentrer sur les indicateurs génériques notamment les MRS, Tval et MCI car ces derniers sont relativement simples à appliquer (indicateur unique) et ils sont fortement utilisés.

Jusqu'à présent les indicateurs de circularité émergents ne s'appliquent que sur un seul cycle. Or, l'économie circulaire implique plusieurs cycles. (Benachio et al., 2020) déplorent ainsi que « les recherches [...] soient focalisées sur l'application du concept d'économie circulaire sur un cycle à la fois ». Cela montre qu'il n'y pas encore de vision globale du concept d'économie circulaire dans la construction. Nous attendons des indicateurs de circularité qu'ils soient robustes quel que soit le nombre de cycles considérés, c'est-à-dire qu'ils permettent une hiérarchisation de scénarios en prenant en compte les possibilités de fin de vie des cycles suivants.

L'objet de cette partie est d'appliquer certains des indicateurs existants à un cas d'étude de réemploi d'une structure en bois de type *shell-nexorade hybride* (Douthe et al., 2018; Mesnil et al., 2018; Kuzmenko et al., 2020). L'évaluation est réalisée sur deux cycles consécutifs, l'objectif étant d'analyser le comportement des indicateurs de circularité face à la prise en compte de plusieurs cycles. Cette étude se veut exploratoire et vise à faire émerger des discussions sur le concept d'économie circulaire.

Cette partie a fait l'objet d'une présentation à la conférence de la SETAC Europe, 31^{ème} meeting annuel en 2021 (Lachat et al., 2021a).

2.2.1 Cas d'étude

Pour étudier le comportement des principaux indicateurs d'économie circulaire (Tval, MRS, MCI), nous nous basons sur le cas d'étude du réemploi d'une structure en bois (Figure 58) plus amplement décrite dans (Mesnil et al., 2018, 2018; Kuzmenko et al., 2020). Cette structure est de type *shell-nexorade hybride* (également appelé de type mixte nexorade-membranaire). Elle est constituée de poutres en bois lamellé-collé assemblées entre elles par le principe du nexorade en joint en T et de panneaux en bois contreplaqués tenus avec des vis. Les éléments ont été fabriqués en atelier à l'aide d'un robot et ont ensuite été assemblés sur place à la main. La fonction principale de cette structure est de couvrir une surface (82 m² dans ce cas) pendant une période définie.

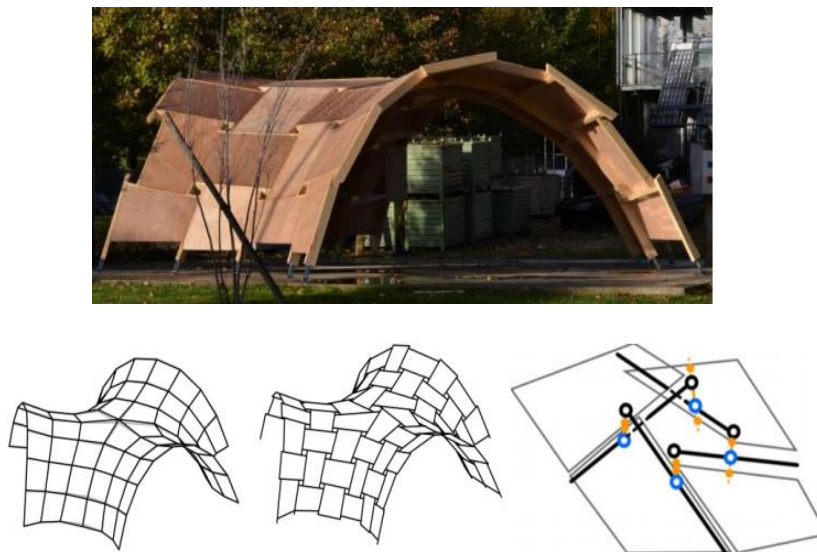


Figure 58 : Prototype d'une shell-nexorade hybride en bois (principe et photo) (Mesnil et al., 2018, 2018; Kuzmenko et al., 2020).

Une étude de potentiel de réemploi de la structure après quelques années d'utilisation (3 ans) a été réalisée par (Kuzmenko et al., 2020). Cette étude a permis de définir un ratio de réemploi de la structure par observation visuelle. La structure était disposée à l'extérieur sans protections particulières depuis 2017. Chaque panneau et poutre a été noté en fonction de son état et donc de la capacité au réemploi de ses éléments. Ainsi, il a été déterminé que 40 % des panneaux et 40 % des poutres en volume sont réemployables. Un scénario de réemploi de ces éléments a été étudié. Il permet de couvrir une surface de 36 m² avec le même principe d'assemblage, *i.e.* une nexorade, de même raideur, en supposant que la fonction de la structure reste identique. Le scénario de réemploi est étudié pour une durée de vie de 2 ans. Un second scénario de réemploi est étudié en allongeant la durée de vie de 2 ans (soit un total de 4 ans) et en augmentant le taux de réemploi de 30 % (*i.e.* un réemploi de 70 % et une structure de 47 m²).

Une analyse de cycle de vie a été réalisée et présentée dans (Kuzmenko et al., 2020, 2019b, 2019a). Elle se base sur deux cycles consécutifs en appliquant la méthode de l'élargissement des frontières. La durée de vie légale (structure temporaire) de la structure est de 10 ans. La principale conclusion est que l'avantage du réemploi dans ce cas d'étude n'est pas tangible (la réponse variant en fonction de l'indicateur ACV considéré). Ceci est dû au faible taux de réemploi des éléments et aux faibles durées de vie des structures.

La liste des matériaux utilisés dans la structure de la nexorade est présentée dans le Tableau 31.

Tableau 31 : Liste des matériaux composant la structure nexorade étudiée

Matériaux	Quantité
Poutre	1,3 m ³ soit environ 650 kg (à 500 kg/m ³)
Panneaux	1,3 m ³ soit environ 585 kg (à 450 kg/m ³)
Visserie	Non pris en compte

2.2.2 Méthodologie

Plusieurs scénarios de fin de vie ont été mis au point afin de comparer les valeurs des indicateurs de circularité. Nous comparons également les valeurs pour un seul cycle de vie et pour deux cycles lorsque l'on élargit les frontières du système comme présenté sur la Figure 59. Cela correspond au rassemblement du premier cycle et du second cycle.

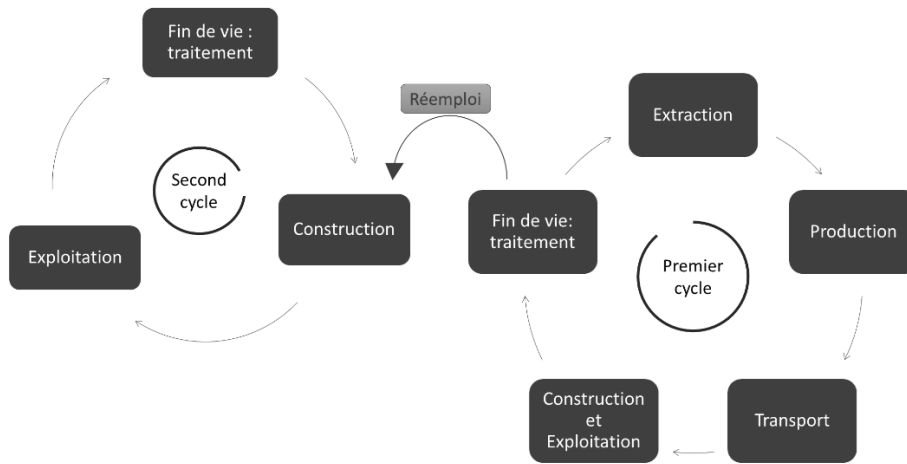


Figure 59 : Cycles de vie du cas d'étude nexorade (librement inspiré de (Kuzmenko et al., 2020))

Dans l'usage courant des indicateurs de circularité, les frontières du système sont les suivantes : un objet avec des flux entrants lors de sa construction (éventuellement sa maintenance) et des flux sortants lors de la fin de vie du premier usage. L'analyse est ainsi limitée à un seul cycle de vie. Cependant l'économie circulaire a, par définition, l'ambition de prendre en compte plusieurs cycles de vie d'un objet et ainsi suivre le cycle de la matière et non pas le cycle d'un seul objet.

Dans cette étude, nous développons douze scénarios portant sur la fin de vie des cycles de la structure nexorade. Le détail des scénarios est présenté dans le Tableau 32. Quatre scénarios ne comportent qu'un seul cycle et ont une durée de vie de 3 ans. Les huit autres sont des variantes où l'on précise la fin de vie du second cycle. Dans ces variantes, nous élargissons donc les frontières du système à deux cycles consécutifs (Figure 59).

Chaque scénario est désigné suivant une nomenclature décrivant son ou ses cycles de vie. Par exemple : le scénario « 1 Inc 60 Reu 40 / 2 Inc 60 Reu 40 » est un scénario constitué de deux cycles dont le premier est constitué en entrée à 100 % de matière neuve et où en fin de vie 60 % de la matière est incinérée et 40 % réemployée pour une durée de 3 ans. La matière réemployable est utilisée pour créer le second cycle. Cette seconde structure couvre 36 m² et durera 2 ans. En fin de vie, la structure sera traitée également en incinérant 60 % de ses éléments et en réemployant 40 %.

Tableau 32 : Scénarios étudiés pour la fin de vie de la structure nexorade

Cycle de vie	Premier Cycle		Second Cycle	
<i>Surface couverte</i>	82 m ²		36 m ²	
<i>Durée de vie du Cycle</i>	3 ans		2 ans	
Scénario	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie
<i>1 Inc 100</i>	100 % matière première neuve	100 % incinéré	Pas de second cycle étudié	
<i>1 Rec 100</i>		100 % recyclé	Pas de second cycle étudié	
<i>1 Inc 60 Reu 40</i>		60 % incinéré 40 % à réemployer	Pas de second cycle étudié	
<i>1 Inc 60 Reu 40 / 2 Inc 100</i>			100 % réemployé (correspond aux 40 % du cycle précédent)	100 % incinéré
<i>1 Inc 60 Reu 40 / 2 Inc 60 Reu 40</i>			60 % incinéré 40 % à réemployer	
<i>1 Inc 60 Reu 40 / 2 Rec 60 Reu 40</i>			60 % recyclé 40 % à réemployer	
<i>1 Inc 60 Reu 40 / 2 Rec 100</i>			100 % recyclé	
<i>1 Rec 60 Reu 40</i>			60 % recyclé 40 % à réemployer	Pas de second cycle étudié
<i>1 Rec 60 Reu 40 / 2 Inc 100</i>		100 % réemployé (correspond aux 40 % du cycle précédent)		100 % incinéré
<i>1 Rec 60 Reu 40 / 2 Inc 60 Reu 40</i>		60 % incinéré 40 % à réemployer		
<i>1 Rec 60 Reu 40 / 2 Rec 60 Reu 40</i>	60 % recyclé 40 % à réemployer			
<i>1 Rec 60 Reu 40 / 2 Rec 100</i>	100 % recyclé			

2.2.3 Résultats

Nous appliquons trois indicateurs de circularité (Tval, MRS, MCI) présentés en section 2.1.4.2 au cas d'étude décrit en section 2.2.1, afin d'étudier leur comportement. Nous abordons également dans cette partie les limites et perspectives des indicateurs et de notre étude.

Les valeurs des indicateurs en fonction des différents scénarios sont présentées dans le Tableau 33. Pour le Material Circularity Indicator (MCI), on ajoute entre parenthèse la valeur du MCI* (Équation 7), le MCI étant le maximum entre MCI* (donné par l'Équation 7) et 0. Dans ce tableau, on ajoute également pour certains indicateurs les valeurs du cycle 2 seul, c'est-à-dire celles obtenues si l'on considère le cycle 2 comme un système à part entière. Cela permet ainsi de compléter l'étude du cycle 1 seul. Pour mémoire, le LFI (Équation 7) est une valeur intermédiaire pour le calcul du Material Circularity Indicator (MCI), qui ne comporte pas encore la fonction d'usage.

Tableau 33 : Résultats de différents indicateurs de circularité en fonction des différents scénarios de fin de vie de la structure nexorade

Scénario	Tval	MRS	LFI	MCI (MCI*)	Cycle 2 seul		
					MRS	LFI	MCI (MCI*)
1 Inc 100	0	0	1	0 (-2)	/		
1 Rec 100	1	0,66	0,5	0 (-0,5)			
1 Inc 60 Reu 40	0,4	0,27	0,8	0 (-1,4)			
1 Inc 60 Reu 40 / 2 Inc 100	0	0	1	0 (-0,8)	0,33	0,5	0 (-1,25)
1 Inc 60 Reu 40 / 2 Inc 60 Reu 40	0,16	0,11	0,92	0 (-0,66)	0,6	0,3	0 (-0,35)
1 Inc 60 Reu 40 / 2 Rec 60 Reu 40	0,4	0,27	0,8	0 (-0,44)	1	0	1
1 Inc 60 Reu 40 / 2 Rec 100	0,4	0,27	0,8	0 (-0,44)	1	0	1
1 Rec 60 Reu 40	1	0,66	0,5	0 (-0,5)	/		
1 Rec 60 Reu 40 / 2 Inc 100	0,6	0,4	0,7	0 (-0,26)	0,33	0,5	0 (-1,25)
1 Rec 60 Reu 40 / 2 Inc 60 Reu 40	0,76	0,51	0,62	0 (-0,12)	0,6	0,3	0 (-0,35)
1 Rec 60 Reu 40 / 2 Rec 60 Reu 40	1	0,66	0,5	0,1	1	0	1
1 Rec 60 Reu 40 / 2 Rec 100	1	0,66	0,5	0,1	1	0	1

Tout d'abord, concernant le MCI, nous pouvons remarquer que la condition limitative par 0 est très sévère et ne permet pas de classer plus finement les scénarios entre eux. Plus prosaïquement, cela ne permet pas de valoriser les efforts les plus simples. La faible valeur du MCI est fortement liée à la fonction d'utilité « X » (Équation 7) qui est un ratio entre l'usage (en temps *i.e.* durée de vie ou en fonctionnalité) réel et l'usage théorique ou moyen. Dans notre cas, la durée de vie théorique de 10 ans retenue influence fortement le résultat face aux 2/3/5 ans d'usage réel.

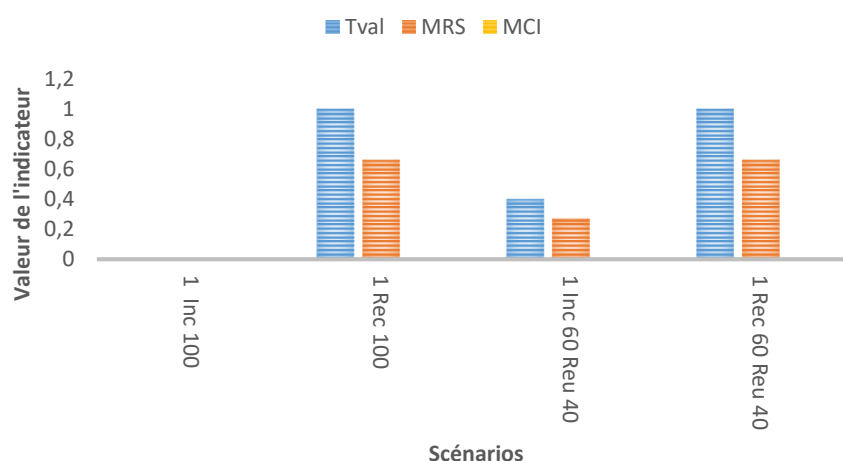


Figure 60 : Indicateurs Taux de valorisation matière (Tval), Material Reutilisation Score (MRS) et Material Circularity Indicator (MCI) en fonction des scénarios de fin de vie de la nexorade en prenant en compte le premier cycle seul

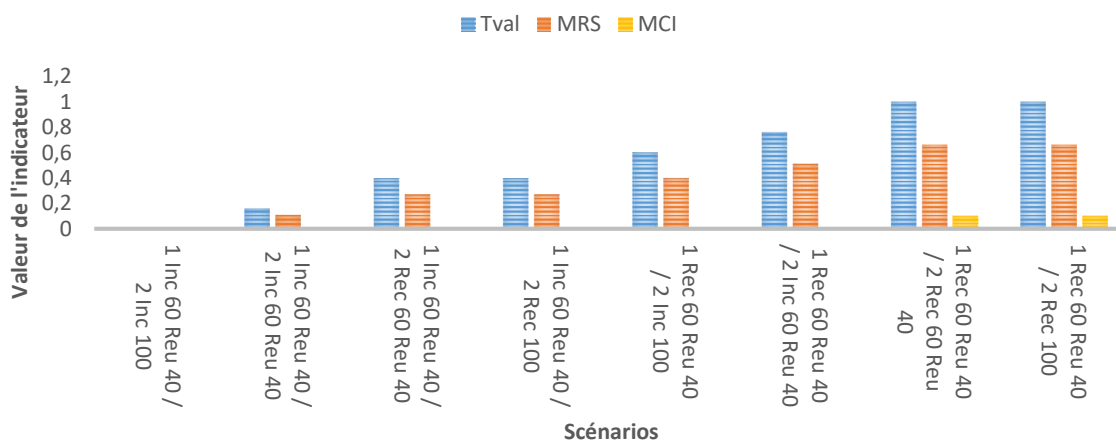


Figure 61 : Indicateurs Taux de valorisation matière (Tval), Material Reutilisation Score (MRS) et Material Circularity Indicator (MCI) en fonction des scénarios de fin de vie de la nexorade en prenant en compte des frontières du système étendues (*i.e.* deux cycles consécutifs)

La Figure 60 et Figure 61 présentent l'évolution du taux de valorisation matière (Tval), du MRS et du MCI en fonction des différents scénarios. Une absence de « barre » pour un indicateur sur le graphique signifie que la valeur de l'indicateur est nulle. Sur ces graphiques, nous pouvons analyser l'impact des matériaux qui entrent en début du système d'étude. Effectivement, quel que soit le scénario, nous commençons le système par des matériaux neufs (Tableau 32). Ainsi, comme seul le Tval ne prend en compte que la fin de vie, il nous est possible d'évaluer l'influence de la fin de vie par rapport au début de vie. Comme attendu, de par sa construction, le MRS donne des résultats « 1/3 » plus petit que ceux

du Tval (Équation 6). Ceci est dû au coefficient « 2/3 » favorisant les matériaux valorisables en fin de vie plutôt que les matériaux secondaires en début de vie. En parallèle, le MCI ne correspond pas à 50 % de Tval car le ratio d'utilité F(X) vient s'ajouter. Mais globalement, les résultats d'un indicateur à l'autre sont proportionnels, c'est-à-dire qu'à scénario identique il suffit de multiplier un indicateur par un coefficient connu par avance pour connaître les valeurs des autres indicateurs.

2.2.4 Analyse

2.2.4.1 Notion de perte de valeur intrinsèque et perte de valeur d'usage

La **valeur intrinsèque** d'un matériau est l'ensemble des caractéristiques propres au matériau, comme ses caractéristiques physiques et mécaniques (résistance à la compression ou à la traction par exemple), esthétiques, géométriques... Dans notre contexte, nous nous concentrons principalement sur les caractéristiques mécaniques, notamment sur la résistance.

La **valeur d'usage** est l'adéquation des caractéristiques d'une structure (usage d'une structure) en lien avec les matériaux utilisés pour cette structure. La valeur d'usage d'un matériau caractérise la cohérence entre les enjeux, *i.e.* les caractéristiques d'une structure, avec les caractéristiques du matériau, *i.e.* la valeur intrinsèque du matériau. Par exemple, un béton haute performance utilisé dans une structure porteuse optimisée et répondant à des contraintes techniques fortes a une valeur d'usage élevée.

Dans notre champ d'étude, les méthodes de valorisation n'ont pas toutes le même niveau de performance.

Ainsi, le **recyclage** a le plus bas degré de valorisation matière²⁶. Effectivement, dans notre étude de cas, le recyclage du bois brut implique une fragmentation du bois, entraînant une perte de résistance du matériau qui doit être renforcé par l'adjonction d'un liant (colle ou résine) pour créer un nouvel élément tel qu'un panneau de particule (NF EN 309 juillet 2005). Le matériau subit ainsi une perte de valeur intrinsèque car il passe d'un état de « forte » résistance technique à un état de faible résistance. En parallèle, ce panneau de particule peut être destiné à la fabrication d'un meuble qui ne nécessite pas de fortes caractéristiques techniques. Le bois a alors subi une perte de valeur d'usage entre les poutres porteuses de la nexorade et le meuble d'entrée de gamme.

Après le recyclage, on trouve ensuite la **réutilisation** (ou détournement d'usage) qui implique généralement une faible perte de valeur intrinsèque mais une forte perte de valeur d'usage. Enfin, il y a le **réemploi** qui implique une faible (aucune pour notre étude de cas) perte de valeur d'usage et aucune perte intrinsèque.

Or, lorsqu'on compare les indicateurs de circularité pour des scénarios avec des méthodes de valorisation différentes, le résultat est le même. Par exemple, dans le *1 Rec 100* la perte de valeur d'usage et de valeur intrinsèque est plus importante que dans le scénario *1 Rec 60 Reu 40*, où 40 % des éléments sont réemployés. Pourtant, les résultats du Tval et MRS sont les mêmes (respectivement 1 et 0,66 comme indiqué en Tableau 33 et Figure 61) pour ces deux scénarios où certes 100 % des éléments sont valorisés en sortie mais pas avec les mêmes valeurs d'usage et intrinsèque. On le

²⁶ À noter qu'il peut exister des exceptions, cela dépend de la manière dont le matériau est recyclé ou réutilisé.

remarque également entre autres avec les scénarios *1 Rec 60 Reu 40 / 2 Rec 60 Reu 40* et *1 Rec 60 Reu 40 / 2 Rec 100*.

On peut donc conclure que ces indicateurs ne prennent pas en compte la perte de valeur d'usage et la perte de valeur intrinsèque des matériaux d'un cycle à l'autre. C'est pourtant une composante incontournable pour permettre la mise en place d'une véritable économie circulaire. Nous verrons dans la section 2.3 que cette problématique est en partie résolue par les nouveaux indicateurs développés spécifiquement pour le secteur de la construction (2.1.4.3), notamment celui proposé par (Zhang et al., 2021a) via l'utilisation d'un facteur de correction pour caractériser la qualité de valorisation. Cependant, la méthode de calcul de cet indicateur n'est pas encore déterminée par les auteurs. Un tel facteur devra prendre en compte à la fois la perte de valeur d'usage et la perte de valeur intrinsèque des matériaux.

2.2.4.2 Extension des frontières et étude sur plusieurs cycles

Nous nous intéressons plus précisément maintenant au comportement des indicateurs lorsque l'on étend les frontières à deux cycles successifs. On observe tout d'abord que les valeurs des indicateurs varient fortement d'un cycle à l'autre pour les mêmes hypothèses sur le premier cycle. Par exemple, pour le scénario *1 Inc 60 Reu 40 / 2 Inc 60 Reu 40*, le Material Reutilisation Score (MRS) est de 0,27 pour le premier cycle, de 0,11 pour les deux cycles et de 0,6 pour le second cycle seul (Tableau 33). L'unité fonctionnelle n'est certes pas la même mais on attend des indicateurs de circularité qu'ils soient représentatifs de l'ensemble du cycle de l'économie circulaire, c'est-à-dire qu'ils prennent en compte le cycle de la matière et non simplement celui de l'objet. Ainsi, ils doivent permettre d'anticiper les cycles suivants et précédents *i.e.* d'anticiper l'usage futur. Dans le cas contraire, et comme on peut l'observer, un élément circulaire en apparence ne peut durer qu'un seul cycle, si par exemple, il est incinéré à la fin du second. Et inversement, un élément pas complètement circulaire, car contenant des matériaux neufs en début de cycle peut par la suite être valorisé et notamment réemployé sur plusieurs cycles. L'indicateur de circularité doit donner une vue d'ensemble comme mentionné par (Benachio et al., 2020).

Pour synthétiser, l'économie circulaire est un concept incitant à prendre en compte plusieurs cycles de vie. Elle s'étend donc sur une temporalité plus grande que l'économie linéaire. Or, les indicateurs actuels, de par leur construction, sont restreints à un seul cycle. En effet, il leur est difficile de prendre en compte plusieurs cycles car ils ne permettent pas de valoriser les flux d'un cycle à l'autre. L'extension des frontières, qui est facilement applicable en ACV, l'est moins lorsque l'on aborde les indicateurs d'économie circulaire qui sont bornés entre 0 et 1 et dont la valeur est propre à un cycle de vie.

À la vue des précédentes observations, les indicateurs de circularité semblent peiner à relever les défis actuels de l'économie circulaire. La transition d'un cycle à l'autre est clef dans l'étude de la circularité. La perte de valeur, qu'elle soit intrinsèque ou d'usage, doit être prise également en compte. Il est donc nécessaire d'adapter les indicateurs existants pour qu'ils soient pleinement représentatifs de la notion d'économie circulaire. Enfin, il serait intéressant d'élargir l'étude en réalisant une autre étude de cas comportant cette fois plusieurs matériaux. Cela permettrait de confirmer les observations réalisées lors de cette étude et de mettre en lumière d'autres problématiques.

2.3 ADAPTATION D'UN INDICATEUR D'ECONOMIE CIRCULAIRE EXISTANT

Face aux limites des indicateurs de circularité mises en lumière dans la section précédente (2.2.3), nous souhaitons développer une première proposition d'indicateur.

(Zhang et al., 2021a) ont récemment développé un indicateur de circularité contenant un coefficient prenant en compte la qualité de la valorisation et donc la perte de valeur intrinsèque. La partie technique (CR_{cb}) de l'indicateur (BC) se calcule tel que présenté dans l'Équation 11.

Équation 11

$$CR_{CB} = \frac{(CR_{mi} + CR_{mo} \times DS)}{2} \times LS \times F_u \quad (a)$$

$$CR_{mi} = R_{ici} \times a + R_{imu} \times b + R_{ifb} \times c + R_{ipr} \times d + R_{iui} \times e \quad (b)$$

$$LS = \frac{LS_{au}}{LS_{dv}} \quad (c)$$

CR_{cb} : Taux de circularité technique,

CR_{mi} : Taux de circularité technique pour les matériaux en entrée (input),

CR_{mo} : Taux de circularité technique pour les matériaux en sortie (output). Il se calcule de la même manière que le CR_{mi} mais pour les matériaux en sortie,

DS : Efficacité du processus de valorisation,

LS : Durée de vie,

F_u : Fonctionnalité atteinte,

LS_{au} : Durée de vie réelle ou envisagée,

LS_{dv} : Durée de vie moyenne d'un élément de même type,

R_{ici} : Pourcentage de matériaux recyclés,

R_{imu} : Pourcentage de matériaux remanufacturés,

R_{ifb} : Pourcentage de matériaux rénovés,

R_{ipr} : Pourcentage de matériaux réparés,

R_{iui} : Pourcentage de matériaux réemployés,

a : Facteur de pondération de la qualité, pour le recyclage (0,5),

b : Facteur de pondération de la qualité, pour le remanufacturage (0,6),

c : Facteur de pondération de la qualité, pour la rénovation de matériaux (0,7),

d : Facteur de pondération de la qualité, pour la réparation (0,8),

e : Facteur de pondération de la qualité, pour le réemploi (1),

Dans un premier temps, nous appliquons cet indicateur BC au cas d'étude précédent pour analyser son comportement. L'efficacité de la valorisation DS et la fonctionnalité F_u sont considérées parfaites donc égales à 1. Concernant le facteur de durée de vie LS , comme mentionné dans le cas d'étude, on choisira 3 ans pour le premier cycle et 2 ans pour le second (5 ans pour les deux cycles). Nous décidons de fixer la durée de vie moyenne de ce type d'ouvrage à 5 ans. Le Tableau 34 présente les résultats obtenus.

Dans la dernière colonne nous réalisons une moyenne pondérée du cycle 1 seul et du cycle 2 seul selon le volume de matière nécessaire pour le cycle.

Tableau 34 : Application de l'indicateur de (Zhang et al., 2021a) au cas d'étude de la nexorade

Scénario	BC (CR _{cb})	BC cycle 2 seulement	Moyenne pondérée (volumique) cycle 1 seul et cycle 2 seul
1 Inc 100	0	/	/
1 Rec 100	0,15		
1 Inc 60 Reu 40	0,12		
1 Inc 60 Reu 40 / 2 Inc 100	0	0,2	0,14
1 Inc 60 Reu 40 / 2 Inc 60 Reu 40	0,08	0,28	0,17
1 Inc 60 Reu 40 / 2 Rec 60 Reu 40	0,14	0,34	0,18
1 Inc 60 Reu 40 / 2 Rec 100	0,1	0,3	0,17
1 Rec 60 Reu 40	0,21	/	/
1 Rec 60 Reu 40 / 2 Inc 100	0,15	0,2	0,21
1 Rec 60 Reu 40 / 2 Inc 60 Reu 40	0,23	0,28	0,23
1 Rec 60 Reu 40 / 2 Rec 60 Reu 40	0,29	0,34	0,25
1 Rec 60 Reu 40 / 2 Rec 100	0,25	0,3	0,24

On observe que le scénario 100 % recyclage n'est pas le scénario le plus performant contrairement aux résultats obtenus avec les autres indicateurs. Cet indicateur met donc en avant l'intérêt du réemploi. Par ailleurs, chaque scénario (sur 1 ou 2 cycles) dispose d'un résultat différent ce qui est cohérent avec l'objectif initial. Avec cet indicateur, il est donc possible de discriminer/discretiser les solutions entre elles.

Nous observons également que la moyenne pondérée permet d'obtenir un compromis entre le cycle 1 seul et le cycle 2 seul, tout en obtenant un résultat supérieur (et plus représentatif) que pour les calculs des deux cycles consécutifs.

Ainsi l'indicateur de (Zhang et al., 2021a) permet de prendre en compte une des lacunes des autres indicateurs : la prise en compte de la qualité de la valorisation. Les facteurs de pondération a, b, c, d et e permettent de compter différemment le réemploi qui conserve sa qualité d'usage et sa valeur intrinsèque, du recyclage qui perd de la valeur intrinsèque. Dans leur article, (Zhang et al., 2021a) ne

donnent pas de méthode de calcul pour ce coefficient. Il serait utile d'en développer une. Pour l'exercice, nous avons utilisé les valeurs des coefficients utilisés par les auteurs dans leur étude.

Néanmoins, nous observons que la question du cycle de la matière n'est pas résolue. C'est donc sur ce point que nous décidons de travailler dans ce chapitre, en partant de l'indicateur développé par (Zhang et al., 2021a) qui est le plus complet au vu de nos observations lors de la recherche bibliographique.

2.3.1 Principe et objectif

L'objectif est de modifier un indicateur (en l'occurrence l'indicateur développé par (Zhang et al., 2021a)) pour qu'il prenne en compte le cycle de la matière *i.e.* plusieurs cycles de l'objet.

Alors que les indicateurs actuels mesurent une « circularité » sur un seul cycle de vie, l'économie circulaire vise à allonger durablement la durée de vie de la matière et pas seulement retarder la mise en décharge d'un ou deux cycles de vie (section 2.1.2).

Ainsi, il nous semble nécessaire que l'indicateur ait un résultat plus favorable pour un objet où la matière pourra subir (par exemple) 10 cycles que 5 cycles, pour une qualité de valorisation équivalente. Un objet dont la matière sera valorisable à l'infini traduira une économie parfaitement circulaire et donc un bon résultat de l'indicateur.

Ce qui distingue la circularité parfaite de la circularité imparfaite (Figure 62) est la perte de valeur de la matière liée à la notion d'entropie en thermodynamique : « Grandeur thermodynamique exprimant le degré de désordre de la matière »²⁷. Ainsi au fur et à mesure de la transformation de la matière, la matière se désordonne en lien avec la dégradation de l'énergie. La perte de qualité de la matière devient irréversible ou bien nécessite un apport d'énergie important. Plus l'entropie est forte, plus tôt l'élimination de la matière apparaîtra.

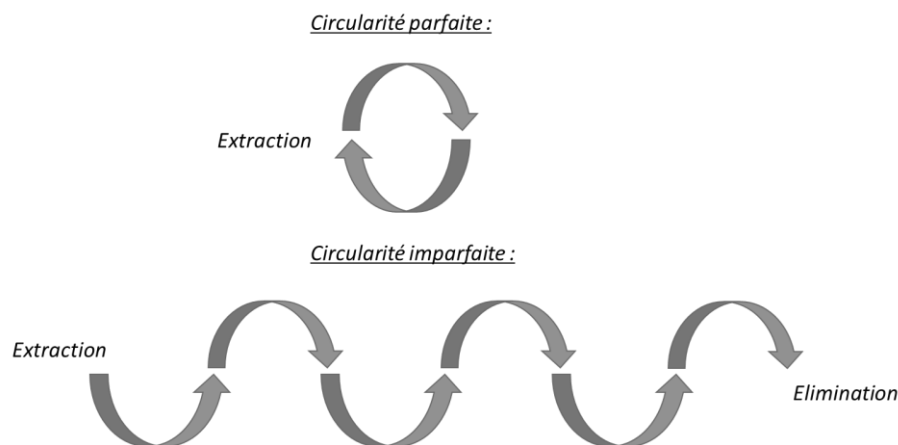


Figure 62 : Circularité parfaite et circularité imparfaite

Face à cela, nous pouvons tout d'abord nous demander comment déterminer la valeur de cette entropie entre chaque cycle. Puis nous pouvons nous demander comment anticiper les futurs cycles de la matière.

²⁷ <https://www.cnrtl.fr/definition/entropie>, consulté en juin 2022

Le premier point rejoint la question de la qualité de la valorisation, coefficient pris en compte dans (Zhang et al., 2021a). Nous ne le détaillerons donc pas plus.

La problématique principale vient donc du second point, *comment anticiper le futur ?* C'est une question complexe qui dépend à la fois des évènements, de l'imprévu et des stratégies adoptées comme le souligne (Marchais-Roubelat and Mondon, 2020). Il s'agit d'éclairer le décideur sur « ce que l'on veut et ce que l'on ne veut pas à partir des scénarios préférés ou au contraire dystopiques » (Marchais-Roubelat and Mondon, 2020). Ainsi, il ne faut pas se limiter à ce que l'on souhaite où à comment on a conçu un objet mais aussi aux choix prévisibles et imprévisibles qui seront faits dans le futur.

Dans notre cas, il est possible de prendre des valeurs de « probabilité d'occurrence » de chaque scénario de valorisation ou élimination. Ces valeurs restent à être calculées et une méthode de calcul à être développée. Le développement de la méthode de calcul n'est pas réalisé au cours de cette thèse et nécessite des recherches futures. L'incertitude sur ces occurrences peut être limitée par différentes mesures à mettre en place dès la conception (Brachet and Mace, 2020) tel que (de manière non exhaustive) :

- La traçabilité initiale des matériaux et principes constructifs ;
- La traçabilité des modifications au cours de la vie en œuvre ;
- L'anticipation de la maintenance : calendrier de maintenance, carnet de suivi... ;
- L'anticipation des vies futures : préconisations, plan de démontage et de recyclage.

Le BIM (Building Information Modeling) est une solution permettant d'assurer en partie la traçabilité comme le mentionne les études de (Akanbi et al., 2018a; Dautremont et al., 2018; Bertin et al., 2019; Zhang et al., 2021b).

Dans cette partie, nous explorons une méthode de calcul d'un indicateur de circularité à partir de l'indicateur de (Zhang et al., 2021a) pour qu'il prenne en compte de manière la plus précise le cycle de la matière. Dans ce cadre, la connaissance des cycles futurs exacts (par exemple après un retour d'expérience) ne doit permettre que d'affiner le résultat mesuré lors du premier cycle de l'objet. Le résultat affiné doit être sensiblement égal au résultat initial (faible variation positive ou négative).

2.3.2 Modification de l'indicateur

La méthode choisie pour prendre en compte le cycle de la matière est une méthode probabiliste basée sur des coefficients de « probabilité d'occurrence » de chaque scénario alternatif.

Nous suivons le cycle de la matière en utilisant le volume de matière, supposée incompressible, *i.e.* sans contraction ni dilatation (nous aurions pu également utiliser la masse). Nous utilisons donc une pondération volumique des indicateurs de chaque cycle et chaque scénario.

La fonctionnalité étant déjà prise en compte par l'indicateur de (Zhang et al., 2021a) via le ratio sur la durée de vie (LS) (et Fu si applicable), il n'est pas nécessaire d'effectuer une nouvelle pondération selon la fonctionnalité.

Pour mettre en avant l'allongement de l'usage de la matière, nous utilisons par la suite un indice en volume.an correspondant au volume de matière utilisé multiplié par la durée d'utilisation de cette matière.

Comme précisé précédemment, nous nous basons sur l'indicateur de circularité développé par (Zhang et al., 2021a) c'est-à-dire le *Building Circularity* (BC) en ne prenant en compte que l'aspect technique de la circularité : CR_{cb} .

Les étapes supplémentaires à l'indicateur de circularité BC sont les suivantes :

- Fixer le nombre de cycles de l'objet maximum et sa durée ;
- Énumérer les scénarios de cycles de la matière possibles ;
- Calculer le BC (CR_{cb}) pour chaque cycle de l'objet et chaque scénario ;
- Calculer le BC moyen pondéré par la masse ou le volume pour chaque cycle de la matière ;
- Définir les probabilités d'occurrences pour chaque cycle de la matière ;
- Calculer la moyenne en fonction des probabilités d'occurrence de chaque cycle de la matière.

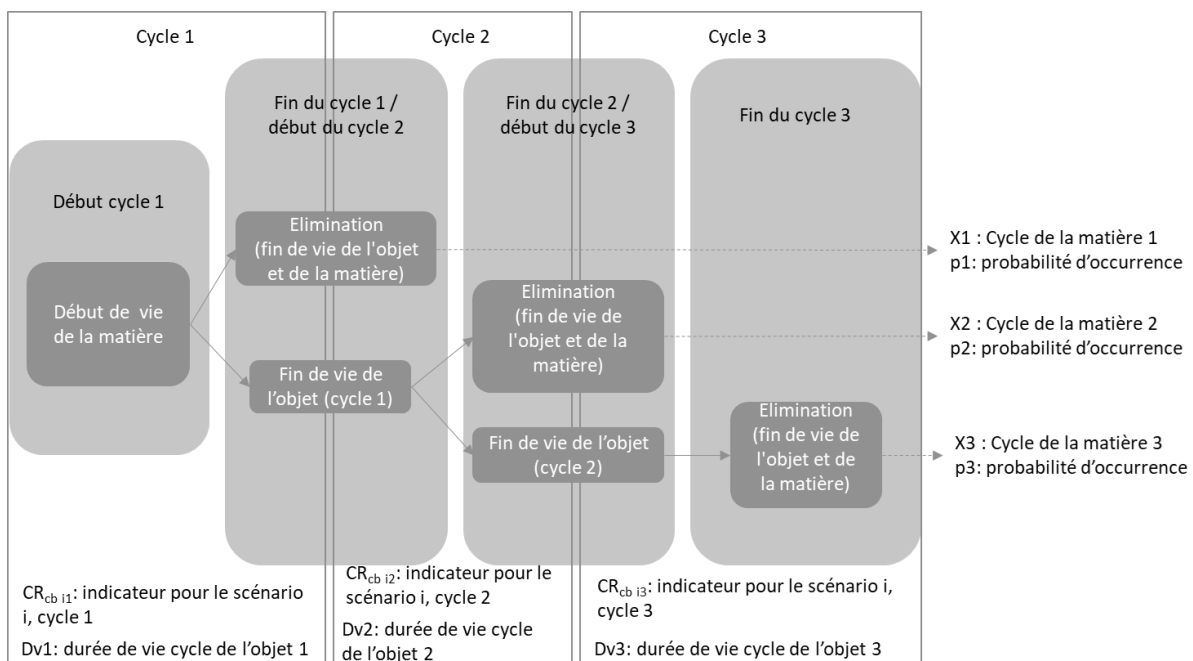


Figure 63 : Principe d'adaptation de l'indicateur de circularité BC pour la prise en compte de plusieurs cycles

2.3.3 Application et analyse

Nous appliquons la méthode décrite plus haut au cas d'étude de la section 2.2.1. On ajoute à ce cas d'étude un troisième cycle de 2 ans ; à l'issue de ce troisième cycle toute la matière est éliminée. On étudie donc trois cycles de vie consécutifs pour une durée de vie maximale totale de 1,4 vie moyenne (LS_{du}).

On suppose que la matière « bois » en l'état ne supporte qu'un seul recyclage *i.e.* la matière après recyclage est éliminée (incinérée dans notre cas).

En prenant en compte la durée de vie du cycle, on peut dire que les 2,6 m³ de matière mis en œuvre initialement pour le premier cycle sont équivalents à 15,08 m³.an. Sachant que le maximum atteignable est de 18,2 m³.an et que sans valorisation au bout du premier cycle cela serait à 7,8 m³.an.

Les différents scénarios de fin de vie sont notés sur la Figure 64, les « X_i » dénombrent les cycles de la matière. La fin du cycle 3 est caractérisé par une élimination quel que soit le scénario. On dénombre

10 cycles de la matière différents. On note que le cycle de la matière X1 dure seulement 1 cycle (de l'objet) et que les scénarios X2, X6, X7 durent 2 cycles (de l'objet).

Nous calculons ensuite l'indicateur CR_{cb} pour chaque cycle de l'objet (Cycle 1, Cycle 2, Cycle 3) et chaque scénario (Tableau 35). Lorsque la fin de vie du cycle est composée de recyclage et de réemploi, nous calculons au cycle suivant deux valeurs de l'indicateur : un pour le cycle recyclé et l'autre pour le cycle réemployé. Dans ce genre de cas, on suppose que le cycle recyclé dure 2 ans (même durée que le cycle de réemploi).

La Figure 65 présente les scores de circularité (moyenne pondérée) pour chaque cycle de la matière en fonction de l'indice « volume.an » *i.e.* selon l'allongement de l'usage de la matière.

On observe ainsi que la circularité (selon BC) n'est pas proportionnelle à l'allongement de la durée de vie. En effet, on peut voir que X6 a un bon allongement de la durée de vie par rapport à X3 (2,29 m³.an de plus) mais un score de circularité bien plus faible (4,41 % de moins). On peut néanmoins globalement déceler une tendance intuitive d'amélioration de la circularité en fonction de l'augmentation de la durée de vie mais fortement dépendante de la qualité de valorisation. Ainsi, la valeur la plus « circulairement » intéressante est obtenue pour le cycle de la matière X10 avec le score de circularité le plus élevé (19,25 %) et l'allongement maximal de la durée d'usage avec 15,08 m³.an. C'est le cycle de la matière faisant intervenir le plus le réemploi. Nous avons exprimé le score en pourcentage afin que le nombre soit plus lisible.

Pour obtenir une circularité optimale, il faut agir sur l'allongement de la durée d'usage de la matière mais également sur la qualité de valorisation (favoriser le réemploi au recyclage).

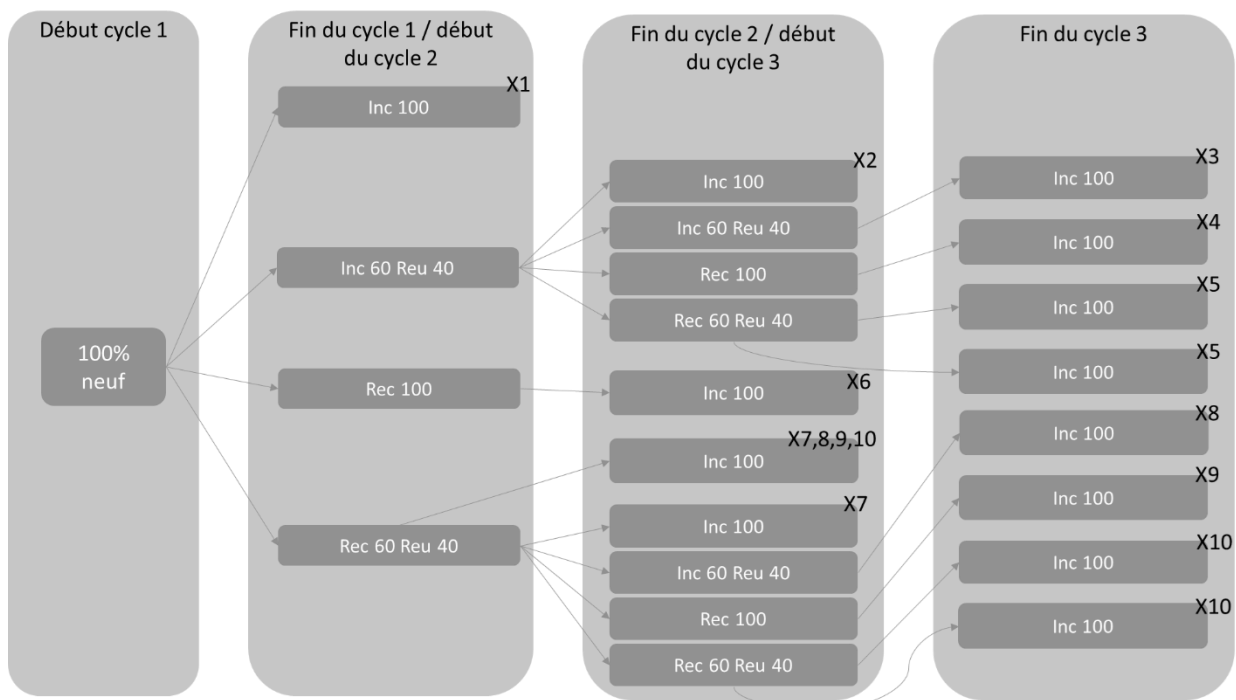


Figure 64 : Scénarios du cycle de la matière pour le cas d'étude nexorade sur l'indicateur de circularité développé

Tableau 35 : Valeur de l'indicateur BC pour chaque cycle de l'objet pour chaque cycle de la matière

Cycles matière	Indice du cycle matière	Indicateur de circularité (BC)				
		Cycle 1	Cycle 2		Cycle 3	
Cycle de la matière 1	X1	0	0			
Cycle de la matière 2	X2	0,12	0,2			
Cycle de la matière 3	X3	0,12	0,28		0,2	
Cycle de la matière 4	X4	0,12	0,3		0,1	
Cycle de la matière 5	X5	0,12	0,34		0,2	0,1
Cycle de la matière 6	X6	0,15	0,1			
Cycle de la matière 7	X7	0,21	0,2	0,1		
Cycle de la matière 8	X8	0,21	0,28	0,1	0,2	
Cycle de la matière 9	X9	0,21	0,3	0,1	0,1	
Cycle de la matière 10	X10	0,21	0,34	0,1	0,2	0,1

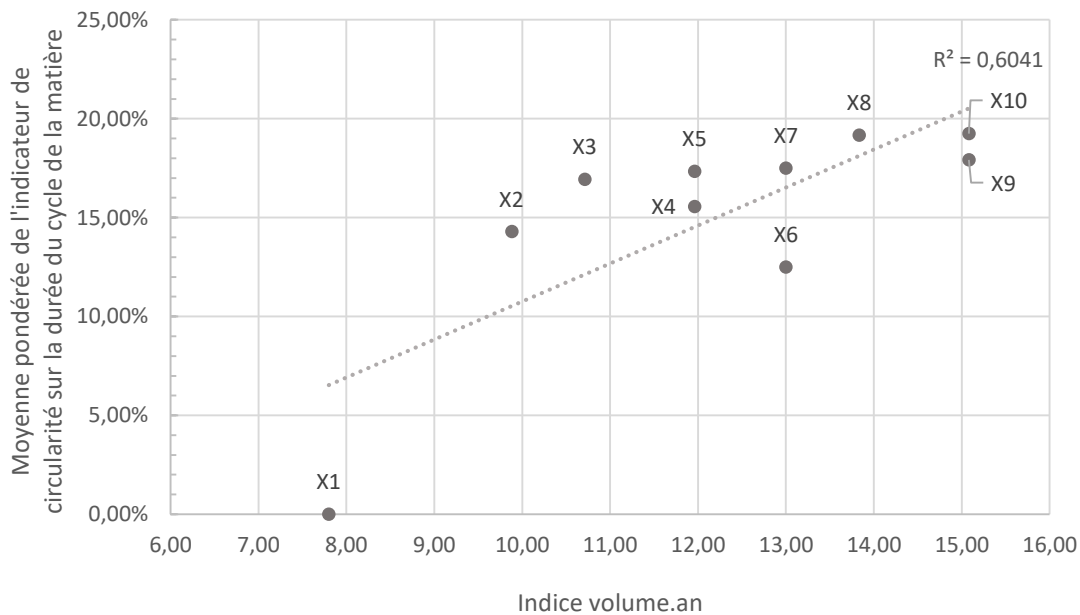


Figure 65 : Moyenne pondérée pour chaque cycle de vie de la matière en fonction de la durée de vie (selon l'indice volume.an)

En parallèle, nous définissons trois scénarios de probabilité d'occurrence du cycle de la matière qui nous permettent de pondérer les différents cycles et d'obtenir un indicateur unique pour l'objet (Tableau 36) :

- **Sc1** : l'économie circulaire est vue sous le prisme basique du recyclage. Il s'agit de prendre en compte principalement les alternatives où il y a du recyclage. Ainsi, pour différencier les cycles de la matière nous calculons l'indice « volume.an » de la matière recyclée. Les scénarios les

plus probables sont donc le X6 et le X9 où 100 % de la matière est recyclée respectivement lors du cycle 2 et cycle 3 ;

- **Sc2** : l'économie circulaire est plus évoluée en faisant attention à la hiérarchie des déchets et le réemploi est à privilégier. Ainsi, nous prenons en compte principalement les alternatives où il y a un réemploi. De la même manière que le scénario précédent, nous calculons l'indice « volume.an » de la matière réemployée. Avec ce scénario, les cycles de la matière sont très similaires. Néanmoins les cycles X3, X5, X8 et X10 sont les plus favorables ;
- **Sc3** : l'économie circulaire vise à maximiser la durée de vie/d'usage de la matière quelle que soit la valorisation. Nous nous basons donc sur l'indice « volume.an » global. Dans ce scénario, les cycles de la matière X9 et X10 sont les plus probables.

Tableau 36 : Probabilité d'occurrence de chaque cycle de la matière et indicateur de circularité global

Indice de cycle de la matière	volume.an	probabilité d'occurrence		
		Sc1	Sc2	Sc3
X1	7,80	0,00	0,00	7,80
X2	9,88	0,00	2,08	9,88
X3	10,71	0,00	2,91	10,71
X4	11,96	2,08	2,08	11,96
X5	11,96	1,25	2,91	11,96
X6	13,00	5,20	0,00	13,00
X7	13,00	3,12	2,08	13,00
X8	13,83	3,12	2,91	13,83
X9	15,08	5,20	2,08	15,08
X10	15,08	4,37	2,91	15,08
Indice de circularité global		0,169	0,174	0,158

Nous présentons en Figure 66 les résultats obtenus avec cette méthode. Comme nous avons commencé à le dire, le scénario permettant d'avoir le meilleur score de circularité est celui favorisant le réemploi (meilleure qualité de valorisation). On obtient ainsi un score de 0,174 (17,4 %) pour le scénario 2 favorisant le réemploi et seulement 0,158 pour le scénario 3 (en fonction de l'allongement de la durée de vie).

Par ailleurs, en calculant l'écart moyen de ces valeurs avec les différents scénarios, avant prise en compte de la probabilité d'occurrence, on obtient un écart moyen inférieur à 4 % (3,2 % pour Sc1 et Sc2 et 3,4 % pour Sc3) ce qui semble acceptable puisque l'indicateur sans modification (donc sur 1 cycle seulement) présentait un écart moyen de 6 % (ce qui est supérieur à la valeur obtenue).

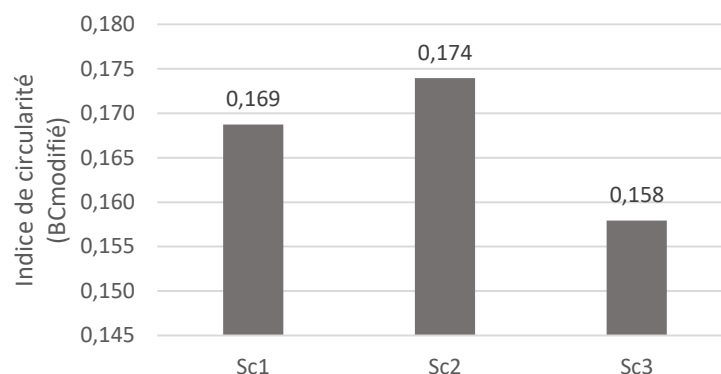


Figure 66 : Valeur de l'indicateur de circularité modifié pour différents scénarios de probabilité d'occurrence

Au vu de ces résultats, nous pouvons dire que les modifications apportées sont concluantes : nous disposons d'un unique résultat d'indicateur traduisant le cycle de la matière et prenant en compte les probabilités d'occurrence.

Nous nous interrogeons toutefois sur la question du double comptage de la matière valorisée. En effet, puisque nous calculons le BC pour chaque cycle de l'objet, la matière valorisée en sortie devient la matière valorisée en entrée également. Pour comprendre l'impact de ce double comptage, nous réalisons un test de calcul de l'indicateur BC (CR_{cb}) en ne prenant en compte que la matière en sortie (on ne prend pas en compte CR_{mi} pour les cycles 2 et 3). Les résultats de cette alternative de calcul sont présentés sur la Figure 67. On observe que les valeurs de l'indicateur sont plus élevées mais que cela ne change pas le classement des scénarios. Sur la Figure 68, nous traçons la moyenne pondérée de chaque cycle de la matière (donc avant prise en compte des probabilités d'occurrence) pour l'indicateur avec double comptage en fonction de l'indicateur sans double comptage. Nous observons que les valeurs sont linéaires (R^2 de 0,996). Par conséquent, la prise en compte de double comptage ou non n'influe pas sur la classification des résultats mais seulement sur la valeur qui est plus élevée (de manière proportionnelle). Or, l'indicateur de circularité est un indicateur de comparaison à étudier en valeur relative. Les résultats ne sont donc pas impactés du moment que la même méthode est utilisée pour toutes les études.

En conséquence, pour la méthodologie présentée dans cette partie, nous décidons de maintenir l'usage de l'indicateur de (Zhang et al., 2021a) et non un indicateur alternatif qui éviterait le double comptage.

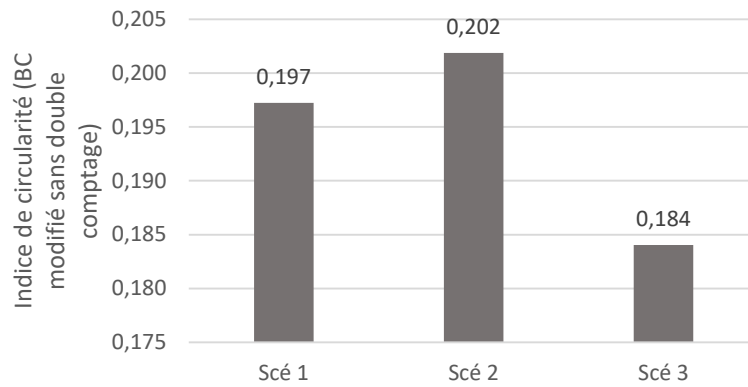


Figure 67 : Valeur de l'indicateur de circularité modifié et sans double comptage pour différents scénarios de probabilité d'occurrence

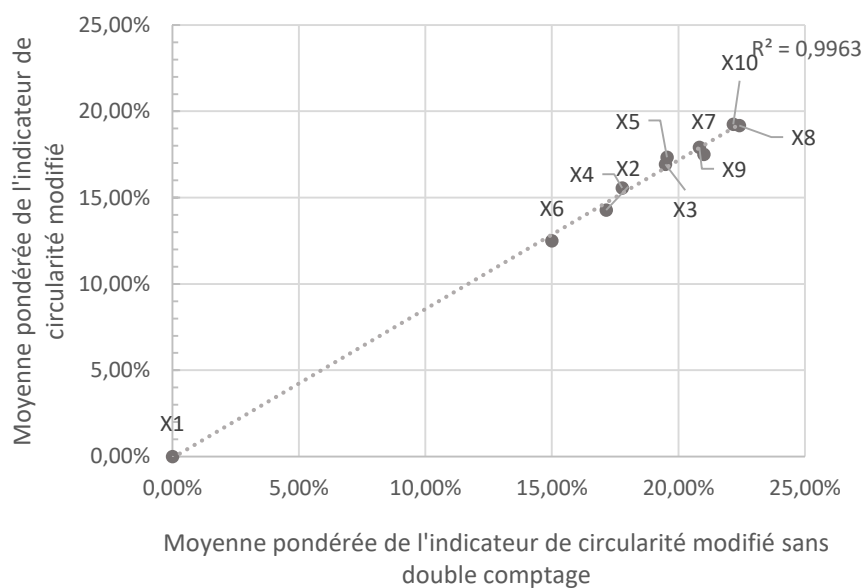


Figure 68 : Moyenne pondérée de l'indicateur BC pour chaque cycle de la matière en fonction de la moyenne pondérée de l'indicateur sans double comptage

Enfin, en perspective, il serait nécessaire d'appliquer cette méthode à plusieurs cas d'étude afin de vérifier les conclusions faites. Ensuite, suite au retour d'expérience de l'application sur de nombreux cas, il serait intéressant de détailler une échelle de l'indicateur BC modifié pour associer directement une valeur calculée à un qualificatif de la circularité de l'objet. Par exemple, un score de BC qui serait inclus dans les 5 % les plus élevés pourrait être qualifié de « très circulaire » et un score inclus dans les 5 % les moins élevés pourrait être qualifié de « très linéaire ».

2.4 CONCLUSION DU CHAPITRE 2

L'économie circulaire est en plein développement depuis les années 2010, et depuis 2017 pour le secteur du BTP. Ce concept vise à dépasser l'économie actuelle qualifiée de linéaire qui consiste à extraire la matière, l'utiliser puis l'éliminer. Le concept d'économie circulaire tend à optimiser l'usage de la matière afin de la réintégrer en fin de vie de l'objet dans un nouvel objet. Toutefois, il existe de nombreuses définitions intégrant chacune leurs spécificités et axes de réflexion (bilan de matière, économique, social, environnemental...).

Face à l'intérêt de l'économie circulaire, des outils de mesure sont développés mais, à l'instar de la définition de l'économie circulaire, chaque indicateur répond à une problématique et à des paramètres sensiblement différents. Ainsi, parmi les indicateurs de circularité existants, nombreux prennent simplement en compte un bilan de matière valorisée ou pas (Tval, MRS). Le MCI de la fondation Ellen Mac Arthur intègre en plus l'amortissement de la fonctionnalité. Néanmoins, aucun de ces indicateurs ne tient compte de la perte de valeur intrinsèque liée à la qualité de valorisation (réemploi, réutilisation, recyclage) ni la perte de valeur liée à l'usage futur de l'élément. Le premier point est résolu en partie par l'indicateur de (Zhang et al., 2021a) en prenant en compte un coefficient selon la qualité de valorisation. Une seconde limite aux indicateurs existants concerne la question de la prise en compte de plusieurs cycles. Focalisés sur la vie de l'objet, les indicateurs de circularité peinent à retranscrire le concept circulaire qui consiste à suivre le cycle de la matière et donc prendre en compte plusieurs cycles de l'objet.

Dans cette optique, nous avons adapté l'indicateur développé par (Zhang et al., 2021a) afin de prendre en compte le cycle de la matière et les incertitudes du devenir futur de la matière. L'adaptation de l'indicateur en s'appuyant sur le cas d'étude d'une structure de type nexorade consiste à retracer les différents scénarios de vie possible sur trois cycles du bois, puis à calculer l'indicateur de circularité BC pour chaque cycle de la matière. Nous associons à chaque cycle un facteur de probabilité d'occurrence. Nous obtenons ainsi un résultat unique représentatif des futurs possibles.

Cette étude nécessite une validation sur d'autres cas d'étude plus complexes. Cette généralisation permettra d'étalonner une échelle de circularité afin de la qualifier sans avoir besoin de la comparer à un autre objet.

Le travail de ce chapitre apporte une vision intégrée de la mesure de l'économie circulaire pour le BTP et un cadre plus général. Il met en avant les lacunes des indicateurs existants et propose des améliorations via une méthodologie de calcul basée sur le cycle complet de la matière et sur l'anticipation du devenir de la matière dans un futur incertain. Nous avons abordé les concepts de réemploi et de qualité de valorisation. Nous allons rentrer plus dans les détails de cette notion, clef de voute de l'économie circulaire, dans le chapitre suivant.

Chapitre 3. L'IDENTIFICATION DU POTENTIEL DE REEMPLOI

Le terme « réemploi » est utilisé règlementairement pour la première fois dans la loi du 15 juillet 1975, où il apparaît comme une méthode de valorisation des déchets au côté du recyclage. Nous avons vu précédemment (section 1.1.2) que l'article L541-1 du code de l'environnement définit ce terme de manière précise et établit une hiérarchie entre les différentes valorisations retranscrite sur la Figure 69, en distinguant le réemploi de la réutilisation. On parle de réemploi lorsqu'un élément est « réutilisé de nouveau pour un usage identique à celui [initialement] conçu » et de réutilisation lorsqu'un déchet est simplement utilisé de nouveau. La réutilisation nécessite alors une « préparation en vue de la réutilisation », définie comme une « opération de contrôle, de nettoyage ou de réparation [...] sans autre opération de prétraitement ». Ainsi, on différencie le réemploi de la réutilisation par le passage ou non au statut de déchet mais également par l'usage futur de l'élément, un élément réutilisé pouvant subir un détournement d'usage (Figure 70). Le réemploi est donc une valorisation plus exigeante, garantissant le maintien de la qualité d'usage. Le réemploi et la réutilisation permettent tous les deux le maintien de la qualité intrinsèque du matériau et l'allongement de la durée de vie des produits manufacturés.

Dans le secteur du bâtiment, l'article L541-4-4 de la loi anti-gaspillage pour une économie circulaire impose certaines conditions pour savoir si un élément passe par le statut de déchet. Ainsi, « 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 ».

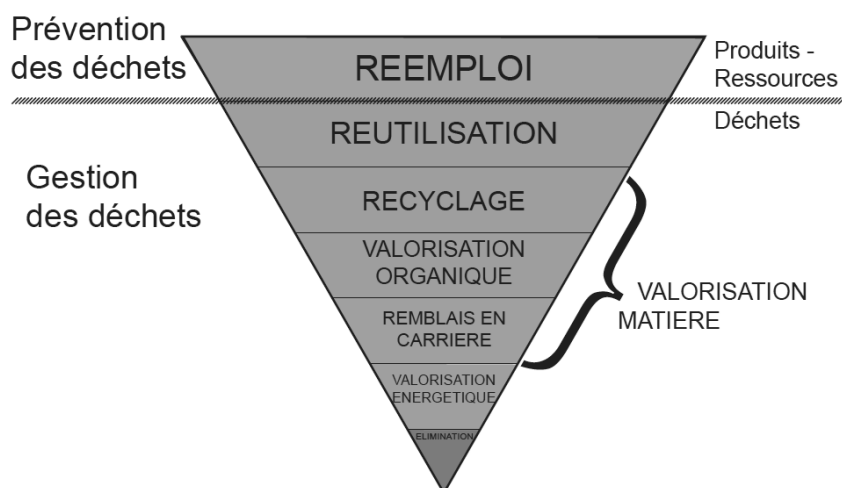


Figure 69 : Hiérarchie des modes de traitement des déchets (Design : Ekopolis)

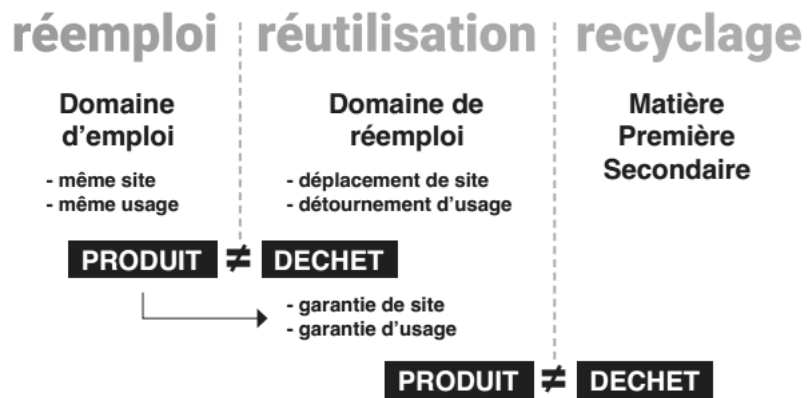


Figure 70 : La frontière produit-déchet d'un matériau (Benoit et al., 2018)

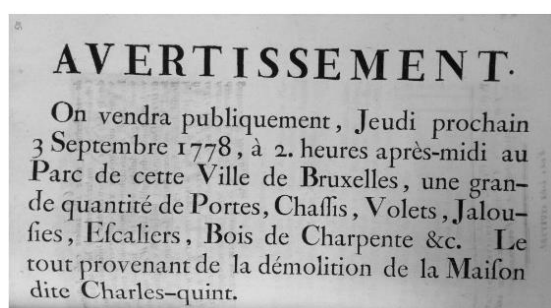
L'objectif de ce chapitre est d'explorer la notion de réemploi et de déterminer les conditions propices au réemploi. Ce chapitre se décompose en quatre parties. Nous étudions dans un premier temps les enjeux et la démarche du réemploi. Nous abordons ensuite les critères et méthodes pour déceler le potentiel de réemploi d'un élément. Enfin, dans les deux dernières parties, nous nous attelons à développer puis appliquer un indicateur permettant de déterminer le potentiel de réemploi avant déconstruction.

3.1 LE REEMPLOI ET LA REUTILISATION DANS LE SECTEUR DU BTP

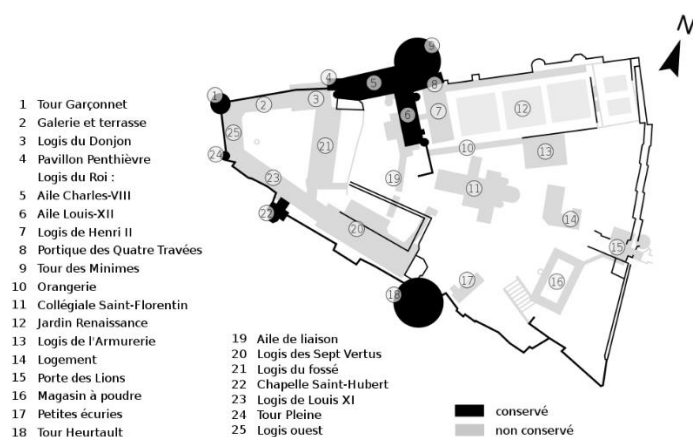
3.1.1 Contexte historique et cadre réglementaire du réemploi

3.1.1.1 Bref historique du réemploi

La littérature scientifique (Bernardi and Dessales, 2017; Benoit et al., 2018; Ghyoot et al., 2018; Aumard and Épaud, 2019; Boissard, 2020) recense de nombreux exemples de réemploi dans l'histoire. En effet, ce n'est qu'au tournant de la seconde révolution industrielle et de la seconde guerre mondiale que les techniques de réemploi (et plus largement la réutilisation, la réparation et le recyclage) ont progressivement été abandonnées au profit de l'économie linéaire, où les matériaux en fin de vie sont jetés.



Placard de mise en vente aux enchères des éléments d'une dépendance du palais de Coudenberg, (a) 1778 (bibliothèque royale de Belgique VH 24489 C-58) (Ghyoot et al., 2018)



Plan du château d'Amboise, en noir la partie conservée, en gris les parties déconstruites (b) servant de carrières de pierre. (Image : Sir Gawain, wikimedia common)

Figure 71 : Exemples de traces de réemploi et de réutilisation dans l'histoire

Ainsi, le réemploi est une pratique courante depuis des siècles. Il était principalement réalisé pour une raison pragmatique et économique, les matériaux étant rares et chers. Les ruines et les bâtiments à démolir ont de la sorte souvent servi de carrière de matériaux. Dans leur ouvrage, (Ghyoot et al., 2018) mettent en avant l'usage courant de la mise en vente aux enchères des bâtiments à démolir (Figure 71 (a)). De même, après la révolution française, de nombreux édifices religieux ou appartenant au patrimoine national ont subi des dégradations par des spéculateurs de matériaux. C'est le cas du château d'Amboise, où le consul Pierre-Roger Ducos, n'ayant pas les moyens de l'entretenir, décide de

vendre les pierres d'une partie du château entre 1806 et 1810²⁸. Cela a eu pour conséquence la destruction des deux tiers des bâtiments (Figure 71 (b)). L'abandon des pratiques de réutilisation et de réemploi sont la conséquence de trois facteurs combinés (Ghyoot et al., 2018) :

- **Augmentation de la pression foncière.** Au lendemain de la seconde guerre mondiale, le boom économique et l'exode rural rendent les centres urbains denses très attractifs. Les loyers augmentent, incitant les propriétaires à la transformation rapide de leurs biens pour optimiser les gains. Il est demandé aux démolisseurs de réaliser les travaux le plus rapidement possible.
- **Modernisation des techniques.** De nouveaux outils tels que l'outillage pneumatique et les bulldozers ont permis une mécanisation du processus de démolition. La démolition est devenue plus rapide mais moins qualitative. Les techniques ne permettent plus de récupérer proprement les matériaux.
- **Augmentation des coûts salariaux.** Le progrès social des trente glorieuses conduit à une augmentation des salaires des ouvriers. Cela diminue la rentabilité de la valorisation des matériaux face au temps de tri.

Ces trois facteurs ont pour conséquence l'augmentation importante des coûts de la déconstruction. Le surcoût du tri n'étant pas couvert par le prix des matériaux récupérés, les chantiers de déconstruction sont devenus des chantiers de démolition.

De nos jours, une prise de conscience s'effectue sur la « crise de la matière » (Choppin and Delon, 2014). L'épuisement des ressources et l'accumulation des déchets ont amené à s'interroger sur la nécessité d'une « transition matérielle » qu'est l'économie circulaire (section 2.1). Ainsi, les politiques publiques intègrent dorénavant des objectifs sur le réemploi et la réutilisation comme nous avons pu le voir en introduction du chapitre.

3.1.1.2 *Cadre réglementaire*

La loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) publiée au JO du 18 Août 2015 a pour ambition de réduire par quatre les émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050 (par rapport à 1990) mais également de réduire de 50 % la quantité de déchets mis en décharge à l'horizon 2050. Pour ce faire, la loi présente une mesure de lutte contre le gaspillage et de promotion de l'économie circulaire. Cette action se traduit notamment pour le secteur du BTP par l'objectif emblématique d'une valorisation des déchets de 70 % à l'horizon 2020.

La LTECV a été complétée en 2020 par la loi anti gaspillage pour une économie circulaire. Outre les compléments sur le vocabulaire mentionnés précédemment et l'instauration du diagnostic PEMD (produits, équipement, matériaux et déchets) (section 1.1.3.2), elle incite les maîtres d'ouvrages à privilégier le réemploi dans leurs appels d'offres. Par ailleurs, des fonds dédiés au financement du réemploi et de la réutilisation sont mis en place pour permettre le développement de ressourceries et recycleries.

Enfin, le plan national de prévention des déchets (PNPD) synthétise « les orientations stratégiques de la politique publique de prévention des déchets et décline les actions de prévention à mettre en œuvre »²⁹. Ce programme s'inscrit ainsi dans le cadre réglementaire européen et national. La nouvelle

²⁸ <https://cervieres.com/2015/05/23/souviens-toi-des-chateaux-livres-aux-vandales/>

²⁹ <https://www.ecologie.gouv.fr/cadre-general-prevention-des-dechets>

version 2021-2027 met à jour les mesures de planification et de prévention pour intégrer les enjeux de l'économie circulaire et du réemploi.

Concentré autour de 5 axes, le PNPD 2021-2027 (Figure 72) entend, dans son axe 3, « développer le réemploi et la réutilisation » en créant les conditions favorables et en soutenant les filières de réemploi et l'économie sociale et solidaire.



Figure 72 : Infographie sur le plan national de prévention des déchets 2021-2027 (MTE)

Les ambitions concernant les enjeux de diminution de la consommation des ressources et de la production de déchets sont donc réelles. Néanmoins, parmi l'ensemble des lois citées précédemment, aucune n'instaure de sanctions en cas de non-respect des objectifs. Les actions sont encore basées sur le volontariat où les institutions publiques doivent servir d'exemple.

3.1.2 Les enjeux du réemploi

Dans le cadre du précédent plan national de prévention des déchets 2014-2020, l'une des actions prioritaires concernant les déchets du BTP était d'identifier les leviers d'actions pour développer le

réemploi des matériaux du secteur. Depuis, de nombreux rapports d'étude, de bonnes pratiques ou encore de fiches techniques ont été publiés. C'est le cas par exemple de l'exposition *Matière grise* au Pavillon de l' Arsenal en 2014, du rapport REPAR#2 (Benoit et al., 2018), de l'ouvrage *Déconstruction et réemploi* réalisé par le collectif Rotor (Ghyoot et al., 2018) ou encore tout récemment du recueil *Déconstruction sélective – construction réversible* (Küpfer and Fivet, 2021) publié par le laboratoire Structural Xploration Lab de l'EPFL. Toutes ces références s'appuient sur des retours d'expériences de cas réels afin d'en faire ressortir des bonnes pratiques et de mettre en avant les freins, les leviers ainsi que les défis du réemploi et de la réutilisation pour le secteur du BTP. À partir des éléments présentés dans la littérature, nous allons dans cette partie synthétiser les enjeux majeurs liés au réemploi et mettre en évidence ses bénéfices.

3.1.2.1 Les freins au réemploi

Les méthodes de valorisation que sont la réutilisation et le réemploi font face à de nombreux freins limitant leur développement (Tableau 37). Nous détaillons les freins les plus importants dans la suite de cette partie (en gras sur le Tableau 37).

Tableau 37 : Les freins au réemploi et à la réutilisation dans le bâtiment. Adapté de (ADEME et al., 2016). Les freins en gras sont les freins principaux abordés dans cette revue de littérature.

Catégorie	Frein
Technique	Qualification et évaluation des performances techniques des matériaux et produits de réemploi
Juridique, procédures	Statut de déchet
	Statut juridique du don, de la mise à disposition
	Décennale, dommage ouvrage
	Marquage CE des matériaux et produits de réemploi
Économie	Garantie « produit » et assurance
	Marché peu développé, demande faible
	Adéquation offre/demande
Environnement, santé	Éligibilité aux aides financières
	Déclaration des performances environnementales et sanitaires
	Substances dangereuses réglementées
Acteurs	Qualité de l'air intérieur
	Prise en compte du réemploi dans le processus courant de conduite d'opération
	Pratiques sur le chantier

Frein technique

L'un des premiers freins, lors d'une volonté de réemploi ou de réutilisation d'un élément, est de savoir si l'élément souhaité satisfera techniquement à l'usage envisagé. Il s'agit de s'assurer que l'élément

est apte à l'emploi et de qualité suffisante. Ainsi pour les matériaux et produits de construction, d'après le règlement européen N° 305/2011³⁰, plusieurs exigences (selon si concerné) sont demandées :

- **Résistance mécanique** afin d'éviter :
 - L'effondrement de l'ouvrage,
 - La déformation excessive,
 - Les conséquences sur les autres ouvrages,
 - Les dommages résultant d'évènements accidentels ;
- **Sécurité en cas d'incendie** pour garantir :
 - La stabilité des éléments porteurs pendant une durée indéterminée,
 - L'apparition et la propagation limitée du feu et des fumées,
 - La sécurité des occupants et des équipes de secours ;
- **Hygiène, santé et environnement**, pour tout le cycle de vie, afin de limiter l'impact du fait de :
 - Dégagement de gaz toxiques, de substances dangereuses, de composés organiques volatils, de radiations dangereuses... dans l'eau et l'air,
 - Mauvaise évacuation des déchets,
 - Humidité interne au produit ou en surface intérieure ;
- **Sécurité d'utilisation et accessibilité** (glissades, chutes, brûlures, électrocutions... accessibilité pour les personnes en situation de handicap) ;
- **Protection contre le bruit** ;
- **Économie d'énergie** et isolation thermique ;
- **Utilisation durable des ressources naturelles** en permettant :
 - La réutilisation ou la recyclabilité des constructions et de la matière,
 - La durabilité,
 - L'usage de matières (primaire ou secondaire) respectueuses de l'environnement.

À noter que cette dernière exigence met en première ligne le secteur de la réutilisation et le réemploi.

Or, après un cycle de vie dans un bâtiment ou une infrastructure, les informations concernant les éléments sont rarement connues. En effet, les fiches techniques originales peuvent être perdues, inexistantes ou encore incomplètes ou ne répondant pas aux critères d'analyse actuelle. Quand bien même la fiche technique existerait, il se pose la question de l'état résiduel de l'élément suite à sa première vie. La requalification des éléments est donc un enjeu fort pour développer à plus large échelle le réemploi.

Toutefois, les matériaux et produits de construction de réemploi n'ont pas nécessairement à répondre aux exigences des éléments neufs. Le marquage « CE » n'est pas obligatoire pour les produits issus du réemploi et de la réutilisation car « dans l'état actuel du droit [...] les produits de construction de réemploi s'apparentent [...] à des produits non harmonisés » (Seys, 2017). Le marquage « CE » est donc une démarche volontaire via l'évaluation technique européenne (ETA). Néanmoins, contrairement aux productions industrielles neuves qui permettent un contrôle uniforme et relativement facile de la qualité des produits, les éléments de réemploi sont, du fait de l'incertitude pendant la vie en œuvre et la fin de vie, tous différents et ont potentiellement des caractéristiques résiduelles hétérogènes. La certification est alors plus complexe à obtenir ou bien se fait pour un lot ou un objet spécifique.

³⁰ Annexe 1, RÈGLEMENT (UE) N° 305/2011 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 9 mars 2011 établissant des conditions harmonisées de commercialisation pour les produits de construction et abrogeant la directive 89/106/CEE du Conseil

La demande et l'obtention d'une ETA peuvent mener à la production et la publication d'un document d'évaluation européen (EAD) qui comblera le manque d'harmonisation pour l'élément en question. L'EAD est une méthode d'harmonisation pour l'évaluation technique d'un produit de construction. Ce document sert de base pour l'obtention simplifiée d'une ETA.

On peut mentionner comme exemple le cas des briques de réemploi : en 2013 une entreprise danoise souhaitait obtenir le marquage CE pour ses briques de réemploi comme gage de qualité pour ses clients. L'entreprise a alors commencé une procédure d'obtention de l'ETA par un organisme d'évaluation. À l'issue de cette procédure, l'EAD n°170005-00-0305 consacré aux briques de réemploi a été établi. Celui-ci forme l'un des premiers EAD pour les matériaux d'occasion. Il a depuis été publié au journal officiel le 28 octobre 2020. Ainsi, d'autres producteurs pourront, si leur produit est couvert en intégralité par cette EAD, l'utiliser pour l'obtention de leur propre ETA.

À défaut de certification « CE », les produits suivent « le régime applicable aux produits non-harmonisés au sein du marché intérieur articulé autour de **l'obligation générale de sécurité des produits**, d'une part, et du **principe de reconnaissance mutuelle** [*i.e.* considérer les autres législations des états membres comme équivalentes], d'autre part» (Seys, 2017)

Pour justifier les caractéristiques techniques, il existe d'autres méthodes de certifications proposées notamment en France par le CSTB³¹ sur la base du volontariat :

- **Avis technique** (ATec), qui procure un avis formulé par un groupe d'experts (GS) sur un produit nouveau et pour un emploi défini. Il indique notamment si le produit satisfait à la réglementation, s'il est apte à l'emploi en œuvre et s'il est durable. Sa durée de validité est de 2 à 7 ans.
- **Appréciation technique d'expérimentation** (ATEx) : « C'est une procédure rapide d'évaluation technique formulée par un groupe d'experts sur tout produit ou procédé innovant » (CSTB). Elle s'applique aux procédés ne faisant pas encore l'objet d'un avis technique. L'ATEx ne concerne qu'un chantier déterminé. Il concerne principalement les chantiers expérimentaux.

Dans leur rapport sur l'identification des freins au réemploi, (ADEME et al., 2016) classent la « qualification / performance » comme un frein à forte criticité. Cependant, les solutions, qui consistent à développer des protocoles et préconisations pour mettre au point, à terme, des normes produit, sont jugées faisables.

Freins juridique et assurantiel

Le projet de recherche BBSM (Le bâti bruxellois, source de nouveaux matériaux), montre que les acteurs professionnels de la construction et les institutions publiques « ont des difficultés à identifier le cadre juridique auquel ils doivent se référer » (Seys, 2017). Le cadre juridique englobe notamment deux grandes thématiques : la responsabilité des acteurs lors d'un projet de réemploi/réutilisation ainsi que les garanties « produit ».

Par ailleurs, (ADEME et al., 2016) précisent que certaines plateformes dédiées aux matériaux « peinent à placer leurs produits auprès des professionnels ». Cette défiance serait liée à « la garantie décennale, les entreprises craignant de ne pas être couvertes » en cas de recours à des éléments de réutilisation ou de réemploi. Les clients sont principalement des particuliers.

³¹ <https://evaluation.cstb.fr/fr/evaluations/>

Pour un produit (quel que soit le secteur), il existe trois garanties :

- **Garantie légale de conformité** de 2 ans (pour un produit neuf) ;
- **Garantie légale de vices cachés** (applicable pour un produit d'occasion ou neuf) ;
- **Garantie commerciale ou contractuelle** (non obligatoire, applicable pour un produit d'occasion ou neuf).

En complément, spécifiquement dans le secteur de la construction, il existe :

- **Garantie biennale de bon fonctionnement** : pour les équipements séparables du gros œuvre (applicable aux produits neufs seulement), elle est similaire à la garantie de conformité ;
- **Garantie décennale dommage ouvrage** : le constructeur est responsable des désordres qui « affectent la solidité de l'ouvrage et le rendent inhabitable ou impropre à l'usage auquel il est destiné »³² (applicable après tous travaux concernés).

Ainsi, une **garantie contractuelle** de type produit ou biennale appliquée aux matériaux de réutilisation ou de réemploi permettrait de rassurer les acquéreurs. (ADEME et al., 2016) ont relevé que certaines plateformes de ventes d'équipements de réemploi procèdent à un échange du produit en cas de défaillance. Ce frein est faiblement contraignant car cela s'applique aux éléments peu techniques (ex : poignée de porte) ou facilement remplaçables (ex : robinetterie, revêtement de sol...).

La **garantie décennale** est plus complexe. Pour se protéger, le constructeur doit souscrire une assurance *de responsabilité civile décennale* et le maître d'ouvrage une *assurance dommage ouvrage*. Cependant, comme nous avons pu le voir précédemment, le réemploi et la réutilisation sont encore des domaines non traditionnels (par opposition au domaine traditionnel disposant de normes, documents techniques unifiés (DTU), règles professionnelles et règles de l'art). Or, les contrats classiques des assureurs concernent le domaine traditionnel. Les acteurs doivent donc compléter leur contrat pour assurer le domaine non traditionnel. La SMA-BTP (un des assureurs du BTP) précise que « l'évaluation technique est une condition pour être assuré ». Ainsi, si le produit de réemploi/ réutilisation ne dispose pas d'ATec, il est nécessaire de réaliser un ATEc pour chaque chantier et chaque produit concerné. Ceci a donc des répercussions monétaires à la fois pour le coût de l'assurance mais aussi pour la réalisation de l'ATEc.

Par extension, concernant la question de la responsabilité des acteurs, cela implique que le maître d'ouvrage soit au courant de la mise en place d'éléments de réutilisation ou réemploi. Ainsi, soit l'entreprise ou le maître d'ouvrage (MOA) souhaite utiliser des éléments de réemploi avec de faibles exigences techniques et donc l'entreprise (respectivement le MOA) devra se mettre d'accord avec le MOA (respectivement l'entreprise) sur les garanties contractuelles, soit les éléments de réemploi sont très techniques et il faudra s'orienter vers l'assurance et leur fournir les justificatifs nécessaires.

Frein économique

« Remplir un hangar d'éléments de réemploi est aisé. Écouler son contenu constitue une autre paire de manche ». Par cette remarque, (Ghyoot, 2017) met en exergue le manque de maturité du marché de la réutilisation et du réemploi.

En effet, le marché de la réutilisation et du réemploi est actuellement limité car selon (Ghyoot, 2017) :

³² <https://www.service-public.fr/particuliers/vosdroits/F2034>

- **L'offre est imprévisible :**
 - o Gisement urbain hétérogène : produits d'époques et d'état très différents ;
 - o Temporalité inconnue : date de fin de vie du bâtiment non prévue ;
 - o Variabilité géographique : le gisement est réparti en de nombreux bâtiments plus ou moins éloignés du chantier de construction ;
 - o Variabilité des types de propriétaires : le gisement est réparti entre plusieurs bâtiments et plusieurs propriétaires.
- **La demande est peu développée :** tant que les « villes continuent à se transformer » des éléments éligibles au réemploi et à la réutilisation « vont continuer à se libérer » (Ghyoot, 2017). Ainsi, l'approvisionnement en matériaux est plutôt garanti. Les filières doivent se structurer pour élargir leur offre et donc stimuler la demande. La présence d'opérations pilotes avec des ambitions croissantes est considérée comme une voie royale pour développer l'offre.

En parallèle, (ADEME et al., 2016) mettent également en évidence que « les plateformes et ressourceries peinent à proposer une variété de produits suffisante et des quantités en adéquation avec la demande car bien souvent elles ne disposent pas d'un espace suffisant et ce, en raison des coûts liés à l'acquisition ou à la location de locaux ». Il y a donc aussi un frein lié au stockage et la gestion des flux. Ce sont deux freins sur lesquels il est nécessaire d'agir pour développer le marché.

3.1.2.2 Les leviers et bénéfices économiques

Toutefois, il existe également des leviers qui peuvent aider au développement des pratiques de réemploi et de réutilisation notamment l'augmentation des coûts de mise en décharge et la création d'emploi.

Augmentation des coûts de mise en décharge

La taxe générale sur les activités polluantes (TGAP) est une taxe que toute entreprise doit payer si elle pratique une activité polluante ou bien utilise des produits polluants³³. Dans le cadre de la gestion des déchets, la TGAP *déchets* s'applique aux activités de stockage, de transfert vers un autre pays ou encore aux activités de traitement thermique des déchets dangereux et non dangereux. Ainsi, les centres de stockages (ISDND, ISDD) doivent payer cette taxe (à la tonne) qui a indéniablement une répercussion sur le prix du dépôt des déchets. Basée sur le principe de pollueur payeur, cette taxe est née en 2000 (Art. 45 Loi n° 98-1266 du 30 décembre 1998 de finances pour 1999). Après une première augmentation en 2016, la taxe augmente de nouveau depuis 2019 et augmentera jusqu'en 2025. Par exemple, pour une installation de stockage sans valorisation des biogaz, le tarif³⁴ à la tonne en 2019 était de 41 €, il passe à 54 € en 2021 et s'élèvera à 65 € en 2025.

Dans leur étude de prix, (ADEME, 2012) fait ressortir le prix moyen d'élimination des déchets inertes du BTP sans la TVA et la TGAP. Les prix sont les suivants :

- « Entre 3 et 14 €/t pour la catégorie béton, brique, tuile, céramique, pierre, ardoise,
- Entre 5 et 11 €/t pour les déchets terreux,
- Entre 2 et 8 €/t pour les mélanges d'inertes,
- Entre 6 et 55 €/t pour les mélanges de déchets inertes et non inertes. »

³³ <https://www.demarches.interieur.gouv.fr/professionnels/taxe-generale-activites-polluantes-tgap> consulté le 20 janvier 2022

³⁴ BAREME - TCA - Taxe générale sur les activités polluantes, <https://bofip.impots.gouv.fr>

Ces données sont certes assez anciennes, néanmoins cela nous montre leur grande variabilité.

Ainsi, le coût de stockage des déchets et surtout l'incitation financière liée à la TGAP poussent à la mise en œuvre de solutions de valorisation des déchets, notamment le réemploi (prévention des déchets) et la réutilisation. En parallèle, la mise en place de la filière REP bâtiment (section 1.1.3.1) combinée à la contribution climat énergie (ou taxe carbone) permet d'augmenter le prix des produits neufs les plus émetteurs. Par conséquent, cela permet de diminuer l'attractivité des produits neufs fortement émetteurs au profit des éléments de seconde main (réemploi, réutilisation), même si cela n'est pas encore étayé par des données chiffrées.

Création d'emploi

Il est reconnu que le réemploi nécessite une main d'œuvre importante (Benoit et al., 2018) : « les opérations de manutention et de traitement requièrent généralement un apport de main d'œuvre plus conséquent que dans les filières plus classiques ». Par conséquent ces coûts supplémentaires impactent le prix de vente. Néanmoins, certains produits peuvent rester rentables malgré la forte demande en main d'œuvre. C'est le cas par exemple de la brique de réemploi qui, malgré la main d'œuvre nécessaire pour les phases de tri, de nettoyage et de conditionnement, se situe à la frontière de la rentabilité avec un coût inférieur de 10 centimes (soit environ un gain de 10 % par rapport au produit neuf) à celui de la brique pleine neuve, selon une étude du CSTB³⁵ (Figure 73). En outre, l'impact sur la création de l'emploi est important, 211 jours de travail sont nécessaires pour 10 000 briques de réemploi contre seulement 8 jours pour des briques neuves.

Pour compléter, pour le projet REPAR#2, Bougrain et Laurenceau réalisent une analyse économique de plusieurs cas d'études de réemploi (Benoit et al., 2018). Les observations sont similaires au cas de la brique. Sur un cas de pavage en béton (Figure 86, section 3.1.4.3), ils obtiennent un gain de 10 € (gain de 28 %) par m² et une demande de 3,9 jours de travail en plus pour 100 m². Pour un pavillon en béton (Figure 86, section 3.1.4.3), ils obtiennent deux conclusions différentes. Ainsi, le scénario de réemploi permet d'économiser 77 € (par m² de mur, soit un gain de 23 %) face à un scénario en brique pleine neuve mais il coûte 92 € de plus face à un scénario en parpaings de béton neuf (soit un surcoût de 56 %). Dans tous les cas, pour 100 m² de mur, cela crée 31,3 jours d'emploi soit entre 10 % et 120% d'emploi en plus.

Briques en réemploi		Briques neuves	
0.79 E ht		0.90 E ht	
Emplois créés pour 10000 briques réemployées		Emplois détruits pour 10000 briques neuves	
études amont	0,10	Transport des matériaux réemployés	- 0,05
Tri mécanique (préparation 1)	0,17	Traitement des matériaux	0,60
stockage	-	fabriqation des matériaux neufs	5,00
Transformation des matériaux (préparation 2)	210,40	transport matériaux neufs	2,31
TOTAL	211	TOTAL	8

Impact très marqué sur l'emploi local

Figure 73 : Impact économique de la filière Brique selon une étude du CSTB (images : Julie Benoit, Bellastock)

³⁵ Présentation Julie Benoist , Bellastock

Pour résumer, nous pouvons dire qu'économiquement le réemploi peut être dans certains cas à la frontière de la rentabilité, néanmoins, comme il mobilise plus de personnel et donc permet de développer de nouveaux emplois, le bénéfice est également social.

3.1.2.3 Les bénéfices environnementaux

L'idée initiale de réutiliser et réemployer des éléments est basée principalement sur l'intérêt environnemental face aux éléments en matériaux neufs. L'intérêt environnemental regroupe ici la question de l'épuisement des ressources naturelles, de la production de déchets ainsi que les indicateurs environnementaux de l'ACV (section 1.3.1.2). En effet, la réutilisation et le réemploi consistent à « récupérer la valeur enfouie dans le gisement » (Ghyoot et al., 2018). Il est ainsi possible de préserver les ressources en prolongeant la durée de vie d'un produit.

Plusieurs analyses de cas d'études confirment les bénéfices environnementaux du réemploi (Sinclair, 2006; EPA, 2010; Aye et al., 2012; Glias, 2013; Benoit et al., 2018; Minunno et al., 2020; Kamp, 2021).

En 2002, l'office américain (OSWER) de l'agence pour la protection de l'environnement (EPA) a initié une série de projets pilotes dont (EPA, 2010) qui consiste à valoriser 44 % de la déconstruction d'une maison abandonnée des années 1930. 20 % en masse des éléments ont ensuite permis de construire une nouvelle habitation. Au-delà d'être 5 % moins chère qu'une démolition classique, cela a permis d'éviter l'enfouissement de 8,84 tonnes de déchets mais aussi d'éviter l'émission de 9,83 t CO₂ eq. par rapport à la maison neuve équivalente.

Plus récemment, (Glias, 2013) a conduit une étude sur le réemploi des structures en béton préfabriquées. Il réalise une ACV d'1 m² de bâtiment et met en avant l'avantage du bâtiment en réemploi pour l'indicateur changement climatique (Figure 74), notamment pour les courtes distances entre le chantier de déconstruction et le chantier de construction. Il montre que le transport des éléments réemployés peut fortement modifier le résultat. L'équilibre est atteint pour un peu moins de 500 km pour leur cas d'étude.

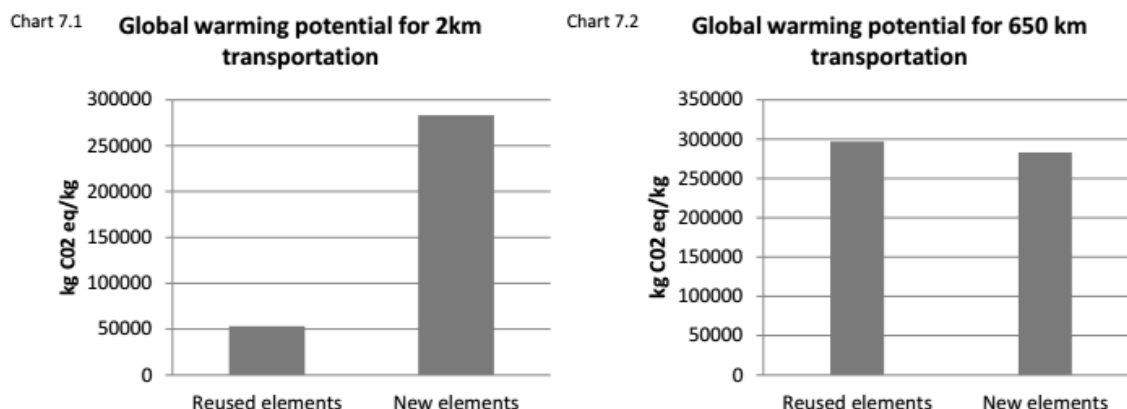


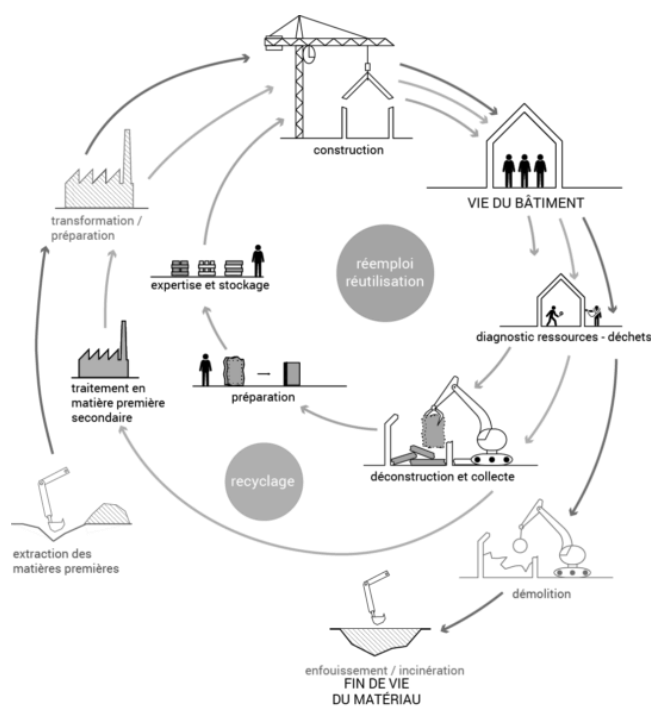
Figure 74 : Comparaison d'un m² de bâtiment contenant soit une structure en réemploi soit une structure neuve (Glias, 2013) en fonction de la distance de transport des structures réemployées

Encore plus récente, l'étude de (Minunno et al., 2020) explore les bénéfices environnementaux d'un bâtiment modulaire. En s'appuyant sur un cas d'étude, les auteurs comparent deux bâtiments : l'un modulaire réemployable et l'autre « linéaire » *i.e.* non réemployé. Le bâtiment modulaire a été conçu selon le principe des 3R (réduire, réutiliser, recycler) de l'économie circulaire. Le bâtiment « linéaire » est un bâtiment modulaire classique construit pour être déplacé une seule fois. Leur système comprend les intrants et extrants liés au transport, aux déchets générés, aux matériaux valorisés et au

procédé d'assemblage. Le bénéfice du réemploi est pris en compte par le calcul de l'impact évité. Par exemple pour le bâtiment modulaire réemployable, il est possible de récupérer plus de 16 tonnes d'acier de structure sur un total de 22 tonnes. Ainsi, pour l'impact sur le changement climatique, le bâtiment modulaire réemployable est plus de 8 fois moins impactant (5,4 *versus* 44,5 t CO₂ eq.). Ils ont par ailleurs réemployé 62 % en masse du bâtiment.

3.1.3 La démarche générale du réemploi et de la réutilisation

Comme nous l'avons vu précédemment, plusieurs projets de recherche ont travaillé sur la démarche pour le réemploi des éléments de construction. Plusieurs études (Le projet européen Interreg FCRBE³⁶ (Facilitating the circulation of reclaimed building elements in Northwestern Europe), Repar#2, (Kamp, 2021)) se sont intéressées à la démarche pour le réemploi des éléments de construction, en identifiant les grandes étapes qui la structure Figure 75 (respectivement (a) à (c)). En se basant sur ces travaux, nous proposons une synthèse de la démarche générale au réemploi des matériaux et produits de construction en 4 étapes et 7 phases, détaillées dans cette section Figure 75 (d).



(a)

³⁶ <https://www.nweurope.eu/projects/project-search/fcrbe-facilitating-the-circulation-of-reclaimed-building-elements-in-northwestern-europe/> consulté le 17 janvier 2022

Interreg FCRBE est un projet inter-régional qui s'est déroulé de janvier 2019 à janvier 2022. Il regroupe huit partenaires du secteur de la construction provenant de trois pays (France, Belgique, Royaume Uni). L'objectif du projet est d'accroître la visibilité du secteur du réemploi et de transmettre les bonnes pratiques. Un ensemble de méthodes, retours d'expériences, rapports et annuaires sont mis à disposition en ligne en libre accès.

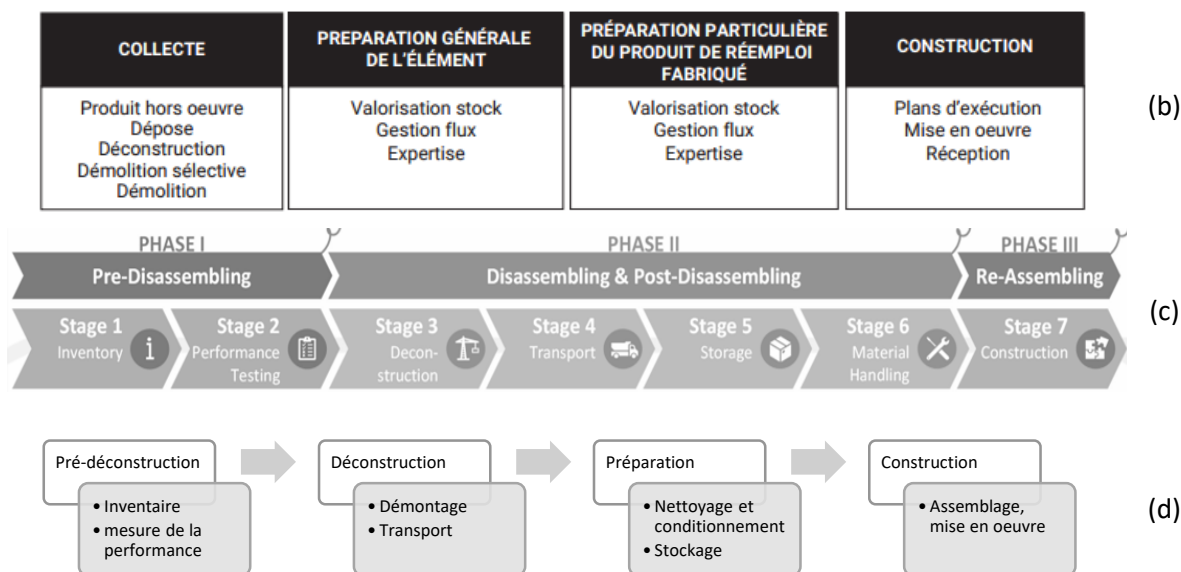


Figure 75 : Mise en perspective des étapes de l'économie linéaire et des étapes de l'économie circulaire pour le secteur du BTP. Les phases de la démarche du réemploi, du démontage au remontage : (a) FCRBE (Les étapes nécessaires au réemploi sont notées en jaune) (Image : Bellastock³⁷) (b) Repar#2 (c) (Kamp, 2021) (d) Démarche proposée dans cette thèse

3.1.3.1 Pré-déconstruction

Cette étape consiste en deux phases complémentaires : l'inventaire et la caractérisation de la performance.

L'analyse est conduite à l'aide du diagnostic ressources ou diagnostic PEMD (section 1.1.3.2). Ce diagnostic présente notamment deux grandes étapes communes pour tous les types d'éléments à réemployer (Benoit et al., 2018) :

- « Étape 1 : **caractériser le gisement et ses possibilités de réemploi** ». Cette étape consiste à analyser les matériaux pour identifier des débouchés notamment ceux potentiellement réemployables. Cette étape peut amener à l'évaluation par un bureau de contrôle des solutions envisagées ;
- « Étape 2 : **fiabiliser les filières de débouchés** ». Cette seconde étape consiste à favoriser une massification du réemploi en proposant « un cadre technique et administratif » pour le matériau diagnostiqué.

La première étape est illustrée par la Figure 76. Cette figure nous montre notamment le besoin d'acquérir de l'information sur le matériau. Les informations recueillies permettent d'orienter le matériau vers un ou plusieurs domaines d'emploi.

³⁷ <https://www.bellastock.com/projets/fcrbe/> consulté le 17 janvier 2022

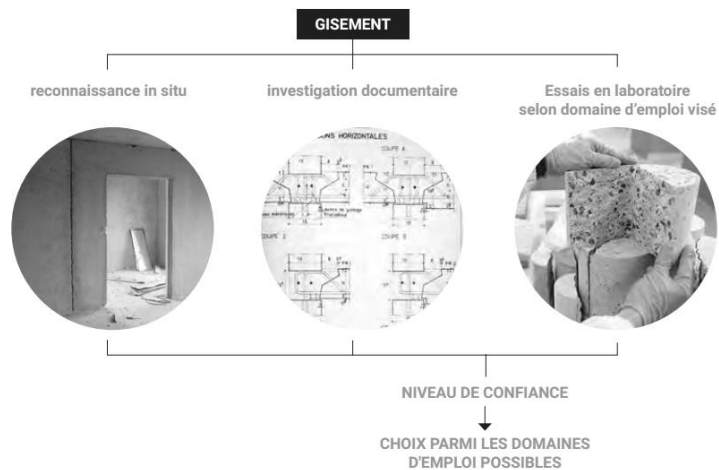


Figure 76 : Méthode de caractérisation d'un matériau pour un domaine d'emploi. Extrait REPAR 2 (Benoit et al., 2018).

(ADEME et al., 2016) notent l'importance de « maîtriser la constance de la **qualité** et la **réplicabilité** des expériences de réemploi ». Il s'agit donc de bien identifier la quantité et la qualité du gisement. Pour cela, plusieurs informations sur l'élément doivent être rassemblées telles que l'état, la quantité, la localisation, les dimensions, l'historique...

La mesure de la performance va permettre, comme nous l'avons vu précédemment (section 3.1.2.1), de lever les freins assurantiels et juridiques.

En évaluant et comparant les différentes stratégies et possibilités de réemploi et de réutilisation, ces deux phases permettent de définir et fixer les potentiels usages des matériaux et produits ainsi que la méthode de déconstruction associée. Les choix réalisés sont faits en fonction « des contraintes techniques, économiques, des filières exutoires disponibles ainsi que du potentiel environnemental » (Küpfer and Fivet, 2021).

3.1.3.2 Déconstruction

Lorsque le ou les usages futurs sont définis, la méthode de dépose des éléments est fixée. Une phase de planification permet de définir l'organisation entre les acteurs et les responsabilités de ces derniers. La déconstruction sélective a pour objectif de « conserver au mieux la valeur et l'énergie grise contenue » (Küpfer and Fivet, 2021) dans les composants. Ainsi, (Küpfer and Fivet, 2021) précisent que les objectifs de la dépose sont les suivants :

- « Limiter la production de déchets » : en limitant les pertes ;
- « Conserver la valeur intrinsèque des composants » : en limitant le nombre d'éléments déclassés susceptibles de subir une valorisation moins qualitative.

Afin de ne pas endommager les éléments, les méthodes de démontage doivent être adaptées en fonction des objectifs. Pour cette étape, (Ghyoot, 2017) met en avant le besoin supplémentaire en main d'œuvre comparativement à une démolition.

Les exutoires des éléments déposés sont de deux types :

- *In situ* : les éléments seront réutilisés ou réemployés directement sur place. Le transport des composants peut être alors nul si le stockage est également réalisé sur place ;
- *Ex situ* : Les éléments sont installés sur un autre chantier ou vont être stockés en attente de débouchés. Ce scénario fait intervenir du transport.

Les moyens de transport sont adaptés en fonction des quantités et dimensions mais également en fonction des aspects économiques et environnementaux. (Glias, 2013) distingue cinq chemins possibles pour les matériaux démontés :

- Chantier de déconstruction → Chantier de construction ;
- Chantier de déconstruction → Plateforme de stockage ;
- Chantier de déconstruction → Centre de recyclage ;
- Plateforme de stockage → Chantier de construction ;
- Plateforme de stockage → Centre de recyclage.

Il est à noter que le centre de recyclage peut être un lieu de stockage ou le lieu de traitement des parties d'éléments non (ou plus) valorisables par le réemploi et la réutilisation. (Glias, 2013) précise que chaque chemin implique une stratégie de gestion des éléments différente, dont le choix dépendra du coût, des délais, de la place nécessaire, de l'impact environnemental et du risque pour l'élément.

3.1.3.3 Préparation

« La requalification doit être menée pour un usage donné. » (ADEME et al., 2016). La requalification (ou préparation) est une phase à l'issue de laquelle l'élément est considéré comme prêt à être réemployé. Cette phase peut prendre plusieurs formes en fonction des besoins. Cela peut passer par un simple nettoyage, par des réparations légères ou encore une modification pour correspondre à l'usage envisagé pour sa seconde vie, l'objectif étant de pouvoir utiliser l'élément déposé avec le minimum de modifications. (ADEME et al., 2016) ajoutent que « suivant le couple produit/usage » cette phase de préparation peut « relever d'une procédure d'autocontrôle sur la base d'exigences essentielles ou d'un contrôle par une tierce partie » de plus ou moins fortes exigences en fonction des contraintes techniques. Par ailleurs, « ces procédures de requalification sont [encore] à définir » pour une bonne partie des éléments.

L'élément est ensuite conditionné pour être livré, vendu ou utilisé.

Ainsi, on comprend qu'un lieu de stockage est nécessaire pour réaliser ces préparations et/ou pour conserver les éléments en attente d'exutoires. Il est néanmoins nécessaire de connaître voire d'imposer les conditions de stockage des éléments de réemploi car certains facteurs, comme les conditions météorologiques (chaud, froid, pluie, humidité...) peuvent causer des détériorations.

3.1.3.4 Construction

C'est la dernière étape (et la finalité) du processus de déconstruction en vue du réemploi ou de la réutilisation. « L'intégration du produit [...] est une étape qui démarre à la fourniture du matériau sur le chantier récepteur » (Benoit et al., 2018). La nouvelle construction prend en compte dans sa conception les caractéristiques propres de l'élément. Par extension, la question de la maintenance doit être abordée de même que la question de la traçabilité tout au long de la nouvelle vie. Un enjeu fort est porté sur la recherche d'un exutoire : comme nous avons pu le voir dans la section 3.1.2.1 à propos du frein lié à la maturité du marché. Ainsi, plus l'élément de réemploi sera documenté et aura un principe de mise en œuvre le plus proche des éléments similaires neufs, plus le débouché sera facile à trouver (Glias, 2013).

3.1.4 Exemples et principaux matériaux réemployés

Dans leur étude, (ADEME et al., 2016) recensent cinq principales origines des matériaux de réemploi. La première regroupe le cœur des matériaux de réemploi, ce sont les matériaux issus de la dépose. Ces derniers ayant eu une première vie en œuvre, il s'agit de leur donner une seconde vie. Les autres origines comprennent les matériaux neufs non utilisés. On y trouve les refus de chantier, les chutes de pose, les chutes de production et les invendus et surplus. Il s'agit alors de leur donner une première vie en œuvre. Cela s'inscrit dans le contexte de prévention des déchets. Pour illustrer le réemploi, nous présentons plusieurs exemples de cas de réutilisation et de réemploi pour les éléments des travaux publics et du bâtiment.

3.1.4.1 Exemples de réemploi et réutilisation pour les travaux publics

Selon les retours d'expériences et les observations de (ADEME et al., 2016), les pratiques actuelles de réutilisation et de réemploi dans le secteur des travaux publics « sont contrastées ». Certaines pratiques sont ancrées dans le secteur comme par exemple le traitement avec liant hydraulique pour les déblais de terre. En parallèle certaines pratiques concernant les matériaux « à forte valeur ajoutée » tels que les pavés et les bordures sont mises en place si le « gisement est significatif ». Enfin, à l'extrémité du spectre, le réemploi et la réutilisation des autres matériaux sont faibles en raison des freins mentionnés au cours de la section 3.1.2.1. Les principaux matériaux concernés par la réutilisation et le réemploi sont listés dans le Tableau 38.

Tableau 38 : Principaux éléments des Travaux Publics pouvant faire l'objet de réemploi ou de réutilisation. Adapté de (ADEME et al., 2016)

Usages	Matériaux et produits
Structure des sols et voiries	Terres excavées
	Déblais/ gravats
	Granulats
Roulement voirie	Pavés et bordures
	Agrégats d'enrobés
Voies ferrées	Ballasts
	Traverses bois
Culture des sols	Tangue
	Terre végétale
Structure	Blocs béton
	Éléments en bois
	Poteaux, poutres en béton armé
	Éléments en acier

Pour illustrer avec un exemple, le centre de ressources économie circulaire et déchets de l'Ademe (OPTIGEDE) a publié plusieurs fiches de partage d'expérience dont celle concernant la *réutilisation du*

ballast de dépose des voies ferrées³⁸. Il s'avère que pour les ballasts, il existe deux valorisations : le réemploi à l'aide d'un criblage réalisé sur train usine (Figure 77) avec potentiellement 30 à 50 % réemployés sur site ou une réutilisation en sous couche routière.



Figure 77 : Dispositif de nettoyage de Ballast intégré au train usine. Il intègre un crible de tri et un crible-laveur à haute pression³⁹

3.1.4.2 Exemples de réemploi et réutilisation pour le bâtiment

La réutilisation et le réemploi dans le bâtiment touchent tous les corps d'état, de l'aménagement intérieur au gros œuvre en passant (de manière non exhaustive) par les façades, les menuiseries, les sols, les cloisons et les éléments techniques. Le Tableau 39 regroupe les principaux matériaux réutilisés et réemployés dans le secteur du bâtiment de nos jours. Les éléments issus du gros œuvre, et notamment les éléments structuraux, sont des éléments dont le réemploi, et dans une moindre mesure la réutilisation, sont moins courants (Küpfer and Fivet, 2021). Ils sont présentés dans la section suivante (3.1.4.3) dédiée à ces produits.

Tableau 39 : Principaux éléments de Bâtiment pouvant faire l'objet de réemploi ou de réutilisation. Adapté de (ADEME et al., 2016)

Usages	Matériaux et produits
Structure	Poteaux et poutres métalliques
	Dalles en béton
	Briques/ parpaing
	Bois (poteaux, poutres, pannes, chevrons...)
Enveloppe extérieure	Tôles
	Tuiles
	Bois (panneaux, planches)

³⁸ <https://www.optigede.ademe.fr/fiche/reutilisation-du-ballast-de-depose-des-voies-ferrees> , consulté le 19 janvier 2022

³⁹ <https://www.plassertheurer.com/fr>

Aménagement/finitions	Bois (panneaux, planches, faux plancher...)
	Isolants (dont faux plafonds)
	Carrelages
	Portes
	Parquets
	Fenêtres (entières/châssis/vitrage)
	Pierres
Équipements techniques	Équipements sanitaires

Les éléments mobiliers tels que les meubles, sanitaires, plans de travaux, portes sont les éléments du second œuvre où le réemploi semble le plus évident et est également le plus développé. Ils sont en effet facilement démontables, avec peu de contraintes techniques et à valeur plutôt élevée (valeur économique ou patrimoniale, cf. section 3.2.2). Ils sont ainsi plus souvent intégrés aux CCTP de déconstruction comme nous pouvons le voir sur l'extrait présenté en annexe V où le mobilier de bureaux et les appareillages électriques doivent être réemployés. Dans le cas de ce chantier de déconstruction de bureaux, qui est un chantier de déconstruction de plusieurs bâtiments situés dans la banlieue parisienne sur un site industriel, les éléments ont été rassemblés dans un bâtiment pour servir de hall d'exposition (Figure 78 (a) et (b)). Ils sont alors vendus ou donnés à des associations et particuliers.

Les éléments les plus couramment réemployés sont les éléments à forte valeur (antiquités, matériaux nobles...) ou les éléments standardisés (faux planchers) facilement réutilisables dans des nouveaux aménagements. La massification du réemploi des faux planchers a notamment été mise en avant par l'entreprise Mobius Réemploi⁴⁰ qui s'est illustrée avec le chantier Pulse à Saint Denis en 2018 (MOA : ICADE) avec la fourniture de 21 800 m² de dalles de faux plancher. Cette opération vitrine a permis le développement de l'entreprise et la démocratisation du réemploi de ces éléments sur d'autres chantiers et pour d'autres entreprises (Figure 78 (c)).

⁴⁰ <https://www.mobius-reemploi.fr/>



(a)



(b)



(c)

Figure 78 : Éléments à réemployer et stockage sur un chantier pour la métropole du Grand Paris (chantier de 2021) : (a) stockage pour exposition de bureaux et étagères ; (b) stockage pour exposition de bureaux et casiers ; (c) fiche de communication pour la mise en valeur du réemploi des faux planchers et dalles de moquette.

La réutilisation peut avoir un aspect transversal entre les secteurs de la construction. L'extension d'une librairie (librairie Aizkibel) en Espagne est un bon exemple (Figure 79). Des traverses en bois récupérées de voies de chemin de fer ont permis la création de la façade de l'extension. Face à la question sanitaire liée à la possible présence d'huile de créosote qui est cancérigène, un contrôle rigoureux par un laboratoire indépendant a été mis en place pour sélectionner les lots exempts de risque (Choppin and Delon, 2014).



Figure 79 : Photographie de l'extension de la librairie Aizkibel (Espagne) par Estudio Beldarrain (photo Jon Cazenave).
Réemploi des traverses de voies de chemin de fer en façade

Inversement, des éléments issus du bâtiment peuvent être détournés de leur usage premier afin de servir pour les travaux publics. C'est le cas de « la Glaneuse », un prototype de luminaire urbain proposé par l'association Bellastock⁴¹ (Figure 80). Plusieurs éléments issus de la déconstruction de bâtiments ont ainsi été utilisés pour réaliser du mobilier urbain : skydome, tubes acier, portes et volets.

Ces exemples montrent l'importance croissante de la réutilisation et du réemploi dans la déconstruction et la conception des infrastructures et du bâtiment. Néanmoins, les acteurs du réemploi estiment que le développement se fait à une échelle trop granulaire et dans le cadre d'une démarche expérimentale, sauf exception pour des produits bien standardisés tels que les faux planchers et les briques pleines (ADEME et al., 2016; Benoit et al., 2018; Küpfer and Fivet, 2021). En effet, (Küpfer and Fivet, 2021) estiment que « la déconstruction sélective et construction réversible sont des ingrédients de l'économie circulaire trop peu appliqués dans la pratique ». De plus, les matériaux conservés semblent principalement être des éléments du second œuvre (ou destinés à un usage dans le second œuvre). Les éléments « de gros œuvre sont aujourd'hui abattus de manière destructive et les matériaux pour la plupart recyclés ou sous-cyclés » (Küpfer and Fivet, 2021).

⁴¹ <https://www.bellastock.com/projets/la-glaneuse/>, consulté le 19 janvier 2022

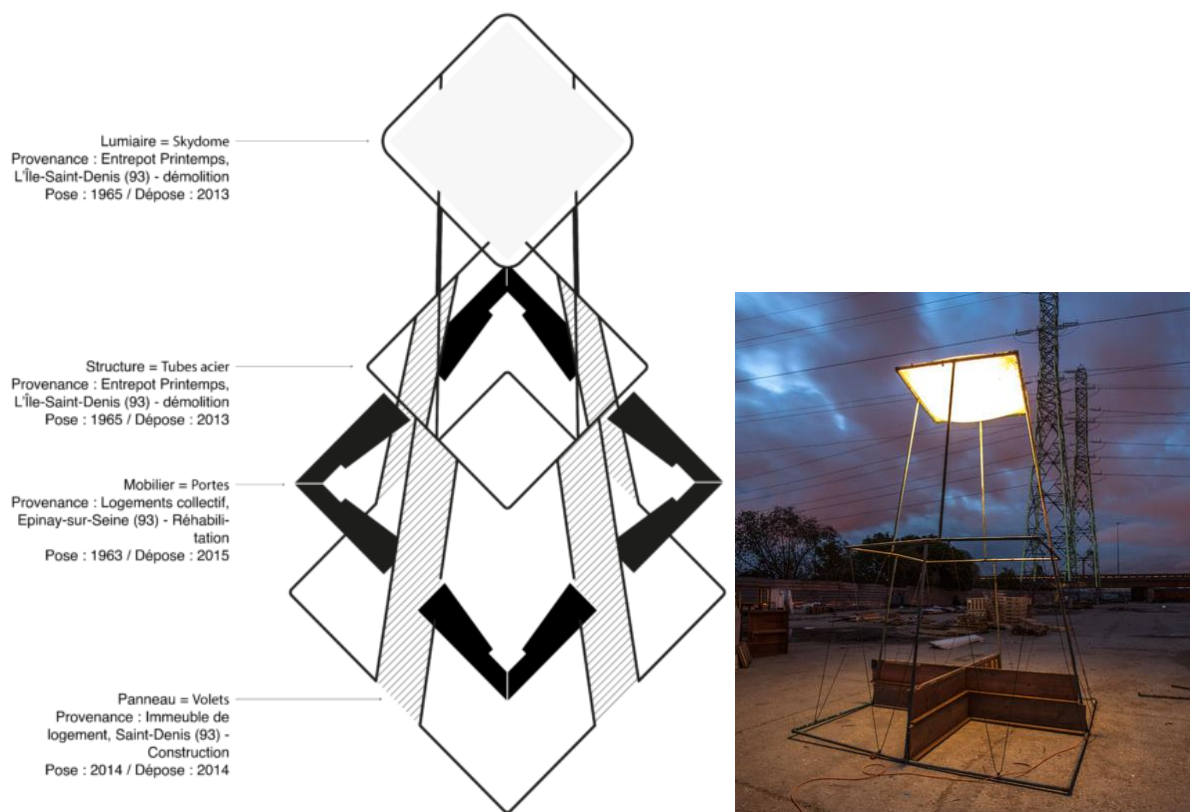


Figure 80 : « La Glaneuse » Luminaire urbain réalisé à partir d'éléments du bâtiment. Exemple de réutilisation d'éléments issus du bâtiment pour le mobilier urbain (photo et image : Bellastock)

3.1.4.3 La question du réemploi structurel

D'après les statistiques de l'observatoire bâtiment énergie carbone⁴² en date du 19 janvier 2022 sur plus de 1200 bâtiments de logement et tertiaire confondus, l'impact sur le changement climatique du lot structure est responsable de plus de 17 % du total de l'impact des produits de construction et équipements.

Il semble donc que réutiliser et réemployer les structures des bâtiments soit un enjeu primordial. Néanmoins, seules quelques expérimentations ont été effectuées sur le sujet et ces dernières touchent principalement les structures bois et acier, de par leur relative simplicité d'assemblage (boulonnage, rivet, tenon mortaise). C'est le cas par exemple de l'auberge de jeunesse d'Ockenburg, du pavillon du Canada à l'expo 58 à Bruxelles ou encore du pavillon d'accueil du château de Versailles (Figure 81).

⁴² <http://observatoire.batiment-energiecarbone.fr/statistiques/experimentation-en-chiffres/> consulté le 19 janvier 2022



Figure 81 : Dépose par déboulonnage et élingage de la structure métallique du pavillon provisoire à Versailles (Benoit et al., 2018)

Pour les bâtiments en béton, des recherches et expérimentations sont en cours mais peu d'applications sont effectuées. À l'inverse le bâtiment *De Drie Hoven*, conçu initialement par Herman Hertzberg pour être modulable à l'aide d'un système d'assemblage simple, a été malheureusement démolé de manière classique en 2015 (Ghyoot et al., 2018). Il est donc important de réaliser un suivi et d'évaluer le risque que le scénario de fin de vie envisagé ne soit pas réalisé ou soit effectivement réalisé.

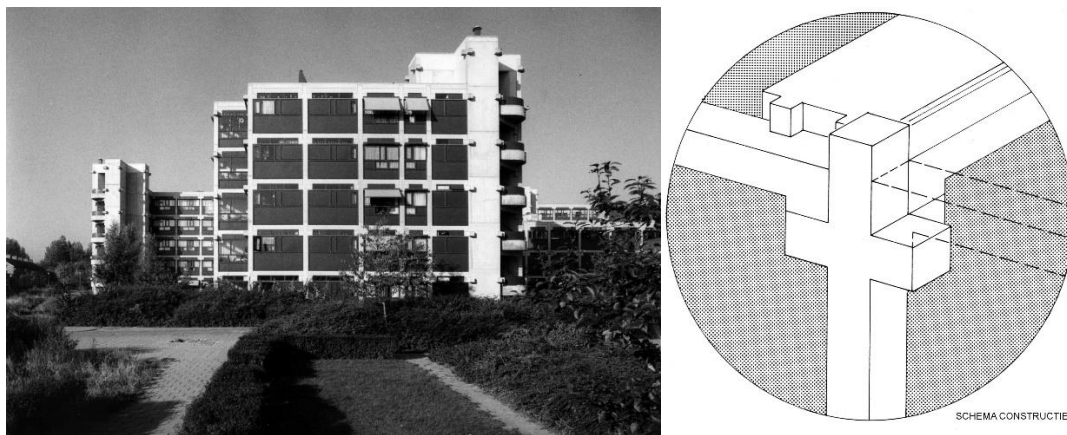


Figure 82 : *De Drie Hoven* (maison pour personnes âgées - Amsterdam) projet conçu selon le principe mis au point par Herman Hertzberg. Photo et schéma constructif poteau poutre et dalles préfabriquées. Exemple de conception pour le réemploi.

Néanmoins, si dans ce cas-là, la préfabrication n'a pas amené à un réemploi, c'est bel et bien par ce levier que le réemploi des éléments en béton est envisagé. En effet, le sciage des joints de connexion pourrait permettre la séparation des éléments tout en gardant leur intégrité. C'est une approche envisagée en Allemagne, avec le projet *Plattenpalast* de l'architecte Carsten Wiewiorra en 2009 (Figure 83), aux Pays-Bas, avec le projet de recherche *the Donor Skelet* (Glijs, 2013) ou encore en Finlande, avec les recherches de (Huuhka et al., 2019, 2015; Huuhka and Hakanen, 2015). Ces travaux portent sur le potentiel de réemploi des bâtiments préfabriqués des années 70 en Finlande. Ils exposent les différents types de préfabriqués existants à partir d'un panel de plans récupérés. Dans leur étude de 2019, les auteurs réalisent un état des lieux des expérimentations similaires, ils mettent notamment en avant le projet allemand *Ahrensfelder Terrassen* présenté sur la Figure 84.

Le constat réalisé par ces différentes études sur le potentiel de réemploi des éléments préfabriqués en béton montre que la méthode pourrait être appliquée en France. Effectivement (Huuhka et al., 2015) précisent qu'il existe un fort potentiel en Europe (Royaume Uni, France, Allemagne, Pays-Bas) car de nombreux bâtiments de ce type sont inoccupés et voués à être démolis.



Figure 83 : Plattenpalast, architecte : Carsten Wiewiorra, 2009, Prototype de maison construite à partir de dalles et voiles préfabriqués issus de la déconstruction d'ancien HLM



(a)

(b)

Figure 84 : Exemple de rénovation et de réemploi : (a) Ahrensfelder Terrassen (Berlin) Barre d'immeubles remaniée, avec plusieurs étages déconstruits puis rénovés ; (b) maison individuelle construite à partir des éléments préfabriqués provenant des étages déconstruits (images : Claus Asam)

Concernant les éléments en béton coulés en place, le réemploi est une « pratique exceptionnelle ». Toutefois, pour des raisons de déconstruction en zone urbaine dense, des techniques de « démontage soigneux » (Küpfer and Fivet, 2021) ont été développées (section 1.2.2). Ces techniques pourraient ouvrir la voie au réemploi d'éléments de structure en béton.

Face au constat du manque de réutilisation et de réemploi des éléments en béton, l'association Bellastock a développé une méthodologie pour réutiliser le béton (Figure 85). Les éléments sont destinés à différents usages en fonction de leur forme (Figure 86) : des larges plaques de voiles en remplissage jusqu'aux débris de l'ordre décimétrique en pavé de voirie en passant par les plaques et bandes pour la confection de palissades ouvertes. Toutefois, nous pouvons regretter qu'aucune de ces solutions ne soit une réelle solution de réemploi, c'est-à-dire qu'aucune de ces solutions ne permet de garder le rôle réellement structurel (dans le cas de l'abri à vélo, une structure acier maintient l'ensemble, le béton a un rôle de remplissage).

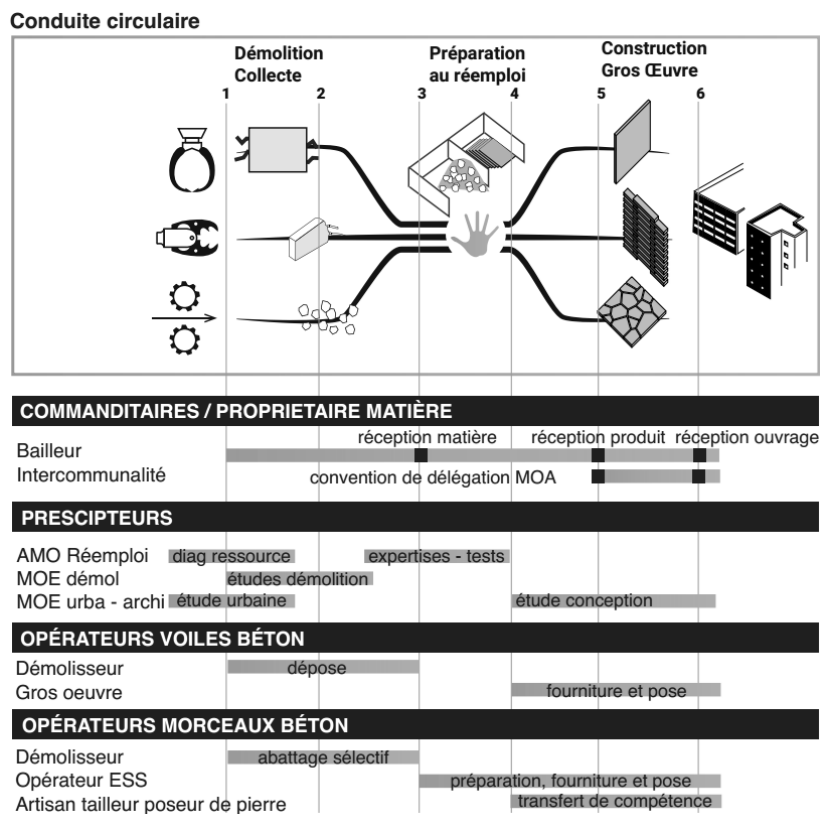


Figure 85 : Principe de réemploi et répartition du rôle des acteurs, cas de la fabrique du clos, Stains (Benoit et al., 2018)

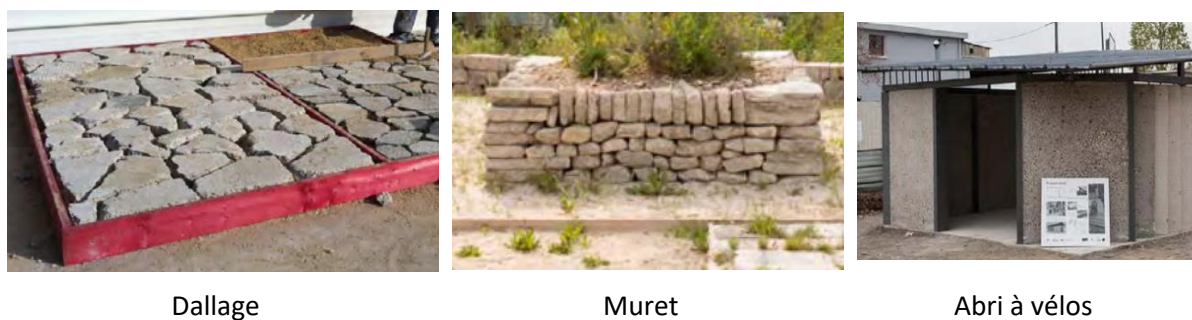


Figure 86 : Exemples de réalisation par l'association Bellastock à partir d'éléments en béton (Clos Saint Lazare - Stains)

En 2021, au cours du projet Re:Crete, des chercheurs du Smart Living Lab à Fribourg ont conçu et construit une passerelle en béton de réemploi (Figure 87). Cette passerelle est constituée d'une succession de 25 blocs bétons, issus de murs de bâtiment déconstruit, soutenus en compression par deux câbles de précontraintes tel un collier de perle. Selon les résultats présentés, les émissions de CO₂ sont réduites de plus de 70 % (Devènes et al., 2022) pour la phase de fabrication.

Néanmoins, cette structure sollicite le béton armé simplement en compression par le biais de la précontrainte. Il serait intéressant de conserver à la fois la capacité en compression du béton mais également la capacité en traction procurée par les aciers de ferrailage.

Il existe alors un réel besoin d'étude sur la possibilité du réemploi d'éléments en béton armé coulés en place.



Figure 87 : Passerelle du Projet Re:Crete (image : EPFL)

En conclusion, il existe de nombreuses expérimentations de réemploi d'éléments du bâtiment mais peu sont développées à large échelle ; ce sont principalement des expérimentations ou des réalisations au cas par cas. Par ailleurs, les principaux éléments réemployés concernent le second œuvre (porte, faïence, menuiseries...). Les éléments de structure, principalement ceux en béton, sont très peu réemployés malgré le fort potentiel décelé dans la littérature.

Ainsi, on peut faire ressortir deux axes à approfondir. Le premier, afin de systématiser le réemploi lors des opérations de déconstruction, est le développement d'un indicateur simple à calculer et à comprendre pour déceler le véritable potentiel de réemploi de l'élément (section 3.2). Le second axe consiste à étudier plus en détail les éléments de structure en béton armé pour montrer la faisabilité et l'intérêt du réemploi structurel (section 4.1 et 4.3).

3.2 LES INDICATEURS DE POTENTIEL DE REEMPLOI

Les parties précédentes (Chapitre 1 et section 3.1) mettent en avant la diversité des matériaux de construction et des méthodes de traitement des déchets. Face à cela, il peut être difficile pour les décideurs (architectes, maîtres d'ouvrages, entreprises) de faire la différence entre ce qui est un déchet et ce qui est valorisable et dans quelles circonstances. Ainsi, il existe une nécessité d'identifier le potentiel de réemploi via un indicateur afin de leur permettre d'utiliser au mieux les déchets comme une ressource.

Nous abordons la question du potentiel de réemploi par une démarche progressive en trois temps. Tout d'abord, nous définissons la notion de potentiel de réemploi puis nous abordons les critères utilisés dans la littérature pour caractériser le potentiel de réemploi. Enfin, nous présentons les principaux indicateurs de potentiel de réemploi de la littérature. Cette démarche permet de bien comprendre le contexte et les raisons menant chacun des auteurs à proposer un indicateur.

3.2.1 Définition du potentiel de réemploi

La notion de potentiel de réemploi, à l'instar de celle de la circularité, admet plusieurs définitions.

Basée sur le travail de (Durmisevic, 2006; Durmisevic et al., 2017), le projet européen BAMB⁴³ (Building As Material Banks) définit le potentiel de réemploi (*reuse potential*) d'un assemblage comme une mesure qui exprime la faisabilité et la probabilité que les pièces de l'assemblage soient démontées facilement, rapidement et sans dommages, et donc réutilisées. Le potentiel de réemploi peut être mesuré/calculé pour un petit assemblage ou pour un bâtiment complet. Il s'appuie sur des aspects tels que la compatibilité et l'indépendance. Il évalue également des critères tels que l'autonomie fonctionnelle et technique, la séquence d'assemblage, la réversibilité des connexions et la géométrie des composants (section 3.2.3). Dans cette définition, le potentiel de réemploi est majoritairement caractérisé par le lien d'un élément avec le reste du système : sa connexion. Par ailleurs, au vu de la définition, il s'applique préférentiellement aux éléments éco-conçus pour être réemployables. Le potentiel de réemploi se traduit alors comme un indicateur mettant en avant la facilité de transformation et de désassemblage des systèmes constructibles des bâtiments réversibles.

(Langston et al., 2008; Langston, 2011, 2012) introduisent l'ARP (*Adaptive Reuse Potential*) permettant de déterminer la valeur d'un bâtiment afin de comprendre comment prioriser les projets encore évolutifs (« adaptive ») et ainsi optimiser l'utilisation des ressources ainsi que conserver l'héritage national. Ainsi la définition du potentiel de réemploi est la valeur résiduelle du stock bâti en terme de bénéfices environnemental, social et financier.

Dans leur article intitulé *Establishing and testing the "reuse potential" indicator for managing wastes as resources*, (Park and Chertow, 2014) définissent le potentiel de réemploi comme la capacité de déterminer où et comment utiliser le matériau à réemployer ou réutiliser. Le potentiel de réemploi est caractérisé par l'étendue des connaissances qui conduit (ou peut conduire) à la faisabilité de la réutilisation et du réemploi. Avec cette définition, l'indicateur de potentiel de réemploi vise à orienter

⁴³ <https://www.bamb2020.eu/>, Le projet BAMB vise à « permettre un changement systémique dans le secteur du bâtiment en créant des solutions circulaires » notamment en développant le réemploi et la conception de d'éléments réemployables.

les décideurs sur la gestion des déchets, en prenant en compte la capacité technique (technique de traitement des déchets) du matériau à être réutilisé. Dans cette étude, l'indicateur concerne principalement l'échelle du matériau (ce qui peut être conservé vs ce qui est un déchet) similaire à un bilan de matière, ce qui en fait un outil adapté aux sous-produits de l'industrie.

De la même manière, (Colas, 2017) présente dans son HDR le potentiel de réemploi comme la capacité à conserver la fonction de l'objet, d'utiliser le plein potentiel de la matière et de l'objet et de minimiser les transformations. L'indicateur proposé évalue de manière large la potentielle valorisation d'un produit de construction.

Pour (Akanbi et al., 2018b), il s'agit également de mesurer la performance des matériaux de construction en fin de vie ; de même pour (Bertin, 2020) qui ajoute une composante sociale complémentaire.

Enfin, (Rakhshan et al., 2021) se focalisent sur le potentiel de réemploi d'un point de vue économique. Dans ce cadre, le potentiel de réemploi est défini comme les économies réalisées en utilisant des éléments de réemploi en lieu et place d'éléments structuraux neufs. Contrairement aux indicateurs précédents, la volonté des auteurs pour leur indicateur est qu'il permette de classer les facteurs économiques qui influent sur le potentiel réemploi des éléments. C'est une méthode probabiliste prédictive.

Ainsi face à l'ensemble de ces travaux, nous pouvons voir qu'il existe une grande variété de définitions du potentiel de réemploi et une grande variété d'objectifs de l'indicateur de réemploi. En effet, il semble que si certains se concentrent sur la capacité technique ou l'état d'un ou plusieurs éléments à la fin de vie (Akanbi et al., 2018b; Colas, 2017) ou encore sous la question des assemblages des composants au sein d'une structure (Durmisevic, 2006; Durmisevic et al., 2017), d'autres analysent le potentiel de réemploi sous le prisme économique (Park and Chertow, 2014; Rakhshan et al., 2021).

Par ailleurs, on observe qu'il existe plusieurs objets ou échelles d'étude :

- La matière : (Park and Chertow, 2014) ;
- L'élément : (Colas, 2017; Akanbi et al., 2018b; Bertin, 2020; Rakhshan et al., 2021) ;
- La structure (ensemble d'éléments) : (Langston, 2012; Akanbi et al., 2018b; Rakhshan et al., 2021; Bertin, 2020) ;
- L'assemblage (connexion entre les éléments) : (Durmisevic, 2006; Durmisevic et al., 2017).

Pour synthétiser, les principales observations sont retranscrites dans le Tableau 40.

Tableau 40 : Les principales définitions du potentiel de réemploi et proposition d'indicateur (liste non exhaustive)

Source	Définition	Particularités	Échelle d'application
BAMB (Durmisevic, 2006; Durmisevic et al., 2017)	Pour un assemblage, cela caractérise la facilité de démontage afin d'être réutilisé ; Importance de la compatibilité et indépendance des éléments	Concentrée sur la conception réversible et sur la connexion des éléments entre eux.	Assemblage
(Langston et al., 2008; Langston, 2011, 2012)	Potentiel d'utilisation ou fonctionnalité restante d'un bâtiment au vu de son obsolescence et de son espérance de vie	S'applique à l'échelle du bâtiment. Intègre une notion d'obsolescence	Structure (bâtiment)
(Park and Chertow, 2014)	Capacité de réutilisation ou de réemploi de matière au vu des capacités techniques actuelles	Concentré sur les sous-produits de l'industrie ; s'applique à un ou plusieurs matériaux	Matière
(Colas, 2017)	Capacité à conserver les caractéristiques techniques et la fonctionnalité d'un élément	Se concentre sur les caractéristiques techniques d'un élément	Élément
(Akanbi et al., 2018b)	Performance résiduelle de l'élément lors de la déconstruction	Caractéristiques techniques basées sur l' âge des éléments	Élément / Structure
(Bertin, 2020)	Capacité d'un élément à être déconstruit et à être bénéfique socialement	Combinaison de plusieurs indicateurs de l'économie circulaire existants ; indice technique et social. Complémentaire de l'ACV Pour le design for reuse	Élément / Structure
(Rakhshan et al., 2021)	Bénéfices économiques potentiels à la réutilisation et au réemploi ; sur un élément ou un système complet	Se concentre sur les caractéristiques économiques ; méthode prédictive probabiliste	Élément / Structure

3.2.2 Paramètres caractérisant le potentiel de réemploi

Dans le cadre de sa recherche de cas d'étude, (Glias, 2013) met en évidence plusieurs critères nécessaires à l'établissement d'une fiche d'identité (*Element Identity*, *EID*) des éléments de structure potentiellement réemployables. Il recense notamment, dans le cas d'une structure en béton armé, les critères suivants :

- Informations Techniques :
 - o Fonction,
 - o Propriétés des matériaux,

- Dimensions,
- Type et système structurel (homogénéité du lot, dimension standard, préfabriqué...),
- Position des armatures,
- État/ capacité résiduelle,
- Quantité ;
- Localisation (logistique facilement réalisable) ;
- Impact environnemental des solutions ;
- Surcoûts des solutions ;
- Risque lors de manipulations sur la qualité des éléments (facilité de déconstruction) ;
- Exutoires possibles.

De la même manière, (Deweerd and Mertens, 2020) notent l'importance de l'audit réemploi (c'est à dire le diagnostic ressources) pour déterminer le potentiel de réemploi des matériaux de construction. Ils proposent notamment deux méthodes :

- Par analogie, pour les produits de construction couramment récupérés ;
- Via des critères d'influence généraux.

En ce qui nous concerne, nous nous intéressons plutôt à la seconde méthode puisque, comme nous l'avons vu précédemment dans la section 3.1, les éléments de structure ne sont pas (encore) couramment récupérés. Les critères sont présentés sous deux aspects, ceux à « influence positive » et ceux à « influence négative » en précisant qu'aucun « des critères [...] n'est totalement déterminant. [Et] L'ensemble des aspects peuvent être [adaptés] avec les besoins [et objectifs du réemploi, ainsi] il peut s'avérer nécessaire de les pondérer ». Ce travail permet d'ajouter à liste de (Glias, 2013) les critères d'influence suivants (pour les matériaux de construction en général) :

- Authenticité et valeur,
- Santé et sécurité,
- Caractère obsolète ou démodé.

Les travaux d'Elma Durmisevic (Durmisevic, 2006; Durmisevic et al., 2017) apportent une vision complémentaire en se focalisant sur les connexions et les assemblages. Ainsi, elle insiste sur deux paramètres clefs :

- L'**indépendance** des éléments entre eux ;
- La **réversibilité/échangeabilité** (*exchangeability*) des composants.

Ces paramètres sont traduits en 8 critères présentés sur la Figure 88 :

- Décomposition fonctionnelle : traduit le niveau de séparation et l'autonomie entre chaque fonction,
- Regroupement : en fonction des exigences des éléments sur leur cycle de vie,
- Relation hiérarchique entre les éléments,
- Spécification de l'élément de base : existe-t-il un élément d'une fonction permettant de relier les autres éléments de la même fonction avec les autres fonctions ?
- Coordination des assemblages/désassemblages sur le cycle de vie,
- Séquence d'assemblage,
- Type des connexions,
- Géométrie des assemblages/interfaces.

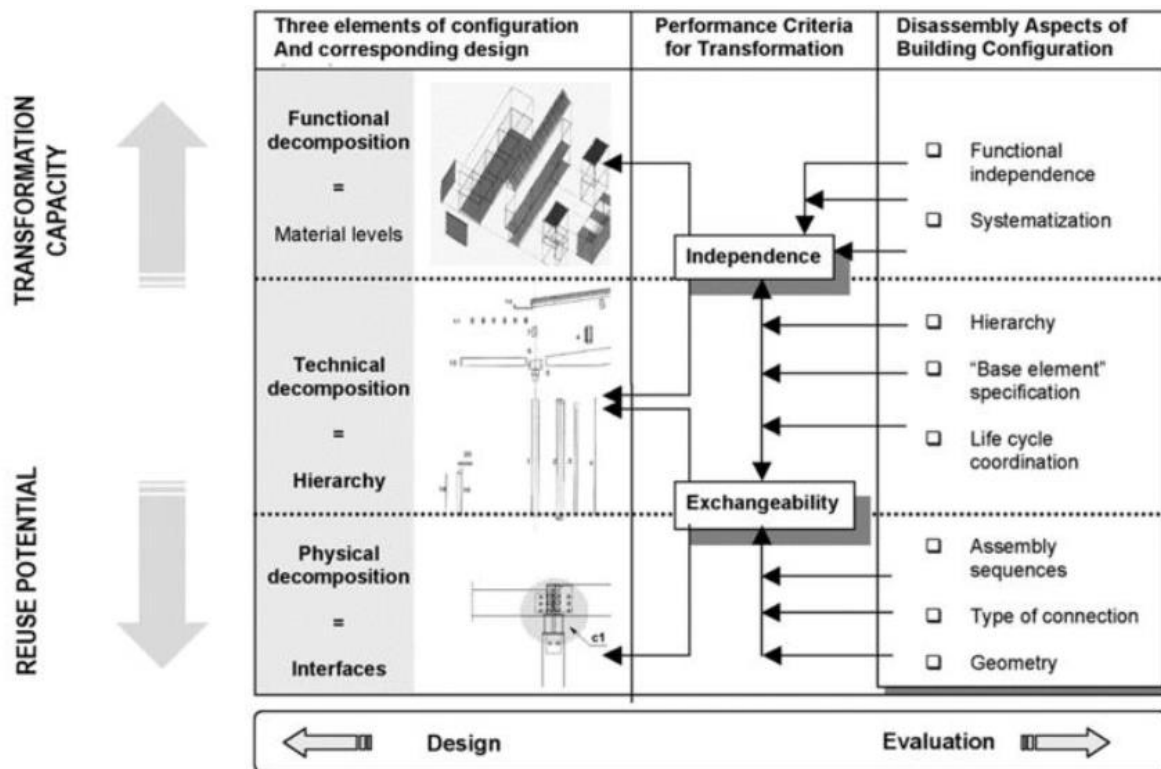


Figure 88 : Critères pour évaluer la capacité d'une structure de bâtiment à être transformée et désassemblée sans être endommagée selon le modèle de (Durmisevic et al., 2017)

On peut observer que la liste de critères permettant de caractériser le potentiel de réemploi est longue et complexe. À l'instar du commentaire de (Deweerd and Mertens, 2020), il est nécessaire d'adapter les critères étudiés en fonction des objectifs du réemploi, en choisissant par exemple de se concentrer sur l'intérêt environnemental et de délaissier, dans une certaine mesure, le côté économique.

3.2.3 Indicateurs existants

Dans la continuité des observations précédentes, nous avons recensé dans la littérature trois manières de construire des indicateurs pour exprimer le potentiel de réemploi :

- (1) Une détermination du potentiel de réemploi basé sur un unique indicateur ;
- (2) Un modèle d'analyse incluant plusieurs indicateurs ;
- (3) Une détermination probabiliste du potentiel de réemploi par indices à l'échelle macro.

Mono-indicateur (1)

L'utilisation d'un seul et unique indicateur est le choix retenu dans les études de (Langston et al., 2008), (Park and Chertow, 2014), (Colas, 2017), (Akanbi et al., 2018b) et (Bertin, 2020).

L'indicateur peut être basé sur **un seul critère**. Ainsi Craig Langston et ses collègues (Langston et al., 2008; Langston, 2011, 2012) mettent en place un indicateur unique, l'indicateur ARP (Équation 12). La Figure 89 présente le fonctionnement de l'indicateur.

$$ARP_{(\text{increasing})} = 100 - \frac{(EL_u^2/100)}{EL_u} \times EL_b, \quad (\text{a})$$

$$ARP_{(\text{decreasing})} = 100 - \frac{(EL_u^2/100)}{100 - EL_u} \times (100 - EL_b),$$

$$L_u = \frac{L_p}{\left(1 + \sum_{i=1}^6 O_i\right)^{L_p}} \quad (\text{b})$$

$$EL_u = \frac{L_u \times 100}{L_p} \quad (\text{c})$$

$$EL_b = \frac{L_b \times 100}{L_p} \quad (\text{d})$$

$$EL_p = \frac{L_p \times 100}{L_p} \quad (\text{e})$$

ARP: Adaptative reuse potential,

EL_u: Effective useful life (durée de vie effective),

L_u: Useful life (durée de vie),

EL_b: Effective building age (âge effectif du bâtiment),

L_b: Current age of the building (âge du bâtiment),

EL_p: Effective physical life (durée de vie physique effective),

L_p: Physical life (durée de vie mécanique/ physique),

O_i: Obsolescence du bâtiment pour le paramètre « *i* ».

Cet indicateur dépend des durées de vie réelles et physiques ainsi que de l'obsolescence du bâtiment. Cette obsolescence est déterminée en six points :

- Obsolescence physique : mesurée par le suivi de la politique (financière) de maintenance de l'ouvrage ;
- Obsolescence économique : liée à la position géographique ;
- Obsolescence fonctionnelle : liée à la flexibilité du bâtiment de par son design et mesurée par le taux de vacance ;
- Obsolescence technique : liée à la capacité du bâtiment à procurer du confort aux occupants ;
- Obsolescence sociale : relation entre la fonction du bâtiment et la demande du marché ;
- Obsolescence légale : qualité du bâtiment initial mis en adéquation avec les contraintes légales actuelles.

Cette obsolescence agit sur la durée de vie effective du bâtiment. Un score ARP de plus de 50 % traduit un bon potentiel d'adaptation, inversement, un score inférieur à 20 % traduit une faible valeur d'adaptation.

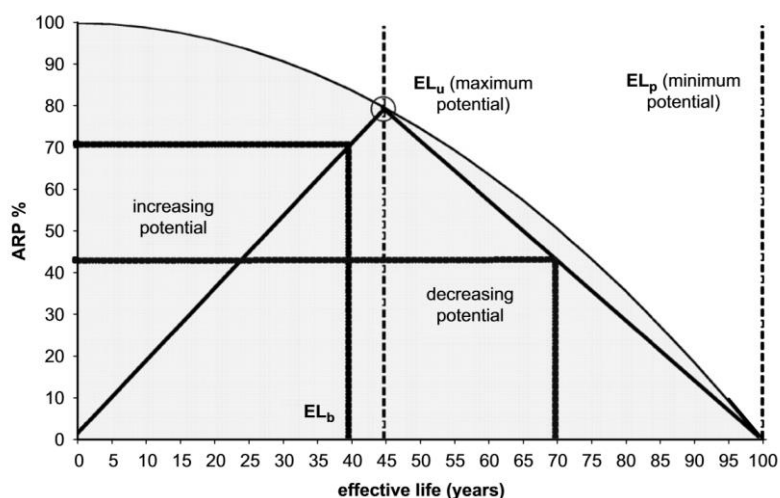


Figure 89 : Concept de l'indicateur ARP (Adaptative Reuse Potential) (Langston et al., 2008)

De leur côté, (Akanbi et al., 2018b) prennent en compte le critère de l'âge. En effet, ils utilisent un modèle mathématique traduisant la performance technique en fonction de l'âge du bâtiment source. Le niveau de réutilisabilité (*reusability level* = potentiel de réemploi) d'un matériau « *m* » est calculé à l'aide d'une fonction exponentielle de l'âge du bâtiment (Akanbi et al., 2018a) (Équation 13). Pour obtenir le potentiel de réemploi d'un composant « *c* », il faut faire la somme des potentiels de réemploi des matériaux constitutifs du composant. Enfin pour mesurer le potentiel de réemploi du bâtiment, il faut réaliser la somme du potentiel de réemploi des composants « *c* » constituant le bâtiment.

Équation 13

$$R_m = \beta - e^{t-\alpha_m}$$

R_m : Niveau de réutilisation (= potentiel de réemploi) du matériau *m*,

α_m : Durée de vie théorique du matériau *m*,

t: Age du bâtiment contenant le matériau *m*,

β : Facteur de d'échelle de mesure (si $\beta = 100$ alors la mesure est en pourcentage).

(Park and Chertow, 2014) utilisent également un unique critère pour construire leur indicateur. Celui-ci mesure le ratio de la quantité de matériaux réutilisables par rapport à la quantité totale. Le critère de détermination de la réutilisabilité est un critère économique : la marge nette d'un type de traitement par rapport au coût de mise en décharge (*net marginal value minus the disposal cost*). Comme nous pouvons le voir sur la Figure 90, la méthode consiste à envisager toutes les possibilités techniques de traitement existantes et applicables (tech A, tech B...) afin d'écouler la quantité de déchets. Puis, il s'agit de ne sélectionner que celles qui sont économiquement plus intéressantes que la mise en décharge. Le résultat de cet indicateur permet d'avoir une valeur entre 0 et 1 pour le stock de déchets ou pour un bâtiment (Figure 91). La valeur ainsi obtenue permet de savoir si le matériau étudié est plutôt réutilisable ou plutôt un déchet (sous le prisme du coût du traitement).

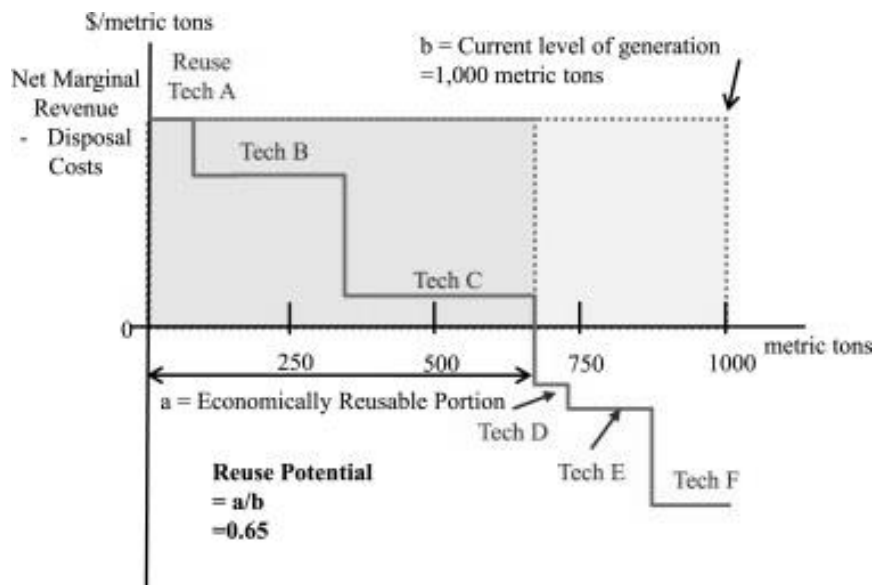


Figure 90 : Méthodologie pour le calcul de l'indicateur de réemploi selon (Park and Chertow, 2014)

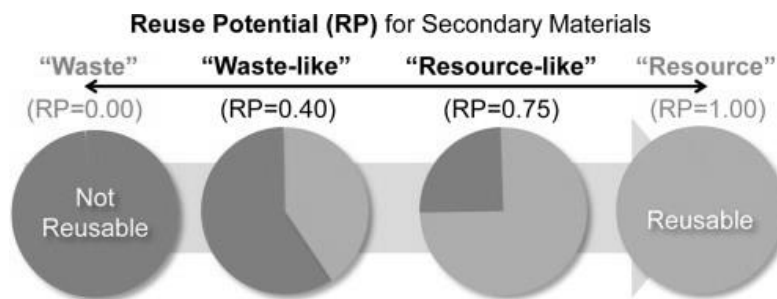


Figure 91 : Exemple de valeurs de l'indicateur de potentiel de réemploi (RP) développé par (Park and Chertow, 2014)

Cette manière de procéder permet d'avoir un résultat rapide via une méthode simple. Néanmoins, l'analyse du potentiel reste très sommaire et peu robuste car on se base sur un seul critère. C'est pourquoi, l'indicateur peut également être basé sur plusieurs critères.

(Colas, 2017) imagine une première ébauche d'indicateur orienté sur l'aspect technique mais prenant en compte plusieurs critères de décision (Équation 14). Le premier terme mesure le ratio entre la performance résiduelle suite au cycle n et la performance nécessaire pour la fonction cible du cycle $n+1$. Le second terme traduit l'effort à fournir pour pouvoir l'utiliser dans sa seconde fonction (réparation, stockage...). Ainsi, les coefficients P_{eff} et C_t traduisent la prise en compte des différents critères techniques énumérés précédemment (section 3.2.2). On peut retrouver notamment dans P_{eff} les critères concernant la capacité résiduelle, les dimensions, les propriétés physico chimiques des matériaux... Le coefficient C_t couvre quant à lui l'état, la localisation/logistique et éventuellement les risques, les coûts environnementaux et économiques. C'est donc un indicateur pour un usage défini (avec des contraintes en l'occurrence techniques définies). Il reste toutefois à préciser la méthode de calcul des différents coefficients.

$$P_{2RV} = \frac{P_{req}}{P_{eff}} \frac{1}{C_t}$$

P_{2RV} : Potentiel de réemploi, de recyclage, de valorisation d'un produit,

P_{req} : Performance requise pour l'emploi du produit dans la fonction du cycle $n+1$ (donnée par les règlements de calcul, norme...),

P_{eff} : Performance effective du produit à l'issue du cycle n (caractéristiques physico chimiques, mécaniques, stockage...),

C_t : Coefficient de transformation (selon les processus de valorisation nécessaire).

Enfin, (Bertin, 2020) propose un indicateur qui regroupe plusieurs critères mesurés à l'aide d'indicateurs de circularité (ex : taux de valorisation déchets, taux de réincorporation... (section 2.1.4)), de l'indicateur de potentiel de réemploi de (Colas, 2017) et d'un ensemble d'autres matrices de décisions notamment sur la démontabilité et l'impact social et territorial. Cet indicateur développé a pour objectif d'être complémentaire à une ACV pour donner le bilan environnemental global d'une opération. Ce choix est basé sur ses observations : « 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 » (Bertin, 2020).

Multi-indicateur (2)

Avoir un unique indicateur est assez avantageux pour la compréhension et la lisibilité des résultats. Toutefois, à l'instar de l'ACV où il est nécessaire de se baser sur plusieurs indicateurs pour éviter les reports de pollution d'un milieu à l'autre (section 1.3.1.2), la détermination du potentiel de réemploi est complexe et fait intervenir plusieurs secteurs d'intérêts : économique, environnemental, sociétal... Ainsi pour gagner en finesse dans l'analyse, il peut être nécessaire de s'intéresser à plusieurs indicateurs, dans la mesure du possible indépendants *i.e.* complémentaires. C'est l'approche adoptée par (Durmisevic, 2006; Durmisevic et al., 2017).

Elle définit ainsi deux indicateurs : celui d'indépendance et celui de réversibilité à partir des huit critères que nous avons vus précédemment (Figure 88). Il existe en outre en tout 17 sous critères. Ces deux indicateurs peuvent être évalués indépendamment. Chaque sous critère est noté selon une graduation propre puis une moyenne est réalisée pour chaque critère (Figure 92). Pour présenter les résultats, il est possible d'utiliser un diagramme de Kiviati (diagramme en radar) (Figure 93) ou de réaliser une moyenne en pondérant les critères.

				grading	
FD FUNCTIONAL DECOMPOSITION	functional separation	fs 01	separation of functions	1	
		fs 02	integration of functions with same ic* into one element	0,6	
		fs 03	integration of functions with different ic* into one element	0,1	
	$fs = [fs1 + fs2 + \dots fs(n)] / n$				
	functional dependence	fdp 01	modular zoning	1	
		fdp 02	Planned interpenetrating for different solutions (overcapacity)	0,8	
		fdp 03	Planned interpenetrating for one solution	0,4	
		fdp 04	Unplanned interpenetrating	0,2	
		fdp 05	total dependence	0,1	
	$fdp = [fdp1 + fdp2 + \dots fdp(n)] / n$				
FD = fuzzy calculation based on "fs" and "fdp" and their weighting factors					

Figure 92 : Grille pour le calcul du critère de décomposition fonctionnelle (Durmisevic, 2006).

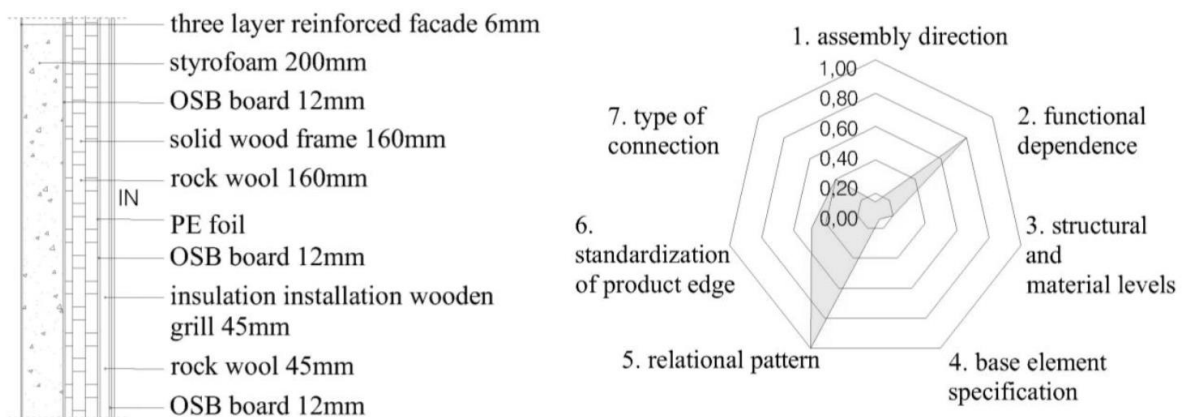


Figure 93 : Application de la méthode Durmisevic sur une façade bois classique de 11 couches (Androsevic et al., 2019)

Indicateur probabiliste/prédictif (3)

Pour finir, nous présentons une troisième méthode de construction d'indicateur. Cette dernière est basée sur l'intelligence artificielle. Bien que la méthode de (Rakhshan et al., 2021) n'utilise pas d'indicateurs techniques, il nous semble intéressant de la présenter car elle pourrait être utilisée avec d'autres paramètres.

Les auteurs définissent plusieurs paramètres présentés sur la Figure 94 (a). Une base de données de retour d'expériences est créée à partir d'une enquête concernant les projets où des éléments structurels ont été réemployés. À partir de cette base de données, plusieurs modèles prédictifs ont pu être implémentés en utilisant la méthode du machine learning. Le modèle permet de classer l'importance des différents paramètres dans le processus de détermination du potentiel de réemploi (Figure 94 (b)).

Cet indicateur donne un résultat pour le réemploi structurel quel que soit le chantier. Ainsi la méthode donne des indices à investiguer pour savoir si des éléments sont potentiellement réutilisables. Cela revient à une grille de bonnes pratiques ou de points d'attention. Par exemple, on peut voir que les deux paramètres les plus importants pour déterminer si un élément est potentiellement réemployable d'un point de vue économique sont premièrement la disponibilité d'argent frais en trésorerie (*cash-flow*) afin de pouvoir acheter les éléments le plus tôt possible et ainsi anticiper l'utilisation future des éléments et deuxièmement le risque financier c'est-à-dire, les risques d'aléas (problèmes lors de la

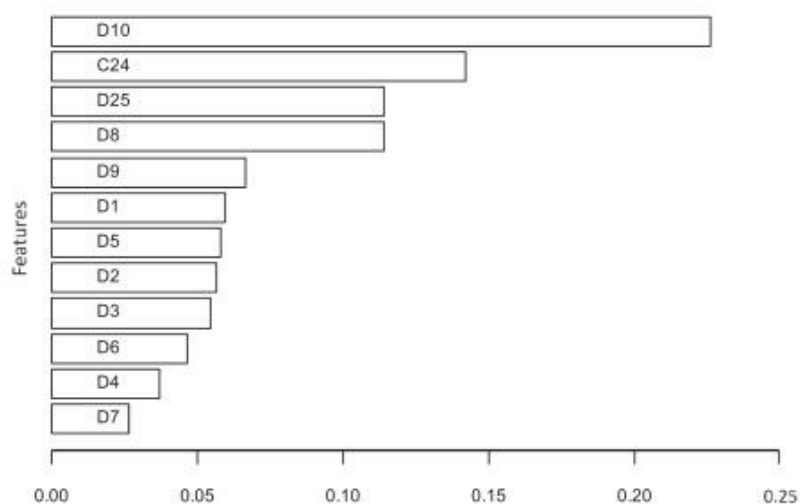
déconstruction ou du transport...) ayant un impact sur le coût final. Ainsi, plus le cash-flow est important et plus le risque financier est faible, plus les éléments auront une chance d'être réemployés.

Cette méthode a l'avantage d'être évolutive et de gagner en précision au fur et à mesure de l'enrichissement de la base de données avec de nouveaux cas d'études (interviews).

Variable Code	Variable description	Variable category
C24	Potential financial risks	Independent
D1	The purchasing price	Independent
D2	Cost of insurance	Independent
D3	Cost of testing	Independent
D4	Cost of refurbishment (sandblasting, treatment, etc.)	Independent
D5	Cost of design with the reused element	Independent
D6	Storage cost	Independent
D7	Transportation cost	Independent
D8	Cost of labour	Independent
D9	Cost of fabrication	Independent
D10	Cash flow (need to purchase the element early, etc.)	Independent
D25	Sourcing/procurement process	Independent
E2	The economic reusability of the component	Dependent

(a)

Variable importance levels (DSA)



(b)

Figure 94 : (a) Variables d'études pour la détermination du potentiel de réemploi selon (Rakhshan et al., 2021) ; (b) graphique barre présentant les variables par importance pour la détermination du potentiel de réemploi en utilisant le machine learning sur un échantillon issu d'un questionnaire

Synthèse sur la recherche bibliographique sur le potentiel de réemploi

Sur la base de cette analyse bibliographique, nous pouvons énoncer la définition que nous avons retenue ainsi que les objectifs de l'indicateur de potentiel de réemploi qui nous semblent adaptés à notre étude.

Pour cette étude, nous nous concentrons sur les aspects techniques à l'échelle d'un élément ou d'un ensemble d'éléments (section 4.1) ; ainsi nous nous rapprochons de la définition proposée par (Colas, 2017) et (Akanbi et al., 2018b). La méthode est en revanche fortement inspirée du travail de (Bertin, 2020).

Le potentiel de réemploi est défini comme la capacité d'un ou plusieurs éléments à conserver ses caractéristiques techniques et sa fonctionnalité après dépose en vue de sa réutilisation ou de son réemploi, en adéquation avec les contraintes économiques, environnementales et logistiques.

L'indicateur a pour objectif de permettre à un décideur (Maitre d'ouvrage (MOA), Entreprise, Maitre d'œuvre (MOE)) de déterminer rapidement et simplement la faisabilité de réemploi d'un élément (notamment de structure d'un bâtiment) avant dépose. Il devra évaluer les caractéristiques techniques, économiques et environnementales.

3.3 DEVELOPPEMENT D'UN INDICATEUR DE POTENTIEL DE REEMPLOI

Dans cette partie, nous exposons la démarche adoptée pour l'élaboration d'un nouvel indicateur de réemploi. Nous présentons dans un premier temps le cadre d'étude, puis les objectifs de l'indicateur. Enfin, nous parcourons, point par point, les éléments clefs de l'indicateur développé. Notons que l'application de cet indicateur est l'objet de la section 3.4.

Pour cette étude, l'objectif est de développer une méthode de caractérisation du potentiel de réemploi d'un élément. Nous avons choisi de ne travailler que sur un indicateur afin d'avoir un résultat plus facile à interpréter. La conséquence de ce choix est, en contrepartie, la perte en information du fait de l'agrégation de données.

Le travail présenté se concentre sur la méthodologie mise en place pour le développement de cet indicateur. La temporalité de la thèse de doctorat ne permet pas de calibrer l'indicateur de manière aboutie. Ainsi, les différents critères et les méthodes de calcul associées ont été mis au point puis testés sur des cas simples. Toutefois, un calibrage plus précis pour fixer les différents seuils utilisés nécessite une application sur un grand nombre de cas pratiques et une confrontation plus longue et plus développée avec des experts en réemploi, en structure béton ou en déconstruction.

3.3.1 Cadre de l'indicateur

3.3.1.1 Objectifs

À destination de l'AMO (assistance à maîtrise d'ouvrage) « réemploi » au stade de l'audit réemploi ou du diagnostic ressource, l'indicateur développé se veut un outil relativement simple et rapidement exécutable qui vient compléter et synthétiser l'expertise de l'auditeur. Ainsi, pour des questions de simplicité, il a été décidé d'utiliser un unique indicateur que nous appellerons indicateur de « potentiel de réemploi » (P_R).

Dans le cadre de cette étude, le potentiel de réemploi se définit comme la capacité d'un élément à conserver ses caractéristiques techniques et sa fonctionnalité après dépose en vue de sa réutilisation ou de son réemploi (section 3.2.1).

La ligne directrice du développement de cet indicateur est d'avoir autant que possible un indicateur complet pouvant s'appliquer à tout élément de réemploi ou réutilisation. Il est par conséquent adaptable aux différents contextes et types d'éléments notamment pour la partie de l'indicateur qui concerne les caractéristiques techniques de l'élément. Dans ce travail, la partie concernant les caractéristiques techniques de l'élément est développée dans le cas spécifique du réemploi de structures en béton armé.

Cet indicateur a été développé sous le prisme de la réutilisation et du réemploi d'éléments du bâtiment. Néanmoins il est facilement envisageable d'étendre le champ d'application de cet indicateur aux éléments du génie civil et des travaux publics. De même, cet indicateur a été créé dans un contexte français, quelques adaptations pourraient permettre de l'appliquer dans un contexte étranger.

Enfin, cet indicateur doit permettre de comparer plusieurs solutions de réutilisation d'éléments entre elles mais également de comparer le potentiel de réemploi entre plusieurs éléments. Le calcul de l'indicateur de potentiel de réemploi s'effectue pour une méthode de déconstruction choisie et un usage choisi : soit un réemploi soit un type de réutilisation. Le lieu d'usage n'a pas besoin d'être

déterminé, l'élément peut être stocké en attente de débouché ; les conséquences (coût, dégradations) sont intégrées dans le résultat de l'indicateur.

Par exemple, dans le cas d'un voile en béton, on peut choisir de calculer l'indicateur pour un réemploi *stricto sensu* c'est-à-dire pour la même fonction et avec peu de reconditionnement ou bien pour une réutilisation en revêtement de sol ou encore une réutilisation en muret. Les processus et contraintes techniques ne sont alors pas les mêmes et influencent le résultat de l'indicateur. Il est également possible de calculer l'indicateur pour ces trois scénarios, de les comparer et ainsi de choisir le débouché le plus favorable dans le cas où un des scénarios se démarquerait des autres.

Notons que cet indicateur n'a pas vocation à se substituer à l'expertise technique ou au rapport du diagnostic ressource. Au contraire, il s'appuie sur les résultats de ces expertises. Ainsi, de nombreux critères seront renseignés à partir de ces documents.

3.3.1.2 Présentation de l'indicateur

Pour le calcul de l'indicateur, nous nous inspirons fortement des travaux présentés dans (Colas, 2017) et dans (Bertin, 2020). Nous évaluons deux indices $I_{P_{rés}}$ et $I_{C_{ext}}$ (Équation 15) permettant respectivement de mesurer les performances techniques de l'élément *i.e.* les caractéristiques qui permettront un futur usage et de mesurer les contraintes pour déconstruire l'élément, qui peuvent être d'ordre économique, juridique, technique, environnementale et sociale.

Équation 15

$$P_R = I_{P_{rés}} \times (1 - I_{C_{ext}})$$

P_R : Indicateur de Potentiel de Réemploi

$I_{P_{rés}}$: Indice de Performance résiduelle de l'élément

$I_{C_{ext}}$: Indice pour les critères externes à l'élément

Le résultat de l'indicateur P_R est compris entre 0 et 1 ; un score de 1 signifie que l'élément étudié a un fort potentiel de réemploi ou de réutilisation, à l'inverse un score de 0 tend à montrer que l'élément n'a pas de potentiel de réemploi ou réutilisation. Les seuils intermédiaires sont à étalonner avec des retours d'expérience. Nous en proposons une première calibration en section 3.4.1 mais celle-ci devra être poursuivie au-delà de la thèse.

Cette méthodologie s'appuie sur le travail de (Bertin, 2020). Les indices sont mesurés en combinant plusieurs critères (technique, économique, géométrique...). Les critères ainsi que la méthodologie de calcul de ces critères sont explicités dans les parties 3.3.2 et 3.3.3 respectivement pour les indices $I_{P_{rés}}$ et $I_{C_{ext}}$. Pour faciliter la compréhension et illustrer le fonctionnement de l'indicateur, nous présentons les tableaux de critères simplifiés pour le calcul des indices dans les Tableau 41 et Tableau 42.

Pour chaque critère, il existe au maximum 5 niveaux. Le niveau 1 est le niveau le plus favorable au réemploi ou à la réutilisation. *A contrario*, le niveau 5 est le niveau de critère le plus défavorable. Les niveaux ne sont pas nécessairement linéaires dans leur notation.

Tableau 41 : Matrice simplifiée des critères internes pour le calcul de $I_{P_{rés}}$

Type et caractéristiques géométriques				
A	B	C	D	E
4	3	2	1	NR
État de l'élément avant dépose				
A	B	C	D	E
4	3	2	1	NR
Performances mécanique et technique et pertes lors du processus				
A	B	C	D	E
4	3	2	1	NR

NR= non réemployable

Tableau 42 : Matrice simplifiée des critères externes pour le calcul de $I_{C_{ext}}$

Thèmes		Critères	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5	Bonus /malus
Technique	Facilité de déconstruction	Difficulté technique de la déconstruction	0	1	3	6	7	
		Facilité d'accès à l'élément (avant et pendant la déconstruction)	0	1	3	3	5	
	Logistique	Manipulation (poids, volume, outils spécifiques)	0	1		3	4	1
		Risque d'endommagement	0	2	4	5	7	
		Accessibilité des sites (chantier, stockage, nouveau chantier)	0	1		3	4	
	Autres	Quantité	0	1			4	
		Connexions/ assemblage avec les ouvrages attenants	0	1		3	4	
		Usage futur (devenir certain ou incertain)	0		2			
Juridique	Statut juridique (déchets)	0	2			5		
	Assurance et garantie	0	1	2	5			
Economique	Maturité du marché (adéquation offre/demande)	0	1	2	4	7		
	Prix (par rapport au produit équivalent ou alternatif)	0	1	2		4		
Environnement et santé	Impact environnemental par rapport au produit équivalent	0	1		4	4	-1	
	Santé (substance dangereuse, qualité de l'air...)	0	1	2	4	7		
	Sécurité (des travailleurs et des riverains)	0	1		3	4		
Social et acteurs	Sensibilisation des acteurs (AMO, MOA, MOE, entreprise, compagnons)	0	1	3	4	7		
	Authenticité, valeur et caractère obsolète ou démodé	0	0	1		4		

Concernant les critères, certains sont chiffrés, d'autres plus qualitatifs. En effet, comme le précisent (Ghyoot et al., 2018), il existe « une multitude de facteurs que les experts en charge de l'identification des réutilisables potentiels doivent apprécier. Certains de ces facteurs ne se mesurent pas à l'aide

d'indicateurs chiffrés. Ils renvoient plutôt à une capacité d'appréciation basée sur l'expérience, l'intuition et le bon sens ». Ainsi par l'ajout de certains critères qualitatifs, nous laissons une liberté d'appréciation au diagnostiqueur (ou auditeur) afin qu'il apporte son expertise et sa créativité.

Comme mentionné précédemment, l'indice $I_{Prés}$ est développé dans le cadre particulier du réemploi d'une structure en béton armé. Il est nécessaire d'adapter cet indice pour chaque élément et usage choisi. En revanche, I_{Cext} est adapté à tous types de réemploi ou réutilisation d'éléments du bâtiment (l'indice n'a alors pas besoin d'être modifié au cas par cas).

Le calcul des critères s'appuie fortement de la matrice de pedigree utilisée en ACV pour la mesure des incertitudes (présentée en section 1.3.5.1), ainsi que sur la méthodologie du (CEREMA, 2020) sur l'analyse des risques pour la méthode d'élaboration de grilles de critères.

La Figure 95 présente une synthèse des termes employés pour les variables à chaque échelon du processus de calcul de l'indicateur de potentiel de réemploi.

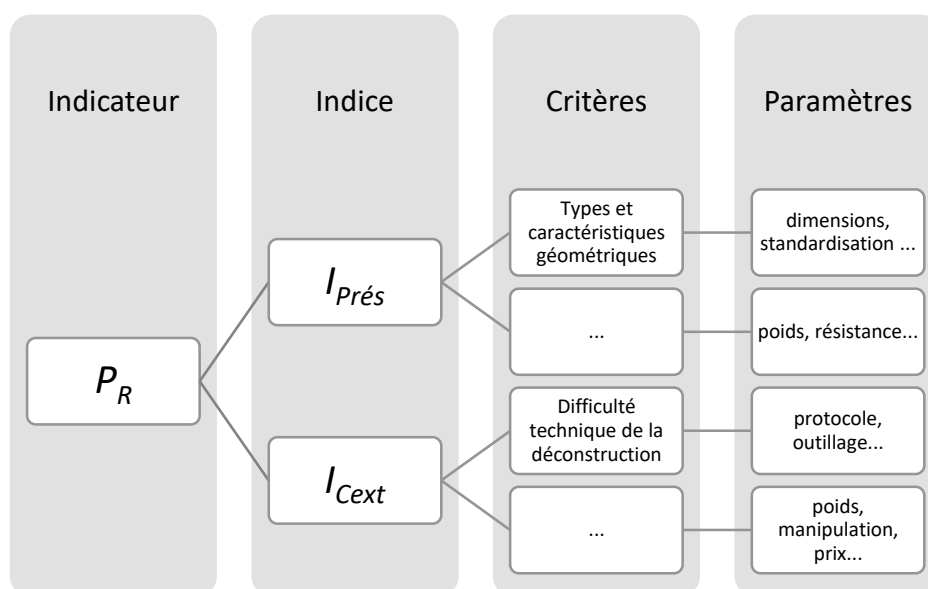


Figure 95 : Termes pour qualifier les variables en fonction des échelons du processus de calcul de l'indicateur

Dans le cas où l'un des critères n'est pas mesuré ou bien lorsqu'on ne connaît pas la réponse au moment de l'audit, il est nécessaire de prendre par défaut le niveau le plus défavorable. Le critère pourra être mis à jour en fonction de l'évolution de l'information à l'instar de l'ACV.

Dans le cas où l'objet d'étude répond à deux possibilités pour un même critère, il est nécessaire de sélectionner le paramètre le plus contraignant. Par exemple, dans le cas de la nexorade (section 2.2) sa fonction est de couvrir (fait partie du clos couvert) mais également de jouer un rôle structurel. La fonction la plus contraignante est l'aspect structurel, c'est elle qui sera retenue pour le critère « assurance garantie » (section 3.3.3).

Dans le cas où un critère n'est pas applicable pour le cas d'étude voulu, cela veut dire que le critère n'est pas essentiel/requis/nécessaire. Il existe alors deux solutions :

- Considérer le niveau le plus favorable au réemploi,
- Évaluer l'indice et exclure le critère en question du calcul (et donc diminuer le score max possible d'autant de points que le niveau maximal du critère en question).

3.3.2 Critères et niveaux des critères pour les caractéristiques intrinsèques de l'élément (calcul de $I_{P_{rés}}$)

Dans leur ouvrage, (Benoit et al., 2018) mentionnent que « Les sollicitations environnementale et d'usage ont fait évoluer le matériau dans le temps [...]. Connaître les sollicitations sur un matériau permet donc de fiabiliser les choix de domaine de réemploi sur les aspects de performance technique et de durabilité ».

L'indice $I_{P_{rés}}$ doit prendre en compte les aspects de performance technique et de durabilité. Il permet ainsi de qualifier l'état du matériau comme **compatible avec l'usage souhaité dans sa nouvelle fonction**.

Pour cela, comme mentionné dans la section 1.2.1, des techniques de diagnostic d'ouvrage existent. (Breyse and Abraham, 2005) définissent le diagnostic d'un ouvrage comme la réponse précise aux « questions soulevées par le MOA soit pour confirmer l'état satisfaisant de l'ouvrage, soit, si celui-ci est dégradé, pour fournir toutes les informations utiles pour la décision ultérieure : nature, étendue, causes des désordres, durée de vie résiduelle présumée et risques encourus, moyens de remédiation et coûts... ». Cette définition vaut autant pour les ouvrages d'art que les bâtiments.

Dans le cas de l'indicateur de potentiel de réemploi et notamment $I_{P_{rés}}$, il s'agit de donner un premier indice et non de se substituer à un diagnostic détaillé ou, dans le cas où le diagnostic est déjà réalisé, il s'agit d'utiliser les résultats de manière simplifiée afin de mesurer le potentiel de réemploi.

Par ailleurs, pour cet indice sur les caractéristiques internes, les niveaux de critères trop singuliers (éléments soumis aux ions chlorure par exemple) sont notés très défavorablement par manque de données sur la durabilité. Néanmoins, ils peuvent être adaptés et modifiés au fur et à mesure des évolutions du domaine et des connaissances.

Face à ces observations, pour cet indice $I_{P_{rés}}$, nous sélectionnons trois critères représentatifs de l'intérêt technique résiduel de l'objet d'étude :

- Types de fabrication et caractéristiques géométriques,
- État de l'élément avant dépose (inspection visuelle) et contrôle de la qualité,
- Performances mécanique, technique et esthétique.

L'évaluation de ces trois critères est détaillée par la suite. Ces critères ne s'appliquent que dans le **cas d'un réemploi d'une structure en béton armé**. Ils peuvent être facilement adaptables à d'autres éléments de structure.

Notons que des guides méthodologiques et techniques ont été développés avec le CSTB et le LERM par Bellastock (Benoit et al., 2018) pour :

- Le réemploi de béton en murs,
- Le réemploi de béton en revêtement de sol.

Un guide technique et méthodologique pourrait être développé pour chaque usage et chaque élément notamment sous contraintes structurelles fortes. Un autre exemple de guide technique est celui présenté dans (FBE, 2020) pour le réemploi de briques. Ces guides peuvent permettre de diagnostiquer plus facilement un élément et d'améliorer la qualité du processus de réemploi et réutilisation.

Types et caractéristiques géométriques

Il s'agit dans ce critère d'étudier le procédé de fabrication ainsi que la géométrie de l'élément cible. Nous avons vu précédemment (section 3.1.4.3) que les bétons préfabriqués pouvaient constituer une voie d'entrée pour le réemploi du béton armé. Les types d'éléments en béton utilisés dans le bâtiment sont :

- **Béton armé préfabriqué** : potentiellement réemployable car ce sont des éléments de dimensions plutôt standardisés et présents en quantité dans un bâtiment. Le lot obtenu sur un bâtiment est donc homogène en qualité et en état ;
- **Béton précontraint préfabriqué** (pré-tension) : le lot obtenu dans un bâtiment est également homogène dans sa qualité et son état. La forte contrainte de la préfabrication permet d'avoir des dimensions standards et de connaître plus facilement les caractéristiques mécaniques. Toutefois, contrairement au béton armé préfabriqué, il peut exister une incertitude sur la tension au sein du béton (tension initiale, tension résiduelle), le potentiel de réemploi est donc un peu plus faible ;
- **Béton armé** (coulé en place) : du fait du coulage sur chantier, l'homogénéité de fabrication est plus incertaine. Les aléas lors de la mise en place (type et qualité du béton, mise en place par les compagnons, température...) peuvent mener à une qualité qui varie légèrement d'un élément à l'autre. Par ailleurs, les dimensions peuvent être adaptées au bâtiment donc possiblement moins standardisées. Le potentiel de réemploi semble donc plus faible que le béton armé préfabriqué ;
- **Béton précontraint** (post-tension) : peu utilisé dans le bâtiment mais plus dans le génie civil, cette méthode permet de franchir des grandes distances et permet de disposer d'un ouvrage sur-mesure adapté aux dimensions. Nous avons peu de retours d'expériences sur la fin de vie de ces éléments. « La mise en œuvre de la précontrainte est une opération précise et dangereuse. Elle doit être assurée par le personnel qualifié de l'entreprise distributrice spécialisée et sous le contrôle du CMP (chargé de mise en précontrainte) de celle-ci » (Techniques de l'Ingénieur, 2005). Un défi est donc présent sur la démolition et la déconstruction de ces éléments. Le potentiel de réemploi semble donc similaire au béton précontraint préfabriqué lorsque l'on réemploi l'élément au complet mais très compliqué s'il est nécessaire de scinder l'élément ;
- **Béton fibré** (dont BFUP) : Le béton fibré est un matériau récent. Nous ne disposons que de peu de retours de durabilité sur une vie en œuvre longue. Néanmoins, de par l'usage de béton haute performance pour le BFUP et la limitation des fissurations grâce aux fibres, la durabilité de ce type de béton semble très bonne (Weill, 2021). Il se pose toutefois la question du traçage des informations pour un bâtiment en fin de vie (béton utilisé, fibre utilisée). Par ailleurs, ce béton est majoritairement utilisé pour des géométries très différentes d'un projet à l'autre. Le potentiel de réemploi semble donc bon pour les éléments simples et standardisés mais plus compliqué pour les éléments très spécifiques. Toutefois, l'originalité peut ajouter un caractère authentique à l'élément (critère qui est pris en compte dans l'indice $I_{C_{ext}}$).

Le critère prend également en compte plusieurs **types de section** (section rectangulaire, section en L, section en T, autres sections particulières) ainsi que les **dimensions** (plutôt standards ou plutôt non standards). Pour ce dernier critère, aucune définition exacte n'est donnée, c'est à l'appréciation du diagnostiqueur et fonction de la typologie de bâtiment. Dans sa thèse, (Bertin, 2020) donne quelques dimensions concernant les structures poteau/poutre : « Un bureau répond [généralement] à une trame standard de 1,35 m pour ses modules de façade, afin d'implanter un bureau type sur 2 trames de fenêtres (2,70 m de large) et sur une profondeur d'environ 5 m (5,4 m si la façade perpendiculaire

respecte la même trame), soit une surface type d'environ 13,5 m² et une hauteur sous plafond de 2,7 m à 2,8 m ». De plus « les portées sont alors calées sur des multiples de la façade : 5,4 m ; 8,1 m ; 10,8 m. La profondeur totale d'un bâtiment de bureaux est fixée entre 18 m et 20m ». Enfin concernant les logements « la hauteur sous plafond est généralement de 2,5 m (soit de 2,8 m à 3,1 m dalle à dalle) mais les trames sont plus diverses ».

Ces différents paramètres sont croisés dans le Tableau 43. Cela permet d'obtenir un score en fonction de la note obtenue (Tableau 44).

Tableau 43 : Matrice de détermination de la note concernant le critère Type et la Géométrie de l'élément. *score à affiner après retours d'expériences

Type de fabrication		Béton Armé Préfabriqué		Béton Précontraint Préfabriqué (pré-tension)		Béton Armé (coulé sur chantier)		Béton précontraint (post-tension)*		Béton fibré*	
		Standard	Non standard	Standard	Non standard	Standard	Non standard	Standard	Non standard	Standard	Non standard
Section	Rectangulaire	1	2	2	3	2	3	/	6	2	3
	en T	2	3	3	4	3	4	/	6	3	4
	en L	3	4	4	5	4	5	/	6	4	5
	Autre	5	5	6	6	6	6	/	6	6	6

Tableau 44 : Score du critère Type et Géométrie

Score Type et Géométrie	
1	A
2 à 3	B
4	C
5	D
6	E

3.3.2.1 État et contrôle de la qualité (durabilité)

Ce critère caractérise l'état de l'élément avant déconstruction. Il prend en compte la présence ou non de pathologies liées à l'ouvrage. Par ailleurs, des éléments de contrôle de la qualité interviennent tout au long du processus de réemploi et réutilisation. La résistance résiduelle n'est pas comptée dans ce critère (ceci est l'objet du critère suivant).

Dans ce cadre, on s'intéresse aux pathologies du béton armé (et autres types de béton), et notamment le risque de corrosion des armatures, de même que la classe d'exposition (selon la norme EN 206-1) de l'élément dans le bâtiment source.

Concernant le contrôle de la qualité, un critère de sensibilisation des acteurs est déjà compté dans l'indice $I_{C_{ext}}$. Il s'agit ici de s'assurer de la présence d'un garde-fou sur la qualité des différentes étapes du processus.

La grille de mesure est présentée dans le Tableau 45. Des adaptations peuvent être nécessaires pour l'appliquer au béton précontraint et au béton fibré.

Tableau 45 : Matrices de détermination du niveau d'état de l'élément

		Classe d'exposition bâtiment source								
		Aucun risque ni attaque	Corrosion induite par carbonatation (XC)				Corrosion induite par chlorure	Corrosion induite par chlorure eau de mer	Attaque gel dégel	Attaque chimique
		X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XD	XS	XF	XA
Pathologie	Absence d'observation particulières (ou très faible fissuration en zone tendu)	A	A	B	B	C	C	D	D	E
	Nid d'abeille	B	B	B	C	C	D	E	E	E
	Fissuration légère, normale	B	B	B	C	C	D	E	E	E
	Fissuration anormale, laminage, épaufrure, écaillage	E	E	E	E	E	E	E	E	E
	Corrosion avérée des armatures	E	E	E	E	E	E	E	E	E
	Infiltration de produits chimiques	E	E	E	E	E	E	E	E	E

	Oui	Non
Garde-fou présent à toutes les étapes du processus (Au moins 1) : - Contrôleur technique, - Expert béton armé, - AMO réemploi, - Entreprise identique de la dépose à la repose, - Guide technique reconnu pour toutes les étapes et pour l'élément cible.	Note du tableau précédent	+1 niveau par rapport au niveau issu du tableau (ex : de A à B, de D à E...)

Durée de vie résiduelle estimée (adaptable selon l'usage envisagé, ici calibrée pour un bâtiment classique)	< 25 ans	25 à 50 ans	50 à 100 ans	> 100 ans
	E	Note obtenue sur le premier tableau + 1 niveau	Note obtenue sur le premier tableau	Note obtenue sur le premier tableau

La durée de vie résiduelle est fortement liée au risque de corrosion du béton armé. Dans un bâtiment, la corrosion résulte principalement de la « pénétration du gaz carbonique qui, après réaction chimique, abaisse le pH au voisinage des armatures de 12,5 à environ 9. Les aciers sont alors dépassivés et la corrosion peut démarrer ». Ainsi, « la profondeur de carbonatation est donc un indicateur de durabilité » (Breyse and Abraham, 2005). La profondeur de carbonatation peut être déterminée par des carottages puis un test à la phénolphtaléine en laboratoire (section 1.2.1 et 4.2.4.1). Plusieurs lois empiriques permettent de prédire l'évolution de la profondeur de carbonatation (Papadakis et al., 1991a, 1991b; Breyse and Abraham, 2005). Ces lois sont de la forme :

$$x(t) = k\sqrt{t}$$

$x(t)$ Profondeur de carbonatation en mètre,

k Coefficient qui dépend de la perméabilité, de la pression partielle de CO₂ et de la composition du béton, en m/(année)^{0.5},

t Temps d'exposition en années.

Il est ainsi possible d'estimer la durée de vie résiduelle avant dépassivation des aciers.

Dans le cas d'un ouvrage où la corrosion des aciers a déjà commencé, nous considérons que l'élément n'est pas réemployable en l'état. En effet, (Breysse and Abraham, 2005) montrent que lorsqu'il y a corrosion, la diminution de la charge n'est pas directement proportionnelle à la diminution de la section d'acier « ceci est dû à la prise en compte de l'écart type sur le taux de corrosion [la corrosion n'est pas uniforme] » ; « la corrosion provoque une diminution du niveau de sécurité qui est caractérisé par [...] une augmentation de la probabilité de défaillance ». Ainsi dans leur exemple, pour un taux de corrosion de 40 %, la probabilité de défaillance augmente drastiquement de $2,1 \cdot 10^{-5}$ à 0,184. L'augmentation de probabilité de défaillance est donc très forte. Dans un cas de ce genre, il serait donc nécessaire de réaliser des réparations préalables.

3.3.2.2 Performances (dont résistance résiduelle)

Ce critère prend en compte les performances de l'élément à réemployer ou réutiliser selon les besoins de la destination envisagée. Il prend en compte également les risques de pertes et de dégradations lors des manipulations. Il est complémentaire au critère précédent. Le recueil d'informations nécessite des tests supplémentaires (non destructifs et destructifs) notamment pour déterminer les matériaux composant les éléments mais également pour déterminer leurs capacités techniques résiduelles.

Dans la section « freins techniques » (section 3.1.2.1), nous avons vu qu'un matériau neuf devait répondre à plusieurs exigences techniques. Nous nous basons sur cette liste d'exigences pour mettre au point ce critère. Nous y ajoutons la question esthétique qui peut être une exigence secondaire ou bien de premier plan selon l'objet étudié.

Pour chaque exigence non conforme, des modifications ou équipements supplémentaires seront nécessaires pour y remédier. En conséquence, cela diminue le potentiel de réemploi de l'élément. La complication est traduite par un score que l'on peut mesurer avec le Tableau 46. Les valeurs des exigences (colonne 4) sont données dans le cas d'un élément de structure en béton armé. Les valeurs sont à adapter pour les autres types d'éléments. Pour les paramètres peu ou non intéressants dans le cas d'une structure (ex : mauvaise évacuation des déchets), la valeur de 1 est donnée par défaut.

Nous mesurons par ailleurs la résistance résiduelle de l'élément. Ce paramètre est mesuré en calculant le ratio présenté dans l'Équation 17. Cette valeur est ensuite corrigée avec les risques de pertes et dégradations lors des étapes de stockage, transport et mise en place. Ainsi, le résultat est compris entre 0 et 1 avec « 1 » plutôt favorable au réemploi car aucune perte de résistance et « 0 » défavorable au réemploi car perte totale de résistance. Notons que le calcul de la résistance résiduelle est donné par le diagnostic d'ouvrage, nous ne le détaillons donc pas.

Équation 17

$$Ratio = \frac{R_{rés}}{R_{théo}}$$

$R_{rés}$ Résistance résiduelle estimée ou testée,

$R_{théo}$ Résistance théorique de l'élément à l'état neuf.

Enfin, nous croisons les résultats obtenus lors des deux étapes précédentes (mesure du risque de complication et mesure de la résistance résiduelle) afin d'obtenir un score unique pour le critère de performance (Tableau 47). Les échelles des scores et les résultats sont calibrés pour un élément de réemploi en béton à rôle structurel.

La note de E équivaut à un réemploi impossible.

Tableau 46 : Extrait de feuille de calcul du score de performance des paramètres techniques. La feuille complète est disponible en annexe VI

		Exigence requise? 1 =oui 0=Non	Si l'exigence est requis e pour l'usage future mais non respectée par l'objet à réemployer	Score à reporter dans cette colonne	Partie à remplir en pourcentage pour chaque paramètre où l'exigence est requise et respectée								Total si exigence requise et respectée	
					Risque de pertes ou de dégradations lors des étapes									
					Dépose		Transport		Stockage		Nouvelle installation			
					Pertes	Dégradation	Pertes	Dégradation	Pertes	Dégradation	Pertes	Dégradation		
Mécanique	Effondrement de l'ouvrage (résistance résiduelle): Calculé par ailleurs	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
	Déformation excessive (ELS)	1	10											0
	Conséquences sur les autres ouvrages	1	2											0
	Résistances aux accidents	1	4											0
Sécurité Incendie	Stabilité des éléments au feu	1	5											0
	Apparition et propagation limitée du feu et des fumées	1	5											0
	Sécurité des occupants et des équipes de secours	1	5											0
Qualité esthétique		1	2											0
Nombre d'exigences			Sous Total										Sous Total	
					Total									
					Score sur les paramètres techniques (hors résistance résiduelle)									

OU :
(si l'exigence est respectée)

Tableau 47 : Détermination du résultat du critère Performance en croisant le score de résistance résiduelle et le score des autres paramètres techniques

		Paramètre de résistance résiduelle (Ratio corrigé)				
		[1 ; 0,8 ]	] 0,8 ; 0,6 ]	] 0,6 ; 0,4 ]	] 0,4 ; 0,2]	< 0,2
Score sur les paramètres techniques	[0 ; 0,7]	A	B	C	D	E
	] 0,7 ; 1]	B	C	D	E	E
	] 1 ; 1,5]	C	C	D	E	E
	] 1,5 ; 3]	D	D	E	E	E
	] 3 ; 10]	E	E	E	E	E

3.3.2.3 Synthèse

Les étapes précédentes permettent d'obtenir une note (A, B, C, D ou E) pour chaque critère composant l'indice. À cette note alphabétique, nous associons une valeur numérique pour chaque critère à l'exception de la note E qui exclut d'emblée le réemploi ou réutilisation pour l'usage considéré (NR : Non Réemployable). En additionnant les valeurs de chaque critère (et en l'absence de note E) et en divisant le résultat par 12 (note maximale), on obtient une valeur comprise entre 0 et 1 avec « 0 » plutôt défavorable au réemploi et « 1 » plutôt favorable au réemploi (NB : S'il y a au moins une note E, le score final est de 0).

Tableau 48 : Tableau de calcul de l'indice $I_{P_{rés}}$

Type et caractéristiques géométriques					
A	B	C	D	E	
4	3	2	1		NR
Etat de l'élément avant dépose					
A	B	C	D	E	
4	3	2	1		NR
Performances mécanique et technique et pertes lors du processus					
A	B	C	D	E	
4	3	2	1		NR

3.3.3 Critères et niveaux des critères pour les caractéristiques externes (calcul de $I_{C_{ext}}$)

Nous nous intéressons au calcul de l'indice $I_{C_{ext}}$. À l'instar de l'indice précédent, nous basons le calcul sur une matrice présentant au maximum 5 niveaux par critère. Les différents critères traités sont présentés dans le Tableau 49. L'indicatif/nomenclature de chaque critère est donné en troisième colonne.

Tableau 49 : Thématiques et critères pour le calcul de l'indice $I_{C_{ext}}$

Thèmes		Critères		Sources
Technique	Facilité de déconstruction	T1	Difficulté technique de la déconstruction	(Deweerd and Mertens, 2020)
		T2	Facilité d'accès à l'élément (avant et pendant la déconstruction)	(Deweerd and Mertens, 2020)
	Logistique	T3	Manipulation (poids, volume, outils spécifiques)	(Deweerd and Mertens, 2020)
		T4	Risque d'endommagement	
		T5	Accessibilité des sites (chantier, stockage, nouveau chantier)	(Deweerd and Mertens, 2020) (ADEME et al., 2016)
	Autres	T6	Quantité	(Deweerd and Mertens, 2020)
		T7	Connexions/ assemblage avec les ouvrages attenants	(Durmisevic, 2006)
		T8	Usage futur (devenir certain ou incertain)	
Juridique	J1	Statut juridique (déchets)	(ADEME et al., 2016)	
	J2	Assurance et garantie	(ADEME et al., 2016)	
Économique	E1	Maturité du marché (adéquation offre/demande)	(Deweerd and Mertens, 2020) (ADEME et al., 2016)	
	E2	Prix (par rapport au produit équivalent ou alternatif)	(Deweerd and Mertens, 2020) (ADEME et al., 2016)	
Environnement et santé	ES1	Impact environnemental par rapport au produit équivalent	(Deweerd and Mertens, 2020) (ADEME et al., 2016)	
	ES2	Santé (substance dangereuse, qualité de l'air...)	(Deweerd and Mertens, 2020) (ADEME et al., 2016)	

	ES3	Sécurité (des travailleurs et des riverains)	(Deweerd and Mertens, 2020) (ADEME et al., 2016)
Social et acteurs	SA1	Sensibilisation des acteurs (AMO, MOA, MOE, entreprise, compagnons)	(ADEME et al., 2016)
	SA2	Authenticité, valeur et caractère obsolète ou démodé	(Deweerd and Mertens, 2020)

Les niveaux sont définis par une ou plusieurs propositions. Dans l'exemple en Figure 96, nous trouvons notamment les termes :

- « OU » : au choix parmi la proposition directement avant et la proposition directement après,
- « OU seulement » : la proposition directement après est suffisante pour atteindre le niveau,
- « ET » : les propositions directement avant et directement après doivent être vérifiés simultanément,

Par exemple, dans la proposition « a ET b ET c OU d OU seulement e » pour obtenir ce niveau il faut **soit** vérifier a et b et c, **soit** vérifier a et b et d, **soit** vérifier seulement e.

La somme de chaque critère donne un score à diviser par le nombre maximal de points (soit 84). On obtient alors un nombre correspondant à l'indice $I_{C_{ext}}$ compris entre 0 (très favorable au réemploi) et 1 (réemploi très défavorable).

Niveau du critère	Niveau 1	Niveau 2
Affirmations à vérifier pour l'obtention du niveau	Existence protocole courant reconnu (EAD, plusieurs ATEX similaires, protocole Bellastock ou ADEME...) OU Protocole avec c dépose soignée "par couche du bâtiment" des éléments ET Dépose manuelle avec petit outillage (visseuse, scie manuelle)	Existence protocole courant reconnu (EAD, plusieurs ATEX similaires, protocole Bellastock ou ADEME...) ET Dépose avec outillage lourd (robot, découpeuse/tronçonneuse, outil hydraulique, pelleteuse, chargeur...)
Valeur du critère si le niveau est vérifié	0	1

Figure 96 : Principe de calcul d'un critère pour le calcul de l'indice $I_{C_{ext}}$

Nous détaillons par la suite chaque critère présenté dans le Tableau 49.

3.3.3.1 Caractéristiques techniques

Pour le thème portant sur la technique, nous nous basons de manière non exclusive sur les travaux de (Michel et al., 2010; Glias, 2013; Brière, 2016) concernant la démolition/déconstruction de structures ainsi que (Benoit et al., 2018; Küpfer and Fivet, 2021) pour le réemploi et la déconstruction des autres matériaux (*i.e.* réemploi de matériaux autres que le béton). Les critères sont issus du regroupement des informations de la littérature (section 3.1) dont notamment (ADEME et al., 2016; Deweerdt and Mertens, 2020). Pour les valeurs des niveaux des critères, nous donnons une appréciation en première approximation ; les valeurs de ces niveaux nécessitent un affinage par discussion d'un groupe d'experts et par application et étalonnage sur plusieurs cas d'études.

L'ensemble des niveaux des critères techniques est présenté dans le Tableau 50.

Tableau 50 : Matrice des niveaux pour les critères techniques

Critères	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5	Bonus à ajouter au niveau
Difficulté technique de la déconstruction	Existence protocole courant reconnu (EAD, plusieurs Atex similaires, protocole Bellastock ou ADEME...) OU Protocole avec dépose soignée "par couche du bâtiment" des éléments ET Dépose manuelle avec petit outillage (visseuse, scie manuelle)	Existence protocole courant reconnu (EAD, plusieurs Atex similaires, protocole Bellastock ou ADEME...) ET Dépose avec outillage lourd (robot, découpeuse/tronçonneuse, outil hydraulique, pelleteuse, chargeur...)	Absence de protocole courant reconnu mais existence protocole "maison" inédit ET Dépose avec outillage lourd ou dépose manuelle avec outillage léger	Protocole actuellement inexistant ET Dépose manuelle possible avec outillage léger	Protocole actuellement inexistant ET Dépose possible avec outillage et matériel lourd	
	0	1	3	6	7	
Facilité d'accès à l'élément (avant et pendant la déconstruction)	Élément directement visible dans son intégralité (notamment les assemblages) ET Absence de risques supplémentaires à un chantier classique (EPI)	Élément caché en partie OU Élément caché en totalité mais plan de montage disponible dans le DOE ET Absence de risques supplémentaires à un chantier classique (EPI)	Élément caché en totalité, faiblement ou difficilement accessible (une ou plusieurs "couches" à enlever au préalable) ET Matériel d'accès et de sécurité faible ou modéré, pendant l'audit et/ou pendant les travaux	Élément visible ET Matériel d'accès et de sécurité modéré ou important (plateforme de travail, nacelle, échafaudage...) lors de l'audit et lors du chantier	Élément non visible, difficilement accessible (plusieurs "couches" à enlever au préalable) ET Matériel d'accès et de sécurité important et très technique supplémentaire (travail en hauteur, risque d'enfouissement) (échafaudage, treuil, blindages, nombreux étais...). Matériel nécessaire pour l'audit et le chantier	
	0	1	3	3	5	
Manipulation (poids, volume, outils spécifiques)	Petits éléments* ET Inférieur ou égale à 4 manipulations***	Petits éléments* ET Supérieur à 4 manipulations***		Gros éléments** ET Inférieur ou égal à 6 manipulations***	Gros éléments** ET Supérieur à 6 manipulations***	Malus pour l'élingage si ajout (par rapport au chantier classique) d'une grue fixe ou mobile soit sur les chantiers soit sur le centre de stockage ou soit sur le centre de traitement
	0	1		3	4	1

Risque d'endommagement	Inférieur à 6 manipulations ET Impact vulnérabilité x enjeu* modéré OU seulement Impact vulnérabilité x enjeu* faible	Supérieur à 6 manipulations ET Impact vulnérabilité x enjeu* modéré	Inférieur à 4 manipulations ET Impact vulnérabilité x enjeu* fort ou très fort	Supérieur à 4 manipulations ET Impact vulnérabilité x enjeu* fort	Supérieur à 4 manipulations ET Impact vulnérabilité x enjeu* très fort	
	0	2	4	5	7	
Accessibilité des sites (chantier, stockage, nouveau chantier)	Très bonne accessibilité	Bonne accessibilité		Faible accessibilité	Très faible accessibilité	
	0	1		3	4	
Quantité	Suffisant	Presque suffisant			Largement insuffisant	
	0	1			4	
Connexions/ assemblage avec les ouvrages attenants	Assemblage lisible ET Bon état de l'interface*	Assemblage lisible ET Etat moyen de l'interface*		Assemblage lisible ET Très mauvais état de l'interface*	Assemblage non lisible	
	0	1		3	4	
Usage futur (devenir certain ou incertain)	Devenir certain au moment de l'audit		Devenir incertain ou inconnu au moment de l'audit			
	0		2			

Les détails des critères du sous thème **facilité de déconstruction** sont présentés ci-dessous.

Difficulté technique de la déconstruction : le critère traduit la faisabilité technique de la déconstruction. Par ce terme, on entend l'existence ou non d'un procédé de déconstruction courant et si ce procédé demande du matériel conséquent supplémentaire (et dans quelle mesure). La déconstruction doit conserver le caractère intègre de l'élément après déconstruction qui est évalué dans $I_{P_{rés}}$ l'indice de performance résiduelle de l'élément ; de même pour le besoin ou non de test supplémentaire. Le type d'assemblage fait l'objet d'un critère indépendant.

Les cinq différents niveaux sont composés selon l'existence d'un protocole de démontage établi ou au contraire de l'absence de protocole ainsi que l'usage de matériel lourd (soit manu portable tel qu'une découpeuse ou un pic hydraulique soit automatisé ou autoporteur tel qu'un robot, banc de coupe, pelleuse, chargeuse ...) ou à l'inverse d'un matériel léger (visseuse, perceuse, pied de biche, marteau, ciseaux...).

Les valeurs sont fixées afin qu'aucun niveau n'empêche de manière rédhibitoire un possible réemploi. Effectivement, avec de la volonté, un protocole peut être trouvé et les autres critères notamment économiques et environnementaux doivent pouvoir changer la donne ou au contraire confirmer l'absence de potentiel de réemploi ou de réutilisation.

Facilité d'accès à l'élément : ce critère est complémentaire au critère précédent. Il traduit l'accessibilité à l'élément en question avant mais également pendant la déconstruction afin de réaliser l'audit, les tests nécessaires et d'affiner le protocole de démontage. L'accès est important pour être précis dans la déconstruction et planifier l'ordonnancement du démontage. L'accès à l'élément doit également se faire de manière sécuritaire. Ainsi, ce critère prend en compte l'équipement de sécurité supplémentaire nécessaire. Par exemple, pour le réemploi de tuiles, il est nécessaire d'accéder au toit mais également de sécuriser les lieux car le travail sera en hauteur. Ce critère est complémentaire au critère « sécurité » du thème « environnement et santé » car on se focalise ici sur le matériel supplémentaire pour assurer la sécurité et non sur les risques et conséquences.

Pour ce critère, cinq niveaux sont définis en fonction des deux paramètres : visibilité/accessibilité de l'élément et matériel d'accès et de protection supplémentaire. Le matériel est compté comme matériel supplémentaire et non comme matériel effectif utilisé car la méthode de déconstruction par défaut peut amener à installer quoi qu'il en soit ce matériel qui n'est alors pas spécifique et n'est donc pas une contrainte supplémentaire liée au réemploi. Par exemple, dans le cas d'une rénovation de façade, un échafaudage est installé pour les travaux. S'il est décidé de récupérer les anciennes menuiseries, il n'est pas nécessaire de compter l'échafaudage comme un élément supplémentaire pour le calcul de l'indicateur. L'échafaudage, bien qu'utile pour la récupération des menuiseries, n'a pas été mis en place spécifiquement pour cette récupération.

Les valeurs des niveaux sont réfléchies pour qu'à l'échelle globale de l'indicateur, le critère soit peu impactant (valeur peu élevée) car ce critère est secondaire. En effet, les contraintes techniques de mise en œuvre de la déconstruction seront pilotées par d'autres critères tels que le coût, la sécurité et l'état de l'assemblage. Dans le cas contraire, cela signifierait qu'il est intéressant de réemployer même si l'élément est difficile d'accès.

Les détails des critères du sous thème **logistique** sont présentés ci-dessous.

Manipulation : ce critère analyse la difficulté supplémentaire de manipulation liée à la récupération de l'élément. En effet, l'élément a un poids, un volume et une fragilité propre imposant des précautions particulières pour la manutention. Cela concerne la dépose de l'élément (après

démontage), son transport vers une plateforme de traitement/stockage ou vers le nouveau chantier ainsi que sa manipulation pour la nouvelle mise en œuvre. Ainsi, le critère prend en compte le matériel de manutention et de transport nécessaires (ce qui traduit le poids et le volume de l'élément). La fragilité ainsi que l'endommagement sont caractérisés dans le prochain critère.

On définit cinq actions durant lesquelles un élément subit une manipulation :

- Élingage, déplacement de l'élément lors du chantier (1 manipulation),
- Gerbage, regroupement des marchandises : emballage et déballage (2 manipulations),
- Trajet, transport d'un lieu à un autre (chantier, plateforme de stockage, plateforme de traitement) : chargement et déchargement (2 manipulations),
- Stockage, entreposage de l'élément,
- Traitement, nettoyage ou réparation (nombre de manipulations à compter en fonction du processus).

Au cours d'une opération de réemploi/réutilisation, l'élément subit donc au minimum deux manipulations : un stockage sur chantier en attente de la construction (mise en stockage puis récupération pour installation) et un transport direct vers le chantier d'utilisation (charge puis décharge). Il n'existe pas de maximum de manipulations.

Les niveaux définis pour ces critères sont fonction du nombre de manipulations réalisées mais également du volume et du poids de l'élément. Pour simplifier l'analyse, les petits objets seront considérés systématiquement gerbés sur palettes, ainsi les manipulations du lot entre l'emballage et le déballage ne seront pas comptés. Nous nous basons ici sur quelques règles de palettisation issues du groupe d'entreprise de d'emballage et de fourniture de bureau Raja⁴⁴. La palettisation est une hypothèse fortement simplificatrice néanmoins elle permet une optimisation de l'espace de stockage, du remplissage des transports et serait donc bénéfique à la vision de massification du réemploi. Par ailleurs, notamment pour les éléments aux dimensions non compatibles à la palettisation, la notion de poids volumétrique peut être intéressante. C'est « une méthode de calcul du volume d'un colis que fait un transporteur »⁴⁵. Ainsi, le transporteur convertit la taille du colis en un poids fictif (le poids volumétrique), qui traduit la place prise par le colis. Si le poids réel est supérieur au poids volumétrique le colis est facturé en fonction du poids réel. Si le colis a un poids réel inférieur au poids volumétrique, le colis est facturé au poids volumétrique. La méthode de calcul est selon l'entreprise Raja généralement $(L \times l \times h \text{ en cm}) / 5000$.

Dans une vision de massification du réemploi, nous considérons que les petits éléments sont les éléments qui peuvent être palettisés et donc leurs dimensions sont inférieures à 1200 x 800 x 1800 cm et leur poids inférieur à 1500 kg. Les gros éléments seront par conséquent les éléments qui ne rentrent pas dans la catégorie des petits éléments.

⁴⁴ <https://blog.raja.fr/guide-process-palettisation> , consulté en mars 2022. Format : 1200x800 ou 600*800. Charge max de 400 kg à 1500 kg (<https://www.logistiqueconseil.org/Articles/Entrepot-magasin/Palettes-dimensions.htm>) . Par ailleurs, un rapport de la carsat (https://www.carsat-ra.fr/images/pdf/entreprises/dte_22-5.pdf) préconise une hauteur de 1m80 pour les manipulations manuelles dans la logistique.

⁴⁵ <https://blog.raja.fr/poids-volumetrique> , consulté en mars 2022

Un malus est additionné au résultat pour l'élingage s'il est nécessaire d'ajouter (par rapport au chantier classique, à un centre de traitement classique ou à un centre de stockage classique) une grue fixe ou mobile sur les chantiers et/ou au centre de stockage et/ou au centre de traitement.

Les valeurs des niveaux restent modérées car les critères de coût et de risque d'endommagement complètent l'analyse. L'écart entre les petits éléments et les gros éléments est important car cela modifie l'efficacité de transport et demande un matériel plus robuste.

Risque d'endommagement : Ce critère traduit la fragilité de l'élément d'étude. Il caractérise le risque des différentes manipulations sur les capacités techniques (ou sur la valeur de l'élément). Selon (CEREMA, 2020), le risque est lié à :

- L'*aléa* : phénomène incertain à l'origine du risque. Il peut être naturel, d'origine humaine ou interne à l'élément ;
- La *vulnérabilité* : capacité de l'élément de par sa conception et son état à résister à l'aléa ;
- L'*enjeu* : prise en compte de la gravité des conséquences en terme « de vie humaine, de coûts de réparation » ou de valeur et capacité technique.

Tableau 51 : Tableau d'aide à la décision pour la détermination de la mesure du couple vulnérabilité x enjeu dans le cadre d'éléments du bâtiment

		Enjeu		
		La dégradation implique un ou plusieurs aspects d'intérêt de l'élément ? ET (OU seulement) Les conséquences peuvent atteindre la santé et la sécurité des personnes au cours du cycle de vie du bâtiment (mécanique, chimique...)	La dégradation implique un ou plusieurs aspects d'intérêt de l'élément ? ET Les conséquences sont sans gravité (esthétique, perte de valeur...)	La dégradation concerne des aspects d'intérêts secondaires ou sans importance
Vulnérabilité	Les éléments ne disposent d'aucune protection particulière pour contrer l'aléa OU Les éléments ne disposent d'aucun protocole pour le transport, le stockage ou la manipulation	10	7	3
	Le Transport, le stockage, l'emballage ou la manipulation fait l'objet d'un protocole "maison"	8	5	2
	Les éléments sont emballés/transportés/stockés de manières sécuritaires selon les règles de l'art de la logistique OU Les éléments sont emballés/transportés/stockés de la même manière qu'un équivalent neuf issu de l'industrie	5	2	1

Dans ce cadre, il est nécessaire de mesurer ces trois aspects pour le critère de risque d'endommagement. La probabilité de l'aléa peut être mesurée avec le nombre de manipulations

décrites précédemment. La vulnérabilité est déterminée de manière qualitative. L'enjeu est pris en compte par le type de conséquence sur l'élément. Ce paramètre doit être analysé par des experts pour chaque élément.

Tableau 52 : Notation du couple vulnérabilité x enjeu

Échelle d'impact	
1 à 3	Faible
4 à 5	Modéré
6 à 8	Fort
9 à 10	Très fort

Le couple *vulnérabilité x enjeu* permet d'obtenir un score à l'aide du Tableau 51. Cette méthode est adaptée de la méthode de management des risques en QHSE (qualité, hygiène, sécurité, environnement) en entreprise⁴⁶. Le score ainsi obtenu permet d'obtenir un qualificatif d'impact (Tableau 52). Celui-ci est ensuite mis en parallèle avec l'aléa (nombre de manipulations) dans les différents niveaux du critère risque d'endommagement.

Accessibilité des sites : ce critère traduit la facilité d'accès aux différents sites tels que le chantier source, le chantier récepteur, le lieu de stockage et le lieu de traitement. Ce critère ne prend pas en compte la question de la facilité à trouver un exutoire ou un espace de stockage qui sera abordé dans le critère sur l'usage futur de l'élément. Il se concentre sur l'aspect pratique pour l'accessibilité aux sites. L'analyse est réalisée à l'échelle macro en distinguant les zones rurales, les zones urbaines dispersées et les zones urbaines denses.

Ce critère n'a pas un impact global fort sur l'indicateur car cette problématique n'est pas spécifique au réemploi mais au chantier du BTP en général. Par ailleurs, les fortes contraintes notamment urbaines peuvent être une opportunité pour le réemploi comme nous pouvons le voir dans la section 4.1 où les contraintes de démolitions ont nécessité le démontage par sciage de la structure du bâtiment et donc procurent un potentiel de réemploi à ces éléments. Dans ce critère, nous nous concentrons sur la facilité à transférer les flux d'éléments récupérés.

L'accessibilité est mesurée à l'aide de la liste du Tableau 53. Chaque proposition vérifiée permet d'accumuler des points, qui additionnés permettent d'obtenir un score ainsi qu'une caractérisation de l'accessibilité (Tableau 54). Si le chantier cible est connu : il faut réaliser deux fois le calcul, l'un pour le chantier source, l'autre pour le chantier cible, sauf pour la question du site de stockage et de traitement, puis diviser le total par 2 (cela nous donne une moyenne entre les deux chantiers). Le score d'accessibilité donne le niveau du critère, il y a donc 4 niveaux.

⁴⁶ <https://openclassrooms.com/fr/courses/5341341-appliquez-une-demarche-de-sante-et-securite-au-travail/5435951-evaluez-les-risques-professionnels-par-la-cotation> consulté en mars 2022

Tableau 53 : Liste pour déterminer le score d'accessibilité des sites (pt =point, pts=points) les éléments dans une même case ne peuvent être additionnés

Situation du chantier	Zone urbaine dense (grande agglomération, centre-ville) (+9 pts)	Zone urbaine moyennement ou peu dense (petite agglomération, faubourgs) (+5 pt)	Zone rurale très dispersée (petits villages ou campagne) (+8 pts)
	Présence d'une zone de chargement pour semi-remorque (-1 pt)	Présence d'une zone de stockage attenante pour la durée du chantier (-1 pt)	Présence d'une zone de stockage attenante jusqu'à l'usage futur de l'élément (-2 pts)
Sites supplémentaires nécessaires en plus du chantier source et du chantier récepteur	Site de stockage distinct (+1 pt / site)	Site de traitement / reconditionnement distinct du site de stockage (+1 pt / site)	
	Accès direct du chantier à une route acceptant les semi-remorques (-1 pt)	Présence d'un axe structurant à proximité du chantier (nationale, grande départementale) (-1 pt)	
Axes routiers			

Tableau 54 : Score d'accessibilité

Score	
0 à 4	Très Bonne
5 à 6	Bonne
7 à 8	Faible
Supérieur ou égal à 9	Très Faible

Les détails des critères du sous thème **autres** sont présentés ci-dessous.

Quantité : ce critère permet de prendre en compte l'intérêt de récupération des éléments au vu de la quantité disponible. Effectivement, selon (Deweerd et Mertens, 2020) « certains revendeurs de matériaux de réemploi [peuvent] refuser un lot si celui-ci est trop restreint ou trop important ». Il s'agit en effet de faire coïncider le lot à son usage futur. Ce critère est complémentaire au critère économique sur la maturité du marché ainsi qu'au critère technique sur l'usage futur.

Il s'agit qualitativement de déterminer si le lot disponible est suffisant (notamment pour faire les essais complémentaires si nécessaire ou bien pour la gestion du transport) ni trop important pour le type d'élément étudié. Nous notons ce critère en 3 niveaux : largement insuffisant, presque suffisant, suffisant. Le cas où la quantité serait excessive est assimilé à « suffisant » car il s'agit alors de récupérer une seule partie du lot ; les conséquences sur l'amortissement se répercutent sur l'onglet économique et/ou environnemental.

La définition de ces trois niveaux n'est pas donnée car elle dépend fortement de l'élément étudié.

Dans le cas qui nous intéresse sur les structures, il est nécessaire de prendre en compte deux facteurs :

- Des essais destructifs peuvent être menés sur un échantillon du lot, le lot doit donc comprendre plusieurs éléments ;
- Il est important d'avoir un lot conséquent et homogène afin de trouver plus facilement un repreneur car cela facilite la mise en place du fait de caractéristiques techniques similaires.

Connexion, assemblage : précédemment, nous avons vu que le travail réalisé par (Durmisevic, 2006; Durmisevic et al., 2017) présente de manière détaillée la mesure du potentiel de réemploi par le prisme de l'assemblage des composants. La méthode est toutefois trop complexe pour être utilisée lors de l'audit réemploi. Ainsi, nous utilisons un critère caractérisant l'assemblage de manière simplifiée. Il n'a pas pour vocation de se substituer aux indicateurs de potentiel réemploi développés par Durmisevic.

Ce critère prend en compte l'état de la connexion, le type de connexion et la lisibilité du système d'assemblage. Dans ce cadre, (Deweerd et Mertens, 2020) préconisent la réalisation d'un test de démontage pour « vérifier si les éléments peuvent être facilement retirés, les moyens, l'endroit le permettant et le taux de perte concerné ». Les « moyens » ont déjà été pris en compte dans le critère sur la facilité de déconstruction. Le type de connexion traduit la facilité d'enlèvement. Par état de la connexion, nous entendons l'état de l'élément à l'interface entre la connexion et l'élément.

La lisibilité de l'assemblage est binaire, soit l'assemblage est *lisible* (assemblage courant, assemblage directement visible ou disponibilité de plans originaux) soit il n'est *pas lisible* (nécessite une étude plus poussée dont un test de démontage). Si l'assemblage n'est pas lisible, il n'est pas possible de déterminer l'état de la connexion explicité ci-après. Le niveau pour ce cas-là sera par défaut le niveau 5.

À l'instar de la matrice de risque, nous réalisons une matrice pour déterminer une valeur du *type x état* de la connexion (Tableau 56) c'est-à-dire pour déterminer l'état de l'élément à l'interface entre la connexion et l'élément. (Durmisevic, 2006) définit notamment 7 types de connexions présentées en annexe VII et résumées sur le Tableau 55.

Une fois le score obtenu à l'aide de la matrice (Tableau 56), on obtient un qualificatif de l'état de l'interface à l'aide du Tableau 57. Ce qualificatif permet de déterminer le niveau du critère.

Tableau 55 : Types de connexion définis par (Durmisevic, 2006)

Indice de numérotation pour la matrice Tableau 56	Connexion	Caractéristiques	Facilité de réemploi
C1	Connexion directe chimique	Éléments fixés de façon permanente	-
C2	Connexion directe préfabriquée	Éléments co-dépendants	-
C3	Connexion indirecte via un composé chimique	Relié par le composant chimique de façon permanente	-
C4	Connexion directe avec composant de fixation additionnel	Le composant de fixation peut être remplacé	+
C5	Connexion indirecte via un troisième composant dépendant	L'élément de jonction est dépendant de l'assemblage	+
C6	Connexion indirecte via un composant indépendant	Tous les éléments sont indépendant après désassemblage	++
C7	Connexion indirecte avec élément de fixation additionnel	Chaque élément est indépendant même avant le désassemblage	+++

Tableau 56 : Matrice de détermination de l'état de l'élément récupéré à l'interface de l'assemblage

		Etat attendu de l'assemblage			
		Bon état sur au moins 90 % des éléments OU Coupure nette (pour les assemblages liés) sur au moins 90 % des éléments (définition à adapter en fonction de la nécessité pour l'usage futur)	Indemne sur au moins 50 % des éléments OU Coupure grossière ou quasi nette pour les assemblages liés sur au moins 90 % des éléments	Fortement dégradé (moins de 50 % indemne) OU Section très grossière	Inconnu (absence de données, Rex, guides, tests)
Type d'assemblage	C1	/	/	?	?
	C2	2	3	3	3
	C3	1	2	3	3
	C4	1	2	3	2
	C5	1	2	2	2
	C6	1	1	2	1
	C7	1	1	1	1

Tableau 57 : État de l'interface en fonction du score type x état

État de l'interface de l'élément à récupérer	
1	Bon
2	Moyen
3	Très mauvais

Usage futur : ce critère traduit le devenir certain ou incertain des éléments récupérés. C'est un critère indépendant et complémentaire à la maturité du marché. Il s'agit de noter si, au moment de l'audit ou de la mesure de l'indicateur, une filière, un repreneur ou un projet est déjà identifié. C'est une réflexion moins globale. Ainsi, si un exutoire est directement identifié, le réemploi est déjà fortement favorisé. Ce critère a été inclus dans le thème technique et non économique afin de favoriser l'innovation en ne se limitant pas seulement nécessairement aux débouchés économiquement intéressants ou aux marchés développés.

Ce critère contient deux niveaux. En cas de projet identifié, cela sera très favorable au réemploi, dans le cas contraire, cela ne sera ni défavorable ni favorable. L'analyse sera alors complétée lors de l'étude de la maturité du marché.

3.3.3.2 Caractéristiques juridiques

Pour le thème portant sur l'aspect juridique, nous nous basons de manière non exclusive sur les travaux de (ADEME et al., 2016; Seys, 2017; Benoit et al., 2018) pour les aspects juridiques et assurantiels. Les critères sont issus du regroupement des informations de la littérature (section 3.1) dont notamment (ADEME et al., 2016; Deweerdt and Mertens, 2020). Pour les valeurs des niveaux des critères, en première approximation, nous nous basons sur le travail de l'étude sur les freins au réemploi de l'ADEME (ADEME et al., 2016) ; les valeurs de ces niveaux constituent une première proposition et nécessitent, à l'instar du thème technique, un affinage par discussion d'un groupe d'experts et par application et étalonnage sur plusieurs cas d'études.

Les niveaux pour les deux critères d'aspect juridique sont notés dans le Tableau 58.

Tableau 58 : Matrice des critères pour le thème juridique

Critères	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5
Statut juridique (déchets)	Élément destiné à la réutilisation ET Présence d'au moins 2 repreneurs possibles (statut ICPE) OU seulement Élément destiné au réemploi	Élément destiné à la réutilisation ET Présence d'1 seul repreneur possible (statut ICPE)			Élément destiné à la réutilisation ET Absence de repreneurs possibles (statut ICPE)
	0	2			5
Assurance et garantie	Enjeu faible	Enjeu modéré	Enjeu fort	Enjeu très fort	
	0	1	2	5	

Statut juridique : Comme nous l’avons vu dans la définition du réemploi (en introduction du Chapitre 3), un élément de réemploi ne passe pas par le statut de déchet, à l’inverse de l’élément de réutilisation. Le passage par le statut de déchet engendre une complexité supplémentaire de gestion. En effet, le déchet a un statut juridique particulier (loi du 15 juillet 1975), ainsi « les structures ayant pour activité la réutilisation relèvent de la réglementation des installations classées pour la protection de l’environnement (ICPE) au titre des déchets qu’elles gèrent »⁴⁷.

Ce critère prend donc en considération la différence entre le réemploi et la réutilisation, car comme nous venons de le voir, la réutilisation implique des complications juridiques supplémentaires si et seulement si la présence de repreneurs potentiels n’est pas identifiée. Cela dépend donc dans le cas de la réutilisation de la présence à proximité du chantier d’un ou plusieurs repreneurs (la distance « acceptable » dépend de l’objet concerné). Dans le cas d’un audit réemploi réalisé par une entreprise dans le but de développer une activité de réutilisation, il faut alors considérer qu’il n’y a pas de repreneur afin de prendre en compte la difficulté supplémentaire à la création d’une ICPE.

L’incertitude liée au fait que le repreneur ne souhaite peut-être pas reprendre le lot d’éléments en question est pris en compte dans le critère concernant la maturité du marché.

Assurance et garantie : ce critère met en avant les complications potentielles liées aux garanties et questions d’assurances. À l’instar d’un produit neuf, les produits de réemploi et de réutilisation mettent en jeu la responsabilité des acteurs. Ainsi, la question des garanties à fournir et des assurances à prendre sont un point clef tout au long du processus (section 3.1.2.1).

Ce critère se base sur le besoin ou non d’une garantie décennale pour le bâtiment (ou garantie responsabilité civile dans le TP), d’une garantie produit (volontaire) ou encore du besoin de réaliser un Atec ou un Atex. Ce critère juge de la difficulté administrative et du risque juridique et non du coût économique ni de la performance effective de l’élément, ces derniers étant pris en compte respectivement dans le critère de prix/coût et l’indice $I_{Prés}$.

Tableau 59 : Matrice de détermination du score de contrainte assurantiel et de garantie

		Nécessité de garantie		
		Garantie décennale	Garantie produit volontaire	Aucune garantie
Destination de l'élément	Structure	4	/	/
	Clos-couvert	3	3	1
	Second œuvre ou travaux extérieurs non structurels	3	2	1

Malus à additionner	Nécessité Atex (+ 1pt)	Nécessité Atec (+2 pts)
---------------------	------------------------	-------------------------

⁴⁷ <https://www.ademe.fr/expertises/dechets/passer-a-l'action/eviter-production-dechets/reemploi-reutilisation> Consulté en mars 2022

La mesure du critère s'effectue à l'aide de la matrice présentée dans le Tableau 59. Notons que ce critère doit être évalué quel que soit l'acteur à qui incombe la garantie ou l'assurance ; c'est une analyse sur la chaîne d'acteurs totale car des difficultés pour un acteur peut rendre la filière inopérationnelle. Le score calculé donne un niveau d'enjeu (Tableau 60).

Tableau 60 : Enjeu de garantie et assurantiel

Note assurance et garantie	
1 à 2	Enjeu faible
3	Enjeu modéré
4	Enjeu fort
> 4	Enjeu très fort

3.3.3.3 Caractéristiques économiques

Pour le thème portant sur l'aspect économique, nous nous basons de manière non exclusive sur les travaux de (Glias, 2013; Benoit et al., 2018; Rakhshan et al., 2021). Les critères sont également issus du regroupement des informations de la littérature (section 3.1) dont notamment (ADEME et al., 2016; Deweerdt and Mertens, 2020). Les valeurs des niveaux nécessitent un affinage par discussion d'un groupe d'experts et par application et étalonnage sur plusieurs cas d'études.

La matrice des niveaux pour le thème économique est donnée dans le Tableau 61.

Tableau 61 : Matrice de niveaux pour les critères économiques

Critères	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5
Maturité du marché (adéquation offre/demande)	Maturité très bonne ET Usage certain	Maturité bonne ET Usage certain OU seulement Maturité très bonne	Marché débutant ET Usage certain OU seulement Maturité bonne	Maturité du marché nulle ET Usage certain OU seulement Marché débutant	Maturité du marché nulle
	0	1	2	4	7
Prix (par rapport au produit équivalent ou alternatif)	Bénéfice de plus de 10 %	Seuil de rentabilité atteint (bénéfices entre 0% et 10 %)	Pertes de moins de 10 %		Pertes de plus de 10 %
	0	1	2		4

Maturité du marché : ce critère rend compte du niveau de développement du marché du réemploi ou de la réutilisation pour l'élément étudié. Nous recensons plusieurs paramètres traduisant le niveau de développement du marché :

- La distance au chantier des différentes installations (stockage, centre de traitement, repreneur, entreprise spécialisée). Selon un rapport⁴⁸ de 2005 du CNR (comité national

⁴⁸ <https://www.cnr.fr/download/file/publications/Les%20transports%20par%20benne%20tp.pdf> , consulté en mars 2022

routier) sur le transport par benne TP, 75 % des marchandises transportées le sont sur des distances inférieures à 50 km. Ainsi, nous utilisons ce nombre comme référence, néanmoins il peut être modulé en fonction de l'élément à réemployer ou réutiliser ;

- Le nombre de centres de stockage à proximité du chantier ;
- Le nombre de centres de traitement à proximité du chantier ;
- Le nombre de revendeurs/entreprises spécialisées à proximité ou plateformes web existantes utilisant les éléments concernés ;
- Le nombre de cas similaires recensés en France ;
- L'existence d'une littérature abondante concernant les éléments de réemploi en question (guides, textes techniques...).

À l'image du critère sur l'accessibilité des sites, nous utilisons un système de points pour obtenir un score (Tableau 62) et ainsi un niveau de maturité (

Tableau 63).

Tableau 62 : Matrice de détermination du score de maturité du marché. Il faut additionner les points vérifiés. Un seul choix par case

Nombre de centre de stockage distinct du chantier :	1 à 3 (+ 1 pt)	Plus de 3 (+ 2 pts)	
Nombre de centre de traitement distinct du chantier :	1 seul (+ 1 pt)	Plus de 1 (+ 2 pts)	
Nombre de revendeurs ou entreprises spécialisées à proximité :	1 seul (+ 1 pt)	2 à 3 (+ 2 pts)	Plus de 3 (+ 3 pts)
Nombre de cas de réemploi ou réutilisation similaires recensés (en France) :	1 à 10 (+ 1 pt)	11 à 100 (+2 pts)	Plus de 100 (+ 3 pts)
Existence de documents pour le réemploi/ réutilisation de l'élément cible :	Guide de bonnes pratiques (+ 1 pt)	Textes techniques ou règles de l'art non normées (+ 2 pts)	Normes techniques (DTU) ou réglementations (+ 3 pts)
Distance des sites par rapport au chantier (ex : chantier/stockage ou chantier/traitement ou chantier/entreprise). <small>Dans la limite de 5 pts et dans la limite de 2 sites les plus proches par type de site (stockage, entreprise, traitement)</small>	Entre 0 et 20 km (+1 pt / site)	Entre 20 et 50 km (+ 0,5 pt / site)	

Tableau 63 : Niveau de maturité du marché en fonction du score obtenu

Maturité du marché	
>13	Très bonne
9,5 à 13	Bonne
4,5 à 9	Débutante
0 à 4	Nulle

Notons que le nombre d'entreprises pourrait être remplacé par le chiffre d'affaire du secteur qui représenterait l'activité réelle. Néanmoins, le secteur du réemploi étant dans une phase de démarrage et de développement, il est plus facile (notamment pour l'auditeur) d'avoir une idée du nombre d'entreprises.

Une nuance est donnée en fonction de l'usage certain ou incertain présenté précédemment.

Prix/coûts (rentabilité) : Ce critère met en avant la rentabilité de l'élément. Pour mesurer les niveaux, il est nécessaire de réaliser au préalable *a minima* une estimation du surcoût de l'opération de réemploi ou de réutilisation (en phase de déconstruction, de transport, de stockage, de mise en œuvre). Pour rappel, il est nécessaire de raisonner en « surcoût » par rapport à une déconstruction classique avec déchets en décharge ou recyclage (selon les pratiques courantes) afin de mesurer réellement ce que coûte l'opération de réemploi ou de réutilisation. Le surcoût obtenu est ensuite comparé au prix de vente (réel ou estimatif) de l'objet de réemploi ou de réutilisation. En l'absence d'estimation du prix de vente en occasion, il faut comparer au prix de vente d'un élément équivalent neuf (même(s) fonction(s), matière et principe constructif potentiellement différents).

Selon l'INSEE (Tableau 64), le secteur du BTP dispose d'un taux de marge moyen (bénéfice économique) pour ses prestations de 21 %. Toutefois, ce chiffre varie fortement par sous-secteurs avec notamment environ 10 % pour la construction des bâtiments et des ouvrages de génie civil. Ainsi nous retenons la valeur seuil de 10 % pour le partage des niveaux du critère coût/prix.

Tableau 64 : Ratios de la construction par activité en 2019 (INSEE)⁴⁹

Secteur d'activité	Valeur ajoutée (en millions d'euros)	Taux de valeur ajoutée	Taux de marge ¹	Taux d'exportation	Taux d'investissement
Construction de bâtiments	19 602	21,6	25,5	1,9	22,5
Promotion immobilière	7 394	17,9	51,8	1,3	21,3
Construction de bâtiments résidentiels et non résidentiels	12 208	24,8	10,0	2,5	23,2
Génie civil	16 426	34,3	25,8	4,7	14,8
Construction de routes et de voies ferrées	12 271	37,2	28,2	1,9	14,2
Construction de réseaux et de lignes	3 122	35,6	22,1	1,3	18,5
Construction d'autres ouvrages de génie civil	1 033	17,0	9,4	24,2	10,8
Travaux de construction spécialisés	71 143	36,8	18,8	1,9	7,7
Démolition et préparation des sites	5 776	33,8	21,2	1,0	15,8
Travaux d'installation électrique, plomberie et autres travaux d'installation	26 541	39,6	18,2	2,0	5,5
Travaux de finition	19 030	37,0	19,5	2,4	7,1
Autres travaux de construction spécialisés	19 795	34,3	18,2	1,5	9,0
Ensemble	107 170	32,3	21,1	2,3	11,5

1. Le taux de marge est calculé avec la valeur ajoutée aux coûts des facteurs alors que le taux de valeur ajoutée est calculé avec la valeur ajoutée hors taxes.

Lecture : en 2019, les entreprises de la construction ont un taux de valeur ajoutée de 32,3 %.

Champ : France, entreprises des secteurs de la construction.

⁴⁹ <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2015613> consulté en mars 2022

Source : Insee, É sane.

3.3.3.4 Caractéristiques environnementales et de santé

Pour le thème portant sur l'aspect environnemental et sur la santé, nous nous basons de manière non exclusive sur les travaux de (Glias, 2013; Benoit et al., 2018). Les critères sont issus du regroupement des informations de la littérature (section 3.1) dont notamment (ADEME et al., 2016; Deweerdt and Mertens, 2020).

Les valeurs des niveaux sont marquées sur le Tableau 65.

Tableau 65 : Matrice des niveaux de la thématique environnementale

Critères	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5	Bonus à ajouter au niveau
Impact environnemental par rapport au produit équivalent	Bénéfice de plus de 10 %	Valeur équivalente (+ ou- 10 %)		Absence de données environnementales	Résultat négatif de plus de 10 %	Bonus utilisation de l'ACV
	0	1		4	4	-1
Santé (substance dangereuse, qualité de l'air...)	Risque nul	Risque faible (= complication faible)	Complication modéré	Complication forte	Complication très forte	
	0	1	2	4	7	
Sécurité (des travailleurs et des riverains)	Risque supplémentaire très faible	Risque supplémentaire modéré		Risque supplémentaire élevé	Risque supplémentaire très élevé	
	0	1		3	4	

Impact environnemental : il serait illusoire d'agrèger l'ensemble des indicateurs de l'ACV et des autres méthodes d'analyses environnementales (étude d'impact, empreinte carbone) dans un unique critère. Ainsi, ce critère n'a pas pour objectif de remplacer ou synthétiser les résultats obtenus mais seulement de représenter la volonté et l'ambition du client sur l'aspect environnemental. Ainsi, il s'agit de prendre en compte les résultats environnementaux obtenus par le client avec la méthode de leur choix (et les indicateurs d'impact de leur choix) pour la comparaison de l'alternative réemploi/réutilisation avec un élément neuf. L'usage de l'ACV est recommandé et récompensé par un bonus (soustraction d'un point).

Les niveaux de ce critère sont déterminés par le fait d'être plus performant ou non d'un point de vue environnemental pour l'indicateur et la méthode choisie. Une valeur seuil de 10 % (incertitude estimée usuellement en ACV) est choisie pour prendre en compte l'incertitude possible. Toutefois, l'auditeur est libre d'adapter cette valeur en fonction de ses propres analyses d'incertitudes. L'usage d'une matrice de pedigree peut être utile pour estimer cette incertitude dans le cas de l'ACV.

Par ailleurs, l'absence de données environnementales (calcul ou littérature) est classée niveau 4 (et non 5) car selon la littérature 3.1.2.3, on peut s'attendre à ce que le réemploi soit plus intéressant ou au moins équivalent d'un point de vue environnemental. Toutefois pour commencer, les niveaux 4 et 5 ont la même valeur. De plus, une démarche d'industrialisation pourrait permettre d'optimiser les procédés et donc de réduire les impacts.

Santé : ce critère prend en compte les risques pour la santé de l'usage de l'élément de réemploi au cours de sa nouvelle vie. Ainsi cela concerne, la présence de substances dangereuses et la qualité de l'air lors de sa vie en œuvre.

Tableau 66 : Matrice de complication santé

		Élément à réemployer ou réutiliser (avant traitement)		
		Substance dangereuse interdite (REACH, 850/2004)	Substance sensible (limité ou contraignante) (REACH, 850/2004, benzène, formaldéhyde)	Absence de substances sensibles ou dangereuses
Utilisateurs du lieu cible	Exposés	4	3	0
	Non exposés	4	2	0

	Substance dangereuse interdite (REACH, 850/2004)	Substance sensible (limitée ou contraignante) (REACH, 850/2004, benzène, formaldéhyde)
Présence et/ou quantité non connue, mais suspectée (tests supplémentaires nécessaires)	+2 pt	+1 pt

	Facilement*	Moyennement *	Difficilement*	Impossible ET Substance non interdite	Impossible ET Substance interdite
Possibilité de retirer la substance dangereuse ou sensible	-2 pts	-1 pt	+ 0 pt	+ 1pt	Non réemployable ($P_R = 0$)

* à l'appréciation de l'auditeur

Tableau 67 : Niveaux de santé

Niveau de complication santé	
0	Nul
1	Faible
2	Modéré
3	Fort
> 3	Très fort

La présence de substances dangereuses est réglementée par CE n°1907/2006 REACH et son Annexe XVII. En outre, la Convention de Stockholm et réglementation POP (850/2004) liste les polluants

organiques persistants dont la vente ou l'utilisation est interdite ou limitée. Pour résumer, voici les différents types de substances que l'on trouve dans ces textes :

- Substances interdites (Annexe I règlement 850/2004) ;
- Substances limitées (Annexe II règlement 850/2004) ;
- Substances extrêmement préoccupantes (règlement REACH) : si concentration supérieure à 0,1% en masse, alors obligation de communiquer sur le contenu (même pour un don) ;
- Substances réglementées (Annexe XVII du règlement REACH).

Ainsi, si l'une des substances est présente, cela est susceptible d'empêcher en totalité le réemploi ou de le compliquer (tests supplémentaires, nettoyage, communication).

Concernant la qualité de l'air, le décret 2011-1727 définit des valeurs-guides pour l'air intérieur pour le formaldéhyde et le benzène dans les ERP (Établissements Recevant du Public).

Par ailleurs, le maître d'ouvrage (public ou privé) peut imposer des seuils même pour les établissements non ERP. Ainsi, il est préférable que les éléments de réemploi et de réutilisation ne présentent aucune de ces substances sensibles (en quantité non négligeable).

Ainsi, afin de mesurer ce critère, nous mesurons les complications liées à la présence de substances dangereuses et des risques pour la qualité de l'air à l'aide de la matrice (Tableau 66) permettant d'obtenir un niveau de santé (Tableau 67).

Sécurité : ce critère s'intéresse à la sécurité des travailleurs et des riverains tout au long de la chaîne de production de l'élément à récupérer c'est-à-dire pendant le chantier de déconstruction, le stockage, le traitement et le chantier de construction. Nous recensons à partir du site web de l'INRS⁵⁰ (Institut National de Recherche et de Sécurité) plusieurs risques, dangers et nuisances possibles liés au chantier de déconstruction et de démolition. Nous ne sélectionnons que les dangers qui peuvent être spécifiques à certaines techniques de déconstruction/construction (par exemple le risque de chute de plain-pied est général à tout chantier par contre le risque de chute de hauteur n'apparaît que pour certaines activités). Les risques retenus sont notés dans le Tableau 68. Chaque risque impliqué dans le processus de réemploi ou réutilisation est additionné et permet d'obtenir un score pour la sécurité des travailleurs et des riverains (Tableau 69).

Tableau 68 : Liste des risques et nuisances sur chantier pour les travailleurs et les riverains

Risques (risque supplémentaire par rapport au chantier sans récupération)	Personnes concernées	
	Travailleurs	Tiers (riverains)
Nuisances sonores	+ 1 pt	+ 0,5 pt
Nuisances vibratoires	+ 1 pt	+ 0,5 pt
Émission de poussières (ou gaz toxiques)	+ 1 pt	+ 0,5 pt
Chute de hauteur	+ 1 pt	+ 0,5 pt
Chute d'objets	+ 1 pt	+ 0,5 pt
Risques routiers	+ 1 pt	+ 0,5 pt
Incendie et explosion	+ 1 pt	+ 0,5 pt
Risque électrique	+ 1 pt	+ 0,5 pt

⁵⁰ <https://www.inrs.fr/> consulté en mars 2022

Machines (coupure, écrasement, arrachage)	+ 1 pt	+ 0,5 pt
Rayonnement ionisant	+ 1 pt	+ 0,5 pt
Rayonnement optique	+ 1 pt	+ 0,5 pt

Tableau 69 : Note pour la sécurité des travailleurs et des riverains

Risque supplémentaire pour la sécurité des travailleurs et des riverains	
0 à 2	Très faible
3 à 5	Modéré
6 à 9	Elevé
> 9	Très élevé

3.3.3.5 Caractéristiques sociales et sensibilisation des acteurs du chantier

Pour ce thème, nous nous basons de manière non exclusive sur les travaux de (Benoit et al., 2018; Ghyoot et al., 2018). Les critères sont issus du regroupement des informations de la littérature (section 3.1) dont notamment (ADEME et al., 2016). Les valeurs des niveaux des critères nécessitent un affinage par discussion d'un groupe d'expert et par application et étalonnage sur plusieurs cas d'études.

Les niveaux sont présentés dans le Tableau 70.

Tableau 70 : Matrice des niveaux pour le thème social et acteurs

Critères	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5
Sensibilisation des acteurs (AMO, MOA, MOE, entreprise, compagnons)	Très bon niveau de sensibilisation et d'expérience	Bon niveau de sensibilisation et d'expérience	Niveau moyen de sensibilisation	Niveau faible de sensibilisation	Niveau très faible (insuffisant) de sensibilisation
	0	1	3	4	7
Authenticité, valeur et caractère obsolète ou démodé	Forte authenticité ET Objet non démodé	Forte authenticité ET Objet démodé	Faible authenticité ET Objet non démodé		Faible Authenticité ET Objet démodé
	0	0	1		4

Sensibilisation des acteurs : ce critère consiste à mesurer le niveau de formation ou sensibilisation des acteurs de la chaîne de réemploi pour l'élément étudié. Il est spécifique au chantier en question. Dans le cas où le chantier n'est pas encore acté ou prévu, il est nécessaire de le mesurer en prenant en compte les intervenants les plus probables.

Nous prenons en compte les paramètres suivants :

- Sensibilisation au réemploi en général (entreprises, compagnons, MOA, MOE, contrôleur technique, CSPS) ;
- Expérience (entreprises, compagnons, MOA, MOE, contrôleur technique, CSPS) ;
- Présence d'un protocole pour chaque étape ;
- Présence d'une AMO réemploi.

Le score de ce critère se base sur une grille avec des points à additionner (Tableau 71) permettant d'obtenir un niveau de sensibilisation (Tableau 72).

Tableau 71 : Mesure de la sensibilisation des acteurs

RG = Réemploi en général ou un autre type d'élément RE = réemploi du même type d'élément dont réemploi général

	MOA		MOE		Entreprise (organisation)		Entreprise (Compagnons /ouvriers)		Contrôleur technique		CSPS	
	slmt ⁵¹ RG	RE	slmt RG	RE	slmt RG	RE	slmt RG	RE	slmt RG	RE	slmt RG	RE
Chantier de dépose /chantier source												
Sensibilisation et/ ou formation au réemploi	+ 0,5 pt	+ 1 pt	+ 0,5 pt	+ 1 pt	+ 0,5 pt	+ 1 pt	+ 0,5 pt	+ 1 pt			+ 0,5 pt	+ 0,5 pt
Expérience	+ 0,5 pt	+ 1 pt	+ 0,5 pt	+ 1 pt	+ 0,5 pt	+ 1 pt	+ 0,5 pt	+ 1 pt			+ 0,5 pt	+ 0,5 pt
Chantier de pose / chantier cible												
Sensibilisation et/ ou formation au réemploi	+ 0,5 pt	+ 1 pt	+ 0,5 pt	+ 1 pt	+ 0,5 pt	+ 1 pt	+ 0,5 pt	+ 1 pt	+ 0,5 pt	+ 2 pt	+ 0,5 pt	+ 0,5 pt
Expérience	+ 0,5 pt	+ 1 pt	+ 0,5 pt	+ 1 pt	+ 0,5 pt	+ 1 pt	+ 0,5 pt	+ 1 pt	+ 0,5 pt	+ 2 pt	+ 0,5 pt	+ 0,5 pt
Existence de protocoles												
Présence d'un protocole phase déconstruction								+ 1pt				
Présence d'un protocole phase transport								+ 1pt				
Présence d'un protocole phase stockage								+ 1pt				
Présence d'un protocole phase traitement								+ 1pt				
Présence d'un protocole phase construction								+ 1pt				

	Oui	Non
Présence d'une AMO réemploi	+ 1 pt	- 1 pt

Tableau 72 : niveau de sensibilisation des acteurs

Niveau de sensibilisation et d'expérience		
Si acteurs des chantiers source ET cible connus	Si seulement acteurs du chantier source connus	
> 16	> 14	Très bon
11 à 16	10 à 14	Bon
8 à 10	5 à 9	Moyen
5 à 7	3 à 4	Faible
0 à 4	0 à 2	Très faible

Authenticité, valeur et caractère obsolète ou démodé : ce critère fait référence à la valeur (authenticité, valeur patrimoniale, valeur historique...) de l'élément ainsi que son intérêt dans la société actuelle (mode, obsolescence).

⁵¹ Slmt = seulement

Voici une liste non exhaustive, extraite de (Deweerd and Mertens, 2020), pour apprécier le côté obsolète ou démodé de l'élément rendant la demande faible ou quasi inexistante :

- Changement des modes de vie (ex : bidet),
- Éléments architectural démodé,
- Matériaux/produits ne suivant plus les standards techniques actuels (mais pouvant être intéressant en réutilisation).

Voici également une liste non exhaustive de facteurs, également extraite de (Deweerd and Mertens, 2020), pour estimer l'authenticité du produit ou matériau de réemploi :

- Produit rare ou en édition limitée,
- Produit de concepteur, artiste ou architecte célèbre,
- Produit possédant une valeur patrimoniale (référence historique ou savoir-faire local),
- Produit présentant des qualités esthétiques intéressantes,
- Présence d'un label.

Les niveaux des critères sont jugés de manière qualitative par l'auditeur en croisant les deux aspects présentés ci-dessus (Tableau 70).

Pour conclure, le calcul de tous les critères ayant été détaillé, il est possible de calculer les deux indices et donc l'indicateur. Une calibration préalable est néanmoins nécessaire. Ceci fait l'objet de la section suivante qui applique l'indicateur développé à plusieurs cas d'étude.

3.4 TESTS DE L'INDICATEUR DE POTENTIEL DE REEMPLOI DEVELOPPE

3.4.1 Application sur des cas d'étude et calibration

Pour analyser le comportement de l'indicateur de potentiel de réemploi développé nous l'appliquons sur plusieurs cas d'études :

- **Porte classique de bureau** (seulement l'ouvrant, non coupe-feu) : ce cas théorique est basé sur le bâtiment du laboratoire, en supposant que le bâtiment est déconstruit et que les portes des bureaux sont réemployées. Ce cas est appelé par la suite « *cas porte* » ;
- **Poutre bois** issue d'une nexorade (section 2.2.1) : nous nous basons dans le contexte académique du cas présenté dans (Kuzmenko et al., 2020). Ainsi, c'est un cas théorique où l'usage est peu contraignant et où l'ensemble du processus est réalisé sur place *i.e.* au laboratoire. Une variante est réalisée dans un cas « industriel » c'est-à-dire en considérant le marché réel et les méthodes du secteur du bâtiment. Ces cas d'études sont appelés par la suite « *cas bois académique* » et « *cas bois industriel* » ;
- **Voile béton pour remplissage** (cas d'étude (Benoit et al., 2018), pavillon vélo en béton, section 3.1.4.2) : cette application est basée sur les résultats (environnementaux, économiques et guide technique) de l'expérimentation de Bellastock dans le cadre de la Fabrique du Clos à Stains. On considère le cas exact présenté dans les documents (lieu, acteurs...). Ce cas est appelé par la suite « *cas voile béton réutilisation* ».
- **Poutre en béton armé à rôle structurel** : nous nous basons sur les éléments de structure récupérés pour ce travail de thèse sur des chantiers de déconstruction et décrits en section 4.1.1. Nous nous plaçons alors dans un contexte théorique « industriel », c'est-à-dire où un lot d'éléments similaires ont été récupérés dans le but d'être utilisés pour un autre bâtiment. Nous exploitons les résultats des essais pour les aspects techniques et pour le contexte. Ce cas d'étude est appelé par la suite « *cas béton* » ;
- **Poutre en béton armé conçue pour être réemployée** : à partir du travail de (Bertin, 2020), nous appliquons l'indicateur à un élément spécialement conçu pour être réemployé. Nous considérons la première déconstruction/reconstruction sur un chantier théorique d'un IGH (immeuble de Grande Hauteur) situé à Paris. Ce cas est appelé par la suite « *cas béton réemployable* ».

L'indice $I_{P_{rés}}$ étant spécifique aux cas de réemploi de béton armé structurel, nous calculons seulement l'indice $I_{C_{ext}}$. On suppose ainsi que la performance résiduelle des éléments est bonne et inchangée par rapport à un produit neuf. Cette hypothèse est une hypothèse faible dans le cas de la porte de bureau, mais plus forte pour le *cas bois* ou le *cas voile béton*. Pour le *cas béton* et *cas béton réemployable*, l'indice $I_{P_{rés}}$ sera calculé dans un second temps (le *cas voile béton* étant un cas de réutilisation non structurelle, il n'entre pas dans le cadre de $I_{P_{rés}}$ en état).

3.4.1.1 Calibration

La matrice de mesure de l'indice $I_{C_{ext}}$ a été dans un premier temps calibrée en utilisant les résultats des quatre premiers cas d'étude (*cas bois académique et industriel, cas béton et cas porte*). Deux calibrations successives ont été réalisées, le Tableau 73 présente l'évolution de la notation suite aux calibrations.

- **V0 : état initial.** À l'état initial, la notation des niveaux s'étalait de 1 à 8 par conséquent il n'était pas possible d'atteindre un résultat de 0. Comme on peut le voir sur la Figure 97, le minimum (courbe « Niveau 1 ») est de 0,19. C'est un problème de construction ; nous souhaitons obtenir un score allant de 0 à 1 inclus. Ceci nous mène au premier niveau de calibration ;
- **V1 : première calibration.** Afin de pouvoir atteindre la valeur de 0, nous avons remplacé les niveaux qui ont une valeur de 1 par la valeur 0. En observant le résultat (Figure 97), nous obtenons bien un minimum atteignable. Toutefois, comme nous nous y attendions, cette modification n'a d'impact principalement que sur les plus bas niveaux, il est donc nécessaire de réajuster les niveaux supérieurs ;
- **V2 : seconde calibration.** Celle-ci consiste en un réajustement des niveaux intermédiaires et de certains niveaux 5 afin de les redistribuer.

Tableau 73 : Évolution de la valeur des niveaux de la matrice $I_{C_{ext}}$ lors de la calibration (V0 : valeurs initiales, V1 : première calibration, V2 : seconde calibration) les cases en surbrillance (orange) présentent les valeurs effectivement modifiées. Les niveaux correspondent aux niveaux de chaque critère dans la matrice de calcul (Tableau 42). La nomenclature des critères est présentée dans le Tableau 49.

	Niveau 1			Niveau 2			Niveau 3			Niveau 4			Niveau 5		
	V0	V1	V2	V0	V1	V2	V0	V1	V2	V0	V1	V2	V0	V1	V2
T1	1	0	0	2	2	1	4	4	3	7	7	6	8	8	7
T2	1	0	0	2	2	1	3	3	3	3	3	3	5	5	5
T3	1	0	0	2	2	1				4	4	3	5	5	4
T4	1	0	0	2	2	2	4	4	4	5	5	5	7	7	7
T5	1	0	0	2	2	1	3	3	3	4	4	3	5	5	4
T6	1	0	0	2	2	1							4	4	4
T7	1	0	0	2	2	1				4	4	3	5	5	4
T8	1	0	0				3	3	2						
J1	1	0	0	2	2	2							5	5	5
J2	1	0	0	2	2	1	3	3	2	4	4	5			
E1	1	0	0	2	2	1	3	3	2	4	4	4	7	7	7
E2	1	0	0	2	2	1	3	3	2				5	5	4
ES1	1	0	0	2	2	1				4	4	4	4	4	4
ES2	1	0	0	2	2	1	3	3	2	5	5	4	7	7	7
ES3	1	0	0	2	2	1				4	4	3	5	5	4
SA1	1	0	0	2	2	1	4	4	3	5	5	4	7	7	7
SA2	1	0	0	1	0	0	2	2	1				4	4	4

	Modification lors de la première calibration
	Modification lors de la seconde calibration

Les résultats de cette calibration sont visibles sur le Tableau 73 et la Figure 97. La figure nous permet de voir que l'on peut désormais atteindre à la fois la valeur de 1 et de 0. Nous pouvons également

observer que les cas d'études varient de la même manière que les différents niveaux pris individuellement. Il n'y a pas de changement brutal d'ordre de grandeur. Pour illustrer, nous observons que dans le cas bois académique, l'indice V0 (0,39) se situe un peu au-dessus du niveau 2 (0,34) soit une différence de +14 % par rapport au niveau 1, après la première calibration, la différence est de -19%, on se rapproche de nouveau ensuite du niveau 1 avec une différence de seulement -10% lors de la seconde calibration. L'observation est la même pour les autres cas d'études, on observe une légère diminution (par rapport aux valeurs d'indice des niveaux) mais de manière modérée.

Enfin, la Figure 98 nous montre la proportion de chaque critère composant chaque niveau. On observe que l'impact d'un critère sur un niveau est compris entre 0 et 12 % ; ainsi il y a un équilibre entre les critères. Il n'existe pas de cas où aucun critère ne prend l'ascendant ni où tous les critères sont identiques.

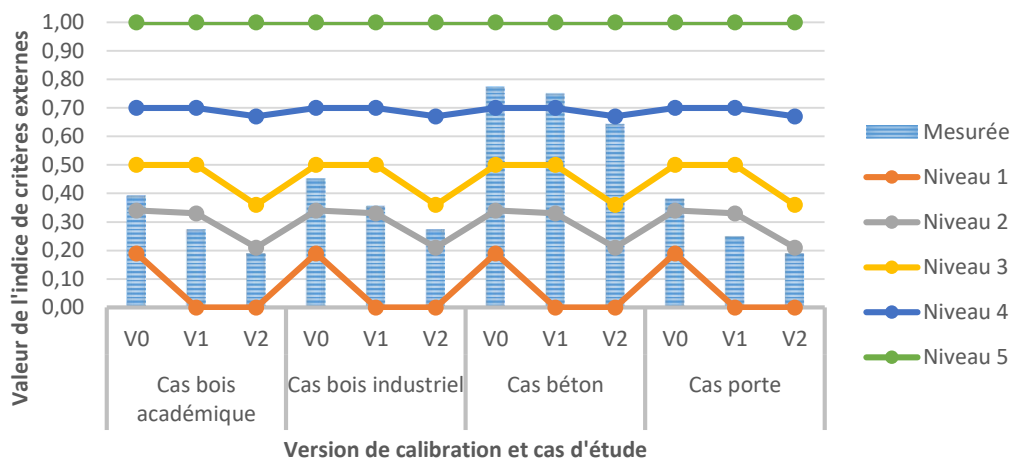


Figure 97 : Évolution des mesures de l'indice de critère externe pour plusieurs cas d'études lors des phases de calibration. Les courbes de niveau correspondent au résultat pour chaque niveau individuellement.

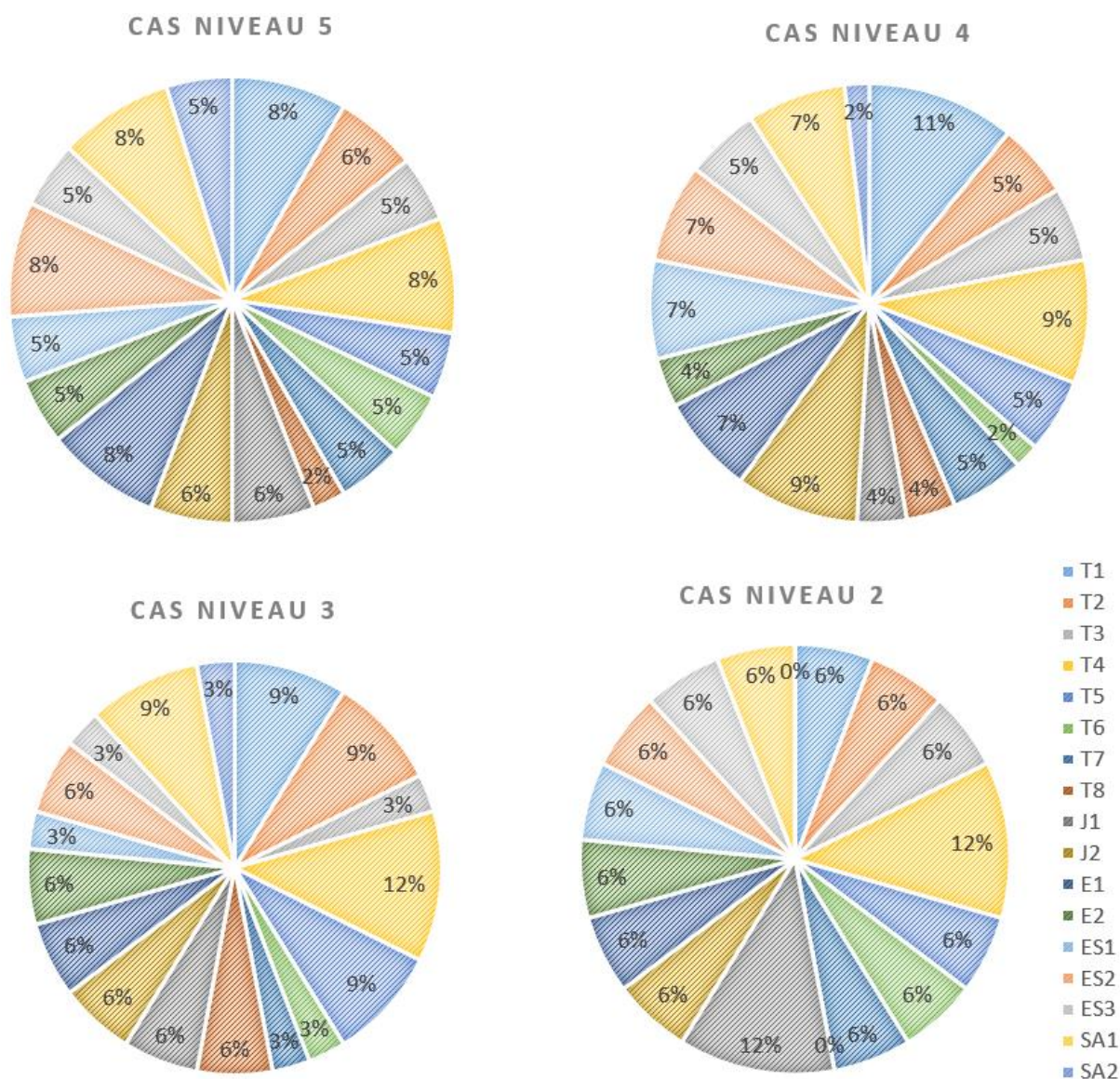


Figure 98 : Diagrammes circulaires présentant la répartition des critères pour chaque niveau

3.4.1.2 Analyse des résultats pour $I_{C_{ext}}$

Les indices de critères externes pour les différents cas d'étude sont présentés sur la Figure 99. Nous notons également les valeurs des indices correspondant à chaque niveau (courbes de couleur sur le graphique) comme points de repère. On peut observer que les niveaux ne sont pas répartis de manière uniforme entre 0 et 1. Par exemple, le niveau 3 ne correspond pas à 50 %. Les niveaux sont plus concentrés pour les faibles indices *i.e.* pour les scores les plus favorables au réemploi et à la réutilisation. Cela permet de différencier plus facilement les éléments plutôt favorables au réemploi.

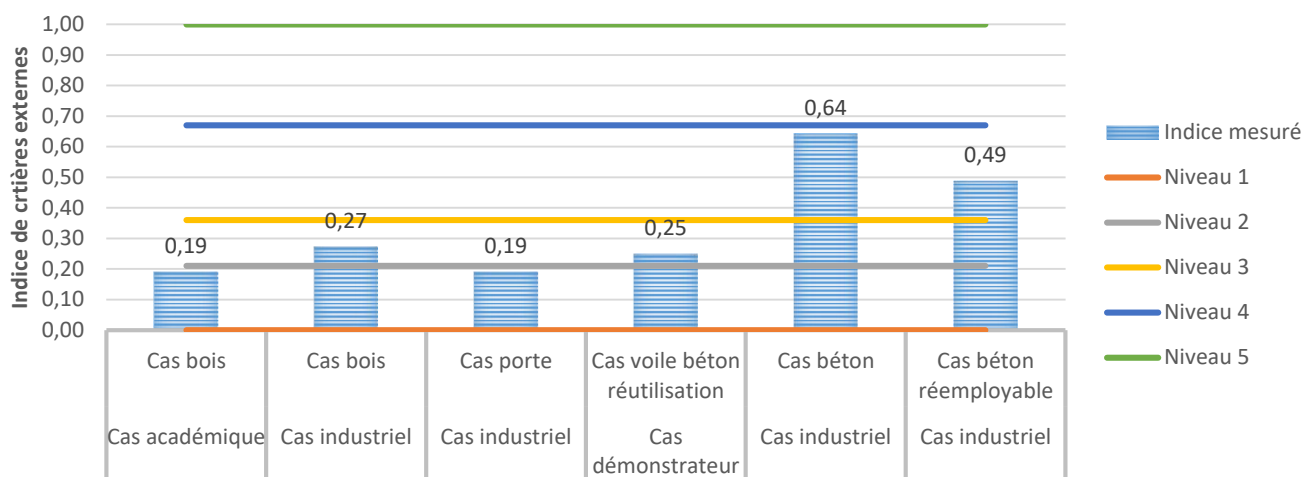


Figure 99 : Indice de critères externes pour tous les cas d'études. Les courbes indiquent l'indice de critères externes pour chaque niveau pris individuellement.

Nous observons plusieurs tendances qu'il serait intéressant de confirmer en appliquant l'indice (et plus largement l'indicateur) à un plus grand nombre de cas d'études. Pour rappel, sur ce graphique (Figure 99), il n'est représenté que l'indice de critères externes ($I_{C_{ext}}$). Cela suppose que la résistance technique résiduelle est satisfaisante pour l'usage souhaité.

La valeur la plus petite obtenue est 0,19 (pour le *cas bois académique* et le *cas porte*) ; les résultats sont cohérents avec l'intuition que l'on en avait. Cela indique qu'un résultat de cet ordre traduit un bon potentiel de réemploi.

La valeur la plus élevée obtenue est 0,64 avec le cas béton. C'est un résultat qui nous semble plutôt faible face au marché actuel ; nous aurions pu nous attendre à un résultat plus défavorable au réemploi. Cela nous confirme toutefois, qu'il existe un potentiel de réemploi pour ces éléments. Il est important de nuancer ces observations par deux points :

- Le cas d'étude est favorisé par le fait que le chantier utilisait de base la méthode de découpage/élingage des poutres pour la déconstruction ainsi, les difficultés supplémentaires de réemploi sont faibles,
- Ce résultat ne prend pas en compte l'indice $I_{P_{rés}}$.

Le *cas bois académique* obtient le même résultat que le *cas porte*, quand bien même on aurait pu s'attendre à une plus grande différence. Pour comprendre ce résultat, nous pouvons nous référer aux diagrammes circulaires présentés sur la Figure 101 qui montrent la part des critères dans le résultat de l'indice. En observant le diagramme du *cas porte*, on observe que le résultat est lié pour 50 % aux critères ES1 – Impact environnemental de la solution et E2 – Coût économique de la solution. Les valeurs sont élevées car nous nous positionnons dans un cas théorique où aucune analyse des coûts ou environnementale n'a été effectuée. Nous avons alors dû sélectionner le niveau le plus défavorable pour ces deux critères, ce qui impacte le résultat. Toutefois, il aurait été possible de prendre un niveau moins défavorable car dans le cadre d'une fiche technique pour le réemploi de porte intérieure en bois à panneaux (projet Interreg FCRBE⁵²), il est mentionné que « même en tenant compte des opérations

⁵² <https://www.nweurope.eu/projects/project-search/fcrbe-facilitating-the-circulation-of-reclaimed-building-elements-in-northwestern-europe/#tab-3> consulté en mars 2022

spécifiques aux logiques de réemploi, les portes en bois à panneaux de récupération constituent généralement une alternative bon marché aux produits neufs ».

Sur le *cas bois* toujours, la différence entre le cas industriel et le cas académique est significative. On observe que le score du cas académique est inférieur de 0,08 par rapport au cas industriel. Nous pouvons expliquer cette différence par une plus grande souplesse du contexte académique. En effet, la structure réalisée n'étant pas destinée à accueillir des personnes et n'étant pas dans un espace public, les contraintes assurantielles sont moins importantes. De plus, le processus de réemploi se fait intégralement sur site et le devenir de l'élément est certain.

Le cas de réemploi du *cas bois* (contexte académique) est fortement impacté par les quatre critères suivants (Figure 101) :

- E2 – Coût (22 %) : puisqu'aucune donnée n'a été calculée, le niveau le plus défavorable a été sélectionné ;
- SA1 – Sensibilisation des acteurs (17 %) : le niveau de sensibilisation est moyen. Du fait du faible score total, ce critère est important en proportion et c'est un critère jugé important dans une opération de réemploi ;
- T1 – Difficulté technique de déconstruction (17 %) : de même que le critère précédent, c'est un biais lié à la proportion, ce critère est de niveau moyen mais c'est également un critère jugé important dans une opération de réemploi ;
- T7 – Connexion et assemblages (17%) : du fait de la non protection des éléments en bois durant la première vie en œuvre, seulement 40 % de la matière est supposée réemployable, ainsi, les connexions sont des points faibles pour ce cas d'étude. En effet, les connexions sont les parties les plus sujettes aux intempéries (maintien d'eau donc pourrissement).

Concernant le contexte industriel, on note que le critère J2 – Assurance et garantie contribue pour 20 %, ce qui en fait le contributeur principal. Ceci est lié à l'aspect structurel du cas d'étude.

Les principaux points impactants du *cas voile béton réutilisation* sont des critères très techniques T1 – Difficulté technique de déconstruction (15 %), T2 – Accessibilité de l'élément (15 %), T3 – Manipulation (15 %), ES3 – Sécurité (15 %). Ces valeurs semblent élevées mais correspondent en fait à un niveau intermédiaire. Ceci est la conséquence d'un fort enjeu technique de l'élément étudié (démontage (sciage), transport (objet lourd)).

Les points principaux impactant le résultat du *cas béton* sont les suivants (Figure 101) :

- E1 – Maturité du marché (13 %) : comme mentionné dans la section 3.1.4.3, il n'existe pas de marché du réemploi des éléments structurels en béton armé ;
- T4 – Risque d'endommagement (13 %) : du fait du fort enjeu lié au rôle structurel et des grandes dimensions (et poids élevé) des éléments, le risque d'endommagement durant le procédé de réemploi est élevé, ce qui pénalise ce cas d'étude ;
- T1 - Difficulté technique de déconstruction (13 %) : les raisons du fort impact de ce critère sont identiques au critère précédent ;
- J2 – Assurance et garantie (9 %) : ceci est lié à la nécessité de disposer d'une garantie décennale et d'un Atex.

Concernant le *cas béton réemployable* qui est similaire à ce dernier, nous retrouvons les critères E1, T4, J2 respectivement pour 16 %, 12 % et 12 %. Le critère T1 par contre est beaucoup plus faible, 7 %, du fait de l'élaboration d'un protocole de déconstruction et de reconstruction lié à la question de la

conception réemployable. Néanmoins, le principal atout de la conception réemployable sera visible dans l'indice de performance résiduelle.

Suite à ces observations, il est possible de faire ressortir plusieurs seuils équivalents aux niveaux, du plus favorable au réemploi au moins favorable (Figure 100) ; à noter que ces seuils doivent être confirmés au fur et à mesure de l'application de l'indice sur d'autres cas d'études :

- **0 à 0,20 : très favorable au réemploi**, sous réserve d'un bon score pour les caractéristiques de performance résiduelle. Ces éléments sont relativement simples à démonter et transporter, peu exigeants techniquement ainsi qu'économiquement et/ou environnementalement intéressants. Un marché est existant et en développement. La valeur pivot 0,20 correspond à la valeur d'un objet fictif ou chaque critère est au niveau 2 ;
- **0,20 à 0,30 : également très favorable au réemploi mais exigeant** (toujours sous réserve d'un bon score pour les caractéristiques de performance résiduelle). Ce sont des éléments facilement démontables et transportables, un marché est existant mais les éléments sont techniquement plus exigeants *i.e.* avec plus de risques au cours du processus. Ils sont économiquement ou environnementalement intéressants. La valeur pivot de 0,3 correspond à la valeur d'un objet fictif ou chaque critère est au niveau 3 ;
- **0,30 à 0,42 : plutôt favorable au réemploi**. C'est un cas intermédiaire. L'effort à fournir est plus conséquent mais relativement maîtrisé ;
- **0,42 à 0,7** : La valeur de 0,42 correspond au résultat lorsque l'on prend la somme des niveaux 5 des critères les plus élevées (*i.e.* de valeur 7). Les critères n'étant pas indépendants, il est impossible d'obtenir ce résultat incluant ces cinq niveaux, néanmoins, ce seuil nous paraît intéressant. Dépasser ce seuil indique que l'élément d'étude est **plutôt favorable au réemploi mais nécessite une implication forte et des ressources plus importantes** tant économiques, techniques qu'organisationnelles. Les éléments sont en effet plutôt volumineux ou lourds. Un score proche de 0,7 indique un élément non spécialement conçu pour être démonté et réemployé. Un score proche de 0,42 indique un élément à la démarche de réemploi conséquente mais disposant d'une réflexion très aboutie ;
- **> 0,7** : Cette valeur représente le seuil entre le niveau 4 et le dernier niveau, cela signifie que la proportion de critères de niveau 4 et 5 est forte. Au-delà de ce seuil, **le réemploi est peu favorable** et semble non pertinent ou du moins nécessiterait des moyens très importants mettant fortement en danger les travailleurs. Par ailleurs, le procédé de déconstruction est très complexe ou bien non préparé. Si le score se rapproche de 1, l'élément n'a aucun potentiel de réemploi.

Enfin, le Tableau 74 permet de décrire le profil d'un élément totalement favorable au réemploi ($I_{C_{ext}} = 0$) ou à l'inverse d'un élément complètement défavorable au réemploi ($I_{C_{ext}} = 1$).

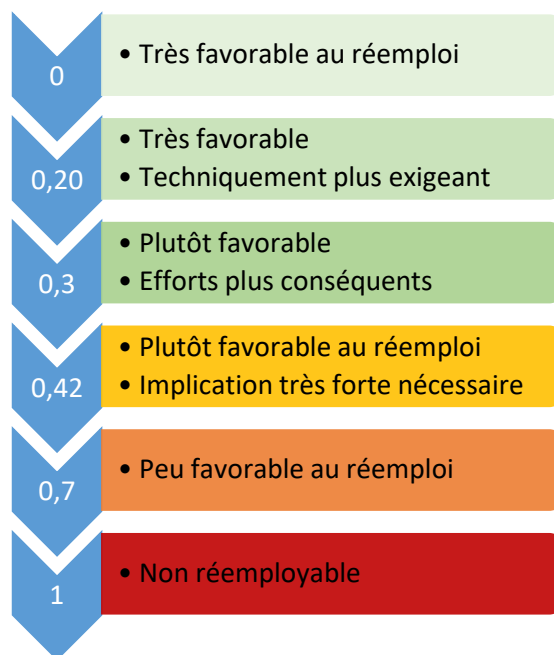
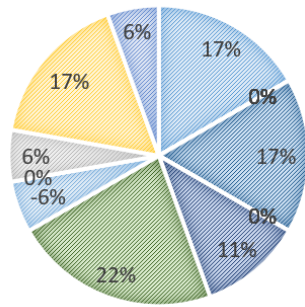


Figure 100 : Seuils de réemployabilité pour l'indice $I_{C_{ext}}$

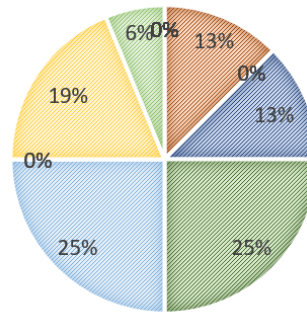
Tableau 74 : Liste des critères pour obtenir un score d'indice (critères externes) de 1 ou bien de 0

Obtenir un score de 0 (favorable au réemploi)	Obtenir un score de 1 (défavorable au réemploi)
<ul style="list-style-type: none"> - Protocole existant et reconnu, - Aucun outillage ou petit outillage, - Élément facilement accessible et en quantité suffisante, - Petit élément (palettisable) subissant peu de manipulation (faible risque d'endommagement), - Caractère authentique de l'élément, - Chantier très accessible, - Assemblage lisible et démontable proprement, - Devenir certain et marché mature (présence de revendeurs), - Pas ou peu de coût d'assurance et garantie, - Bénéfice économique de + de 10 % et bénéfice environnemental de + de 10 %, - Absence de risques pour la santé et la sécurité, - Acteurs sensibilisés et expérimentés au réemploi. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aucun protocole de déconstruction, - Utilisation d'outillage lourd, - Élément caché, difficilement accessible demandant un matériel de sécurité spécialisé, - Élément en quantité insuffisante, - Objet démodé et non authentique - Gros élément subissant de nombreuses manipulations (forts risques d'endommagement), - Utilisation d'une grue spécifiquement pour la déconstruction, - Chantier peu accessible, - Assemblage non lisible, - Devenir inconnu et absence de marché, - Enjeu assurantiel fort (garantie décennale pour la structure), - Pertes économiques de + de 10% et données environnementales non favorables (+ de 10 %), - Risque pour la santé et sécurité forte, - Aucune sensibilisation des acteurs.

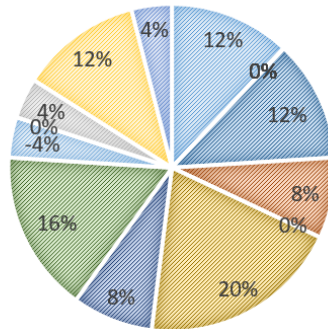
CAS BOIS ACADÉMIQUE



CAS PORTE

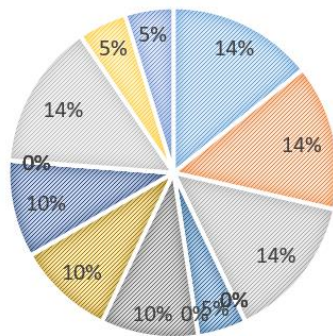


CAS BOIS INDUSTRIEL

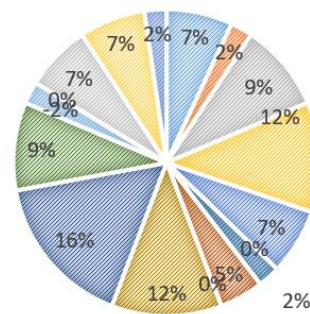


- T1
- T2
- T3
- T4
- T5
- T6
- T7
- T8
- J1
- J2
- E1
- E2
- ES1
- ES2
- ES3
- SA1
- SA2

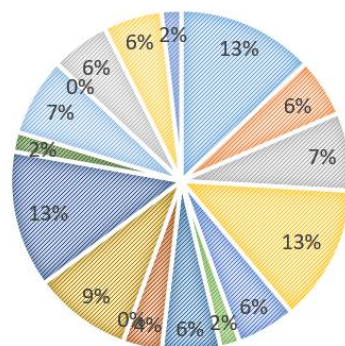
CAS VOILE BÉTON RÉUTILISATION



CAS BÉTON RÉEMPLOYABLE



CAS BÉTON



- T1
- T2
- T3
- T4
- T5
- T6
- T7
- T8
- J1
- J2
- E1
- E2
- ES1
- ES2
- ES3
- SA1
- SA2

Figure 101 : Répartition des critères pour le calcul de l'indice de critères externes pour les différents cas d'études

3.4.1.3 Analyse des résultats pour le potentiel de réemploi (P_R) dont $I_{P_{rés}}$

Dans cette section, nous ajoutons la question de la technicité résiduelle de l'élément à l'analyse. Nous mesurons l'indice $I_{P_{rés}}$ pour le *cas béton* et le *cas béton réemployable*. Les scores de cet indice sont respectivement 0,66 et 1. Les détails des résultats pour chaque critère sont notés dans le Tableau 75. Pour rappel contrairement à l'indice sur les critères externes, un indice de 1 signifie de bonnes caractéristiques techniques et un score de 0 signifie une perte totale des caractéristiques techniques pour l'élément d'étude.

Tableau 75 : Détail de notation des critères pour le calcul de l'indice $I_{P_{rés}}$ pour le cas béton et le cas béton réemployable

Critères	Note cas béton	Note cas béton réemployable
Type et caractéristiques géométriques	B (3 pts)	A (4 pts)
Etat de l'élément avant dépose	B (3 pts)	A (4pts)
Performances mécanique, technique et risque de pertes*	C (2 pts)	A (4 pts)
Total de l'indice	8 pts/12 = 0,66	12 pts/ 12 = 1

*Le risque de perte pour le processus de réemploi a été estimé à 10 %, adapté de l'estimation donnée par (Bertin, 2020). Des études sont nécessaires pour mesurer la perte réelle à chaque étape du processus de réemploi.

La différence entre ces deux cas s'explique par le caractère réemployable de l'élément pour le *cas béton réemployable* contrairement au simple *cas béton*. En effet, des protocoles détaillés ont été développés par (Bertin, 2020) afin d'optimiser la déconstruction et la reconstruction de l'élément. De plus, l'élément a été conçu (agencement des armatures) et dimensionné pour limiter les pertes lors de la déconstruction et de la reconstruction (l'auteur a réalisé des essais à échelle réduite pour confirmer l'absence de pertes).

Ces exemples nous montrent donc le fort intérêt de disposer de protocoles détaillés et de concevoir les éléments réemployables. Toutefois, on garde en tête que le score du *cas béton* est loin d'être négligeable et qu'il y a en effet un bon potentiel pour l'aspect technique.

Connaissant les deux indices ($I_{P_{rés}}$ et $I_{C_{ext}}$) pour ces deux cas d'études, nous pouvons calculer l'indicateur de potentiel de réemploi (P_R) de ces deux éléments (Équation 15). Nous obtenons ainsi un score de 0,24 pour le *cas béton* et un score de 0,51 pour le *cas béton réemployable*. Pour rappel, un score de 0 signifie que l'élément n'a aucun potentiel de réemploi et un score de 1 signifie que l'élément a un très fort potentiel de réemploi (et doit être réemployé).

La combinaison des deux indices nous confirme l'observation précédente concernant la conception réemployable. En effet, l'écart entre ces deux cas d'étude se creuse au détriment de l'élément non conçu pour être réemployé.

En outre, nous observons que le *cas béton* a un score final de 0,24 et donc se situe après le dernier seuil (section précédente) (> 0,7 en inversant l'échelle). Cela le place à la limite entre *un réemploi peu favorable et non pertinent* et *un réemploi favorable mais nécessitant un investissement fort*. Notons qu'il est possible de rendre le réemploi plus favorable en agissant sur les leviers mis en avant précédemment :

- Développement de protocoles pour chaque phase du procédé de réemploi afin de limiter les pertes de résistance technique (T1, T4 et $I_{P_{rés}}$),
- Sensibilisation de tous les acteurs de la chaîne de déconstruction et de construction (SA1),
- Réalisation d'une étude environnementale (section 4.3).

Par ailleurs, si les pratiques de réemploi de cas similaires se développent, les points concernant la maturité du marché (E1) et la complexité juridique (J2) seront également plus favorables au réemploi. Ceci permettra alors d'améliorer le résultat de l'indicateur de potentiel de réemploi.

3.4.2 Analyses de sensibilité

Pour compléter l'analyse précédente, il nous semble intéressant de faire une analyse de sensibilité. Ainsi, nous réalisons des variantes sur la construction des critères et des niveaux. Nous n'effectuons pas de variations sur les processus de réemploi choisis pour les cas d'étude. En effet, c'est dans le cas de l'application en tant que diagnostiqueur qu'il serait pertinent de faire une telle analyse.

Lors de la construction de l'indicateur de potentiel de réemploi (P_R) nous avons relevé plusieurs points sensibles qu'il nous semble utile d'analyser plus en détail :

- Pour l'indice $I_{P_{rés}}$:
 - o Les pertes et dégradations possibles pour la mesure de la performance technique,
 - o L'importance du critère de performance parmi les autres critères de l'indice ;
- Pour l'indice $I_{C_{ext}}$:
 - o Les hésitations face aux critères entre deux niveaux consécutifs,
 - o Le comportement face à l'absence de données (environnementale et économique).

3.4.2.1 Analyse de sensibilité pour l'indice $I_{P_{rés}}$

Le premier point d'interrogation concerne le calcul du critère de « Performances mécanique, technique et pertes lors du processus » de réemploi ou de réutilisation. En effet, une forte incertitude existe sur la dégradation des éléments de structure en béton lors des phases de déconstruction, transport, stockage et remise en œuvre. Si les essais réalisés par (Bertin, 2020) et les essais réalisés en section 4.1 permettent d'avoir une idée de la perte lors de la vie en œuvre, de la déconstruction de l'élément et de la remise en œuvre, nous ne connaissons pas les pertes liées au stockage, au transport et à l'usage de procédés de déconstruction et construction différents. Pour rappel, la mesure des indicateurs pour les *cas béton et béton réemployable* dans la section 3.4.1 est basée sur une hypothèse de perte de capacité de 10 % au total pour l'ensemble des phases.

On se demande alors les conséquences sur l'indice et l'indicateur s'il y a une dégradation de 10 % à chaque étape. Cela implique une modification des pertes pour les exigences M1, M2, M3, UD1 (nomenclature en annexe VI). Cette modification est appelée **Variation 1**.

Nous nous demandons également si ce critère n'est pas sous représenté par rapport aux deux autres. Actuellement, tous les critères ont la même pondération (un tiers), nous réalisons la **Variation 2** où l'on donne plus d'impact à ce critère. Le Tableau 76 présente les nouvelles notes pour chaque critère et chaque niveau ; avec cette variation le critère de performance a une pondération d'environ 50 % de l'indice $I_{P_{rés}}$.

Les résultats de ces deux variantes (Variation 1 et Variation 2) sont présentés dans le Tableau 77.

Tableau 76 : Valeur des niveaux pour l'analyse de sensibilité Variation 2

Type et caractéristiques géométriques				
A	B	C	D	E
3	2	1,5	1	NR
Etat de l'élément avant dépose				
A	B	C	D	E
3	2	1,5	1	NR
Performances mécanique, technique et pertes lors du processus				
A	B	C	D	E
6	4	2,5	1	NR

Le choix effectué dans la Variation 1 est une hypothèse forte car la performance est ainsi diminuée de 30 % par rapport à l'état initial. On observe toutefois qu'à l'échelle de l'indice ou de l'indicateur le résultat n'est pas trop handicapant : au plus 13 % de dégradation du score pour le *cas béton* et au moins 8 % pour le *cas béton réemployable*. Ceci est lié aux deux autres critères (Type et géométrie et État) qui ont un effet tampon.

On observe que la Variation 2 impacte moins les résultats (5 % pour le *cas béton*). Toutefois, combinée avec la variation 1, les dégradations des scores s'additionnent (atteignant 18 % pour le *cas béton*) et deviennent conséquents ; même pour le *cas béton réemployable* (17 %) où la perte d'un niveau (passage de A à B) a d'autant plus d'impact sur le résultat.

Cette étude nous montre l'importance de bien connaître les conséquences d'un point de vue structurel sur les éléments de réemploi en béton armé lors du processus de réemploi. Cela met en exergue le besoin de recherches futures sur l'état des éléments structurels déconstruits en béton armé.

Tableau 77 : Mesure de la dégradation de l'indice $I_{P_{rés}}$ et de l'indicateur P_R lors de variations sur deux points de vigilance (Variation 1 et variation 2)

	Cas béton				Cas béton réemployable			
	$I_{P_{rés}}$	Dégradation du score	P_R	Dégradation du score	$I_{P_{rés}}$	Dégradation du score	P_R	Dégradation du score
Etat initial	0,66	0%	0,24	0%	1	0%	0,51	0%
Variation 1	0,58	12%	0,21	13%	0,92	8%	0,47	8%
Variation 2	0,63	5%	0,23	4%	1	0%	0,51	0%
Variation 1 + 2	0,54	18%	0,19	18%	0,83	17%	0,43	16%

La question de la pondération du critère est un choix méthodologique à fixer. En effet, cela revient à se poser la question de la place de la résistance résiduelle dans la démarche du réemploi. Bien qu'il y ait une perte plus ou moins conséquente de la résistance résiduelle, cela n'empêche pas à l'élément de disposer d'une réelle capacité au vu des résultats de l'indicateur de potentiel de réemploi et des essais.

À ce stade, nous décidons de garder les valeurs de niveau initiales car l'aspect technique est déjà fortement représenté dans l'indicateur. On le trouve effectivement dans l'indice $I_{P_{rés}}$ mais également dans l'indice $I_{C_{ext}}$ avec la thématique technique et les thématiques économiques et

environnementales. Le résultat de l'analyse économique et environnementale variera effectivement en fonction de l'élément neuf à comparer.

3.4.2.2 Analyse de sensibilité pour l'indice $I_{C_{ext}}$

Concernant l'indice $I_{C_{ext}}$, nous nous interrogeons sur deux points. Le premier concerne les incertitudes sur les niveaux choisis de certains critères pour certains cas d'étude. Les cas d'études étant pour la plupart des cas théoriques (ou contenant une partie basée sur des hypothèses), il a fallu poser un cadre et un contexte à chaque cas d'étude (lieu de chantier, méthode, processus...) en se basant sur les documents sources. Toutefois, pour certains critères, le résultat obtenu se situe à la frontière entre deux niveaux du fait de l'incertitude sur des hypothèses (une faible variation des hypothèses permet d'atteindre un niveau plus favorable). Par exemple dans le *cas béton réemployable*, la maturité du marché est de niveau nul mais une faible variation des hypothèses telles que la position des plateformes de stockage ou leur nombre permettrait de passer au niveau débutant. Ainsi nous avons réalisé de nouveaux calculs d'indice en prenant ces niveaux plus favorables. Ces valeurs sont nommées **Variation 3** par la suite. Ces incertitudes concernent notamment les critères de maturité du marché, d'accessibilité du chantier, de sensibilisation des acteurs et le paramètre concernant le nombre de manipulation.

Le second point concerne la règle sur la sélection du cas « le plus défavorable lorsqu'aucune donnée n'est disponible ». Cette règle concerne principalement le coût économique, l'impact environnemental et l'usage certain ou non. Pour avoir un ordre de grandeur de l'amélioration du score dans le cas où ces éléments sont absents, nous avons calculé une dernière variante appelée **Variation 4** prenant en compte un score intermédiaire ou plus favorable. Par exemple, en absence de données environnementales nous avons considéré ici que le réemploi de l'élément était équivalent au produit neuf ce qui est une hypothèse acceptable à la vue des observations en section 3.1.2.3.

Les variantes des indices calculés sont présentées sur la Figure 102 pour le *cas porte*, *cas béton* et *cas béton réemployable*. Les *cas bois* ne sont pas calculés car le contexte académique complexifie la vision. Le *cas voile béton réutilisation* n'est pas calculé car le cas d'étude est basé sur un cas réel bien documenté et complet donc nous n'avons pas noté d'incertitude de ce type.

Nous pouvons observer que pour le *cas porte* et le *cas béton*, la Variation 3 a peu (ou pas) d'effet sur le résultat (seulement 0,01 point de moins pour le *cas béton*). Ainsi, on peut dire qu'il y a peu d'incertitude sur ces cas d'études. L'ambiguïté sur le calcul des critères est très faible. On remarque toutefois que cela est plus important pour le *cas béton réemployable* (0,11 points de moins). Ceci est plutôt lié au fait que ce soit un élément conçu pour être réemployable et que ce soit un cas théorique. En effet, nous nous sommes posés plusieurs questions lors de la mesure de l'indice. Fallait-il par exemple considérer les conditions les plus favorables comme décrites et envisagées lors de la conception ou bien considérer le marché et les pratiques actuelles ? À titre d'illustration, un bâtiment construit avec de tels éléments a été dimensionné pour que, s'il y a déconstruction, le réemploi soit facilité et que les éléments trouvent rapidement une place. Ainsi, faut-il considérer le marché actuel du réemploi ou faire une hypothèse pour dans 50 ans ? Ces questions impactent dans notre cas principalement la maturité du marché et le nombre de manipulation.

Concernant la Variation 4, on observe qu'elle peut avoir un impact conséquent (0,14 points de moins soit environ 75 % de moins pour le *cas porte* ; 0,12 points de moins soit environ 4 % de moins pour le *cas béton* ; 0,12 points de moins soit environ 25 % de moins pour le *cas béton réemployable*). Ceci montre qu'une amélioration conséquente de l'indice est possible en réalisant une étude économique et/ou environnementale. Par ailleurs, ce résultat nous montre qu'il existe des points d'amélioration

pour optimiser le résultat comme par exemple faire en sorte que l'usage futur soit certain ou encore que la chaîne d'acteurs soit bien sensibilisée sur les questions de réemploi. On peut voir notamment que le *cas porte* peut se différencier fortement du *cas bois* (qui obtient un indice de 0,19) et ainsi passer dans la fourchette des éléments les plus favorables au réemploi (sous réserve de capacités techniques suffisantes).

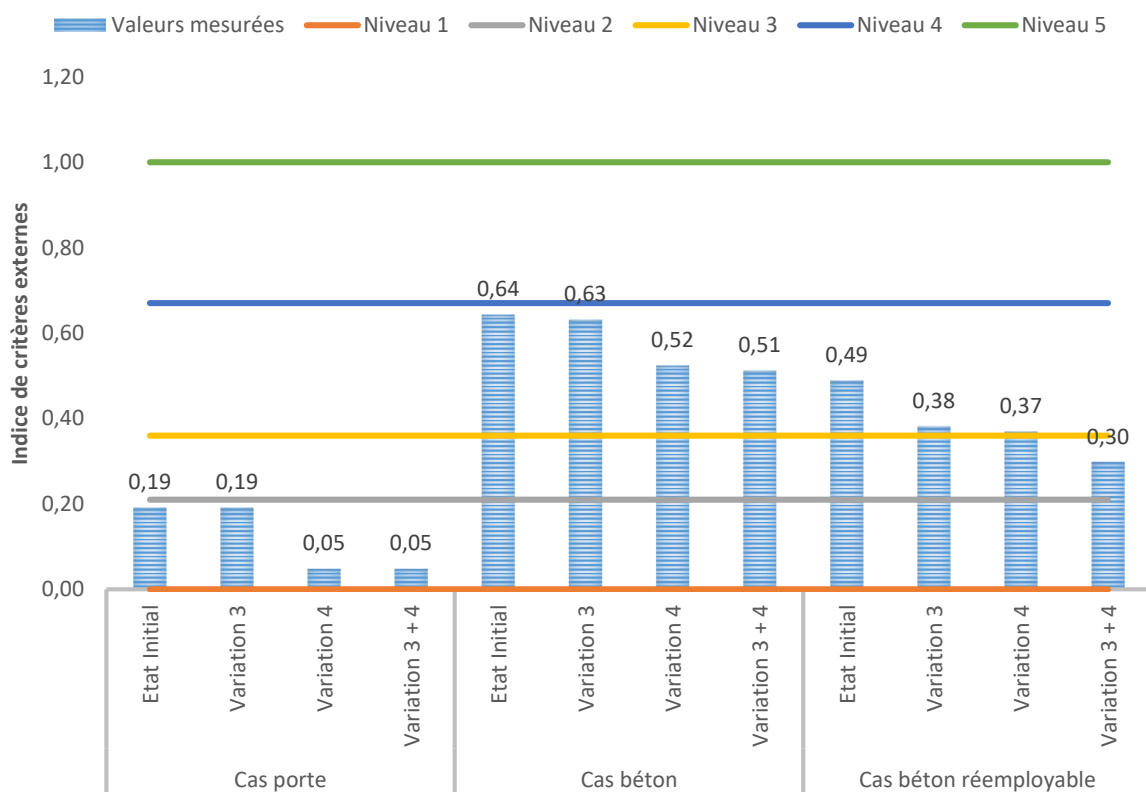


Figure 102 : Indice de critères externes. Les courbes indiquent l'indice de critère pour chaque niveau pris individuellement

De même en combinant les deux variations, nous pouvons observer que le *cas béton réemployable* passe dans la fourchette d'indice de 0,20 à 0,30 ce qui en ferait un élément très favorable au réemploi. Cela montre encore une fois l'intérêt de concevoir réemployable.

Pour résumer, nous pouvons dire que l'incertitude sur le choix des niveaux est faible dans le cas de chantiers réels et se passant actuellement. L'incertitude peut être plus grande s'il s'agit de projeter le réemploi dans un temps long (et donc de faire de nombreuses hypothèses). Dans ce cas-là, il sera nécessaire de faire des analyses de sensibilité plus détaillées sur les hypothèses réalisées.

Nous pouvons également dire qu'en réalisant une optimisation du processus de réemploi et en effectuant une étude économique et environnementale, l'indice des critères externes (et donc le potentiel de réemploi) peut être amélioré de manière conséquente.

3.4.2.3 Synthèse à l'échelle du potentiel de réemploi

Dans un dernier temps, nous croisons les différentes variations entre elles afin de voir le résultat final de l'indicateur de potentiel de réemploi (Tableau 78).

Nous observons que pour le *cas béton*, le potentiel de réemploi est compris dans une fourchette allant de 0,19 à 0,32. La fourchette obtenue se situe sur la frontière entre un élément avec un potentiel de

réemploi qui nécessite une mobilisation des ressources importantes (pour les résultats de 0,24 à 0,32) et un élément sans potentiel de réemploi (pour les résultats de 0,19 à 0,23).

Nous restons tout de même dans un même ordre de grandeur, contrairement au *cas béton réemployable* où la fourchette est plus grande : de 0,42 à 0,70. Ici, le résultat est à cheval sur trois catégories : les éléments très favorables au réemploi mais techniquement plus exigeants (0,70), les éléments plutôt favorables au réemploi (0,58 à 0,65) et les éléments plutôt favorables au réemploi mais avec implication forte (0,42 à 0,57).

Par ce dernier cas d'étude, on comprend que la conception réemployable est bénéfique pour le potentiel de réemploi mais dépend tout de même fortement de la volonté des acteurs et de l'état des pratiques de déconstruction et de construction en fin de vie du bâtiment source. En effet, le scénario qui a amené à la conception ne sera peut-être pas le scénario lors de la déconstruction. Un bon exemple est celui de la maison pour personnes âgées à Amsterdam « De Drie Hoven » présentée sur la Figure 82 dans la section 3.1.4.3 qui est un bâtiment conçu modulable et finalement démoli de manière classique.

Tableau 78 : Indicateur de potentiel de réemploi (P_R) obtenu en croisant les variations de l'indice $I_{P_{rés}}$ (lignes) et de l'indice $I_{C_{ext}}$ (colonnes)

		Cas béton				Cas béton réemployable			
		État Initial	Variation 3	Variation 4	Variation 3 + 4	État Initial	Variation 3	Variation 4	Variation 3 + 4
Cas béton	État Initial	0,24	0,24	0,31	0,32				
	Variation 1	0,21	0,21	0,28	0,28				
	Variation 2	0,23	0,23	0,30	0,31				
	Variation 1 + 2	0,19	0,20	0,26	0,26				
Cas béton réemployable	État Initial					0,51	0,62	0,63	0,70
	Variation 1					0,47	0,57	0,58	0,65
	Variation 2					0,51	0,62	0,63	0,70
	Variation 1 + 2					0,42	0,51	0,52	0,58

3.5 CONCLUSION DU CHAPITRE 3

Le réemploi est défini par le code de l'environnement comme l'opération où un élément qui est « réutilisé de nouveau pour un usage identique à celui conçu », ce qui le distingue de la réutilisation où l'usage change. C'est le niveau de valorisation le plus élevé selon la hiérarchie des déchets. Pour le secteur du bâtiment, le réemploi est favorisé par la LTECV de 2015 et la loi anti gaspillage pour une économie circulaire de 2020. Le réemploi est mis en avant pour son caractère bénéfique en terme de consommation des ressources et d'impact environnemental. Toutefois, il fait face à de nombreuses contraintes techniques, économiques et sociales.

Parmi ces contraintes, on retrouve la diversité des matériaux. Elle est grande dans un bâtiment. Ainsi, il peut être compliqué pour les décideurs de distinguer ce qui est un déchet de ce qui valorisable (et dans quelles circonstances). Pour identifier le potentiel de réemploi d'un élément du bâtiment, nous avons développé un indicateur sortant un résultat unique permettant de mesurer la capacité de cet élément à être valorisé (réemployé ou réutilisé) dans le contexte envisagé. Bien qu'il existe dans la littérature différentes définitions du potentiel de réemploi et d'indicateurs associés, aucune ne s'applique de manière aussi complète dans le cadre souhaité du diagnostic de structures. En effet, l'indicateur développé se calcule dans la continuité du diagnostic PEMD d'un bâtiment ou d'un ouvrage et synthétise les connaissances et analyses des diagnostiqueurs pour donner un score unique de réemployabilité ou réutilisabilité.

Constitué de deux indices, l'indicateur de potentiel de réemploi développé (P_R) prend en compte les caractéristiques particulières et intrinsèques à l'objet (exigences techniques nécessaires et exigences résiduelles), ainsi que l'ensemble des caractéristiques qui gravitent autour (contraintes pour le procédé de déconstruction, contraintes économiques, contraintes géographiques...).

Les valeurs des niveaux initialement choisies à dire d'expert nécessite un étalonnage ; nous en avons ainsi proposé une première calibration. Les résultats préliminaires de l'indicateur appliqué sur plusieurs cas d'études sont encourageants. Notons, que nous sommes les seuls à avoir testé et appliqué cet indicateur ; une discussion avec différents experts (structure, réemploi, maitres d'œuvre et d'ouvrage) et un calibrage plus robuste sur de nombreux cas d'étude restent nécessaires.

Ainsi, nous avons vu qu'une poutre en béton armé dispose d'un relatif potentiel de réemploi ; sous réserve d'une résistance résiduelle significative et d'un impact environnemental du procédé réduit. Nous allons, dans le chapitre suivant, nous intéresser plus spécifiquement à ce type d'élément et justifier ces hypothèses.

Chapitre 4. APPLICATION AU REEMPLOI D'ÉLÉMENTS DE STRUCTURE EN BETON ARME ISSUS DE LA DECONSTRUCTION

Dans l'analyse bibliographique de la section 3.1.4, nous avons mis en évidence l'absence et le besoin d'une réflexion approfondie sur le réemploi des éléments de structure en béton armé. Le Chapitre 3 et plus exactement l'application de l'indicateur de potentiel de réemploi (section 3.4.1) a permis de mettre en évidence un potentiel autour du réemploi de tels éléments. Deux grandes incertitudes, dont on trouve peu de réponses dans la littérature, perdurent et nécessitent un approfondissement : la faisabilité technique et l'impact environnemental de l'opération de réemploi. C'est autour de ces deux interrogations que nous structurons ce chapitre. Nous étudions dans un premier temps, les caractéristiques mécaniques résiduelles d'un élément de structure puis dans un second temps, l'impact environnemental du réemploi dans un contexte d'économie circulaire.

Notons que les résultats de ce chapitre ont été utilisés pour le cas d'application du chapitre précédent (calcul de l'indicateur de potentiel de réemploi) afin de servir de calibration à l'indicateur. Contrairement aux chapitres précédents où la déconstruction, l'économie circulaire et le réemploi sont étudiés de manière non spécifique à un élément, ce dernier chapitre se focalise sur l'élément de structure (poutre) en béton armé.

4.1 PRESENTATION DES CAS D'ETUDES

Avec la collaboration de l'entreprise Cardem et de la DRTO Ile-de-France de Vinci Construction France (Direction des Ressources Techniques et Opérationnelles), nous avons eu accès à des éléments de structures en béton armé issus de deux chantiers de déconstruction de bâtiments, l'un en Auvergne-Rhône-Alpes et l'autre en Ile-de-France.

Une même nomenclature est utilisée pour les deux chantiers étudiés ; la nomenclature des éléments est la suivante :

« TypeLocalisationNuméro »

Avec

Type : P=Poteau ; Pu=Poutre

Localisation : L=Lyon ; P=Paris

Numéro : De 1 à 4 (numéro des éléments d'un même chantier)

4.1.1 « Chantier de Paris » à Levallois Perret (92)

Il s'agit d'un chantier de réhabilitation lourde d'un bâtiment de bureaux. Si la date exacte de construction n'est pas connue, on peut toutefois l'estimer autour des années 80. Dans cette opération de rénovation, le bâtiment est entièrement curé mais seules certaines parties du bâtiment sont déconstruites au cas par cas, notamment certaines poutres qui sont par la suite remplacées par des nouvelles. Certains voiles, planchers et cages d'escalier sont déconstruits. La Figure 103 présente le bâtiment avant commencement des travaux (a) et pendant les travaux après le curage (b). Le système constructif est classique, de type poteaux-poutres-voiles. Ce cas d'étude sera appelé dans la suite de la thèse « chantier de Paris ».

La Figure 104 présente la méthode de déconstruction. C'est en majorité une méthode par sciage à la scie diamant sur les quatre côtés des poutres qui a été adoptée.



(a)



(b)

Figure 103 : Chantier de rénovation à Levallois Perret (92) appelé dans la suite de la thèse « chantier de Paris » : (a) bâtiment avant travaux, (b) bâtiment après curage.



Figure 104 : Principe de déconstruction des poutres pour le chantier de Paris

Quatre éléments issus de deux poutres différentes ont été récupérés sur ce chantier. Les éléments et leurs dimensions sont présentés sur les Figure 105, Figure 106 et Figure 107. Ce sont des éléments massifs et fortement ferrillés. Les éléments sont en bon état et peu fissurés (hormis le ragréage qui se détache). Les poutres PuP1 (Figure 105) et PuP2 (Figure 106) ont été piquées au marteau hydraulique au niveau de la dalle et non sciées, ce qui explique la présence d'une partie de dalle solidaire à la poutre. Pour rectifier ce problème, les éléments ont été sciés (à la scie diamant, par une entreprise spécialisée) à posteriori afin de ne prendre en compte que la poutre. Les poutres PuP3 et PuP4 (Figure 107) sont très courtes.

Ces quatre éléments proviennent de deux poutres différentes, l'une contenant PuP1 et PuP2 et l'autre PuP3 et PuP4. L'hypothèse de positionnement des poutres PuP1 et PuP2 entre elles au sein de la poutre mère est présentée sur la Figure 108. Le ferrailage est donc asymétrique.

Ces trois éléments étant localisés dans la région Parisienne, ils ont été rapatriés et testés au laboratoire Navier de l'ENPC à Champs-sur-Marne (77).

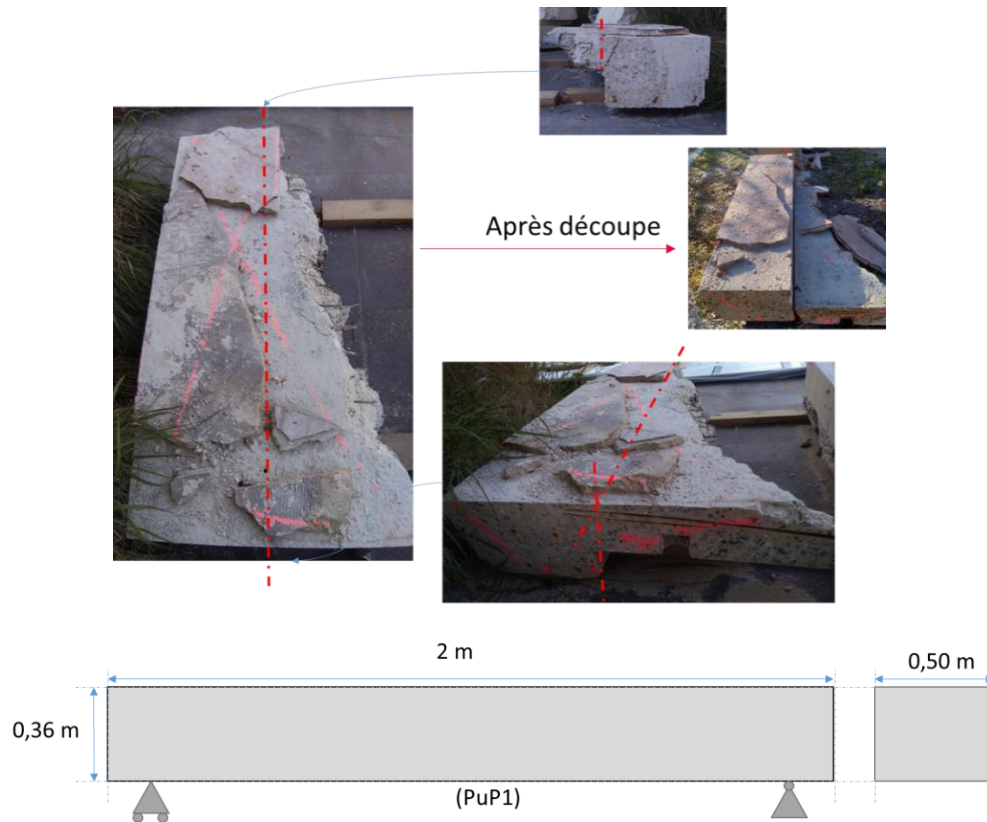


Figure 105 : présentation de la poutre PuP1 (chantier de Paris)

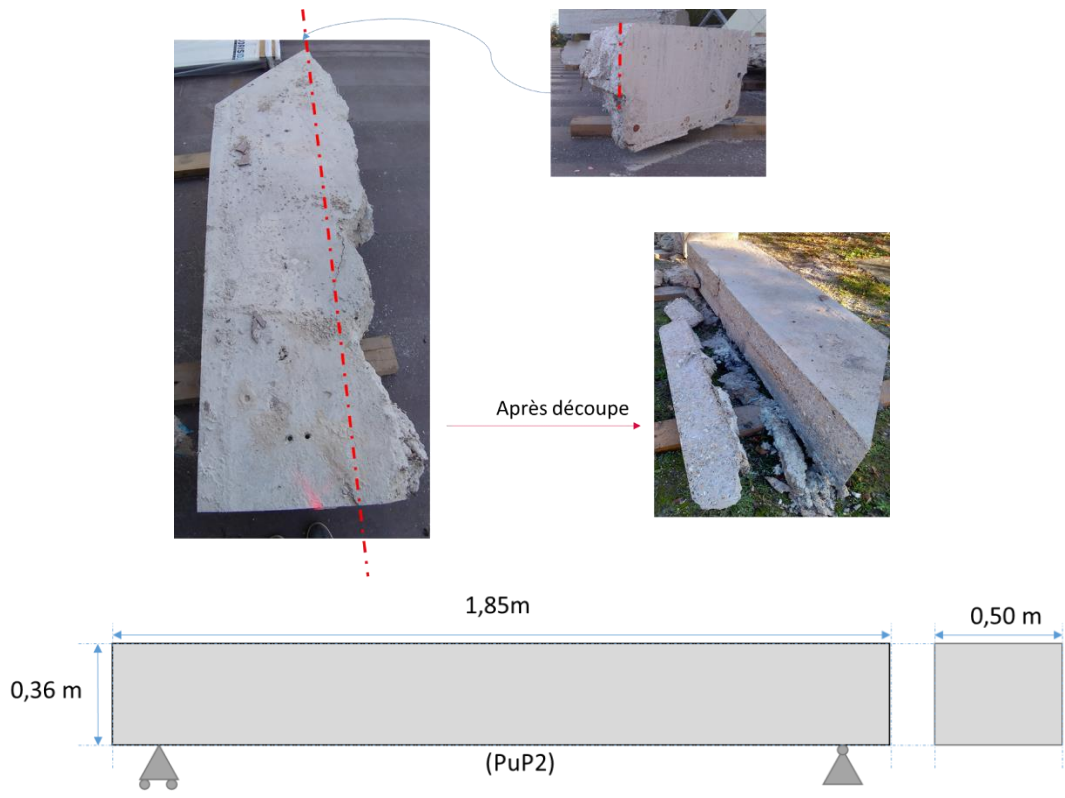


Figure 106 : Présentation de la poutre PuP2 (chantier de Paris)

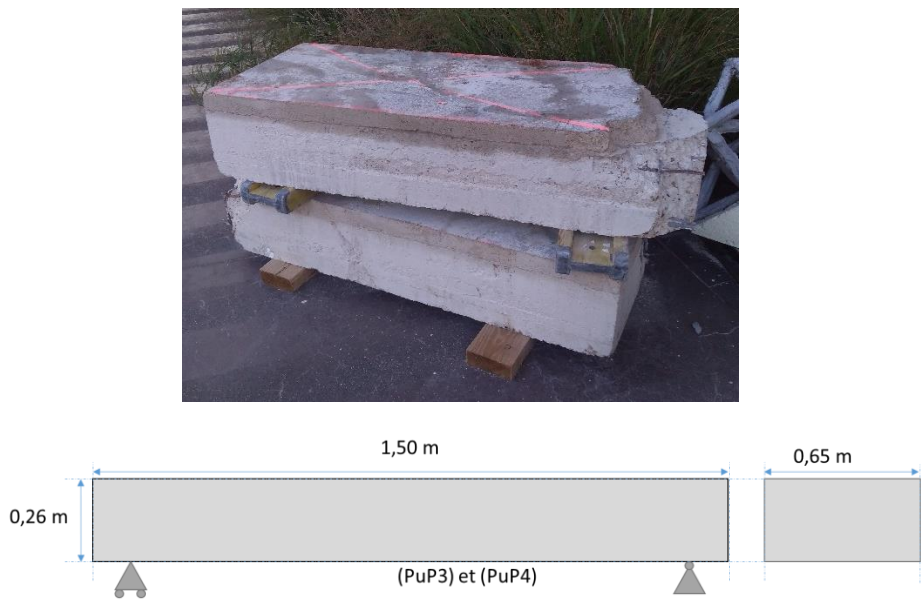


Figure 107 : Présentation de la poutre PuP3 et PuP4 (chantier de Paris)

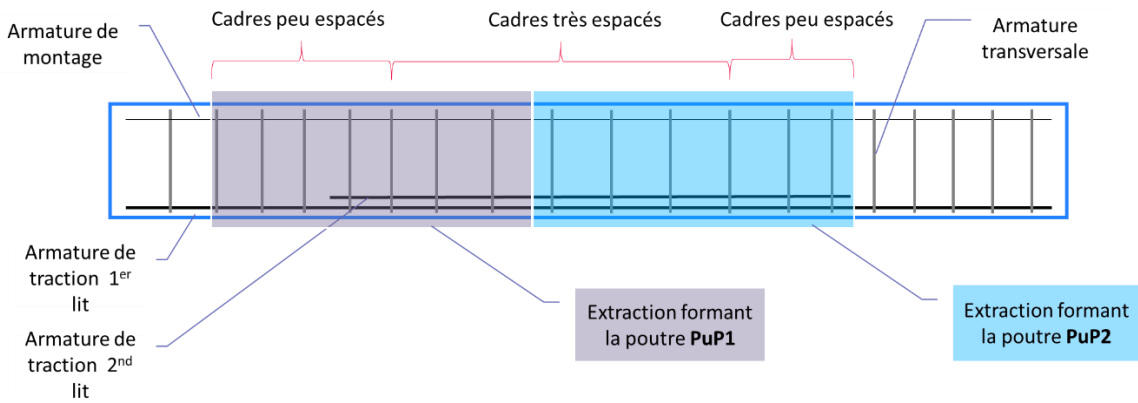


Figure 108 : Hypothèse d'extraction des poutres PuP1 et PuP2

Les éléments PuL3, PuP3 et PuP4 ne sont pas testés pour les raisons suivantes :

- PuL3 est en trop mauvais état : présences de chocs et ferrailage apparent (le poteau PL2 également en mauvais état servira de calibration pour la presse) ;
- PuP3 et PuP4 sont trop massifs pour être testés en flexion jusqu'à la ruine avec le dispositif expérimental à disposition.

Ces éléments seront soumis à des tests non destructifs de détermination de la position des armatures ainsi qu'à des carottages afin de déterminer la résistance du matériau béton seul (test de compression) et l'état de propagation du front de carbonatation.

4.1.2 « Chantier de Lyon » à Champagne au Mont d'Or (69)



Figure 109 : Chantier de rénovation de bureaux à Champagne au Mont d'Or (69), appelé dans la suite de la thèse « chantier de Lyon » (Image google maps)

À l'occasion d'une opération de rénovation et de réagencement d'un complexe de bureaux datant de 1985, un bâtiment a été déconstruit en 2021. Sur la Figure 109, nous pouvons voir le bâtiment en phase de curage après retrait du bardage en verre. Ce cas d'étude sera appelé dans la suite de la thèse « chantier de Lyon ».

Le bâtiment déconstruit est en partie préfabriqué en béton armé. Les planchers sont des caissons préfabriqués en U inversés soutenus par les façades également préfabriquées. Cette construction

permet de ne pas avoir de poteau au centre du plateau. Les jonctions entre les différents bâtiments ont été coulées en place avec une structure poteau-voile-dalle (Figure 110). Pour les éléments préfabriqués et les dalles coulées en place, la déconstruction se fait par sciage puis élingage des différents éléments. Les poteaux coulés en places sont piqués en tête et en pied (Figure 111). Pour élinguer les poteaux, un carottage est réalisé en tête de poteau afin de servir d'accroche.

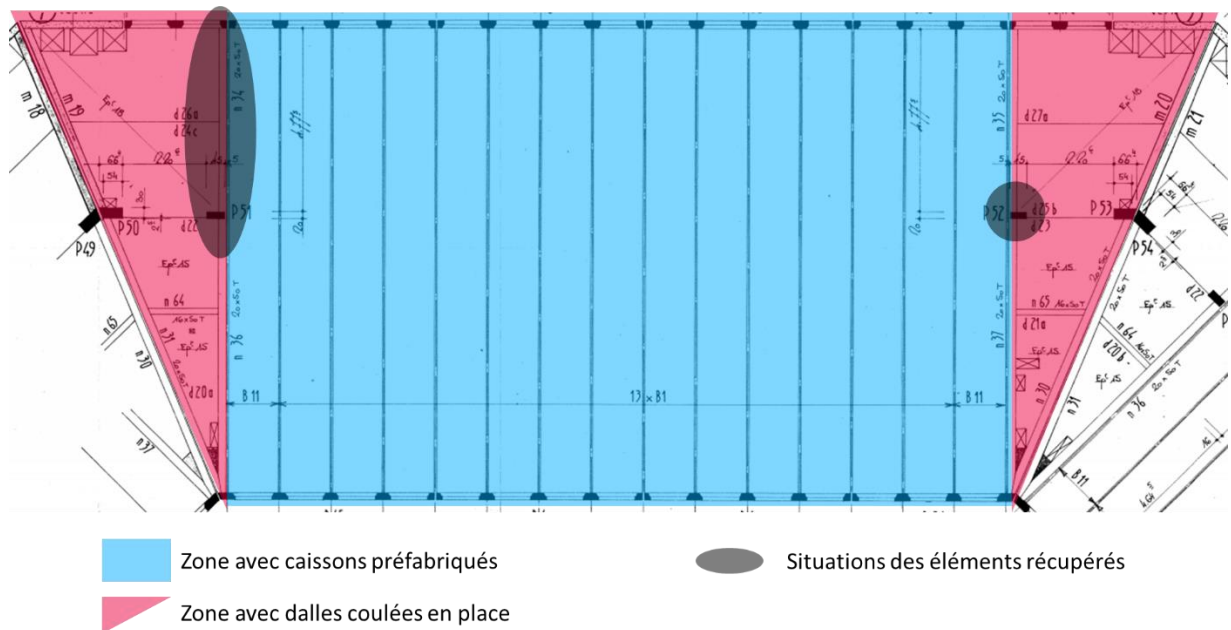


Figure 110 : Vue en plan du plancher du bâtiment déconstruit sur le chantier de Lyon



Figure 111 : Démontages des poteaux coulés sur place au chantier de Lyon

Trois éléments ont été récupérés sur ce chantier : deux poteaux coulés en place et une poutre en partie préfabriquée.

Ces trois éléments et leurs dimensions sont présentés sur les Figure 112, Figure 113 et Figure 114. Ce sont des éléments élancés. Les éléments ont été manipulés sans précautions supplémentaires à celles effectuées sur le reste du chantier. On peut voir sur les photographies que les éléments sont assez accidentés, notamment le poteau PL2 (Figure 113) et la poutre PuL3 (Figure 114) où l'armature au centre des éléments est apparente (et même sectionnée pour la poutre). Selon le personnel de chantier, ces accidents résultent de l'élingage lors de l'arrimage des éléments avec une chaîne métallique. Ces retours chantier sont cohérents avec les observations que l'on peut faire sur la Figure 111 où l'on voit l'un des éléments en bon état après piquage. Par ailleurs, tous les éléments présentent des fissurations probablement liées aux différents chocs et à l'usage de marteaux hydrauliques.

Ces trois éléments étant localisés dans la région lyonnaise, ils ont été rapatriés et testés au laboratoire LTDS de l'ENTPE à Vaulx-en-Verin (69).



Figure 112 : Présentation du poteau « PL1 » (chantier de Lyon)

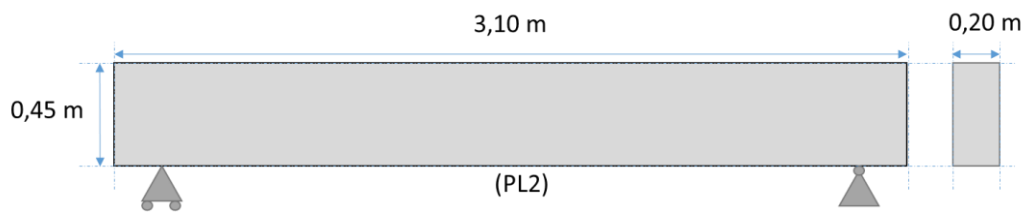


Figure 113 : Présentation du poteau « PL2 » (chantier de Lyon)

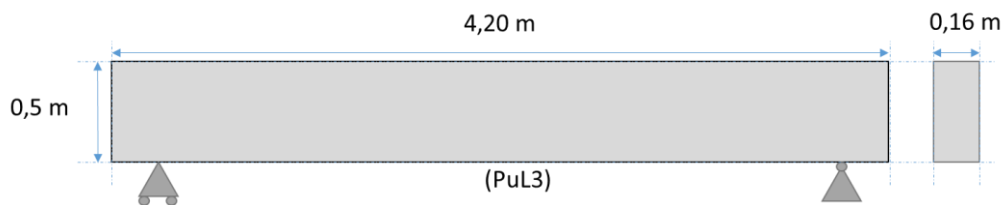


Figure 114 : Présentation de la poutre « PuL3 » (la poutre est actuellement installée sur sa fibre supérieure i.e. la partie normalement en compression) (chantier de Lyon)

4.1.3 Conclusion

Ces deux chantiers nous apprennent beaucoup sur l'étape de recherche d'éléments de réemploi. On constate ainsi qu'il est possible d'obtenir des éléments en bon état apparent comme des éléments très accidentés. Effectivement, ces deux chantiers d'études nous permettent de présenter deux cas extrêmes où la qualité de la dépose est très différente. Il est donc important de pouvoir contrôler et adapter la dépose des éléments. Cela passe notamment par la sensibilisation du personnel intervenant sur les chantiers de déconstruction. Par ailleurs, la méthode de déconstruction en elle-même (sciage ou piquage) semble visuellement peu influente sur l'intégrité de l'élément. Cette remarque nécessite toutefois d'être approfondie plus en détail et sur un panel d'éléments plus grand. Enfin, globalement, des méthodes de déconstruction de la structure élément par élément existent et semblent de qualité. Le passage au réemploi n'implique pas de révolution importante dans les techniques.

Ainsi pour une première approche, une amélioration et une fiabilisation de la qualité semblent tout à fait envisageables en agissant sur la sensibilisation du personnel et l'adaptation du protocole d'élingage des éléments. Pour la recherche future, dans la perspective de prospection de nouveaux cas d'études, il serait nécessaire d'intervenir plus en amont de la déconstruction afin de pouvoir mieux contrôler le protocole de déconstruction, choisir les dimensions et l'état des éléments à récupérer.

4.2 FAISABILITE TECHNIQUE DU REEMPLOI DU BETON ARME

Cette section présente une étude préliminaire à la faisabilité du réemploi d'éléments en béton armé issus de la déconstruction. Elle est basée sur le travail de thèse de (Brière, 2016) qui présente l'analyse du cycle de vie de trois scénarios théoriques de fin de vie d'une poutre en béton armé : mise en décharge, recyclage et réemploi. L'auteur met en avant l'avantage environnemental de la réutilisation sur la plupart des indicateurs choisis. Dans ce travail, il « s'agissait avant tout de poser les premières pierres d'une étude future plus approfondie ». Ainsi, son étude est basée sur l'hypothèse forte de réutilisation totale et pour un même usage de la poutre ; aucune perte de fonctionnalité ou de résistance mécanique n'est étudiée.

Dans cette section nous nous proposons d'approfondir l'étude de (Brière, 2016) en étudiant la faisabilité du réemploi au travers de la mesure de la durabilité et de la résistance résiduelles d'éléments de structures réels issus de la déconstruction. Par ailleurs, l'étude ACV réalisée dans la partie suivante (partie 4.3) se fera par extension des frontières (fin de vie cycle n et début de vie cycle n+1) et non seulement en prenant en compte la fin de vie et les impacts évités.

Pour cette étude, nous avons prospecté des chantiers afin de récupérer des éléments issus de la déconstruction, puis nous avons réalisé des essais de flexion sur ces derniers. Dans cette section, nous présenterons notre démarche théorique de mise en œuvre du réemploi, les cas d'études que nous avons sélectionnés pour mettre en avant la faisabilité préliminaire du réemploi et enfin nous expliquerons le protocole expérimental, les résultats des essais et les perspectives de l'étude.

4.2.1 La démarche du réemploi

Nous avons vu précédemment (section 3.1.2.1) que la qualification et l'évaluation des performances techniques des éléments issus de la déconstruction sont des freins majeurs au réemploi. Pour avancer sur cette problématique, nous nous concentrons sur l'étude de la faisabilité technique du réemploi, en

tentant de répondre à la question : l'élément déconstruit peut-il assurer un rôle structurel dans une nouvelle structure ? Ainsi, les autres freins au réemploi discutés précédemment (économiques, organisationnels...) ne sont pas abordés dans cette étude préliminaire de faisabilité. Chaque frein doit faire l'objet d'un travail plus approfondi dans des recherches futures.

Pour ce faire, on se base sur la méthodologie du diagnostic ressources préalable à la déconstruction (section 3.1.3), dont on propose une extension afin d'intégrer une étude de faisabilité technique du réemploi des éléments structurels en béton armé. On se concentre ainsi sur un seul usage *i.e.* un usage structurel similaire et non pour un usage détourné.

La démarche de diagnostic de la faisabilité du réemploi structurel ainsi élaborée est résumée sur le graphique de la Figure 115. Cette démarche se décompose en deux phases.

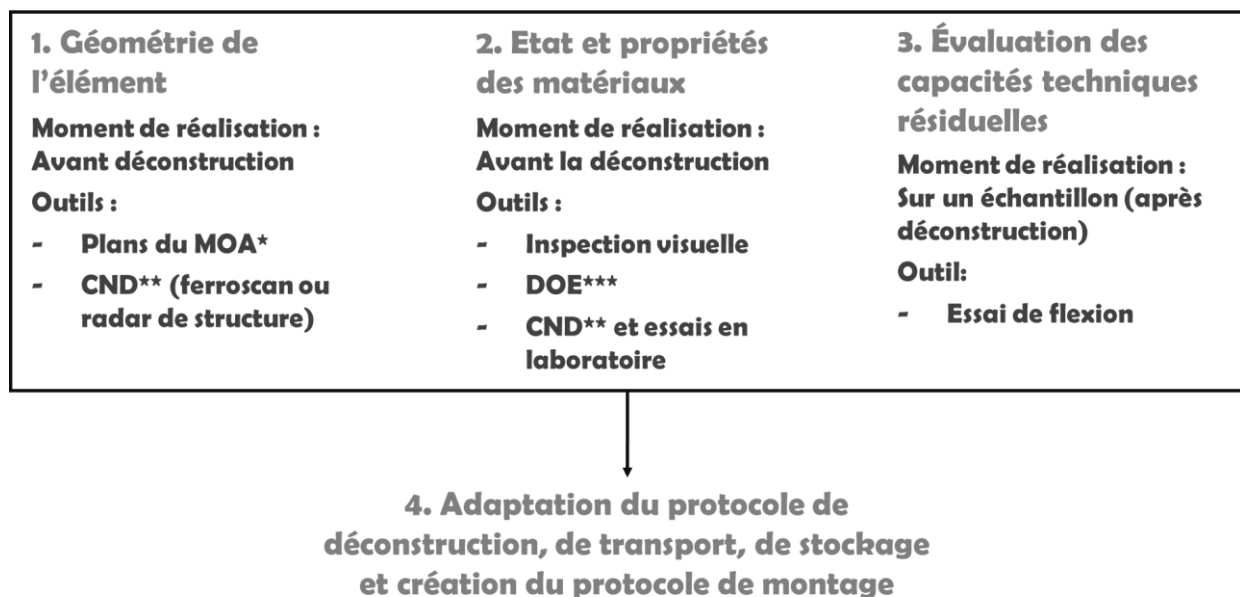


Figure 115 : Protocole de caractérisation d'un élément (étapes 1,2 et 3) de structure en vue du réemploi (étape 4). * Maître d'Ouvrage ; **Contrôles Non Destructifs ; ***Dossier des Ouvrages Exécutés.

I. Diagnostic technique du potentiel de réemploi d'un pool d'éléments (Étapes 1 à 3 de la Figure 115) :
 Cette phase consiste à rassembler les informations pratiques et techniques pour évaluer si les éléments sont réemployables. La connaissance des caractéristiques techniques permet de trouver un débouché en réemploi :

- **Étape 1. Déterminer la géométrie** et la composition de l'élément. Il s'agit de connaître les dimensions de l'élément, à savoir ses dimensions hors tout (hauteur, largeur, profondeur), mais également ses différents éléments constitutifs. Pour un élément en béton armé par exemple, il est important de connaître la position et le diamètre du ferrailage horizontal et vertical, qui a une influence sur la résistance mécanique comme sur la durabilité.
- **Étape 2. Déterminer les propriétés des matériaux et l'état** de l'élément. Cette étape consiste à déterminer les propriétés physiques, chimiques ou mécaniques des matériaux constitutifs et à analyser l'état général et détaillé des matériaux et de l'élément. Dans le cas des éléments en béton armé, il s'agit de connaître premièrement les propriétés des matériaux constitutifs : principalement la résistance en compression (éventuellement en traction) du béton et la résistance en traction des armatures. En outre, concernant l'état, il faut se poser des questions concernant l'état du béton et du ferrailage. Le béton est-il fissuré ? Le béton a-t-il été soumis à des éléments pathogènes (chlorure, sel de déverglaçage, infiltrations, intempéries) ?

Présente-t-il une pathologie (alcali-réaction, réaction sulfatique interne...) ? L'armature est-elle corrodée ou bien existe-t-il un risque de corrosion (infiltrations, carbonatation profonde...) ? etc. Cet ensemble de questions permet de déterminer l'état global de l'élément. Il est alors possible de donner une première estimation de la durabilité ainsi que de la résistance de l'élément.

- **Étape 3. Évaluer les capacités techniques résiduelles.** Dans cette étape, il s'agit d'évaluer la résistance effective d'un élément ou, dans le cas d'un lot/pool homogène d'éléments, d'évaluer l'ordre de grandeur de cette résistance pour l'ensemble. Pour cela, on réalise un recalcul de la résistance en prenant en compte les dégradations subies au démontage et transport. Un coefficient de sécurité peut être appliqué. Pour corroborer ces calculs, il peut être recommandé de réaliser des tests destructifs en laboratoire sur un ou deux éléments du lot. Dans le cadre d'une poutre, cette évaluation peut être réalisée par un test de flexion. Notons que la détermination du potentiel de réemploi des éléments s'effectue préférentiellement en amont de la déconstruction à l'aide des deux étapes précédentes. Cette dernière étape permet de valider les hypothèses et de fiabiliser les estimations, mais aussi de s'assurer que la déconstruction s'est bien déroulée. Cette étape s'inscrit dans le cadre académique de cette thèse car elle permet un travail en amont pour la compréhension de l'état d'un élément déconstruit.

II. Mise en œuvre de la déconstruction et de la construction de l'élément de réemploi (Étape 4 de la Figure 115) : Cette phase permet de s'assurer qu'un élément jugé réemployable avant déconstruction reste en bon état pendant toute la phase où il est extrait d'une structure. C'est la phase entre le cycle de vie précédent et le cycle de vie futur *i.e.* la phase de déconstruction, transport, stockage (si nécessaire), réparation (si nécessaire) et enfin mise en œuvre dans le futur bâtiment. L'intégrité et le bon état de l'élément est assuré par la mise en place d'un protocole adapté. Lors de ces phases, le risque principal est la fissuration et les épaufrures liées aux chocs ou à une mauvaise logistique/manutention, les autres risques ayant été évalués lors de la phase du diagnostic technique du potentiel de réemploi. Le développement des différents protocoles ne sera pas abordé dans la présente thèse. Ils pourront faire l'objet de travaux de recherche futurs en adaptant les protocoles plus généraux tel que REPAR#2 (Benoit et al., 2018) ou (Deweerd et Mertens, 2020).

L'usage du contrôle non destructif (CND) (ou plus largement des techniques de maintenance d'ouvrage d'art) au cours des différentes étapes du protocole de caractérisation des éléments semble tout à fait adapté car ce sont des techniques déjà existantes, pas ou peu destructives et reconnues pour les ouvrages d'art (Breyse and Abraham, 2005; Nguyen, 2014). Par conséquent leur utilisation pour les éléments du bâtiment et pour les éléments de réemploi ne nécessite pas d'innovation technologique.

Dans la suite de cette partie, nous allons mettre en application la première phase de la démarche proposée à des éléments de structures issus de la démolition de bâtiment. Ces éléments sont destinés au réemploi. Les éléments qui ne pourront pas être réemployés de manière structurelle peuvent être réutilisés de manière non structurelle à l'instar de ce que propose l'association Bellastock : pavés béton, cloisons, murets (Benoit et al., 2018) (section 3.1.4.2). Si aucune des deux solutions précédentes de traitement n'est possible, le béton pourra être recyclé en granulats (section 1.2.3).

4.2.2 Diagnostic technique du potentiel de réemploi

4.2.2.1 Modélisation mécanique théorique

Comme mentionné dans la partie 4.2.1, un des défis du réemploi des éléments structuraux est de pouvoir déterminer leurs caractéristiques physiques et mécaniques et notamment leur résistance résiduelle sans compromettre l'intégrité de la structure (à l'exception de l'étape de confirmation où un élément du lot peut être détruit par un essai de flexion).

L'objectif des étapes 1 et 2 de la phase 1 (cf. partie 4.2.1) est de permettre d'évaluer au mieux le comportement mécanique de l'élément de structure existant.

Pour les cas d'études présentés précédemment, nous recherchons dans un premier temps les caractéristiques géométriques des éléments. Nous nous référons premièrement aux plans et nous confirmons ou infirmons les plans avec des mesures non destructives *in situ*.

Afin de déterminer le positionnement et le diamètre des cages d'armature au centre du poteau, nous avons eu recours aux plans mis à disposition par le maître d'ouvrage. Un extrait est présenté dans la Figure 116. Ce plan présente le ferrailage des poteaux PL1 et PL2 du chantier de Lyon. Il nous apprend notamment que le ferrailage vertical est constitué de 8 barres d'acier de Haute Adhérence (HA) de 10 mm de diamètre. Le ferrailage horizontal est constitué de cadres de diamètre 6 mm, répétés tous les 20 cm sur la hauteur du poteau (espacement réduit à 10 cm pour le pied de poteau).

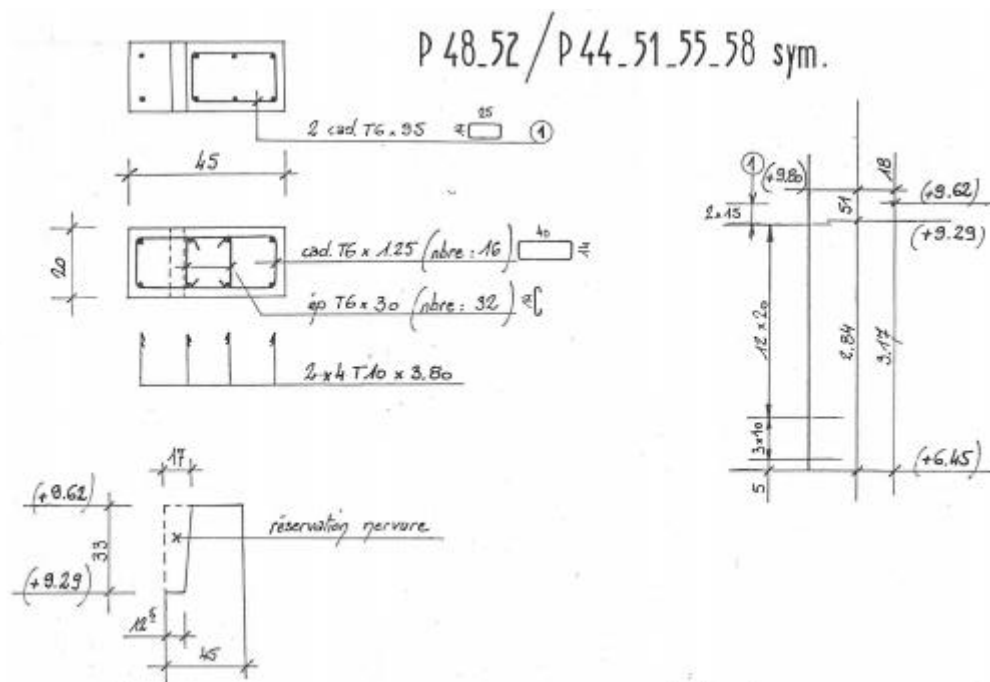


Figure 116 : Extrait du plan de ferrailage disponible dans le Dossier des Ouvrages Exécutés du Maître d'Ouvrage pour le chantier de Lyon

Ensuite, les dimensions sont mesurées facilement à l'aide d'un mètre. Le ferrailage horizontal et l'enrobage peuvent être déterminés après déconstruction en observant les extrémités des poutres (tout en gardant en tête l'incertitude sur l'homogénéité au sein de l'élément). Néanmoins la présence de lits d'armatures supplémentaires au centre des poutres n'est pas détectable visuellement. Dans ce même principe, la distinction entre le ferrailage du poteau et le ferrailage de jonction du poteau n'est pas aisée.

Les calculs sont effectués conformément aux règles de (EUROCODE 2, 2005) en utilisant les modèles de comportement proposés pour l'acier et le béton avec des paramètres de comportement caractéristiques, à savoir que :

- **Pour le béton**, ne connaissant pas le type de béton réellement utilisé, nous faisons l'hypothèse de l'usage d'un béton courant qui contient 350 kg/m³ de ciment. Ainsi, les valeurs suivantes peuvent être retenues :
 - Résistance à la compression à 28 jours : $f_{ck} = 35$ MPa,
 - Résistance de calcul : $f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,5} = 23,3$ MPa,
 - Résistance moyenne à la traction : $f_{ctm} = 0,3 f_{ck}^{0,66} = 3,1$ MPa,
 - Module d'Young : $E_{cm} = 22 \left(\frac{f_{ck}+8}{10} \right)^{0,3} = 34,1$ GPa;
- **Pour l'acier**, nous faisons l'hypothèse d'un acier de limite d'élasticité $R_e=450$ MPa. Ainsi, le comportement est déterminé par la courbe de la Figure 117. Par ailleurs, le coefficient d'équivalence (α_e) (rapport du module d'élasticité longitudinale de l'acier à celui du béton) est égal à 15 par convention.

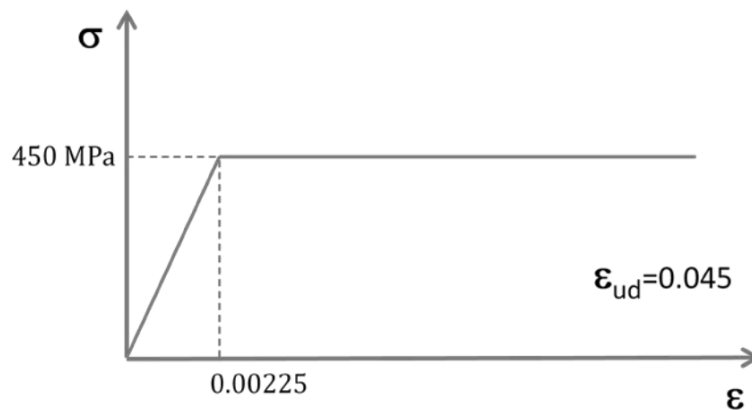


Figure 117 : Courbe de comportement force déplacement de l'acier, diagramme à palier horizontal (EUROCODE 2, 2005).

Nous étudions un cas simple où la poutre est positionnée sur 2 appuis soumis à une flexion simple due à son poids propre et une ou deux charges ponctuelles (Q) respectivement pour une flexion 3 points (Figure 118) ($F=Q$) et une flexion 4 points (Figure 119) ($F=2Q$). On calcule la résistance en utilisant le moment fléchissant maximal à l'ELU (État Limite Ultime), la réglementation distinguant deux états :

- **ELS (État Limite de Service)** : c'est l'état vérifiant que les déformations élastiques d'une structure restent compatibles avec le fonctionnement. Franchir cette limite peut affecter la durabilité ou l'utilisation de la structure mais pas la sécurité.
- **ELU (État Limite Ultime)** : c'est l'état vérifiant que la structure ne subit pas de déformations menant à la ruine de la structure.

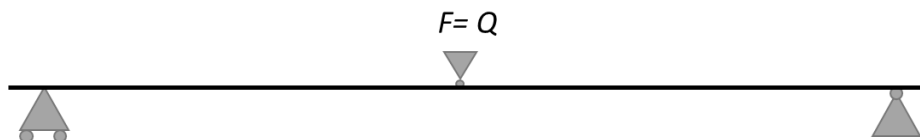


Figure 118 : Schéma flexion 3 points

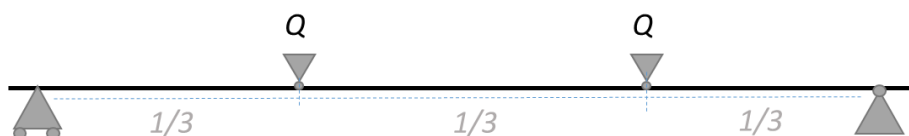


Figure 119 : Schéma flexion 4 points

Nous calculons les données clés correspondant aux grandes étapes de la flexion : la première fissuration et la rupture.

Pour ces calculs, nous considérons :

- L'hypothèse de Navier-Bernoulli : les sections droites restent droites après déformation,
- L'absence de glissements relatifs entre les armatures et le béton,
- Le béton tendu est négligé, l'acier comprimé est négligé.

La **première fissuration** apparaît lorsque la contrainte de traction sur la fibre inférieure dépasse la résistance en traction du béton. Cette valeur peut être pertinente dans le cas d'un élément neuf mais pas nécessairement pour un élément de réemploi pour lequel cette première fissuration a été atteinte au cours de sa phase d'usage. Néanmoins, nous calculons tout de même le moment de première fissuration pour l'élément neuf équivalent (Équation 18).

Équation 18

$$M_f = \frac{f_{ctm} \times I_z}{h - Y_g}$$

M_f : moment de première fissuration,

f_{ctm} : résistance en traction du béton,

I_z : inertie de la poutre,

Y_g : distance du centre de gravité par rapport à la fibre supérieure.

Ensuite, nous calculons le **moment de rupture**. Il existe deux pivots de rupture en flexion simple :

- **Pivot A** : L'élément dispose d'un petit ferrailage, il résistera à des efforts de traction faibles. C'est l'acier de ferrailage qui atteindra la rupture en traction. La rupture intervient si la déformation relative de l'acier tendu vaut 45 pour mille ($\epsilon_{ud}=0,045$) ;
- **Pivot B** : L'élément dispose d'un ferrailage important, il résistera à des efforts importants. Le béton atteindra la rupture en compression. La rupture intervient si la déformation relative du béton comprimé vaut 3,5 pour mille ($\epsilon_{cu3}=0,0035$).

À la vue des ferrailages des poutres PuP1, PuP2, PuP4 et PuP5, nous pouvons supposer que les éléments ont été dimensionnés pour des efforts de traction élevés. Ainsi nous pouvons émettre l'hypothèse d'une rupture sous des efforts de compression importants dans le béton, c'est-à-dire en Pivot B. En écrivant l'équilibre entre le béton comprimé et l'acier en traction nous obtenons le moment maximal que la poutre peut supporter (Équation 19).

Ce moment à la rupture permet de calculer la force à la rupture. Cette dernière est calculée à l'aide de l'Équation 20.

$$M_{elu} = F_{bc}(d - 0,4 y) = 0,8byf_{cd}(d - 0,4y)$$

M_{elu} : moment à la rupture.

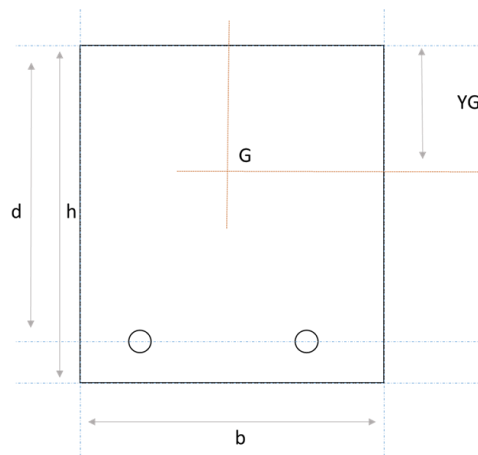
F_{bc} : force reprise par le béton comprimé

f_{cd} : résistance de calcul du béton

y : position de l'axe neutre

b : largeur de la poutre

d : distances armature selon l'image ci-dessous



Équation 20

$$F(4 \text{ points}) = 2Q = \frac{6}{L} \left(M - \rho g b h \frac{L^2}{8} \right) \quad (a)$$

$$F(3 \text{ points}) = Q = \frac{4}{L} \left(M - \rho g b h \frac{L^2}{8} \right) \quad (b)$$

F : force au vérin de la presse à appliquer

M : moment

h : hauteur de la poutre

b : épaisseur de la poutre

L : longueur de la poutre entre appuis

$\rho * g$: poids volumique.

(Pour une flexion 4 et 3 points)

Nous calculons ces différents moments et forces pour les poutres de types PuP1 et PuP3 et les poteaux de type PL1. Les différentes valeurs sont inscrites dans le Tableau 79. Compte tenu des hypothèses retenues, il existe deux grandes incertitudes :

- **Incertitude sur la résistance des matériaux** béton et acier : Nous calculons donc également les moments et forces de rupture dans un contexte de matériaux très résistants, c'est-à-dire avec un béton 50 MPa (à 28 jours) et un acier Re=500 MPa. Cela nous donne une borne supérieure pour chaque élément. Cela fait sens dans l'optique d'essais de flexion, pour vérifier que la presse a la capacité suffisante, mais en pratique, on chercherait surtout une borne inférieure.
- **Incertitude sur le ferrailage.** Le second lit d'armature en traction n'étant pas traversant nous ne connaissons que la quantité d'armature minimale et maximale. Ainsi, nous calculons le moment et la force pour ces deux possibilités. Cela s'applique pour les poutres PuP1 et PuP2.

Tableau 79 : Tableaux des résultats théoriques. * et ** : variations des hypothèses de résistance et ferrailage, *** borne supérieure (atteinte dans le cas où l'ensemble des armatures sont assimilées à la position la plus basse)

	Chantier de Paris		Chantier de Lyon
	PuP1 et PuP2	PuP3 et PuP4	PL1 et PL2
Résistance de fissuration	129 kN	127 kN	41,2 kN
Moment de rupture	141,3 kN.m Max* : 251,1 kN.m	162,9 kN.m Max** : 186,8 kN.m	Max*** : 94 kN.m
Résistance de rupture en 4 points	421 kN Max* : 831 kN	694 kN Max** : 796 kN	Max*** : 197 kN
Résistance de rupture en 3 points	280 kN Max* : 554 kN	462 kN Max** : 531 kN	Max*** : 131kN

On observe qu'en raison de la forte incertitude qui demeure sur les caractéristiques physiques des matériaux des différents éléments, l'incertitude sur la résistance est grande (du simple au double pour les poutres PuP1 et PuP2).

Concernant les éléments PuP3 et PuP4, le calcul montre que la rupture ne pourra être atteinte avec notre dispositif expérimental. Par conséquent, ils ne seront donc pas testés, comme mentionné précédemment.

Ces valeurs posent une base de comparaison en estimant la résistance à l'état neuf des éléments issus de la déconstruction.

4.2.2.2 Test de vérification de la résistance du béton

Afin de vérifier la robustesse de l'hypothèse concernant la résistance à la compression du béton, nous avons réalisé avec l'aide du CEREMA Ile de France et du CEREMA Centre-Est des tests de compression normalisés sur éprouvettes de béton (selon la NF EN 12390-3).



(a)



(b)

Figure 120 : Carottage des éprouvettes béton : (a) carottage ; (b) éprouvettes béton après rectification

Pour les éléments de Paris, trois carottages ont été réalisés, à l'aide d'une carotteuse de diamètre 8 cm (carotte de 7,5 cm de diamètre), sur les éléments PuP3 et PuP4 (Figure 120 (a)). Les éprouvettes ont ensuite subi un recoupage en longueur (hauteur finale de 16,5 cm) et une préparation des par rectification, pour rendre planes et horizontales les faces d'appui (Figure 120 (b)). Les trois éprouvettes ont été testées à la compression (Figure 122 (a) et (b)). Le rapport d'essai est disponible pour exemple en annexe IX. Nous obtenons une résistance moyenne de 22,3 MPa. Cette valeur est donc très inférieure à l'hypothèse prise en compte (35 MPa au minimum).

Pour les éléments de Lyon, quatre carottages ont été réalisés de la même manière sur les poteaux PL1 et PL2. Les éprouvettes ont ensuite été redécoupées pour obtenir des éprouvettes d'élancement 2, soit 14,8 cm de hauteur pour 7,3 cm de diamètre de. La planéité et l'horizontalité des surfaces d'appui sont assurées par un surfaçage au soufre Figure 121 (a). Les éprouvettes sont enfin testées en compression (Figure 121 (b)). Nous obtenons une résistance moyenne du béton de 32 MPa. Cette valeur est donc proche de la valeur utilisée pour la simulation et est en accord avec le plan disponible qui préconisait une résistance du béton supérieure à 270 bars (27 MPa).



(a)



(b)

Figure 121 : Surfaçage au soufre(a) et compression des éprouvettes (b)

Dans le cas des éléments de Paris, ces essais nous permettent de mettre à jour les calculs de résistance à la flexion des poutres PuP3 et PuP4 (Tableau 80). Nous obtenons une baisse max de la résistance estimée de seulement 8,4 %. Par extension, nous réalisons également le calcul de la résistance à la flexion estimée pour les poutres PuP1 et PuP2 bien que nous n'ayons pas fait de carottage et tests sur éprouvette pour ces dernières. Cette hypothèse nous semble réaliste car toutes ces poutres étaient situées dans une zone proche les unes des autres, en intérieur et au niveau du même étage. Il serait tout de même intéressant de faire des tests complémentaires sur les poutres PuP1 et PuP2 pour valider ou invalider cette hypothèse.



(a)



(b)

Figure 122 : Test de compression des éprouvettes : (a) vue globale de la presse ; (b) vue de l'éprouvette

Tableau 80 : Valeur de résistance des poutres de Paris en prenant en compte un béton de résistance 35 MPa et 22,3 MPa. *si deux lits d'armatures

	PuP3 et PuP4			PuP1 et PuP2
	Béton de résistance 35 MPa	Béton de résistance 22,3 MPa	Variation	(Par extension) Béton de résistance 22,3 MPa
Résistance de fissuration	127 kN	93 kN	- 26%	94 kN
Moment de rupture	162,9 kN.m	149 kN.m	-8,4%	123 kN.m Max* : 206 kN.m
Résistance de rupture en 4 points	694 kN	636 kN		406 kN Max* : 681 kN
Résistance de rupture en 3 points	462 kN	424 kN		271 kN Max* : 454 kN

4.2.2.3 Mesure du front de carbonatation

Nous souhaitons observer l'avancée de la carbonatation au sein des éléments et ainsi obtenir une idée de la durabilité des éléments face au risque de corrosion (section 3.3.2). Trois carottes de béton sur les éléments de Paris et 2 sur les éléments de Lyon ont été prélevées (2 pour les éléments de Lyon)

pour un test à la phénolphtaléine, décrit en section 1.2.1. Les carottes de béton sont préalablement fendues (Figure 123) puis de la phénolphtaléine est déposée sur la surface fendue (Figure 124). La section rose témoigne d'une basicité forte et la section incolore témoigne d'une basicité faible (pH inférieur à 9,2) traduisant une carbonatation de la zone.

Éléments de Paris

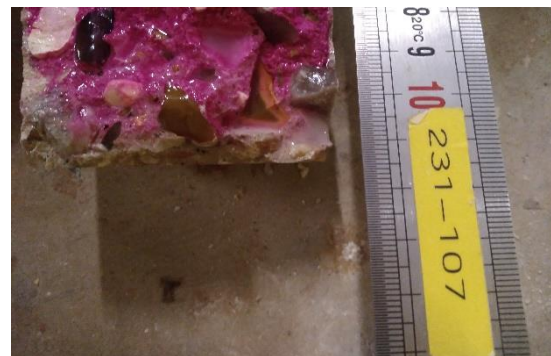
Nous nous intéressons aux parties de carottes sur les faces exposées de la poutre : face haute (coté sol) (Figure 124 (a)) et face basse (coté plafond de l'étage inférieur) (Figure 124 (b)). On peut voir sur ces photographies que la section carbonatée est très faible : inférieure à 0,5 mm. Or, l'enrobage des armatures est de 2 cm ce qui laisse une marge d'évolution de la carbonatation de plus de 1 cm avant qu'il y ait un risque d'initiation de la corrosion.



Figure 123 : Dispositif de fendage des carottes de béton



(a)



(b)

Figure 124 : Photographie des essais à la phénolphtaléine : (a) mortier de surface, partie supérieure des poutres (coté revêtement de sol) ; (b) béton en sous face de la poutre (coté faux plafond)

Cette très faible carbonatation est liée à :

- L'exposition favorable des poutres au sein du bâtiment (intérieur en zone de bureau et donc une humidité et une température relativement constantes) ;
- La faible durée de vie du bâtiment (construction estimée aux années 80 soit environ 40 ans de durée de vie).

Éléments de Lyon

Nous nous intéressons aux parties de carottes sur les faces exposées des poteaux : une face est recouverte d'un enduit blanc au cours de la vie du bâtiment et une face est restée brute au cours de la vie du bâtiment. La Figure 125 présente les résultats. On observe que la section carbonatée est également très faible (à l'instar des éléments de Paris). Néanmoins, on observe que la profondeur de carbonatation n'est pas la même en fonction de la face étudiée. En effet, le coté enduit dispose d'un front de carbonatation de 4 à 3 mm de profondeur et le coté brut dispose d'un front à 8 à 10 mm. Cette différence peut être liée à la présence d'un enduit qui protège le béton mais pourrait également s'expliquer par l'usage de la pièce du bâtiment où était installé le poteau au cours de la vie du bâtiment. Avec un enrobage de 3,5 à 4,7 cm pour les grands cotés et de 2 cm pour les petits côtés, la durée de vie de l'élément peut encore être prolongée sans risque immédiat de corrosion.

Test face enduit plâtre Test face brute (sans enduit)

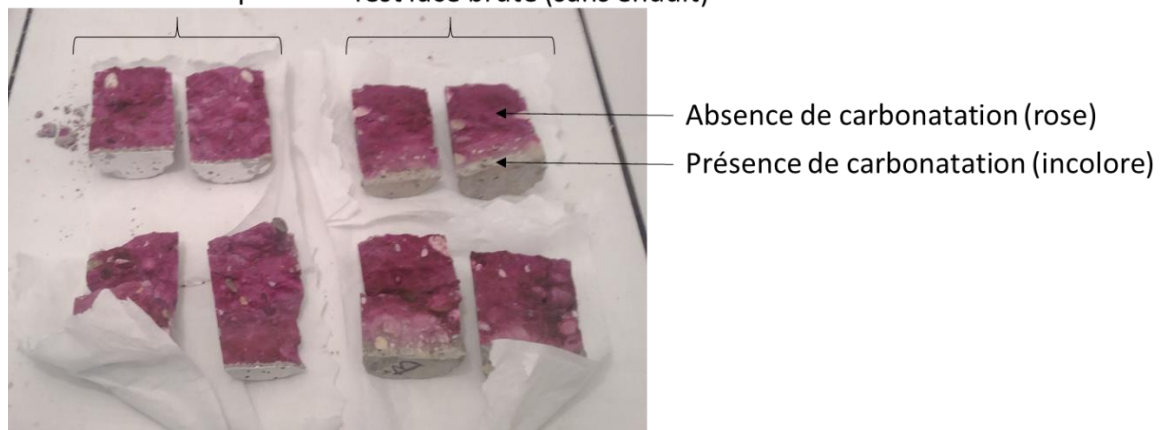


Figure 125 : Test à la phénolphthaléine sur deux éprouvettes de la poutre PL2

4.2.3 Essais de caractérisation de la capacité portante résiduelle des éléments de structure

4.2.3.1 Objectifs de l'essai

Les éléments de structure issus des deux chantiers de déconstruction ont été testés jusqu'à la rupture par essai de flexion. L'objectif principal de l'essai est de déterminer leur résistance résiduelle et de les comparer avec la résistance théorique d'éléments neufs équivalents, dimensionnés selon la norme NF EN 1992-1-1 (EUROCODE 2, 2005).

Cet essai nous permet également de déterminer le comportement vis-à-vis du chargement jusqu'à la rupture des éléments issus de la déconstruction (limites élastiques, plastiques et mécanisme de fissuration).

4.2.3.2 Protocole et dispositif d'essai

Un essai de flexion 4 points est réalisé sur l'élément PL1 à l'ENTPE. Les éléments PuP1 et PuP2 à l'ENPC sont quant à eux testés en flexion 3 points car les résistances attendues sont supérieures aux capacités de la presse pour un essai de flexion 4 points.

Les dispositifs expérimentaux sont présentés sur la Figure 126 pour l'essai de flexion 3 points et la Figure 127 pour l'essai de flexion 4 points. On indique également sur ces figures l'instrumentation mise en place, notamment le suivi des déplacements au moyen de LVDT (transducteur différentiel variable linéaire qui convertit un mouvement mécanique rectiligne en courant électrique).

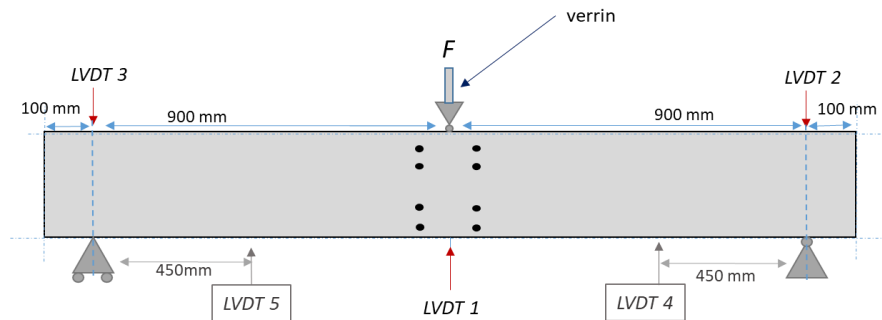


Figure 126 : Schéma du dispositif expérimental pour les poutres **PuP1** et **PuP2**. Dispositif d'essai de flexion 3 points. Essais à l'ENPC, éléments issus du chantier de Paris.

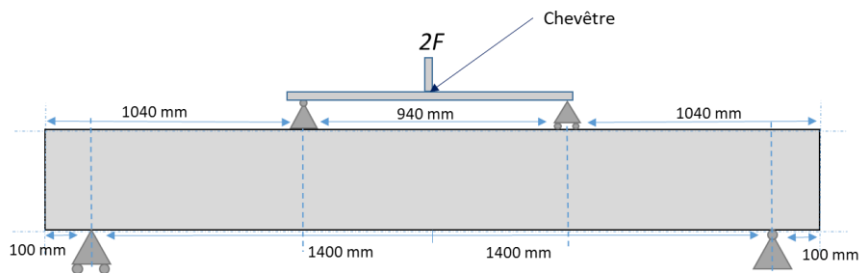


Figure 127 : Schéma du dispositif expérimental pour le poteau **PL1**. Dispositif d'essai de flexion 4 points de l'ENTPE, éléments issus du chantier de Lyon.

Chacun des éléments à tester est installé en position isostatique sur le bâti, via deux appuis :

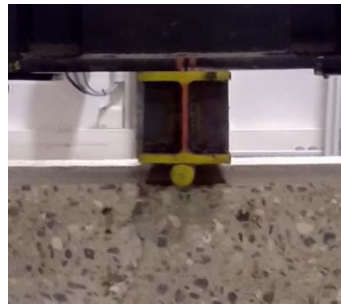
- Un appui rotulé qui bloque les déplacements selon l'axe transversal et l'axe longitudinal à la poutre ;
- Un appui simple, qui bloque le déplacement de la poutre selon la direction transversale à l'axe de la poutre uniquement.

En pratique, les appuis sont les mêmes sur la presse (Figure 128 (a)), le frottement résiduel des appuis bloquant les mouvements horizontaux (axe longitudinal de la poutre).

Dans le cas d'un essai de flexion 3 points (essais des poutres PuP1 et PuP2 à l'ENPC) (Figure 128 (b)), le chargement se résume à une force ponctuelle appliquée à mi-poutre. Elle est transmise par le vérin de la presse via un appui simple constitué d'un rouleau métallique posé sur une plaque métallique elle-même posée sur la poutre. Dans le cas d'un essai de flexion 4 points (essais du poteau PL1 à l'ENTPE) (Figure 128 (c)), le vérin appuie sur un chevêtre qui repose lui-même sur la poutre par deux appuis.



(a)



(b)



(c)

Figure 128 : Détail concernant les appuis : (a) appui poutre/bati ; appui du vérin sur la poutre : (b) presse de l'ENPC, (c) presse de l'ENTPE

Le chargement est réalisé par un vérin d'une capacité maximale de 450 kN pour la presse de l'ENPC et de 400 kN pour la presse de l'ENTPE. Le vérin est piloté en déplacement. Le dispositif de mesure est centralisé au niveau du poste de commande (Figure 129).

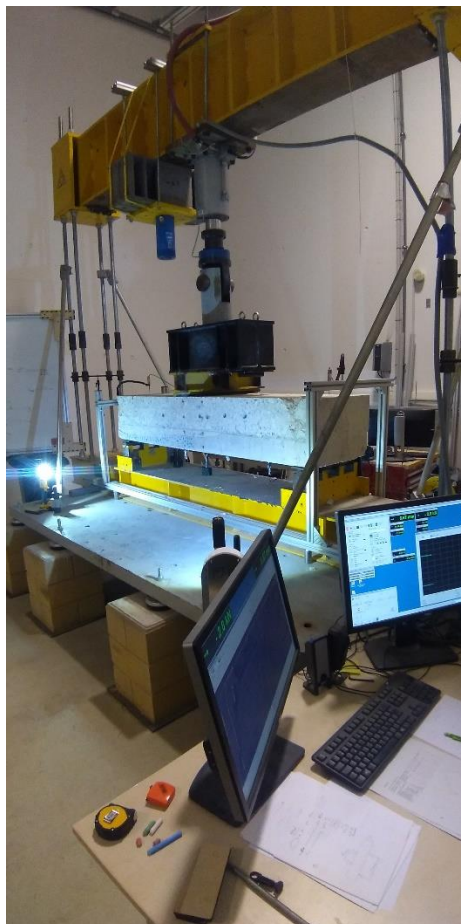


Figure 129 : Poste de commande de la presse, dispositif de l'ENPC

4.2.3.3 Instrumentation

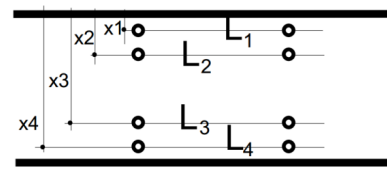
La force et la course du vérin sont directement mesurées par le capteur interne au vérin.

Pour les essais de flexion 3 points, Les déplacements sont mesurés par des LVDT dont la position est indiquée sur les schémas des Figure 126 et Figure 127 et sont enregistrés en continu par la centrale d'acquisition. La position de l'axe neutre est également déterminée pour chaque palier de force, à l'aide d'un déformètre à bille (Figure 130). Quatre lignes horizontales de deux billes chacune ont été fixées sur la poutre (Tableau 81). On mesure avec le déformètre la variation de distance entre les billes : $\epsilon_i = \Delta L_i / L_{0i}$ pour chaque ligne i . La distribution des déformations linéaires dans la hauteur de la poutre permet de placer l'axe neutre.

Au cours de l'essai, les fissures sont repérées et notées par un trait de couleur à la craie. La Figure 131 présente un exemple de relevé des fissures de la poutre PuP1.



Figure 130 : Déformètre à billes et positionnement des billes



Indice	Côte (mm)
x1	30
x2	130
x3	230
x4	330

Tableau 81 : Placement des billes pour la mesure de la déformation au déformètre à billes



Figure 131 : Repérage de fissures de la poutre PuP1

Pour l'essai de flexion 3 points, l'instrumentation mise en place à l'ENPC permet de suivre tout au long de l'essai :

- L'effort F appliqué par le vérin, mesuré par la presse ;
- La flèche f au centre de la poutre ainsi qu'à deux points à mi-distance du centre et des appuis, mesurée par des capteurs de déplacement LVDT de course 2 cm (LVDT 1,4 et 5) ;
- Les déplacements parasites au droit des appuis (LVDT2 et LVDT 3) ;
- La position de l'axe neutre via la distribution linéaire des déplacements dans la hauteur de la poutre, mesurée à l'aide d'un déformètre à bille.

Pour l'essai de flexion 4 points, l'instrumentation mise en place à l'ENTPE permet de suivre tout au long de l'essai :

- L'effort F appliqué par le vérin, mesuré par la presse ;
- La flèche f au centre de la poutre, mesurée par la presse ;

En parallèle de ces différentes mesures, un enregistrement vidéo est effectué (Figure 132). Le relevé des fissures (nombre et orientation) est effectué à chaque palier de force.

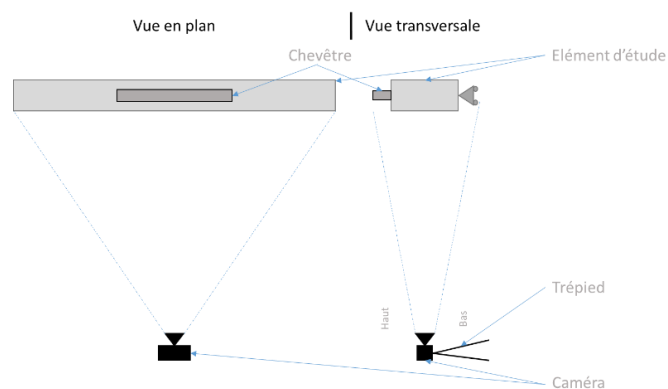


Figure 132 : Schéma de principe du placement de la caméra pour le suivi de l'expérience.

4.2.4 Résultats

4.2.4.1 Essai des poutres PuP1 et PuP2 à l'ENPC

La Figure 133 illustre l'ensemble du dispositif d'essai de flexion 3 points réalisé à l'ENPC. La photographie a été prise juste avant le début du chargement.

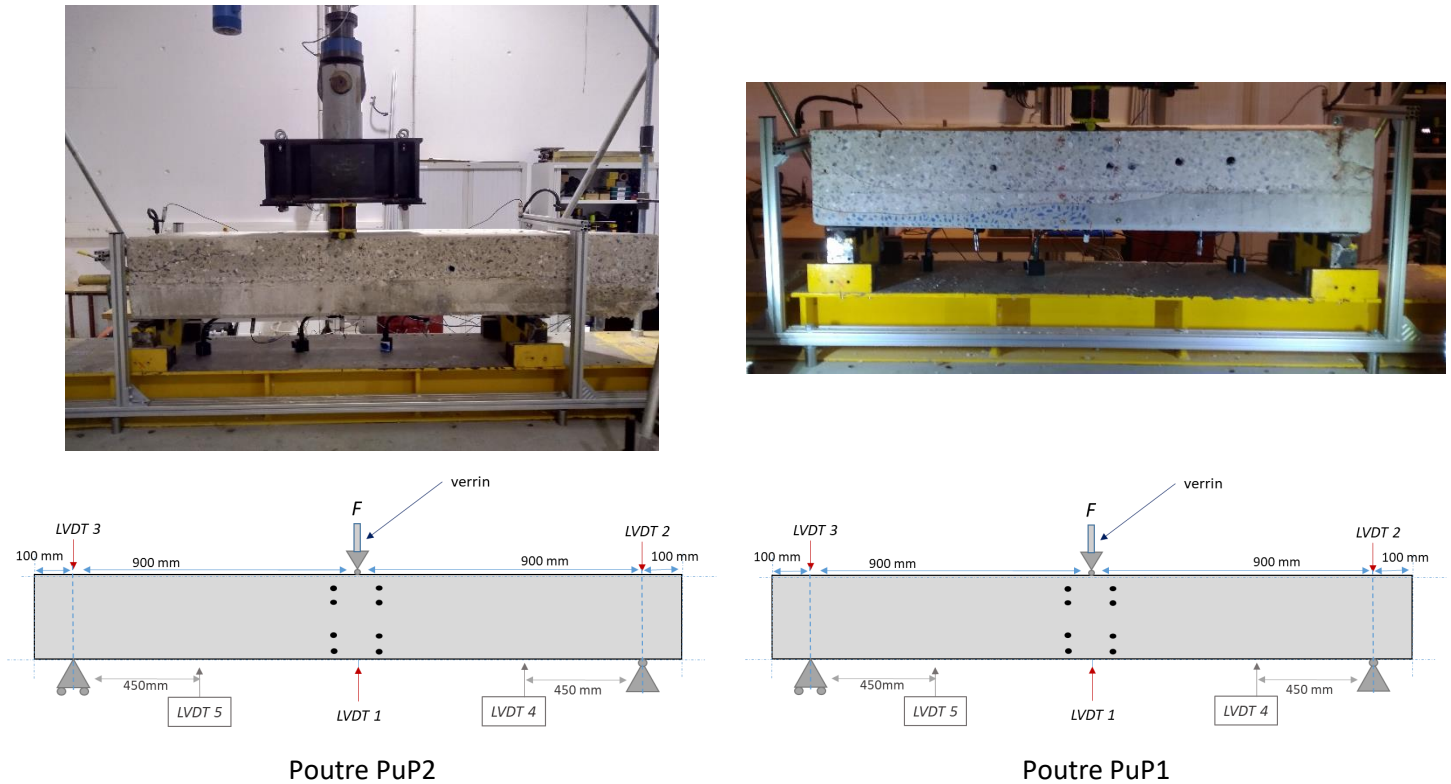


Figure 133 : Poutres PuP2 et PuP1 installées et instrumentées au laboratoire Navier, ENPC

Pour ces deux éléments, le chargement de ruine est estimé entre 280 kN et 554 kN. Au vu du caractère massif des éléments, les déplacements attendus sont faibles et le chargement est donc effectué à 0,01 mm/s. Les mesures de déformations au niveau des LVDT sont réalisées avec une fréquence de 10 Hz. Les mesures au déformètre à billes et les relevés de fissurations sont effectués à chaque palier : les paliers et les valeurs de mesures sont présentés en annexe X.

Étude des courbes force-déplacement

Les courbes force-déplacement des deux poutres sont représentées sur les Figure 134, Figure 136 et Figure 137. Les paliers sont visibles par la faible diminution de force pour une même déformation. Ceci peut être dû à l'hystérésis du béton qui se relâche légèrement lors de l'arrêt de la compression dynamique. Ce phénomène traduirait le comportement viscoélastique du béton. Trois déchargements ont été réalisés au cours des deux essais.

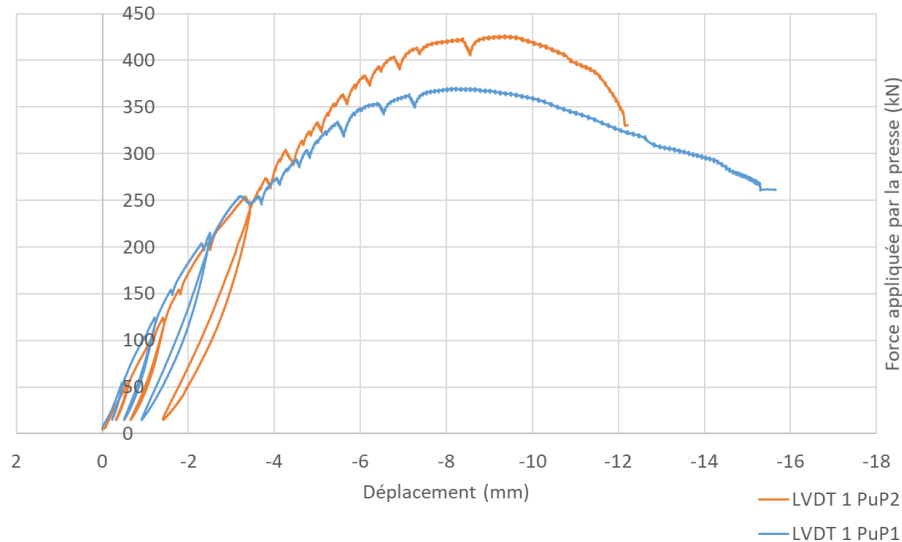
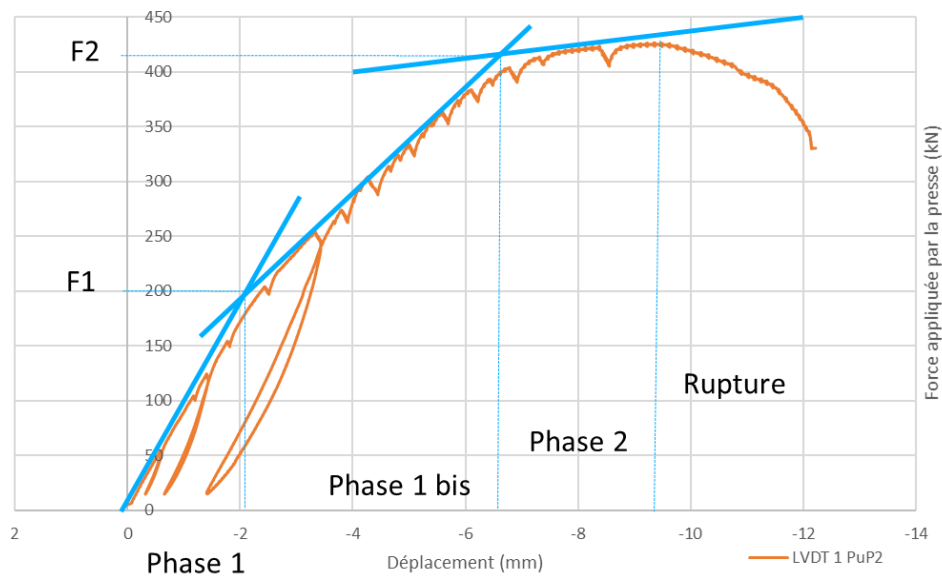


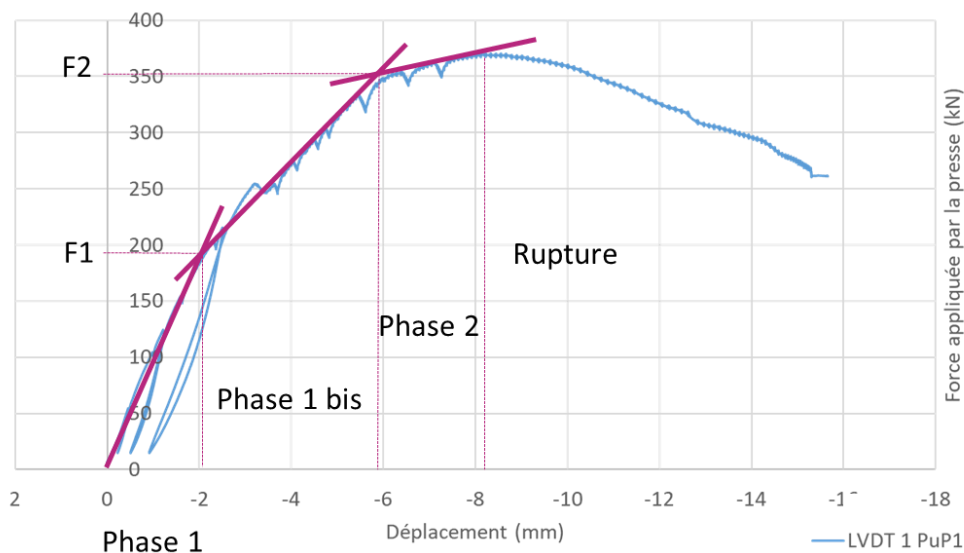
Figure 134 : Valeur de la force appliquée en fonction du déplacement pour le capteur LVDT central pour l'élément PuP2 et PuP1

Les courbes (Figure 134) sont cohérentes avec les études de flexion réalisées sur des éléments neufs (Ajdukiewicz and Kliszczewicz, 2007; Omary et al., 2014) et les études théoriques (Fleury and Mouterde, 2019; Mosley et al., 1996). On peut identifier trois grandes phases (Figure 135 (a) et (b)), qui seront mises en parallèle avec les observations visuelles dans la suite de la partie. Les valeurs sont données pour la poutre PuP2 :

- **Phase 1** : de 0 à $F_1=200$ kN environ. C'est une phase où la flèche est faible et évolue peu (inférieure à 2,37 mm soit 0,012 mm/kN). Lorsque la poutre est déchargée lors de cette phase, la flèche redevient presque nulle (0,31 mm pour une charge de 14,8 kN après un chargement max de 54 kN ; 0,65 mm pour une charge de 14,6 kN après une charge max de 124 kN) ;
- **Phase 1 bis** : de 200 à $F_2=410$ kN environ. La flèche croît plus fortement (6,98 mm à 410 kN soit 0,021 mm/kN). Après le déchargement la flèche résiduelle est plus importante (1,41 mm à 15,7 kN après un chargement max de 250 kN) ;
- **Phase 2** : de 410 kN à 426 kN environ. La flèche devient très importante pour une faible augmentation de la force appliquée (9,49 mm à 426 kN soit 0,156 mm/kN) ;
- **Phase 3, rupture** : à 426 kN (370 kN pour la poutre PuP1).



(a)



(b)

Figure 135 : Mise en évidence des phases sur la courbe force-déplacement pour les poutres PuP2 (a) et PuP1 (b)

Par ailleurs, en comparant les résultats obtenus pour les poutres PuP1 et PuP2 (Figure 134), nous pouvons observer que les deux éléments ont des comportements très similaires. Jusqu'à 250 kN les deux courbes sont très proches. Notons toutefois que la valeur F1 pour la poutre PuP1 semble légèrement plus basse : entre 150 kN et 200 kN.

À 250 kN, la poutre PuP1 présente une singularité. En effet, cette dernière perd légèrement en résistance. Une rupture se produit mais un réajustement semble permettre à l'élément de continuer le chargement par la suite. Cela pourrait être dû à une perte d'adhérence temporaire des aciers en traction. Ce seuil de 250 kN marque également une inflexion dans l'allure de l'évolution de la flèche en fonction du chargement. Les valeurs des flèches pour les deux poutres divergent, la poutre PuP1 se déforme plus rapidement ayant pour conséquence l'atteinte plus rapide de la rupture.

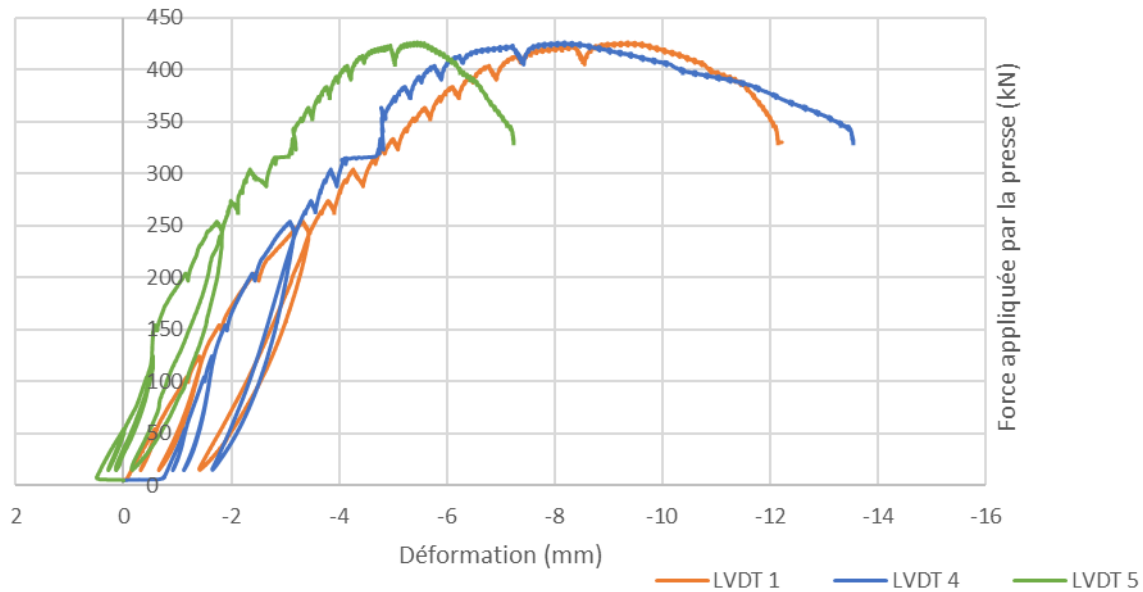


Figure 136 : Valeur de la force appliquée en fonction du déplacement pour les capteurs LVDT 1, 4 et 5 (fibre inférieure) pour l'essai sur l'élément PuP2 à l'ENPC

Pour chaque poutre, nous élargissons l'analyse en étudiant les résultats des autres capteurs. Nous mettons donc, en plus du capteur central, les capteurs intermédiaires (LVDT 4 et LVDT 5). Concernant la poutre PuP2 (Figure 136), nous pouvons noter que le déplacement initial du LVDT 4 (courbe verte) et LVDT 5 (courbe bleu) sont des artefacts de mise en place de la poutre sur ses appuis, la poutre n'étant pas parfaitement plate. Nous pouvons observer que les deux capteurs à inter distance des appuis et du centre ont une déformation plus faible (pour un même chargement) comparée au capteur central. Au stade post rupture (décroissance de la résistance) de la poutre, la variation de la flèche au niveau du LVDT 5 est la plus faible.

Concernant la poutre PuP1 (Figure 137), les observations sont similaires. Les capteurs intermédiaires mesurent une flèche plus faible pour un même chargement. C'est d'autant plus le cas après 250 kN au moment de la rupture intermédiaire.

La déformation est décroissante en partant de l'appui gauche vers l'appui droit. Cela peut suggérer une rupture intermédiaire dans la partie gauche de la poutre.

Par ailleurs, après rupture, on observe que la variation de la flèche au niveau du LVDT 4 est la plus faible contrairement à la poutre précédente.

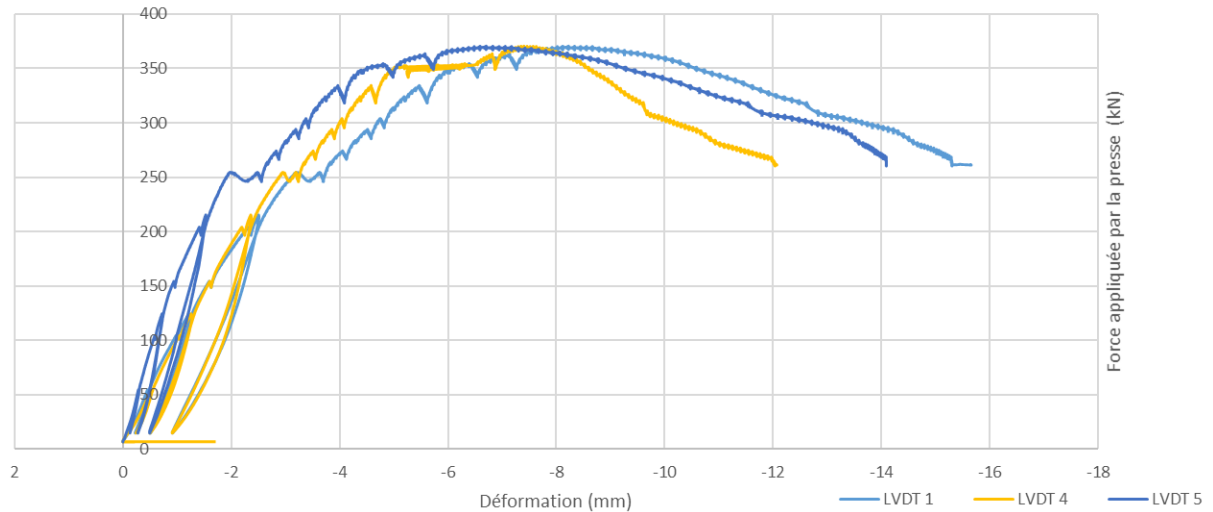


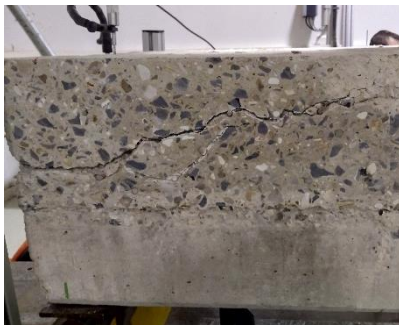
Figure 137 : Valeur de la force appliquée en fonction du déplacement pour les capteurs LVDT 1, 4 et 5 (fibre inférieure) en pour l'essai sur l'élément PuP1 à l'ENPC

Étude de la fissuration

Afin de mieux comprendre les différentes phases observées dans la partie précédente, nous nous intéressons aux étapes de fissuration.

À l'état initial, les poutres présentent quelques fractures légères (

Figure 138) peu impactantes structurellement car situées dans les coins. On n'observe aucune fissure apparente sur les fibres inférieure et supérieure.



Fracture coin supérieur gauche
PuP2



Fracture centre PuP2



Fracture coin supérieur droit
PuP1

Figure 138 : Photographies et localisation des fractures visibles à l'état initial sur les poutres PuP1 et PuP2

La Figure 139 présente un détail de la poutre PuP2 au cours de l'essai. Les premières fissures sont visualisées, respectivement vers 150 kN et 200 kN pour PuP1 et PuP2, en partie basse des poutres et de manière homogène le long de la poutre (en vert sur la Figure 139). En continuant le chargement, les fissures progressent notamment au centre de la poutre (en bleu sur la Figure 139). Ces fissures sont inclinées, traduisant la présence simultanée d'un moment fléchissant et d'un effort tranchant. Vers respectivement 250 kN et 300 kN pour PuP1 et pour PuP2 (en rouge sur la Figure 139), on observe la

propagation des fissures le long de l'interface de reprise de bétonnage entre la poutre préfabriquée sur chantier et le coulage en place du plancher.



Figure 139 : Extrait représentatif de la fissuration pour la poutre PuP2 (vert : 200 kN, bleu : 250 kN ; rouge : 270 kN)

Progressivement, les éléments sont amenés à la ruine. Avant la ruine, les fissures apparaissent et se propagent au niveau de la partie béton coulé en place (partie haute) avec une fissuration à 45° (Figure 140). Sur cette figure, il est possible d'observer que les gaines pour le passage des câbles provoquent des zones de faiblesse favorisant la fissuration. En prolongeant le chargement, les fissures s'ouvrent.



Figure 140 : Extrait représentatif de la fissuration proche de la ruine pour la poutre PuP1 (vert (sous le bleu) : 150 kN, bleu : 200 kN, rouge : 250 kN, vert (sur le bleu) : 270 kN)

La rupture de la poutre PuP1 est atteinte à 370 kN. L'état de la poutre est présenté sur la Figure 141. La rupture de la poutre PuP2 est atteinte à 426 kN. La Figure 142 illustre l'état de la poutre après rupture. Sur ces photos, nous pouvons observer que la rupture se traduit par de fortes fissurations sur un seul côté de la poutre : le côté droit pour la première et le côté gauche pour la seconde.

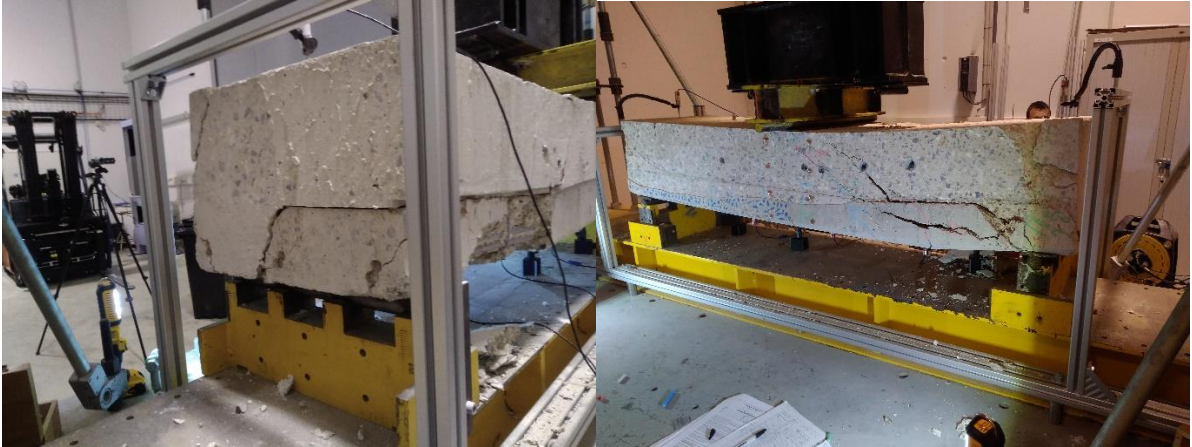


Figure 141 : Poutre **PuP1** après rupture (à l'ENPC)



Figure 142 : Poutre **PuP2** après rupture (à l'ENPC)

Les détails de la rupture sur la face haute et la face basse sont présentés respectivement sur les Figure 143 et Figure 144. Le béton fracturé situé sur la partie supérieure de la poutre nous indique qu'il a subi des contraintes supérieures à sa limite de compression, confirmant l'hypothèse d'une rupture par pivot B (rupture du béton) retenue lors du calcul théorique (section 4.2.2.1).



Figure 143 : Détail de la rupture sur la fibre supérieure (**PuP2**)



Figure 144 : Détail de la rupture sur la fibre inférieure (PuP2)

Le côté où la rupture apparaît n'est pas anodin. Effectivement, les fissures les plus visibles (Figure 141 et Figure 142) sont des fissures proches des appuis révélant la présence d'une forte sollicitation à l'effort tranchant. Pour contrer ce cisaillement lors du dimensionnement d'une poutre, il est d'usage selon l'Eurocode 2 d'utiliser des armatures transversales (cadres). Or, le ferrailage vertical dans une poutre classique n'est pas réparti uniformément dans la poutre (exemple : Figure 145) car l'effort tranchant est plus important vers les appuis sous l'effet d'un chargement uniformément réparti.

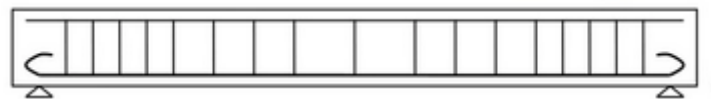


Figure 145 : Dessin d'illustration du ferrailage d'une poutre en béton armé (Almohandiss, n.d.)

Or, les poutres PuP1 et PuP2 étant issues d'une même poutre plus grande, le ferrailage vertical n'est pas symétrique à l'intérieur des poutres PuP1 et PuP2. L'extrémité la plus proche du centre initial de la grande poutre dispose de cadres plus espacés et donc d'une résistance au cisaillement moins importante (pour rappel : Figure 146). C'est donc les extrémités concernées qui ont rompu en premier. La poutre PuP1 a effectivement fortement fissuré du côté droit et la poutre PuP2 du côté gauche. Un contrôle non destructif à l'aide d'un radar de structure permettrait de confirmer la disposition des cadres d'armature.

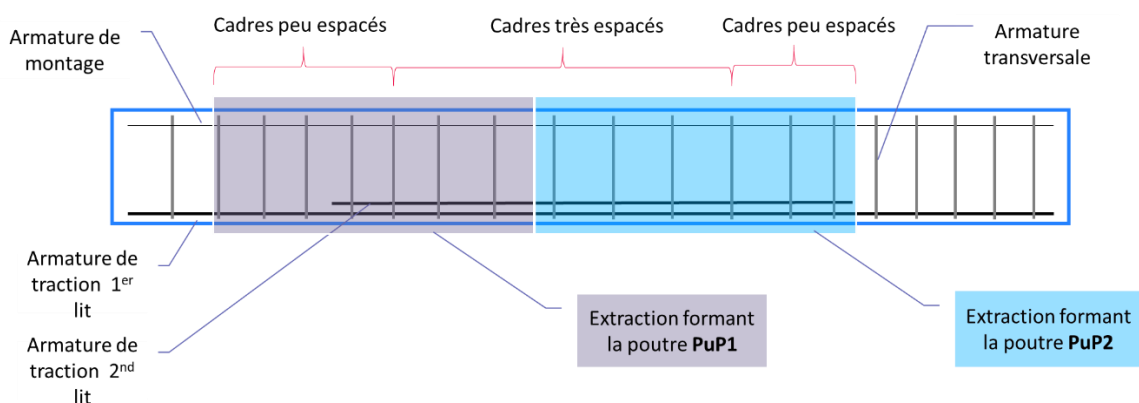


Figure 146 : Hypothèse de situation des poutres PuP1 et PuP2 au sein de la poutre complète avant déconstruction

Synthèse de l'étude des courbes force-déplacement avec l'étude de la fissuration

Les phases qui ont mené la poutre à la rupture ont été identifiées :

- **Phase quasi élastique** : À faible chargement, les matériaux béton et acier se trouvent dans le domaine élastique linéaire. La fibre supérieure est en compression tandis que la fibre inférieure est en traction (ce qui est le cas pour les autres phases également). L'effort tranchant est repris par le ferrailage vertical (cadres). Durant cette phase, le déplacement est quasi réversible.
- **Phase acier élastique** : Des fissurations apparaissent et se propagent au sein de la poutre. La flèche devient plus importante. Les déplacements sont irréversibles, on observe une flèche résiduelle après déchargement. Les fissurations sont orientées à environ 45° traduisant l'effort tranchant combiné au moment fléchissant.
- **Phase de plastification des aciers** : Les fissures s'élargissent plus fortement de même que la flèche qui augmente de manière plus importante. Les armatures de traction passent en phase plastique.
- **Rupture** : Face aux fissures dues à la traction, la section de béton comprimée devient trop faible. Le béton se fissure en compression au niveau de la fibre supérieure. La poutre perd progressivement en résistance. La flèche augmente plus rapidement.

Cette étude expérimentale sur deux poutres issues de la déconstruction montre que les éléments se comportent de la même manière qu'un élément neuf, c'est-à-dire avec les différentes phases mentionnées ci-avant. Toutefois, de manière plus ciblée, des singularités comme celle rencontrée à 250 kN pour la poutre PuP1 peuvent apparaître. Il serait nécessaire de réaliser une étude approfondie pour comprendre la cause de cette singularité et notamment savoir si elle est due au processus de déconstruction ou bien au processus de construction. Pour cela, il faudrait réaliser ces mêmes essais sur un panel similaire d'éléments mais déconstruits de manières différentes avec plus ou moins de soins. Si la singularité apparaît seulement sur les éléments les plus mal déconstruits cela pourrait suggérer que le phénomène est lié à la déconstruction. De plus, un scan des armatures en direct permettrait de connaître le lieu provoquant cette singularité.

Dans le cas des éléments testés, l'asymétrie du ferrailage des poutres a constitué une faiblesse. Effectivement, le manque d'armatures transversales pour contrer l'effort tranchant au niveau d'une extrémité a favorisé la fissuration puis la rupture à l'extrémité en question. Ce mécanisme est visible sur les photographies montrant le développement et l'élargissement de fissures entre l'appui faible et le centre.

Du point de vue quantitatif, la rupture des éléments PuP1 et PuP2 est apparue respectivement à 370 kN et 426 kN. Cela correspond à une différence de 184 kN (perte maximale de 33 %) et 128 kN (perte maximale de 23 %) par rapport à l'estimation calculée maximale (554 kN). La résistance de la poutre PuP1 est inférieure à la poutre PuP2 car le second lit d'armature n'est pas présent sur toute la longueur de la poutre contrairement à la poutre PuP2. Des analyses supplémentaires nécessiteraient d'être conduites afin de calculer plus précisément la résistance possible à l'état neuf. Cela impliquerait une meilleure connaissance des géométries des éléments à l'aide d'un radar de structure (pour connaître la disposition des armatures) mais également une meilleure connaissance des caractéristiques physiques des matériaux constitutifs de la poutre (résistance de l'acier en traction, résistance à la compression du béton à l'aide d'un scléromètre ou d'essais en laboratoire sur carottes de béton). Ces essais complémentaires ont été réalisés par la suite (sections 4.2.2.2 et 4.2.2.3) mais sur une poutre légèrement différente donc les résultats peuvent être sensiblement différents.

On peut noter qu'avec un minimum de 2/3 de résistance résiduelle, les éléments déconstruits ont encore une résistance conséquente et donc une fonctionnalité intéressante. Par ailleurs, la phase plastique (avec acier élastique) étant atteinte vers 200 kN, cela correspond au minimum à 1/3 de la

résistance maximale théorique. Ainsi, même dans le cas d'une réflexion à l'ELS avec des contraintes de fissurations et de flèches, les éléments étudiés disposent d'une capacité utile intéressante.

4.2.4.2 Ouverture : Essai de flexion 4 points du poteau PL1 à l'ENTPE

En dehors des poutres, il existe dans un bâtiment de nombreux éléments structuraux dont les poteaux. Ces derniers disposent d'une fonction et donc d'un dimensionnement différent. En effet, les poteaux sont dimensionnés pour résister à la compression et au flambement. Pour un même test, face à un poteau ou une poutre, les comportements et résultats peuvent donc être différents. Nous avons souhaité explorer le comportement des poteaux en flexion simple, c'est pourquoi nous avons réalisé une flexion 4 points sur les éléments PL1 et PL2 qui sont des poteaux. Les résultats des essais sont présentés ci-dessous. Ces données acquises dans une optique d'ouverture à d'autres éléments structuraux ne sont pas plus exploitées dans la suite de la thèse mais pourront servir pour un travail futur.

La Figure 147 illustre le dispositif expérimental de flexion 4 points réalisé à l'ENTPE (Lyon). Au vu de l'état des éléments récupérés et donc du risque fort de rupture imprévisible, le dispositif expérimental a été simplifié. Seul le capteur de déplacement et capteur de force interne à la presse sont utilisés pour les mesures (aucun LVDT n'est ajouté). En revanche une analyse par corrélation d'image est menée à l'aide d'une caméra et la réalisation au préalable d'un mouchetis (Figure 148).

La fréquence d'acquisition des données est de 10 Hz.

La courbe force-déplacement du poteau PL1 est présentée sur la Figure 149. Nous ne disposons pas des données pour le poteau PL2 suite à un incident technique d'acquisition.



PL1



PL2

Figure 147 : Poteaux PL1 et PL2 installées au laboratoire LTDS, ENTPE



Caméra



Mouchetis

Figure 148 : Caméra et mouchetis pour l'analyse du déplacement par corrélation d'image

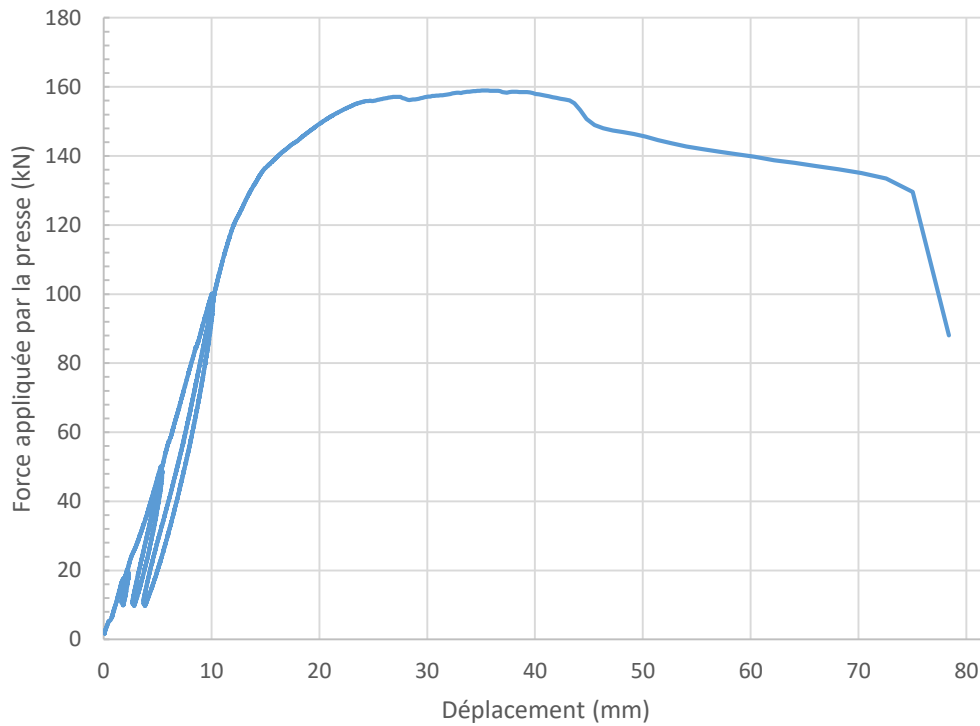


Figure 149 : Valeur de la force appliquée en fonction du déplacement mesuré par la presse pour l'élément PL1

Trois chargements / déchargements ont été réalisés respectivement à 20 kN, 50kN et 100 kN.

La courbe (Figure 149) présente une forme similaire à celle obtenue pour les essais des poutres PuP1 et PuP2. Nous identifions trois phases (Figure 150) à l'instar des flexions trois points :

- **Phase 1** : de 0 kN à F2 (entre 140 kN et 158 kN). La flèche évolue relativement peu. Les déchargements lors de cette phase ne permettent pas d'obtenir un déplacement nul ; Il existe une flèche résiduelle (3,86 mm après le 3^{ème} déchargement).
- **Phase 2** : De F2 à la rupture (159 kN). La flèche est très importante pour une faible augmentation de la force. En effet, la flèche augmente de 25 mm à 15 mm pour une augmentation de force respectivement de 19 kN et 1 kN (selon où l'on considère F2).
- **Phase 3, rupture** : à 159 kN. on peut noter que la rupture pour le poteau PL2 est obtenue à 157 kN. On observe que la résistance décroît progressivement mais avec un fort déplacement jusqu'à 75 mm puis il y a rupture totale de la poutre la résistance chute.

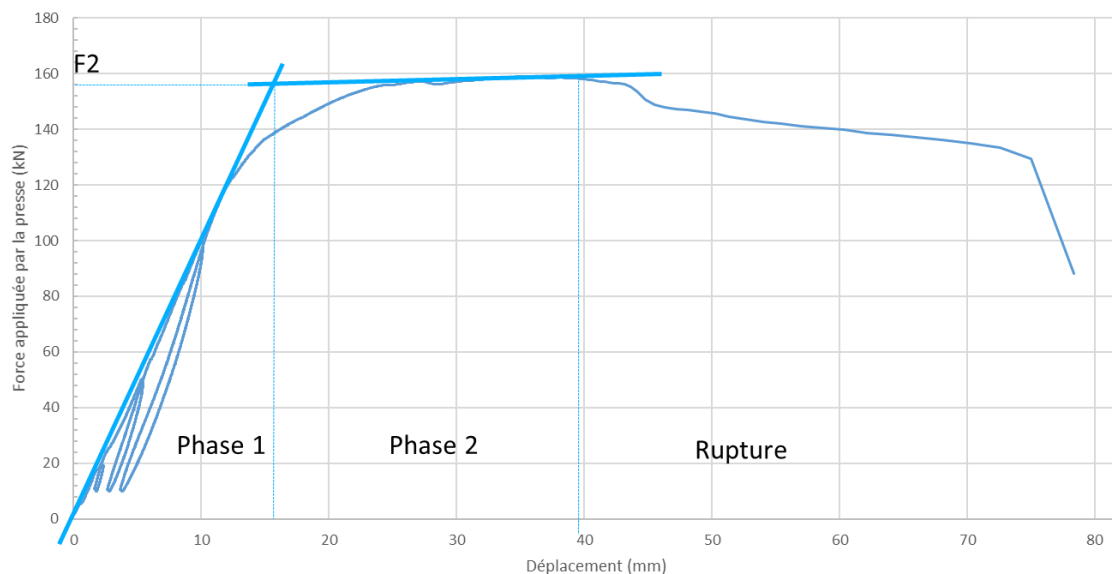


Figure 150 : Mise en évidence des phases sur la courbe force-déplacement pour le poteau PL1

On remarque que le comportement est proche du comportement en traction de l'acier confortant l'aspect « petit » ferrailage du poteau. La rupture est donc en pivot A (l'acier est utilisé à son maximum, la rupture intervient suite à la rupture du ferrailage en traction).

Malgré des éléments en mauvais état, nous obtenons une perte de résistance en flexion de seulement 20 % au maximum ce qui laisse un potentiel de résistance intéressant. Néanmoins, l'élément étant un poteau, sa résistance en flambement serait plus intéressante pour envisager son réemploi or, sa résistance au flambement est sans nul doute fortement impactée par les chocs subis lors de son démontage et transport. Cela nécessiterait un démontage plus précautionneux. Des recherches plus approfondies sont donc nécessaires pour ce type d'élément de structure.

4.2.4.3 Perspectives

Nous avons étudié la possibilité technique de réemploi sous le prisme de la résistance résiduelle et du comportement à la rupture qui est l'indicateur principal de la fonctionnalité d'un élément de structure.

Les éléments étudiés disposent d'une capacité utile résiduelle intéressante. Néanmoins, toujours pour une démarche académique, il serait nécessaire de réaliser une analyse statistique sur un échantillon plus grand d'éléments pour confirmer cette résistance résiduelle. Cette valeur pourrait être mesurée en fonction de la méthode de déconstruction. Cela permettrait ensuite d'extrapoler sur les autres déconstructions pour des applications opérationnelles. À la vue de ces observations, en première approximation, un réemploi des éléments de structure en béton armé est envisageable.

Nous avons vu que dans sa thèse, Raphaël Brière (Brière, 2016) mentionnait le besoin de prendre en compte une marge de sécurité par rapport aux éléments à réutiliser. Avec les nouveaux travaux conduits au cours de cette thèse, nous avons un ordre de grandeur de la résistance résiduelle d'un élément déconstruit. Sans être rédhibitoire, la résistance résiduelle est tout de même réduite, ce qui peut avoir des conséquences sur les impacts réellement évités lors d'un réemploi. Nous adapterons l'analyse du cycle de vie réalisée par Raphaël Brière en prenant en compte ces nouvelles données dans la partie 4.3 .

Par ailleurs, dans le cas où il y aurait des exigences à l'ELS, nous avons montré que le comportement au chargement des éléments de réemploi est le même que dans un cas neuf avec les phases élastiques (ou quasi élastiques) et plastiques. La démarche pour prendre en compte ces exigences serait donc similaire au neuf pour les éléments de réemploi.

Cependant, quel que soit l'état limite choisi, il existe des problématiques connexes pour la faisabilité du réemploi :

- **Durabilité** : Quelle durée de vie pourra avoir un élément déconstruit ? Existe-t-il un risque de pathologie du béton armé ?
- **Assemblage** : Comment assembler les éléments de réemploi avec les autres éléments de la structure (neufs ou en réemplois) ?

Nous allons exposer les principaux enjeux de ces problématiques et indiquer des pistes de résolution.

Durabilité et fissuration

La durabilité dépend de plusieurs paramètres. L'un de ces paramètres concerne l'environnement auquel est soumis l'élément de structure. Ainsi dans le cas du réemploi, la classe d'exposition des éléments déconstruits comme la destination de l'élément à réemployer sont importantes à prendre en compte. Effectivement, un élément dimensionné pour une classe d'exposition peu contraignante puis réemployé dans une structure subissant de fortes intempéries verrait sa durabilité fortement dégradée et sa durée de vie réduite. Pour cela en première approche, nous considérons seulement les éléments de structure protégés des intempéries (soit des éléments protégés par un bardage extérieur soit des éléments à l'intérieur des bâtiments). De même, la destination de l'élément de réemploi est considérée pour un usage situé dans un lieu également protégé des intempéries.

Dans cette réflexion, on écarte donc les éléments soumis à la problématique de gel/dégel, action du sel, eaux (dont fuites et infiltrations), sols acides, attaques bactériennes, milieu marin. En pratique, c'est lors du diagnostic préalable à la déconstruction (section 1.1.3.2) que ces éléments sont écartés.

Le diagnostic aura permis également d'isoler les éléments présentant des pathologies classiques du béton (réaction alcali-granulat, réaction sulfatique interne).

Ainsi, la principale problématique concerne le risque de corrosion des armatures (Mai-Nhu, 2015) : « Dans le cas des structures en béton armé[...] la corrosion est le principal facteur à prendre en compte [pour] la durabilité des [...]ouvrages ». La norme ISO 8044 (1999) définit la corrosion comme étant une

« interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement ou de son système technique constitué par les deux facteurs ».

En dehors des pathologies et expositions mentionnées précédemment, le risque de corrosion peut survenir via la carbonatation du béton. La carbonatation est le résultat de la réaction du dioxyde de carbone avec des hydrates du béton. Il forme alors un isomorphe du carbonate de calcium modifiant l'équilibre chimique rendant la solution interstitielle du béton moins basique (pH 9 environ) qu'initialement (pH 13,5 environ). Cette baisse de pH permet à la corrosion de s'initier (en accord avec le diagramme potentiel-pH / diagramme de Pourbaix) (Mai-Nhu, 2015).

Dans ce cadre, la présence de fissures peut faciliter la pénétration du dioxyde de carbone au sein du béton. Plusieurs études telles que (Torrenti and Barre, 2016) analysent la relation entre fissuration et durabilité. Ils indiquent que le contrôle de l'ouverture des fissures permet de garantir la durabilité des bétons mais ne donnent pas plus de détails quant à la taille des fissures recommandées. L'Eurocode 2 précise les limites de fissuration pour les éléments neufs. Pour les classes d'exposition envisagées pour le réemploi (X0 : environnement très sec ou XC1 : sec ou humide en permanence) la valeur de dimensionnement (0,4 mm max) est une valeur pour l'esthétique. Il est indiqué que l'ouverture des fissures n'a pas d'incidence sur la durabilité⁵³.

Pour conclure, en restant dans des classes d'exposition peu exigeantes telles que XC1 où la carbonatation est le seul risque pour la durabilité, le réemploi est rendu possible pour les éléments de déconstruction en bon état (sans pathologie) *i.e.* les éventuelles fissurations ne semblent pas être un frein à leur usage en tant qu'élément structurel. Cela peut cependant être un frein esthétique, il conviendra alors de réaliser un ragréage ou d'utiliser un parement (faux plafond, plaque de plâtre...).

Ancrage et assemblage

Nous avons pu remarquer au cours de l'essai (Figure 141, Figure 142) que les armatures en traction se sont enfoncées à l'extrémité. Cela indique une perte d'adhérence entre le béton et l'acier. Ceci est dû à un manque d'ancrage des armatures. Effectivement, les ancrages ont été coupés lors de la déconstruction des éléments. Ainsi, dans l'hypothèse d'un réemploi d'une telle structure, il est nécessaire de réfléchir à l'assemblage et l'ancrage des armatures. Nous avons relevé dans la littérature trois grandes méthodes d'assemblage concernant les questions du réemploi et de l'écoconception « design for reuse », les voici :

- Nouveau **clavetage avec insertion de nouvelles barres** d'armatures : il s'agit de réaliser un percement pour encastrer une armature qui liera les éléments et fera la jonction avec les armatures initiales (Figure 151 (a)) ;
- Utilisation de **corbeaux ou platines** métalliques : il s'agit de placer des platines fixées aux poteaux afin de soutenir les éléments horizontaux (dalles, poutres). Les éléments peuvent être boulonnés entre eux (Figure 151 (b)). Il est possible de mixer l'usage de platine et l'insertion d'armatures (Figure 151 (c)) ;
- **Hydro démolition** du béton autour des armatures : C'est en réalité une méthode de déconstruction qui serait donc à envisager avant la déconstruction. Cette technique permet de mettre à nu les armatures qui peuvent être alors directement utilisées pour un nouveau clavetage. Néanmoins, cette méthode nécessite que les armatures ne soient pas entremêlées.

⁵³ <https://www.infociments.fr/betons/maitrise-de-la-fissuration-structurelle-des-ouvrages-en-beton-arme>

C'est pourquoi cela peut être très utile en stade d'écoconception de la structure où l'armature sera conçue pour être démontée et remontée (Figure 151 (d)) (Bertin, 2020).

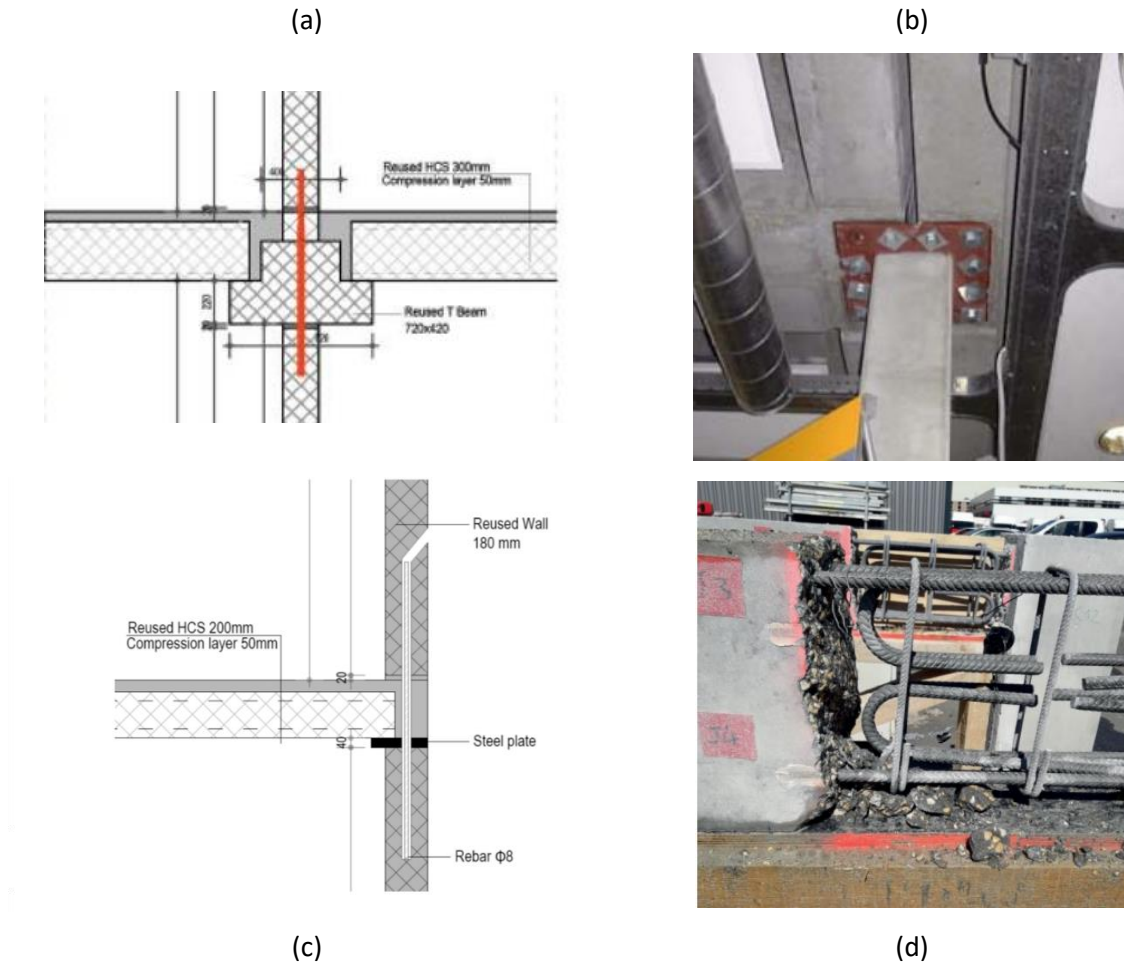


Figure 151 : (a) Connection mur/poutre par insertion d'armature (Gliás, 2013) ; (b) MX5 system ; les éléments sont boulonnés entre eux. (te Dorsthorst and Kowalczyk, 2005) ; (c) Platine métallique pour support de dalles réemployées (Gliás, 2013) ; (d) Assemblage hydro démolé (Bertin, 2020)

Tableau 82 : Estimation de la longueur d'ancrage (l_s) pour différentes résistances d'acier ($F_e E$) et résistance de béton à 28 jours (f_{c28}) en fonction du diamètre des armatures (\emptyset). (Almohandiss, n.d.)

	f_{c28} (MPa)	20	25	30	35	40
$F_e E 215$	l_s	50 \emptyset	43 \emptyset	37 \emptyset	33 \emptyset	30 \emptyset
$F_e E 235$	l_s	54 \emptyset	47 \emptyset	41 \emptyset	36 \emptyset	33 \emptyset
$F_e E 400$	l_s	41 \emptyset	35 \emptyset	31 \emptyset	27 \emptyset	25 \emptyset
$F_e E 500$	l_s	51 \emptyset	44 \emptyset	39 \emptyset	34 \emptyset	31 \emptyset

Les méthodes présentées précédemment ne répondent pas toutes à la nécessité d'ancrage des armatures pour l'adhérence des armatures (corbeau ou platine). Le Tableau 82 donne des estimations de la longueur d'ancrage nécessaire. Dans le cas des poutres testées, en supposant que le béton utilisé est un béton 35 MPa et l'acier est un acier Re=500 MPa, la longueur d'ancrage des armatures serait de 34 fois le diamètre des armatures (34 \emptyset = 680 mm). Il aurait donc fallu 68 cm d'ancrage pour chaque

extrémité. À cela s'ajoute la longueur de recouvrement qui permet d'assurer la transmission des efforts d'une barre à l'autre. Cette longueur est du même ordre de grandeur que la longueur d'ancrage selon l'Eurocode 2. Dans l'exemple des éléments testés, les poutres étant très courtes mais très massives, la mise en place de ces armatures supplémentaires apparaît comme un souci technique afin de garder l'intégrité de l'élément.

4.3 ACV COMPARATIVE DES METHODES DE VALORISATION DU BETON ARME

4.3.1 Cadre de l'étude

4.3.1.1 Objectif de l'étude

L'objectif global de cette étude est de comparer les méthodes de valorisation du béton pour un élément structurel en béton armé dans une démarche d'économie circulaire. Ainsi, nous ne limitons pas l'étude à un seul cycle de vie.

Les enjeux sont donc triples :

- Comparer les méthodes de valorisation (aucune valorisation, recyclage du matériau, réemploi de l'élément de structures) entre elles dans le cas d'un élément porteur (poutre) ;
- Comparer les méthodes de valorisation au niveau du cycle de la matière ;
- Explorer la question des allocations entre les cycles d'un élément porteur de structure.

Pour la comparaison, nous nous basons sur les poutres présentées dans la section 4.1.1 caractérisées en flexion (section 4.2.4.1). Les poutres d'étude ont une portée de 1,80 m et une hauteur de 0,36 m. La poutre PuP2 servira de base pour le dimensionnement des autres éléments.

Du fait du caractère exploratoire du réemploi d'éléments de structure en béton armé, l'ACV se basera sur plusieurs hypothèses concernant la déconstruction et la mise en place de l'élément de réemploi dans la nouvelle structure.

Au vu des multiples objectifs, nous séparons l'analyse en trois études :

- **Étude 1 – Comparaison des approvisionnements en matière** (section 4.3.1.6) : basée sur une approche d'approvisionnement en matière, cette étude permet de comparer les méthodes de traitement nécessaire au passage d'un cycle n à un cycle $n+1$ selon la mine d'approvisionnement de la matière dans l'optique du réemploi de la poutre porteuse en béton armé. La mine peut être primaire (matière vierge) ou secondaire (matière en place ou recyclée) ;
- **Étude 2 – Extension des frontières, le cycle de la matière** (section 4.3.1.7) : basée sur le cycle de vie d'une poutre en béton armé ayant trois utilisations consécutives. Nous suivons le cycle de la matière pour une poutre en réemploi : de sa construction neuve à partir de matériaux vierges à sa démolition ultime. Les contraintes de fonctionnalités sont basées sur la poutre de réemploi ;
- **Étude 3 – Réflexions sur les allocations** (section 4.3.1.8) : concentrée sur le réemploi, on étudie plusieurs variantes d'allocation lors du cycle de la matière.

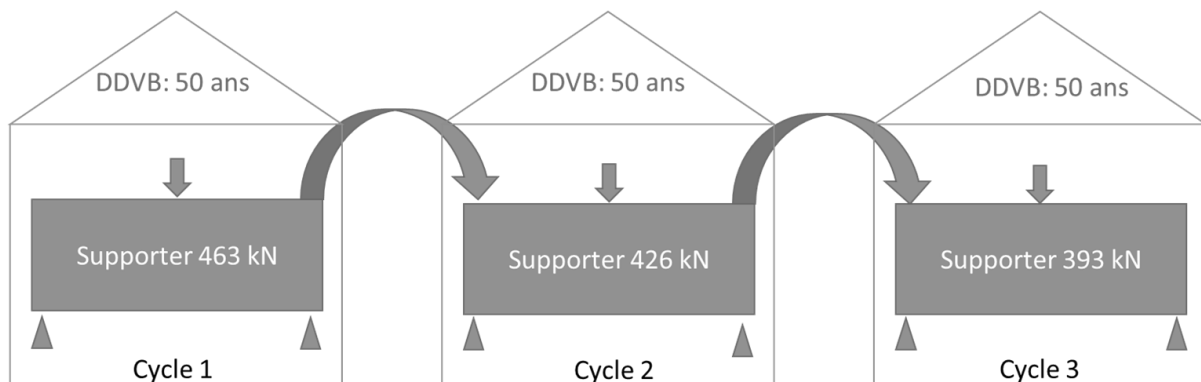
4.3.1.2 Unité fonctionnelle

Les trois études se basent sur l'unité de référence d'une poutre de 1,80 m de portée et 0,36 m de hauteur.

La principale fonction de cette poutre (élément porteur) est de reprendre une charge et de la transmettre à ses extrémités sur des poteaux ou voiles. Dans la pratique, les charges à reprendre sont multiples : poids propre, charges d'exploitation, charges d'équipement, charges de vent, contraintes au séisme... Suite aux essais préliminaires de la section 4.2.4.1, nous ne disposons que de la résistance résiduelle des poutres. Ainsi, dans ce travail exploratoire, nous faisons le choix de caractériser la

fonctionnalité de la poutre seulement par le biais de la résistance à une charge ponctuelle au centre de l'élément. Pour le premier cycle, on considère la limite à la rupture de 463 kN (valeur calculée avec la méthode de la section 4.2.2.1 pour une poutre neuve avec un béton C25/30). La charge maximale à la rupture choisie pour le second cycle de vie est 426 kN : c'est la valeur la plus élevée obtenue lors des essais en section 4.2.4.1. Le choix de cette poutre est motivé par le fait que le ferrailage est mieux connu car visible des deux côtés. Ceci correspond à une perte inférieure à 8 %. Nous supposons donc une perte similaire pour le passage du cycle 2 au cycle 3 soit une résistance à la rupture de 393 kN. Ces données sont synthétisées dans la Figure 152.

La valeur de 50 ans pour la durée de vie du bâtiment est la valeur utilisée dans l'Eurocode 0 pour un « bâtiment courant ».



DDVB: durée de vie du bâtiment
Hauteur de la poutre : 0,36 m
Portée : 1,80 m

Figure 152 : Synthèse des restrictions de performance pour la poutre de référence

Nous pouvons ainsi définir les unités fonctionnelles pour les trois études :

- **Étude 1** : Poutre permettant de franchir une portée de 1,80 m et de supporter une charge maximale (ponctuelle en son centre) de 426 kN pour une durée de vie minimum de 50 ans (on s'intéresse au cycle 2 mentionné précédemment) ;
- **Étude 2 et Étude 3** : Poutre permettant de franchir une portée de 1,80 m et de supporter une charge maximale (ponctuelle en son centre) de 463 kN et pendant 50 ans puis de 426 kN pendant 50 ans supplémentaires et enfin de 393 kN pendant encore 50 ans.

Ainsi pour ces études, les paramètres de la poutre évoluant sont la composition du béton (granulat vierge ou granulat recyclé), la largeur de la poutre (donc la quantité de béton), le type de poutre (neuve ou de réemploi), les différents scénarios de fin de vie et durées de vie.

4.3.1.3 Système et frontières

Nous ne considérons que la section de la poutre permettant de franchir la portée souhaitée, l'assemblage n'est pas pris en compte car ce dernier n'a pas été étudié dans cette thèse, il est donc exclu du système. Une mise à jour de l'étude sera alors nécessaire lorsqu'une solution d'assemblage aura été développée.

Le système contient le cycle de vie complet de l'élément « poutre » selon la norme NF EN 15804 (Figure 33) : la production des matériaux, la construction de l'élément, la maintenance, la déconstruction et la fin de vie.

Les systèmes des trois études peuvent se décomposer en plusieurs sous-systèmes. La Figure 153 présente une vue d'ensemble des différents processus que nous détaillons par la suite. Ces processus seront ensuite assemblés en fonction des besoins (système) de chaque étude. Les systèmes de ces études sont présentés dans les sections 4.3.1.6, 4.3.1.7 et 4.3.1.8.

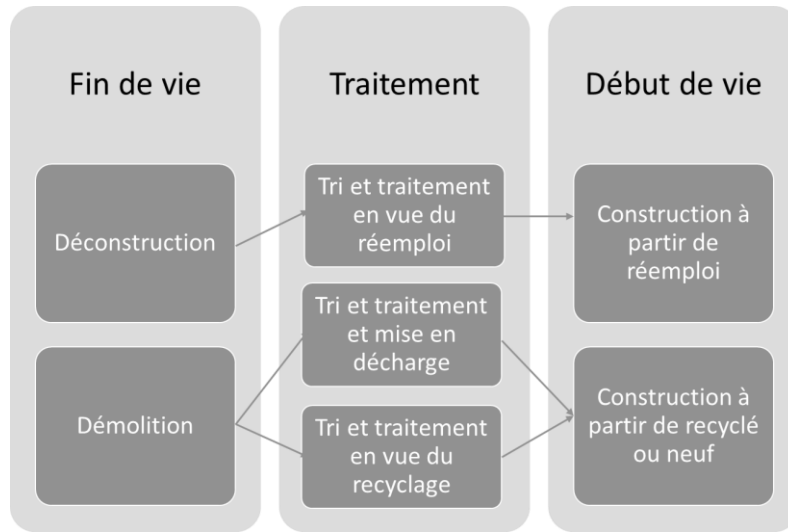


Figure 153 : Vue d'ensemble des différents processus détaillés

Déconstruction (pour le scénario réemploi)

Ce sous-système prend en compte les étapes de déconstruction soignée de la poutre par sciage puis grutage de l'élément. La Figure 154 présente les frontières du système (procédés et flux inclus). Le petit matériel tel que les étais, les chaînes de fixation et la scie ne sont pas pris en compte. L'amortissement est considéré négligeable.

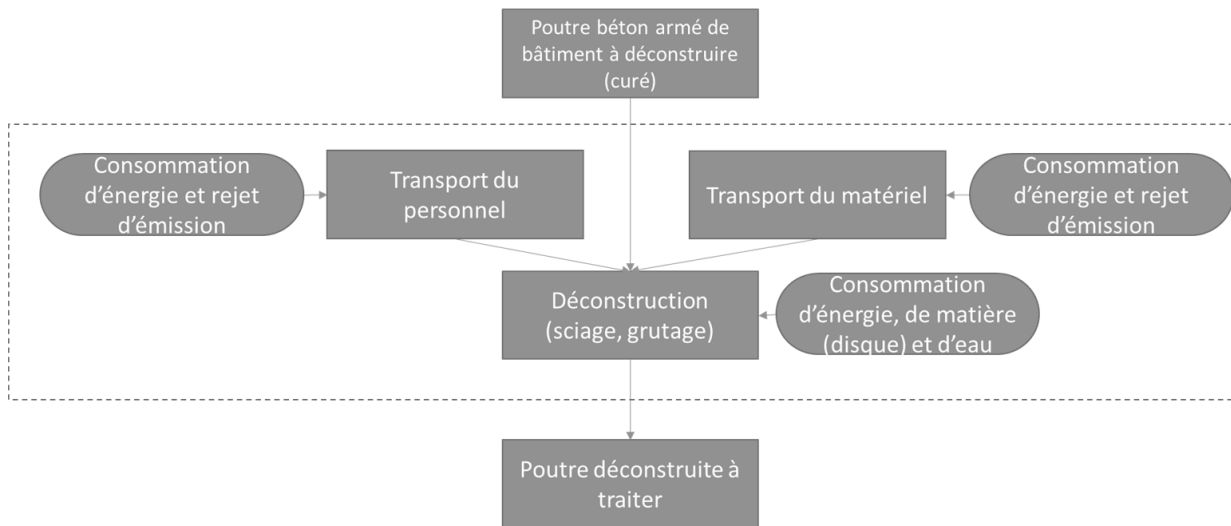


Figure 154 : Frontières du sous-système de la déconstruction du bâtiment en vue du réemploi de la poutre

Démolition (pour le scénario granulat neuf ou recyclé)

Ce sous-système prend en compte la démolition de la structure en béton armé. Il permet de produire des déchets à traiter. Les consommables ne sont pas pris en compte du fait de l'absence de données. La Figure 155 présente les frontières du système (procédés et flux inclus).

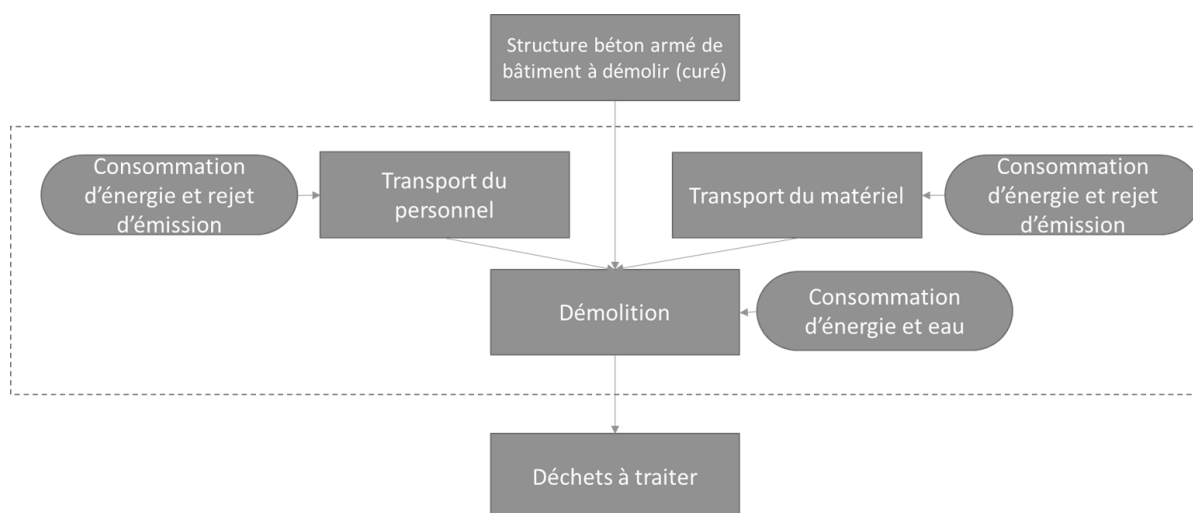


Figure 155 : Frontières du sous-système de la démolition du bâtiment en vue du traitement des déchets

Tri et traitement (pour le scénario réemploi)

Ce sous-système prend en compte la phase de « traitement des déchets » du bâtiment. Comme la poutre est destinée au réemploi, ce système ne comprend qu'une phase de transport du chantier de déconstruction au site de stockage. La Figure 156 présente les frontières du système (procédés et flux inclus).

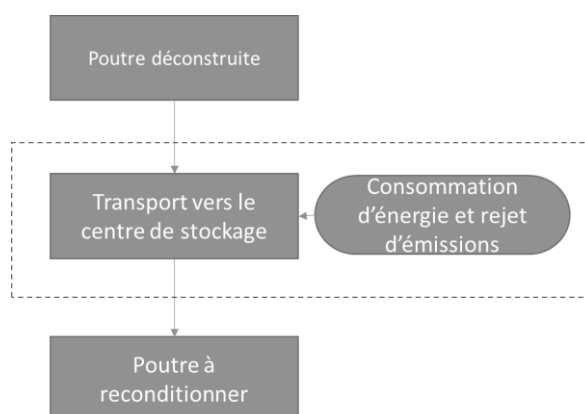


Figure 156 : Frontières du sous-système pour le traitement en fin de vie de la structure du bâtiment en vue du réemploi

Tri et traitement (pour le scénario granulat neuf)

Ce sous-système prend en compte la phase de traitement des déchets de béton armé issus de la démolition du bâtiment. La Figure 157 présente les frontières de ce sous-système. Les consommables lors de la phase de concassage ne sont pas pris en compte du fait de l'absence de données.

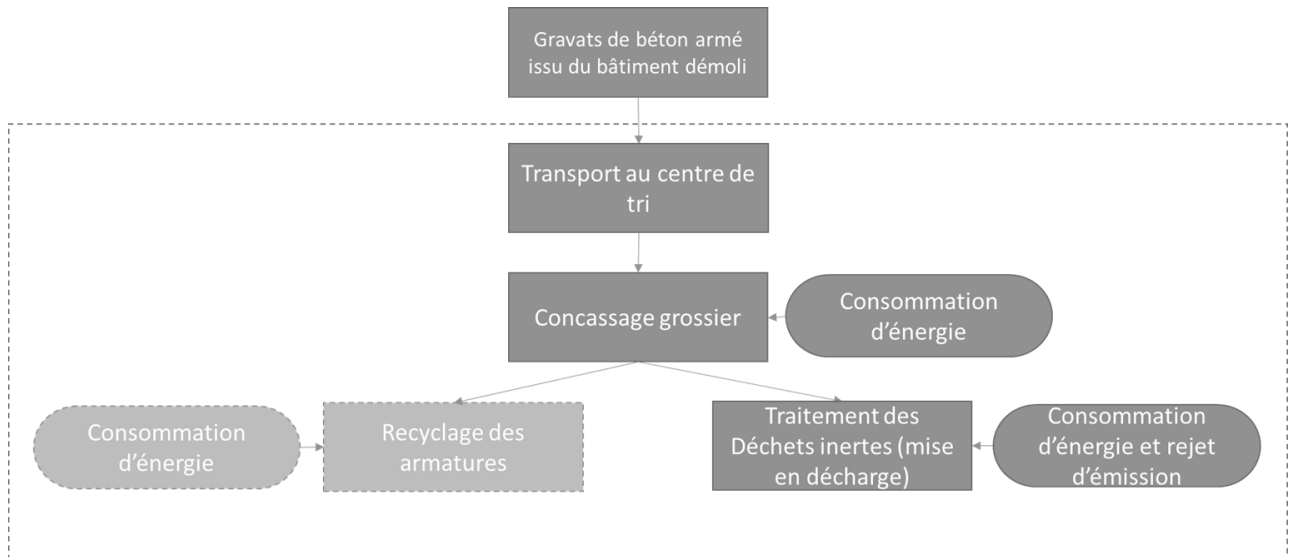


Figure 157 : Frontières du sous-système pour le traitement des déchets issus de la démolition

Tri et traitement (pour le scénario granulat recyclé)

Ce sous-système est similaire au précédent à la différence que les déchets inertes vont en filière de recyclage. La Figure 158 présente les frontières du sous-système. À l'instar du précédent, les consommables de la phase de concassage ne sont pas pris en compte.

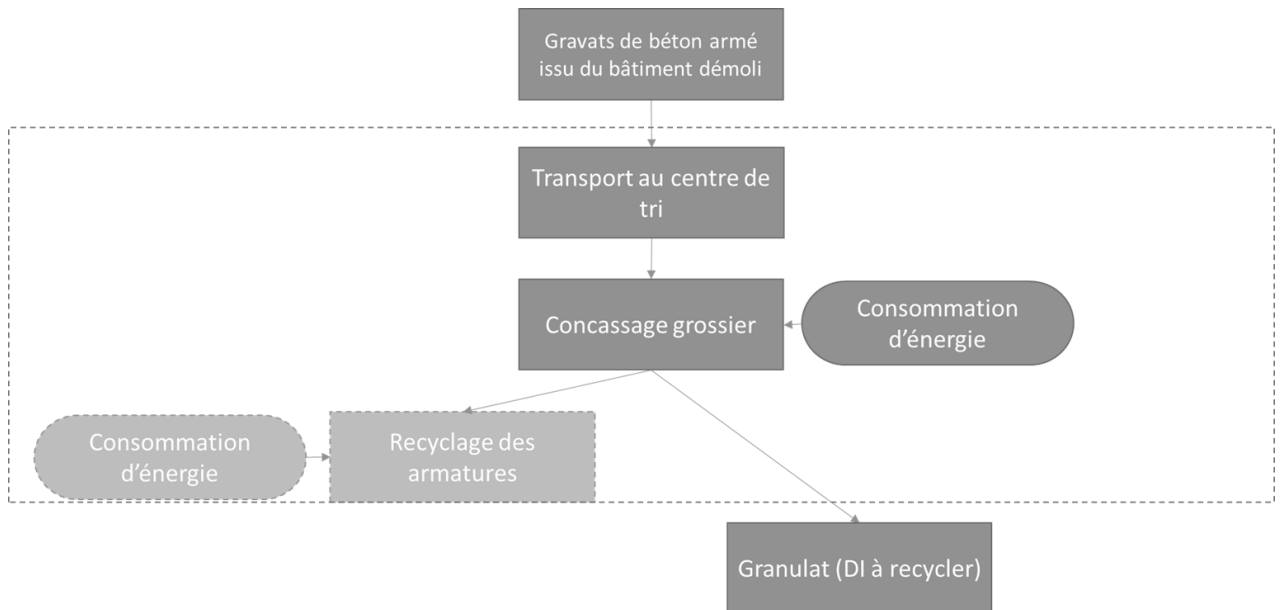


Figure 158 : Frontières du système pour le traitement des déchets de la démolition en vue du recyclage des granulats

Construction (pour le scénario réemploi)

Ce sous-système prend en compte la construction d'une nouvelle structure de bâtiment à partir de poutre de réemploi. La Figure 159 présente les frontières du sous-système. Le système ne prend pas en compte l'amortissement des machines de chantier (grue) et à l'instar de la déconstruction, les étais et fixations temporaires diverses ne sont pas pris en compte car considérés négligeables.

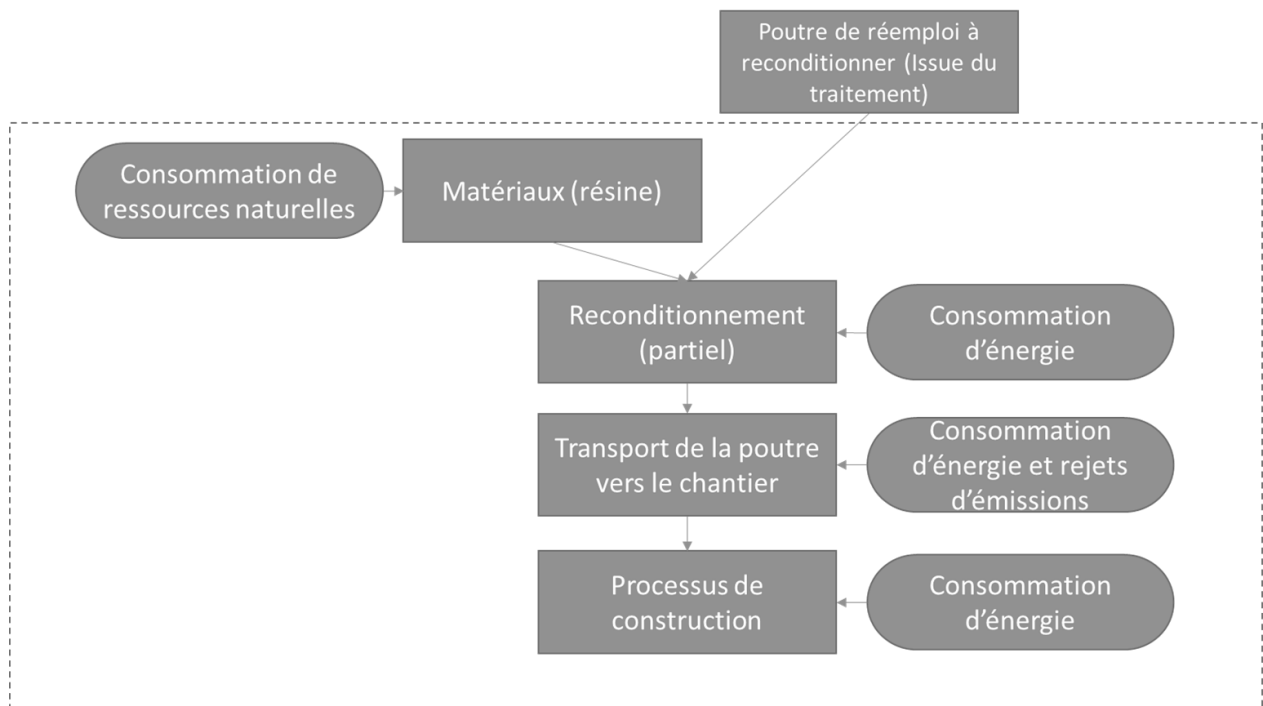


Figure 159 : Frontières du sous-système de la construction d'une nouvelle structure à partir d'une poutre de réemploi

Construction (pour le scénario granulat neuf ou recyclé)

Ce sous-système prend en compte la construction d'une nouvelle poutre à partir de béton contenant du granulat vierge ou recyclé selon le scénario. La Figure 160 présente les frontières du système. Le procédé en gris pâle n'est pris en compte qu'en cas d'utilisation de granulats recyclés (c'est le procédé de recyclage du granulat).

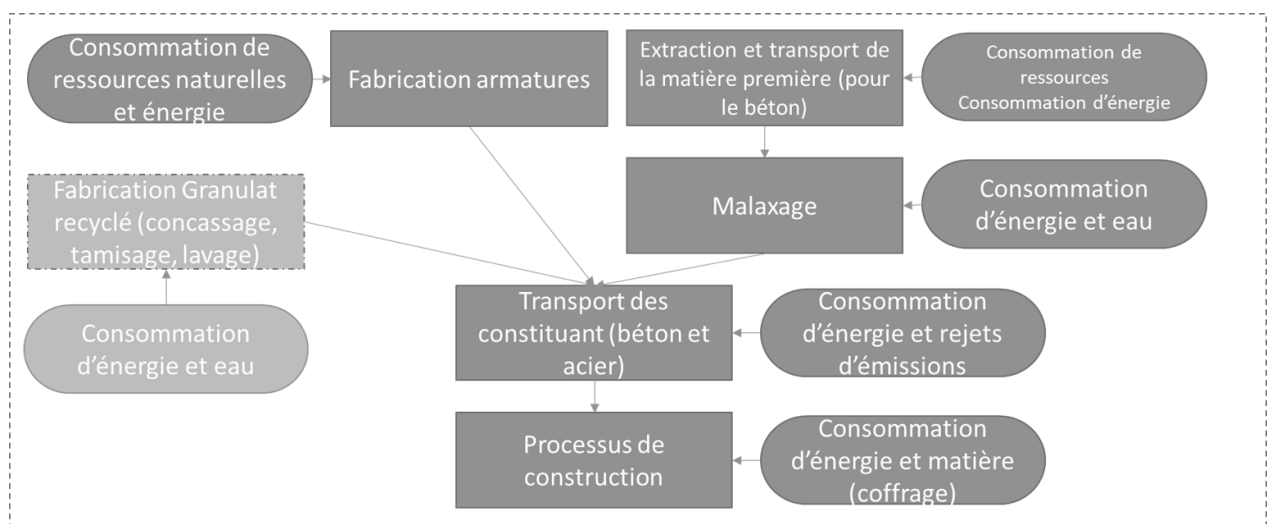


Figure 160 : Frontières du sous-système de la construction d'une poutre neuve à partir de granulats neuf ou recyclé

4.3.1.4 Hypothèses et limites de l'étude

La déconstruction de l'élément (en vue du réemploi) ne prend en compte que la dépose de l'élément cible et non les frontières étendues de la déconstruction du bâtiment complet comme cela a été fait dans l'étude sur le granulat recyclé (section 1.4).

Comme mentionné précédemment dans les frontières, certains éléments ne sont pas pris en compte par manque de données, sachant que certains sont considérés comme négligeables.

4.3.1.5 Base de données et méthode d'impact

Nous utilisons la base de données Ecoinvent 3.5 et le logiciel d'ACV OpenLCA v.1.10.

Les processus intermédiaires sont issus de :

- Données des chantiers de déconstruction des poutres à réemployer ;
- (Ben Fraj and Idir, 2017) pour le recyclage des granulats et du béton ;
- (Lachat et al., 2021b) (section 1.4) pour la démolition du bâtiment ;
- Le générateur de FDES BETie du SNBPE pour la construction de poutres neuves ;
- (Bertin, 2020; Brière, 2016) pour des données complémentaires sur le réemploi.

Nous utilisons par ailleurs, la méthode d'impact des normes NF EN 15804+A1 et NF EN 15804/CN (ensemble des indicateurs d'impacts et de flux de la norme présentée dans la section 1.3.4). Cette méthode est toujours utilisée dans cette thèse en raison de son côté normatif la rendant opportune pour les financeurs et industriels du secteur. La réflexion autour de la méthode ne fait pas partie du champ de cette thèse.

4.3.1.6 Scénarios pour l'étude 1 : les valorisations du béton, réflexions sur l'approvisionnement

Dans ce premier niveau d'étude, nous nous intéressons à l'impact environnemental des valorisations du béton armé à l'échelle d'une structure.

Nous avons une approche « d'approvisionnement en matière », c'est-à-dire que nous commençons le cycle de vie à partir de la source fournissant le granulat (on peut utiliser l'analogie de la mine de matériaux). La démarche d'approvisionnement peut être résumée par cette phrase : *J'ai besoin de matière ! D'où est-ce qu'elle provient ? Quelles transformations subit-elle ?*

Ainsi, nous étudions quatre provenances du granulat ; quatre structures ayant la même fonctionnalité mais avec une technique de valorisation et de construction différente (Tableau 83). Nous comparons l'ACV de ces quatre structures dans la section 4.3.3.1.

Nous étudions ces scénarios en couvrant la phase de production des matériaux et de construction de la poutre. Le système est représenté sur la Figure 161 ; les frontières s'apparentent à un système « cradle to gate ». Nous n'abordons pas dans cette étude la fin de vie des structures car quel que soit le scénario de construction, la fin de vie « a priori » est inconnue, pouvant être identique ou différente selon le scénario. Nous adoptons un point de vue amont et non aval qui a été déjà abordé dans la thèse de (Brière, 2016).

Pour ne pas alourdir l'étude avec une question d'allocation, on alloue l'intégralité de la déconstruction à la production du déchet inerte, aucun impact de la déconstruction n'est alloué à l'acier à l'instar de l'étude du chapitre 1.

Tableau 83 : Scénario de fin de vie et de construction pour chaque structure étudiée

Structure	Source de la matière	Début de vie
P _{réem} (Poutre de réemploi)	Bâtiment (Déconstruction + reprocessing)	Nouvelle installation de la poutre
P _{rec} (Poutre neuve avec granulats recyclés)	Bâtiment (Démolition + recyclage)	Construction de la poutre avec granulats recyclés
P _{recSD} (Poutre neuve avec granulats recyclés provenant du centre de tri)	Centre de traitement (seulement recyclage)	Construction de la poutre avec granulats recyclés
P _{vier} (Poutre neuve avec granulats vierges)	Roche massive (extraction)	Construction de la poutre avec granulats vierges

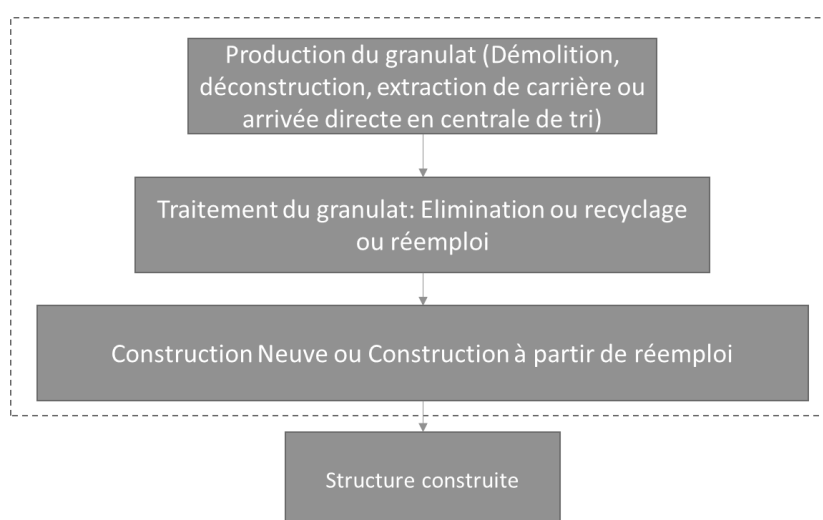


Figure 161 : Système pour l'étude 1 « cradle to gate » (les frontières sont représentées par la ligne en pointillé)

4.3.1.7 Scénarios pour l'étude 2 : réflexion autour de l'extension des frontières, cycle de la matière

Il existe plusieurs approches pour prendre en compte les bénéfices du réemploi et de la réutilisation face aux autres méthodes de traitement de la matière.

(Joensuu et al., 2022) présentent trois approches pour définir les frontières du système lorsque l'on étudie un composé valorisé (réemploi, réutilisation ou recyclage) d'un bâtiment (Figure 162) :

- **Approche par extension des frontières (M1)** : c'est la méthode utilisée par (Kuzmenko et al., 2020) pour le cas d'étude du chapitre 2 (section 2.2.1). Il s'agit d'inclure les flux de l'ensemble des deux (ou plus) cycles de la structure étudiée. Le résultat de l'ACV sera global à l'ensemble des cycles. Cette méthode permet d'éviter les questions d'allocation ;
- **Approche par partitionnement et allocation par cycle (M2)** : il s'agit de diviser et répartir l'impact global (sur sa durée de vie) de l'élément d'étude entre plusieurs sous-systèmes : les cycles d'usage. Ainsi, l'impact de l'élément d'étude est réparti sur les différents cycles de vie, à cela s'ajoute l'impact du reste de la structure pour un seul cycle ;

- **Approche par durée de vie spécifique des éléments (M3)** : il s'agit d'étudier chaque composant du bâtiment individuellement. Il est ainsi possible de reconstituer le bâtiment pendant la durée de service en utilisant une allocation en fonction de la durée de vie effective.

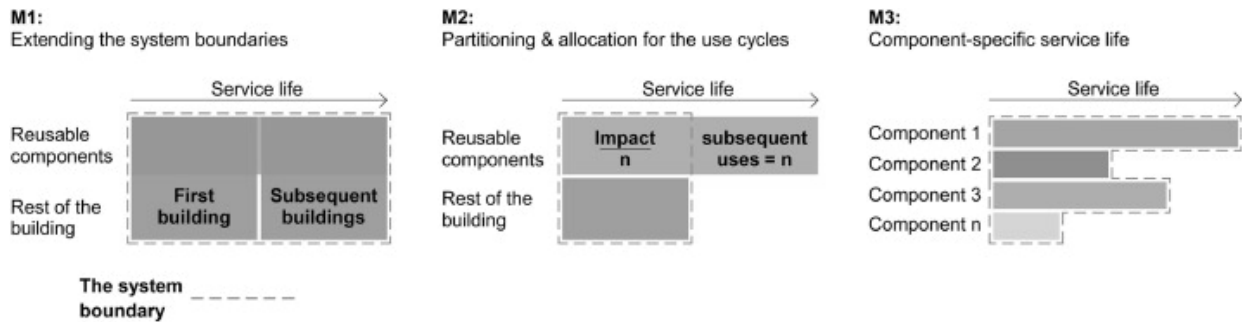


Figure 162 : Différentes approches méthodologiques de définition des frontières du système pour l'ACV dans un cadre d'économie circulaire (Joensuu et al., 2022)

Ainsi pour synthétiser, on peut classer ces trois méthodes en deux catégories : les **méthodes sans allocation** par extension des frontières du système et les **méthodes avec allocation**. Nous explorons ces deux catégories dans cette thèse.

Dans cette seconde étude, nous choisissons d'étendre les frontières du système pour suivre le cycle complet de la matière « béton » (de la construction en neuf à l'élimination).

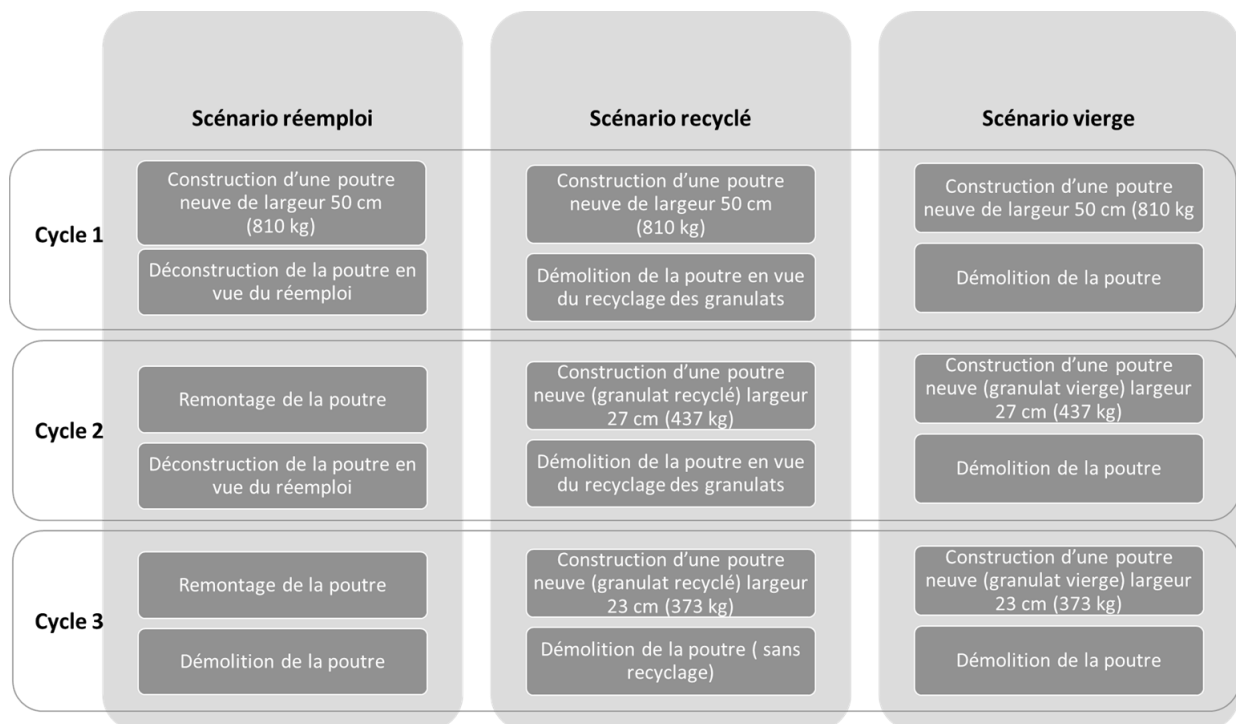


Figure 163 : Système et scénario d'extension des frontières à trois cycles pour différents scénarios de traitement et valorisation

La question du réemploi permettant d'allonger au plus la vie de l'élément, nous nous basons donc sur cette durée de vie. Nous utilisons trois cycles consécutifs. Cette méthode utilisée dans (De Wolf et al., 2020; Hoxha and Fivet, 2018) permet de représenter les trois types de cycle représentatifs de la valorisation :

- **Cycle 1** : comprend la première fabrication de l'élément à partir de matériaux neufs ;

- **Cycle 3** : contient la destruction de l'élément (fin de vie ultime), la matière est éliminée ;
- **Cycle 2** : représente l'ensemble des cycles intermédiaires, dans une optique d'économie circulaire, où la matière est réemployée (ou valorisée) à la fois en début et en fin de cycle. Dans cette étude, nous ne considérons qu'un cycle intermédiaire mais il pourrait être envisageable qu'il y ait plusieurs voire une infinité de cycles.

L'extension des frontières permet de s'affranchir de la question de l'allocation de la phase initiale de construction et de la phase finale de démolition. Le système de cette étude est représenté sur la Figure 163. Dans cette étude, il ne subsiste qu'un seul scénario recyclé car en suivant le cycle de la matière, toute matière provient d'une source en amont, le scénario P_{recSD} est donc écarté.

4.3.1.8 Scénarios pour l'étude 3 : réflexions autour de l'allocation entre des bénéfiques

Dans cette étude nous nous intéressons à la seconde catégorie de comptabilisation des bénéfiques du réemploi : la méthode par allocation. Nous nous intéressons uniquement au scénario de réemploi.

Concernant l'allocation, il s'agit de répartir l'impact de la production et de la fin de vie d'un élément pouvant être réemployé. (De Wolf et al., 2020; Hoxha and Fivet, 2018) recensent les méthodes suivantes pour les objets de réemploi et réutilisation:

- **Méthode Cut-off (100/0)** : nous l'avons déjà abordée dans le cadre des granulats recyclés (section 1.4.4.2). Il s'agit de considérer que tous les processus utilisés avant le début du cycle suivant (« n+1 ») sont comptés dans le cycle « n ». L'impact est compté au moment de sa production ;
- **Méthode End-of-life (0/100)** : c'est l'inverse de la méthode précédente. Il s'agit d'allouer la phase de production au dernier cycle d'usage. Cela se base sur l'hypothèse que les éléments seront réemployés après le premier cycle. Cette méthode encourage les acteurs à concevoir réemployable mais impose un suivi de l'élément pour confirmer que l'élément est bien réemployé ;
- **Méthode par distribution (PAS-2050)** : c'est une approche similaire à l'approche M2 (Figure 162) vue précédemment. Les impacts de la production et de l'élimination sont répartis de manière égale à tous les cycles de vie. Cette méthode a l'inconvénient de nécessiter de prévoir le nombre de cycles de vie, ce qui est complexe dans le cas du bâtiment ;
- **Méthode issue de l'Environnemental footprint de la commission européenne (EC EF)** : correspond à l'allocation 50/50 (section 1.4.4.2), cette allocation permet de distribuer de manière équitable les étapes de production et d'élimination sur le premier et le dernier cycle ;
- **Méthode de la SIA 2032** : similaire à l'approche M3, cette méthode consiste à compter la part de l'impact de la production en fonction de la durée de vie. Toutefois cette méthode réalise un ratio basé sur la durée de vie théorique et non sur la durée de vie réelle totale. Ainsi, il est possible d'avoir un impact nul pour les cycles qui permettent d'utiliser l'élément au-delà de la durée de vie théorique.

Ainsi, nous décidons d'étudier les approches Cut-off, End-of-life et EC EF ainsi que les méthodes PAS-2050 et SIA 2032. Le Tableau 84 présente les différents scénarios d'allocation. Nous étudions l'allocation seulement pour le scénario de réemploi présenté dans l'étude précédente. La production initiale comporte l'impact de la production et de la construction de la poutre neuve auquel on ôte l'impact de la construction (remontage) d'une poutre de réemploi. Le traitement final comporte l'impact de la démolition et du traitement de la poutre auquel on enlève l'impact de la déconstruction d'une poutre de réemploi.

Tableau 84 : Scénarios d'allocation (on considère que la structure du bâtiment est dimensionnée pour 100 ans, mais le bâtiment a une durée de vie de 50 ans).

Allocation	Cycle 1		Cycle 2		Cycle 3	
	Production initiale	Traitement final	Production initiale	Traitement final	Production initiale	Traitement final
Cut- off (100/0)	100%	0%	0%	0%	0%	100%
EoL (0/100)	0%	0%	0%	0%	100%	100%
EC EF (50/50)	50%	50%	0%	0%	50%	50%
PAS-2050	33%	33%	33%	33%	33%	33%
SIA 2032	50%*	50%*	50%*	50%*	0%	0%

4.3.1.9 Dimension des poutres

Nous dimensionnons la poutre neuve (avec du granulat neuf ou recyclé) équivalente à la poutre de réemploi pour le cycle 2 et cycle 3. Nous fixons la hauteur de la poutre à 36 cm (même hauteur que la poutre de réemploi) ce qui permet de garder une hauteur sous plafond identique dans les deux cas de poutre. Le dimensionnement des poutres est réalisé à l'aide de la feuille de calcul construite précédemment (annexe VIII). Nous prenons comme référence la poutre PuP2 (section 4.2.4.1).

Le Tableau 85 synthétise les dimensions, paramètres de calcul et compositions du béton utilisés pour les trois poutres (neuve avec granulat recyclé, neuve avec granulat vierge, réemploi).

Tableau 85 : Récapitulatif des paramètres de la poutre neuve

Paramètre fixé	Poutre neuve avec granulats vierges (P_{vier})	Poutre neuve avec granulats recyclés (P_{rec})	Poutre de réemploi ($P_{réem}$)
L (longueur de la poutre)	1,80 m		
H (hauteur de la poutre)	36 cm		
l (largeur de la poutre)	50 cm pour le cycle 1 ; 27 cm pour le cycle 2 ; 23 cm pour cycle 3		50 cm
Enrobage	2 cm		
Résistance à la compression du béton (C25/30)	25 MPa		25 MPa*
Résistance à la traction de l'acier	500 MPa		450 MPa
Masse volumique du béton	2300 kg/m ³		
Masse volumique de l'acier	7800 kg/m ³		

Masse volumique du béton armé	2500 kg/m ³ 25 kN/m ³		
Résistance à la rupture	463 kN pour le cycle 1 ; 425 kN pour le cycle 2 ; 394 kN pour le cycle 3		426 kN pour le cycle 2 (393 kN pour le cycle 3)
Acier d'armature (pour une poutre)			
Armature horizontale	Lit 1 : 3 x Ø 20 mm Lit 2 : 3 x Ø 18 mm		
Masse armature horizontale	23,95 kg		
Armature transversale	Cadres Ø 8 mm, 1 épingle Ø 8 mm Tous les 24,5 cm (7 fois)		Cadres Ø 8 mm, 1 épingle Ø 8 mm Tous les 24,5 cm (7 fois)
Masse armature transversale ⁵⁴	4,77 kg pour le cycle 2 (4,54 kg pour le cycle 3)		2,20 m pour une armature soit 0,86 kg 6,02 kg
Total	28,73 kg pour le cycle 2 (28,49 kg pour le cycle 3)		29,97 kg
Composition du béton** (pour 1 m ³ de béton)			
Ciment ATILH 42-5	270 kg	282 kg	270 kg
Granulat roche massive	1087 kg (vierge)	864 kg (recyclée)	1087 kg
Granulat roche meuble	780 kg	806 kg	780 kg
Filler calcaire	45 kg	31 kg	45 kg
Plastifiant	1,31 kg	1,4 kg	1,31 kg
Eau	190 kg	244 kg	190 kg

* Bien que les essais de compression sur éprouvette (section 4.2.2.2) indiquent une résistance de 22,3 MPa, nous faisons l'hypothèse qu'à la construction du bâtiment le choix d'un béton normé C25/30 a été sélectionné.

**Composition mise au point dans le projet national Recybéton (IREX, n.d.)

⁵⁴ <https://www.abc-maconnerie.com/technologie/mise-oeuvre/beton-arme/ferrailage/generalites.html>, consulté en mai 2022, pour le calcul de la longueur développée d'un cadre d'armature

4.3.2 Inventaire du cycle de vie

Pour la réalisation de l'ICV, nous nous basons sur le travail de (Brière, 2016) et (Bertin, 2020) concernant le processus de réemploi, ainsi que sur les nouvelles données collectées sur chantier.

Nous divisons l'inventaire du cycle de vie en trois catégories faisant références aux sous-systèmes présentés dans la section 4.3.1.3 :

- Fin de vie du bâtiment (démolition ou déconstruction selon le scénario) ;
- Tri et traitement des « déchets » (élimination, recyclage ou réemploi selon le scénario) ;
- Construction (neuve ou réemploi selon le scénario).

De manière générale, concernant les distances de transport, nous considérons que le chantier d'étude se situe à Levallois Perret (92). Ce chantier est à la fois le site de récupération (déconstruction/démolition) et le nouveau site de construction. On suppose que le stockage des éléments en béton et le recyclage se font sur la plateforme de Gennevilliers (EQUIOM Granulat) à 13,7 km du chantier (donnée *Google maps*).

Le béton non recyclé est supposé déposé dans l'ISDI de la butte d'Orgemont à Gennevilliers (92) à 4,4 km de la plateforme de tri.

Pour le nouveau béton, on considère qu'il provient de la centrale de Gennevilliers (EQUIOM béton) à 9,7 km du chantier (4 km de la centrale de recyclage) ; les granulats vierges proviennent également de la plateforme de Gennevilliers mais la provenance réelle est inconnue, par conséquent, la valeur de (Ben Fraj and Idir, 2017) de 22 km est choisie.

Pour les transports routiers, nous décidons de prendre en compte des motorisations Euro V pour l'ensemble des procédés. C'est une mise à jour par rapport au modèle utilisé dans le chapitre 1 (section 1.4.1) au vu des données actuelles du parc routier : selon le (Sénat, 2021) la norme Euro VI représente 47 % des poids lourds en 2020 et la norme Euro V 18 % du parc. Cela place la catégorie Euro V dans la médiane du parc actuel.

Pour rappel, par convention, les procédés Ecoinvent sont écrits en italique lorsqu'ils sont repris bruts ou en police romaine s'ils sont en partie modifiés.

4.3.2.1 Poutre de réemploi $P_{réem}$

Pour rappel, la poutre de réemploi pèse 810 kg et est de dimension 0,5 m x 0,36 m x 1,80 m.

Chantier de déconstruction

Comme le mentionne (Brière, 2016) dans son manuscrit et comme nous avons pu le voir dans le chapitre 1 (section 1.2.2), « il n'existe pas de méthodologie unique pour récupérer des poutres en béton armé : les moyens et l'énergie mis en œuvre seront variables selon la longueur de la poutre, la hauteur de l'étage auquel elle se trouve, la disposition des ferraillements ou l'expérience de l'entreprise de démolition réalisant l'opération... ». Nous nous basons donc pour ce cas d'étude sur l'expérience du chantier de Paris : la poutre est découpée par sciage et retenue par une chaîne fixée au plancher de l'étage supérieur (Figure 164). Le plancher est supporté par des étais.



Figure 164 : Méthode de déconstruction de la poutre dans le cadre du chantier de Levallois Perret (92) appelé chantier de Paris

Dans le cadre de ce chantier, un ouvrier est nécessaire pour démonter une poutre (qui correspond à 3 ou 2 éléments comme ceux récupérés). Un ouvrier supplémentaire, dans la grue, est nécessaire pour élinguer les éléments au pied du bâtiment.

Nous ne disposons pas de la consommation exacte de la scie et de la grue pour ce chantier précis. Toutefois, comme nous en avons parlé dans la section 4.1, nous avons fait appel à une entreprise pour recouper une partie des éléments récupérés. Nous nous basons donc sur ces données (dont la méthode de sciage est identique (Figure 165)). 1 heure de sciage est nécessaire pour 4,40 m de longueur à couper (hors installation). Bien que la scie puisse consommer au maximum 22 kW, l'installation électrique (tri-phasée 380V, 40A) permet d'utiliser la puissance maximale (donc 5 kWh/m linéaire). En supposant cette consommation pendant toute l'utilisation, l'énergie nécessaire, pour une unité fonctionnelle (4,35 m de périmètre) est de 21,75 kWh. À noter que, pour simplifier, on considère la même consommation pour l'interface dalle/poutre que pour l'interface poteau/poutre, quand bien même la profondeur de coupe est plus importante pour cette dernière.



Figure 165 : Redécoupage des poutres à l'ENPC par l'entreprise Forbétou

Concernant la consommation d'eau, selon une fiche technique Hilti⁵⁵ le débit minimum nécessaire est de 5 l/min mais d'élève idéalement 10 l/min. Nous utilisons cette dernière valeur. Pour une unité fonctionnelle, la scie est utilisée 1 h soit une consommation de 60 litres d'eau.

⁵⁵ https://www.hilti.fr/medias/sys_master/documents/h3e/h39/9762184855582/Mode-demploi-D-LP-30-D-LP20-DS-TS-30-01-Mode-demploi-PUB-5069660-000.pdf consulté en mai 2022

L'usage de la grue est estimé selon la fiche technique de la grue Liebherr 125 EC-B 6⁵⁶. La puissance crête est utilisée pour toute la durée d'utilisation. La durée d'utilisation pour une poutre (une UF) est d'environ 11 min⁵⁷. Le

Tableau 86 présente la consommation de la grue pour une UF. La répartition entre les mouvements de la grue est estimée arbitrairement à 1/3 du temps total par mouvement.

Tableau 86 : Temps de grue et consommation de la grue pour une UF

Mouvement	Consommation crête de la grue	Durée d'utilisation pour une UF	Consommation pour une UF
Levage	18 kW	3,63 min	1,089 kWh
Orientation	7,5 kW	3,63 min	0,454 kWh
Distribution	5,5 kW	3,63 min	0,333 kWh
Total			1,876 kWh

À noter que la production des étaitements, de la chaîne, du crochet n'est pas prise en compte car leur amortissement est faible par rapport à leur usage/durée de vie.

Concernant le disque de sciage, on suppose l'usage d'un disque de 90 mm (pour pouvoir scier une profondeur de 36 cm) d'épaisseur 2 mm⁵⁸ soit une masse d'environ 10 kg. On considère qu'un disque permet de découper seulement une UF. Pour ce disque on approxime le procédé avec une quantité d'acier.

Selon l'INSEE⁵⁹, en 2017, la distance médiane domicile / travail est de 9 km pour les franciliens. Nous utilisons cette valeur pour les distances des déplacements du personnel pour venir sur le chantier.

Le transport de l'équipement se fait par camionnette pour un équipement estimé grossièrement à 150 kg (70 kg pour le groupe hydraulique, 30 kg pour la scie, 50 kg pour la tuyauterie et l'outillage). On considère que le transport du matériel de sciage s'effectue par camionnette chaque jour avec une distance de 9 km (même valeur que pour le transport du personnel).

Du fait de l'absence de données précises, les mêmes hypothèses concernant la base vie sont prises en compte au prorata de la masse de la poutre par rapport au chantier A (chapitre 1) mais pour une distance inférieure du fait de la particularité de la région parisienne. Des centres de stockage du matériel lourd, Solumat (groupe Vinci) est situé entre 40 km et 60 km nous décidons toutefois de retenir la valeur majorante de 100 km pour la distance entre le chantier et le centre de stockage du matériel lourd dont la base vie.

Le Tableau 87 présente les flux sélectionnés et leurs quantités.

⁵⁶ <https://www.liebherr.com/fr/fra/produits/engins-de-construction/grues-%C3%A0-tour/grues-%C3%A0-partie-tournante-sup%C3%A9rieure/flat-top-ec-b/details/297236.html> consulté en mai 2022

⁵⁷ <https://polyvert.iutrs.unistra.fr/temps-unitaires-de-cycles-de-grue/> consulté en mai 2022, pose de poutre préfabriquée estimée à 0,160 heures + 10 % d'incertitude. On suppose un chargement / déchargement direct sur ou à partir du camion (sans stockage).

⁵⁸ <https://www.diamantevolution.fr/Disque-diamant/Disque-diamant-pour-beton-et-beton-arme/Disque-diamant-H2007.html> consulté en mai 2022

⁵⁹ <https://www.insee.fr/fr/statistiques/5425974> consulté en mai 2022

Tableau 87 : Procédés pour la déconstruction de la poutre étudiée en vue du réemploi

Procédé Ecoinvent	Quantité	Information	Provider ⁶⁰
Chantier			
<i>Electricity, medium voltage</i>	21,75 kWh	Sciage de la poutre	Market, Cutoff, U – FR
<i>Electricity, medium voltage</i>	1,9 kWh	Elingage de la poutre	Market, Cutoff, U – FR
<i>Tap water</i>	60 kg	Sciage de la poutre	Market, Cutoff, U – Switzerland
<i>Hot rolling, steel</i>	9,9 kg	Disque de scie (consommable)	Market, Cutoff, U – GLO
<i>Steel, low-alloyed</i>	9,9 kg	Disque de scie (consommable)	Market, Cutoff, U – GLO
Transport du personnel			
<i>Transport, passenger car, large size, diesel, EURO 5</i>	9 km	Transport du personnel pour le sciage	Cutoff, U – RER
<i>Transport, passenger car, large size, diesel, EURO 5</i>	0,54 km	Transports du personnel pour le grutage	Cutoff, U – RER
Transport du matériel			
<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5</i>	0,2565 t.km	Transport base vie	Market, Cutoff, U – RER
<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5</i>	1,35 t.km	Transports du petit outillage	Market, Cutoff, U – RER
<i>Transports de la grue : négligé, supposé amortie avec le reste des travaux</i>			

Tri et Traitement

La phase de tri et traitement ne considère que le transport de la poutre déconstruite au site de stockage. Le Tableau 88 présente le flux constituant le procédé.

Tableau 88 : Procédé de tri et traitement de la poutre étudiée en vue du réemploi

Procédé Ecoinvent	Quantité	Information	Provider
<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5</i>	11,1 t.km	Transport de la poutre vers le centre de stockage	Market, Cutoff, U - RER

⁶⁰ Provider = précise le procédé utilisé pour produire le flux Ecoinvent. Cutoff= règle de coupure, U= Unit, RER= pays européens, FR= France, RoW = ensemble des autres pays mondiaux.

Chantier de construction

L'étape de remontage/construction est précédée par un reconditionnement. Bien que nous n'ayons pas développé de méthode d'assemblage de la poutre, nous souhaitons prendre en compte dans l'analyse l'impact du conditionnement pour l'assemblage. (Brière, 2016) utilise un reprocessing de nature chimique à base de résine. Il est nécessaire de perforer les extrémités de la poutre pour pouvoir sceller l'acier d'assemblage avec une résine époxy. Nous considérons donc la perforation et la consommation de résine. Nous nous basons sur les données de (Brière, 2016) basées sur le produit Sika AnchorFix®-3+⁶¹. Nous ne prenons pas en compte le nouvel acier d'armature dont l'affectation est laissée de manière arbitraire à l'assemblage. Par ailleurs, le reprocessing pour la mise en place du plancher est également alloué totalement au plancher.

Tableau 89 : Procédé de construction/ montage d'une poutre en réemploi

Procédé Ecoinvent	Quantité	Information	Provider ⁶²
Reprocessing de la poutre			
<i>Electricity, medium voltage</i>	1,25 kWh	Perforation	Market, Cutoff, U - FR
<i>Epoxy resin, liquid</i>	0,16 kg	Résine	Market, Cutoff, U - RER
Chantier			
<i>Electricity, medium voltage</i>	1,9 kWh	Grutage	Market, Cutoff, U - FR
<i>transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO 5</i>	11,1 t.km	Transport de la poutre du centre de stockage au chantier	Market, Cutoff, U - RER
Transport du materiel			
<i>Transport de la grue : Négligé, supposé amortie avec le reste des travaux</i>			
Transport du personnel			
<i>Transport, passenger car, large size, diesel, EURO 5</i>	10,29 km	Transport du personnel	Cutoff, U - RER

Pour la construction, on considère que le procédé (*i.e.* la mise en place) de la poutre de réemploi est semblable à un procédé de pose d'élément préfabriqué. Il est ainsi sensiblement proche du procédé de déconstruction. On considère l'usage d'une grue et d'un étaieement pour soutenir la poutre. L'étaieement n'est pas compris dans le modèle ACV car nous le considérons suffisamment amorti. Nous considérons la même utilisation de la grue que pour la déconstruction.

Pour le personnel nécessaire, nous nous basons sur les données du site Polyvert⁶³, dans le cas d'une poutre préfabriquée, 3 personnes sont nécessaires pour la pose et le scellement. La vitesse de pose

⁶¹ <https://fra.sika.com/dms/getdocument.get/942b83f9-e8a5-423f-8aaf-3c591f78ae85/sika-anchorfix-3-plus.pdf> consulté en mai 2022

⁶² Provider = précise le procédé utilisé pour produire le flux Ecoinvent. Cutoff= règle de coupure, U= Unit, RER= pays européens, FR= France, RoW = ensemble des autres pays mondiaux.

⁶³ <https://polyvert.iutrs.unistra.fr/cadences-de-production-en-travaux-neufs/#eh> consulté en mai 2022

est d'environ une unité par heure (soit environ 1/7^{ème} de la journée). Le trajet des ouvriers est considéré identique à celui retenu pour la déconstruction (i.e. 9 km).

4.3.2.2 Poutres neuves (P_{rec} et P_{vier})

Pour ces éléments, nous reprenons plusieurs éléments de l'étude du chapitre 1 (section 1.3) concernant notamment les granulats et la déconstruction des structures bétons. Les valeurs présentées sont les valeurs pour le cycle 2. Les quantités doivent être adaptées pour les autres cycles.

Chantier de déconstruction

Pour cette phase, nous nous basons sur le cas du chantier A (section 1.4.1.1) pour l'abattage de la structure réalisé à la pelle hydraulique. De l'eau est utilisée pour faire retomber les poussières au sol. Nous utilisons une consommation de carburant de 33 l/h.

Nous adaptons les distances de transport, le personnel provient de 9 km du chantier et le matériel de maximum 100 km comme expliqué plus tôt.

Nous prenons en compte un pré tri sur chantier des éléments du curage et d'abattage (structure et toiture) ainsi que la base vie et l'approvisionnement en essence des engins de déconstruction.

Les flux et quantités sont présentés dans le Tableau 90.

Tableau 90 : Procédé de démolition d'une poutre pour une tonne de poutre

Procédé Ecoinvent	Quantité	Information	Provider
Chantier			
<i>Diesel, burned in building machine</i>	690 MJ	Abattage	Market, Cutoff, U - GLO
<i>Diesel, burned in building machine</i>	1 047 MJ	Pré-tri sur chantier	Market, Cutoff, U - GLO
<i>Tap water</i>	1,81 kg	Eau sur chantier contre les poussières	Market, Cutoff, U - Europe without CH
Transport du matériel			
<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5</i>	1,29 t.km	Transport de l'essence et de la base vie	Market, Cutoff, U - RER
<i>Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5</i>	20,61 t.km	Transport de la pelle hydraulique	Market, Cutoff, U - RER
Transport du personnel			
<i>Transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 5</i>	0,71 km	Transport du personnel en camionnette	Market, Cutoff, U - GLO

Traitement en fin de vie

Les déchets sont supposés transportés par camion de 16-32 tonnes vers la plateforme de tri et de recyclage.

Pour le scénario de fin de vie où le béton est éliminé, nous prenons en compte au préalable un tri du béton armé afin de récupérer les armatures. La masse des armatures est de 3,5 % de la masse totale.

On ne considère aucune perte durant le processus de granulats comme mentionné dans l'étude du chapitre 1 (section 1.4.1) : 1 tonne de déchet en béton permet d'obtenir 1 tonne de granulats. Par conséquent, toute la poutre recyclée à la fin du cycle « n » ne sera pas consommée en granulats au cycle « n+1 ». Dans l'étude 1, une allocation massique est réalisée pour obtenir l'impact seul de la masse de granulats nécessaire.

L'acier d'armature est supposé envoyé après le tri au centre de recyclage de Gargenville (groupe Riva) à 42 km.

Le Tableau 91 présente les flux et quantités utilisés.

Tableau 91 : Procédé de tri et traitements des déchets du béton armé pour une tonne de poutre démolie

Procédé Ecoinvent	Quantité	Information	Provider
Tri			
<i>Diesel, burned in building machine</i>	2,75 MJ	Chargement dans le concasseur	Market, Cutoff, U - GLO
<i>Electricity, medium voltage</i>	1,42 kWh	Concassage et retrait des armatures	Market, Cutoff, U - FR
<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5</i>	13,7 t.km	Transports du chantier à la plateforme de tri	Market, Cutoff, U - RER
<i>Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5</i>	0,10 t.km	Transports internes	Market, Cutoff, U - RER
Traitement de l'acier (pour une tonne d'acier)			
<i>Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5</i>	42 t.km	Transport du centre de tri au centre de recyclage de l'acier	Market, Cutoff, U - RER
Elimination des Déchets Inertes (pour une tonne) (sauf pour le scénario recyclage des DI)			
<i>Inert waste, for final disposal</i>	1 t	Transport du personnel, y compris le personnel chargé du désamiantage, en camionnette	Market, Cutoff, U - CH
<i>Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5</i>	4,4 t.km	Transport du centre de tri au centre d'élimination	Market, Cutoff, U - RER

Chantier de construction

Pour la construction des poutres neuves, nous nous inspirons de la fiche FDES « Poutre en béton de dimension 0,30 x 0,20 m, C25/30 XF1 CEM II/A (v.1.5) » (SNBPE, 2018) disponible sur la base INIES mais également de l'outil BETie pour les différents procédés de construction.

Le Tableau 92 résume les processus et quantités intervenants. Les sources des distances de transport des différents constituants du béton armé sont notées dans le

Tableau 93.

Selon le site d'étude de prix Polyvert⁶⁴, 3 hommes sont nécessaires pour le coulage en place de poutres. Le temps de réalisation est d'environ 12 mètre linéaire par jour donc 1/7 de jour pour une UF. Nous considérons les mêmes distances de trajet des ouvriers que pour la déconstruction (9 km).

Tableau 92 : Processus et quantités pour la phase de construction

Paramètre	Valeur Cycle 1	Valeur Cycle 2	Valeur Cycle 3
Distance centrale / chantier	9,7 km		
Capacité du camion	8 m ³		
Coffrage amortie	0,220 kg de métal	0,178 kg de métal	0,171 kg de métal
Energie d'installation (grue)	124,80 MJ	67,39 MJ	57,41 MJ
Pourcentage déchet béton	3% (75% valorisé, 25% mis en décharge)		

Tableau 93 : Sources des distances de transport des constituants du béton armé

Matériau	Source	Valeur
Ciment (jusqu'à la centrale BPE)	Valeurs moyennes SNBPE	18,2 km par train, 26 km par barge, 124 km par camion
Filler (jusqu'à la centrale BPE)	Valeurs moyennes SNBPE	200 km par camion
Granulat Vierge (jusqu'à la centrale BPE)	(Ben Fraj and Idir, 2017)	22 km par camion
Granulat recyclé (jusqu'à la centrale BPE)	Valeur spécifique au cas d'étude	4 km par camion
Plastifiant (jusqu'à la centrale BPE)	Valeurs moyennes SNBPE	350 km par camion
Sable (jusqu'à la centrale BPE)	(Ben Fraj and Idir, 2017)	22 km par camion
Armatures (jusqu'au chantier)	Usage du procédé « Market » Ecoinvent	

⁶⁴ <https://polyvert.iutrs.unistra.fr/cadences-de-production-en-travaux-neufs/#eh> consulté en mai 2022

Tableau 94 : Procédé de construction d'une poutre en béton armé à partir de granulats recyclés ou de granulats vierges. Pour une poutre de 437 kg (poutre équivalent réemploi pour le cycle 2)

Procédé Ecoinvent	Quantité	Information	Provider
Fabrication			
Reinforcing steel	28,73 kg	Armature (adapté pour la distance et le recyclage)	Adapté
<i>Steel, low alloyed</i>	0,178 kg	Amortissement du coffrage	Cutoff, U - RER
<i>Hot rolling, steel</i>	0,178 kg	Amortissement du coffrage	Cutoff, U - RER
<i>Scrap steel</i>	-0,178 kg	Traitement de l'amortissement du coffrage	Market, Cutoff, U – Europe without CH
Malaxage	0,18 m ³	Malaxage	
<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5</i>	4,054 t.km	Transport du béton de la centrale au chantier	Market, Cutoff, U - RER
<i>Electricity, medium voltage</i>	67,39 MJ	Consommation pour la mise en œuvre	Market, Cutoff, U - FR
Formulation (spécifique au scénario de recyclage) (pour 1 m³ de béton)			
Ciment ATILH 42-5	282 kg	Procédé interne issue des données de l'ATILH	
Granulat recyclé	864 kg	Procédé interne	
Granulat roche meuble	806 kg	Procédé interne	
<i>Limestone, crushed, for mill</i>	31 kg	Filler Calcaire	Cutoff, U - RoW
<i>Plastifiants</i>	1,4 kg	Procédé interne	
<i>Tap water</i>	244 kg	Eau	Market, Cutoff, U – Europe without CH
Formulation (spécifique au scénario granulats vierges) (pour 1 m³ de béton)			
Ciment ATILH 42-5	270 kg	Procédé interne issue des données de l'ATILH	
Granulat roche massive concassé	1087 kg	Procédé interne	
Granulat roche meuble	780 kg	Procédé interne	
<i>Limestone, crushed, for mill</i>	45 kg	Filler Calcaire	Cutoff, U - RoW
<i>Plastifiants</i>	1,31 kg	Procédé interne	
<i>Tap water</i>	190 kg	Eau	Market, Cutoff, U – Europe without CH
Transport des matériaux (spécifique scénario granulats recyclés) (pour 1 m³ de béton)			
<i>Transport, freight train</i>	5,132 t.km	Pour le ciment	Cutoff, U - FR
<i>Transport, freight, inland waterways, barge</i>	7,332 t.km	Pour le ciment	Cutoff, U - RER

<i>Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5</i>	34,911 t.km	Pour le ciment	Cutoff, U - RER
<i>Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5</i>	0,490 t.km	Pour le plastifiant	Market, Cutoff, U - RER
<i>Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5</i>	27,388 t.km	Pour les autres composants	Cutoff, U - RER
Transport des matériaux (spécifique scénario granulats vierges) (pour 1 m³ de béton)			
<i>Transport, freight train</i>	4,914 t.km	Pour le ciment	Cutoff, U - FR
<i>Transport, freight, inland waterways, barge</i>	7,020 t.km	Pour le ciment	Cutoff, U - RER
<i>Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5</i>	33,426 t.km	Pour le ciment	
<i>Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5</i>	0,458 t.km	Transports du personnel par train	Cutoff, U - FR
<i>Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5</i>	50,07 t.km	Pour les autres composants	Cutoff, U - RER
Transport du matériel			
<i>Transport de la grue : négligé, supposé amorti avec le reste des travaux</i>			
Transport du personnel			
<i>Transport, passenger car, large size, diesel, EURO 5</i>	10,29 km	Transport du personnel pour la construction	Cutoff, U - RER
Malaxage (pour 1 m³ de béton)			
<i>Electricity, medium voltage</i>	0,52 kWh	Energie de malaxage	Market, Cutoff, U - FR
Production de granulats recyclés (pour 1 tonne de granulats)			
<i>Electricity, medium voltage</i>	0,08 kWh	Energie de malaxage	Market, Cutoff, U - FR
<i>Tap water</i>	67,7 kg	Eau de lavage	Market, Cutoff, U – Europe without CH

4.3.3 Résultats

Lors de cette étude, nous nous concentrons sur l'unité fonctionnelle définie *i.e.* une poutre. Par conséquent on ne prend pas en compte les conséquences du surpoids occasionné par les poutres de réemploi sur la structure verticale. Il serait donc également utile de faire une étude à l'échelle du portique ou du bâtiment.

4.3.3.1 Étude 1 : comparaison de l'approvisionnement en matière

Nous évaluons l'impact environnemental pour les quatre scénarios de poutres. Les Figure 166 et Figure 167 présentent l'impact relatif des quatre scénarios. Les valeurs numériques des impacts sont présentées en annexe XI.

Nous pouvons observer que la déconstruction en vue du réemploi est la solution la moins impactante pour 4 indicateurs sur 7 : *acidification des sols et de l'eau*, *changement climatique*, *épuisement des ressources abiotiques (fossiles + éléments)*. Pour le *changement climatique*, le scénario de réemploi est plus de 50 % moins impactant que le scénario le plus impactant (neuf avec recyclage des granulats) et 50 % moins impactant que le scénario vierge. Néanmoins, le scénario de réemploi est plus impactant sur l'indicateur *formation d'ozone photochimique* de plus de 10 % par rapport aux autres scénarios (environ 20 %). Pour les deux indicateurs restants : *appauvrissement de la couche d'ozone* et *eutrophisation*, le scénario de réemploi est du même ordre de grandeur que le scénario recyclé en prenant en compte une incertitude de 10 %.

Ainsi, on peut dire qu'en ayant une vision « approvisionnement de la matière », le réemploi de poutre de structure en béton armé semble bénéfique pour la plupart des indicateurs. Il est toutefois nécessaire de conduire davantage d'études pour fixer la perte de résistance de la poutre après déconstruction. En effet, si la perte est trop élevée, la fabrication de la nouvelle poutre (avec moins de matière) pourrait être équivalente à la poutre de réemploi. Ceci fait l'objet d'une étude de sensibilité en section 4.3.4.1.

Concernant les autres scénarios (recyclés avec ou sans déconstruction et neuf), nous retrouvons les observations faites lors du Chapitre 1 mais à une échelle plus réduite. Ainsi on retrouve que le scénario recyclé n'est pas nécessairement moins impactant que le scénario neuf en prenant en compte le seuil d'incertitude de 10 %. C'est le cas pour tous les indicateurs à l'exception du dernier, *épuisement des ressources abiotiques - éléments* où le scénario neuf est plus impactant de 30 %. Les différences ne sont pas aussi marquées que dans le Chapitre 1 car le procédé d'extraction ou recyclage du granulat est dilué parmi les autres étapes et procédés de la fabrication de la poutre. Ainsi on observe que la prise en compte de la phase de déconstruction pour la production du granulat recyclé a un impact moindre (inférieur à 10 %) alors que nous pouvions atteindre des différences comprises entre 50 % et 95 % à l'échelle du granulat selon l'indicateur et la provenance. Il faut noter toutefois que dans l'étude actuelle, la part de la déconstruction est allégée car nous n'avons pris en compte que l'abattage de la structure inerte et non les procédés liés au second œuvre et autres déchets comme mentionné précédemment (section 4.3.1.3).

Pour mieux comprendre la provenance des impacts pour les différents scénarios nous avons regardé plus en détail la contribution de certains procédés et étapes (Figure 166, Figure 167, Figure 169, Figure 170).

Nous pouvons voir que contrairement aux autres scénarios, l'impact pour le scénario de réemploi est lié en majorité à la fin de vie de la structure au sein du bâtiment précédent (déconstruction et traitement). La phase de construction contribue au maximum à 21 % de l'impact total (pour l'indicateur appauvrissement de la couche d'ozone). Ce qui est cohérent avec le principe de réemploi qui, par définition, nécessite un reconditionnement limité. Pour limiter l'impact d'un tel scénario il s'agit alors de réfléchir sur l'impact de la démolition et notamment sur l'impact du sciage (ou plus largement de la méthode de démontage). La Figure 168 présente plus en détail la contribution de la phase de déconstruction pour le réemploi ; on observe que la majorité de l'impact est liée à la consommation

du disque de sciage. Il est donc important de vérifier l'hypothèse selon laquelle nous avons besoin d'un disque entier pour scier une poutre. Ceci fait l'objet d'une étude de sensibilité en section 4.3.4.2.

Pour les autres scénarios, le contributeur majoritaire est la phase de construction, et plus exactement, la fabrication de la poutre (entre 80 % et 100 % selon l'indicateur). Par ailleurs on peut voir que, pour tous les scénarios, le transport du personnel compte pour quelques pourcents (5 et 20 %), il n'est donc pas négligeable quand bien même la valeur utilisée (9 km aller) est une valeur plutôt optimiste. L'impact est doublé pour le scénario de réemploi où l'on prend en compte la déconstruction (démontage) de la poutre.

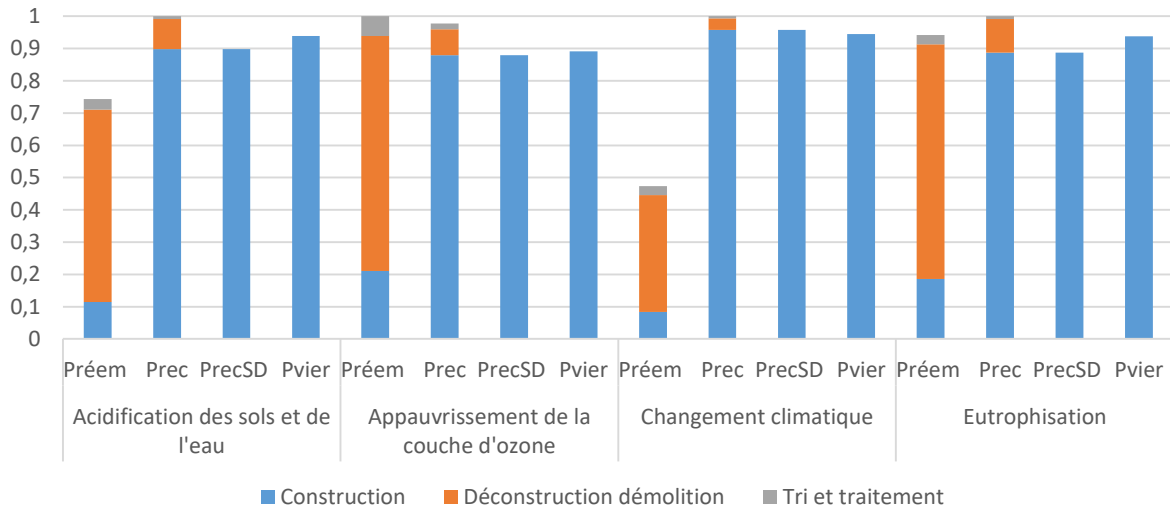


Figure 166 : Impact relatif des quatre scénarios de l'Étude 1 pour les quatre premiers indicateurs de la NF 15804+A1 retenus

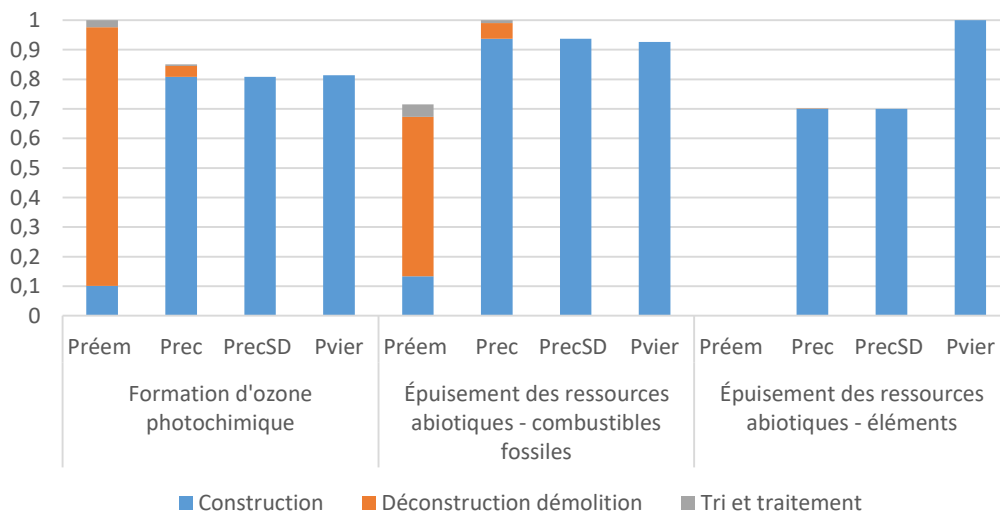


Figure 167 : Impact relatif des quatre scénarios de l'Étude 1 pour les trois derniers indicateurs de la NF 15804+A1 retenus

Phase chantier de déconstruction

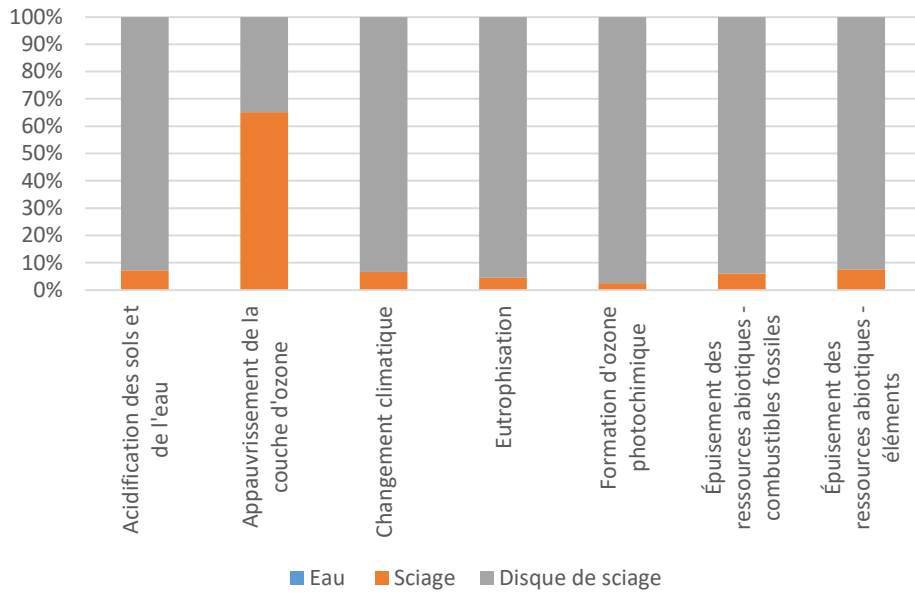


Figure 168 : Analyse de contribution pour la phase de « chantier de déconstruction » du scénario de réemploi (P_{réem})

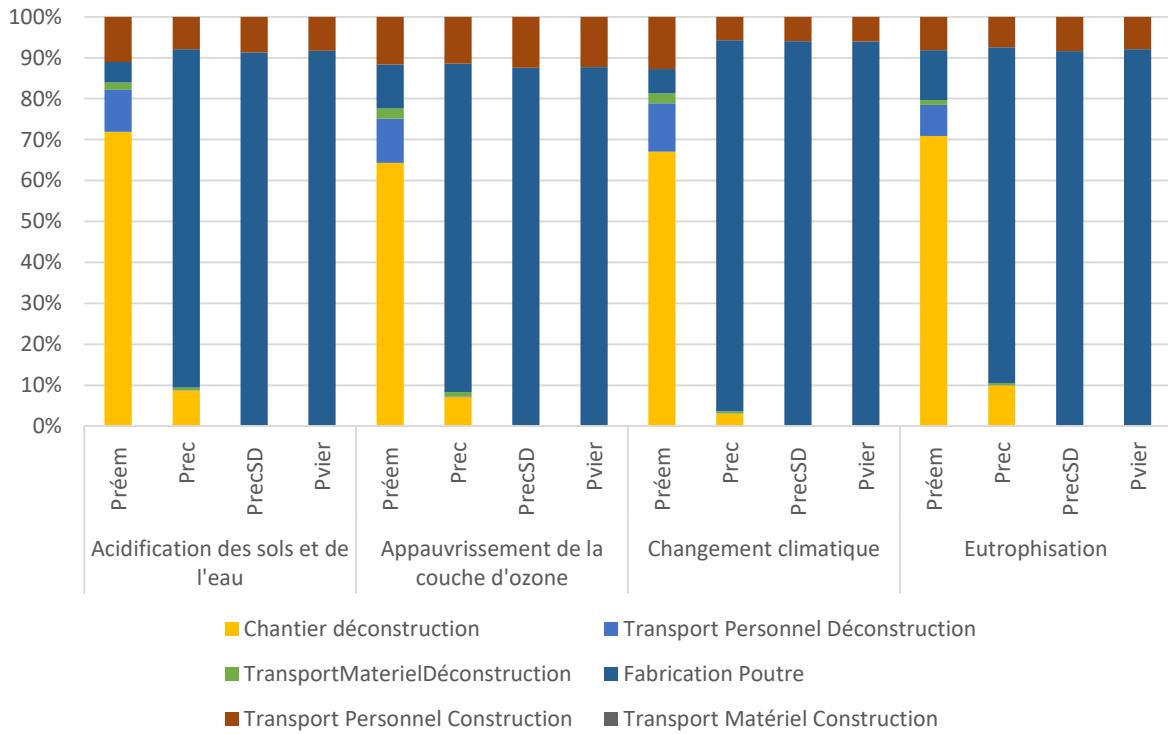


Figure 169 : Contribution à l'impact des quatre scénarios de l'Étude 1 pour les quatre premiers indicateurs de la NF 15804+A1 retenus

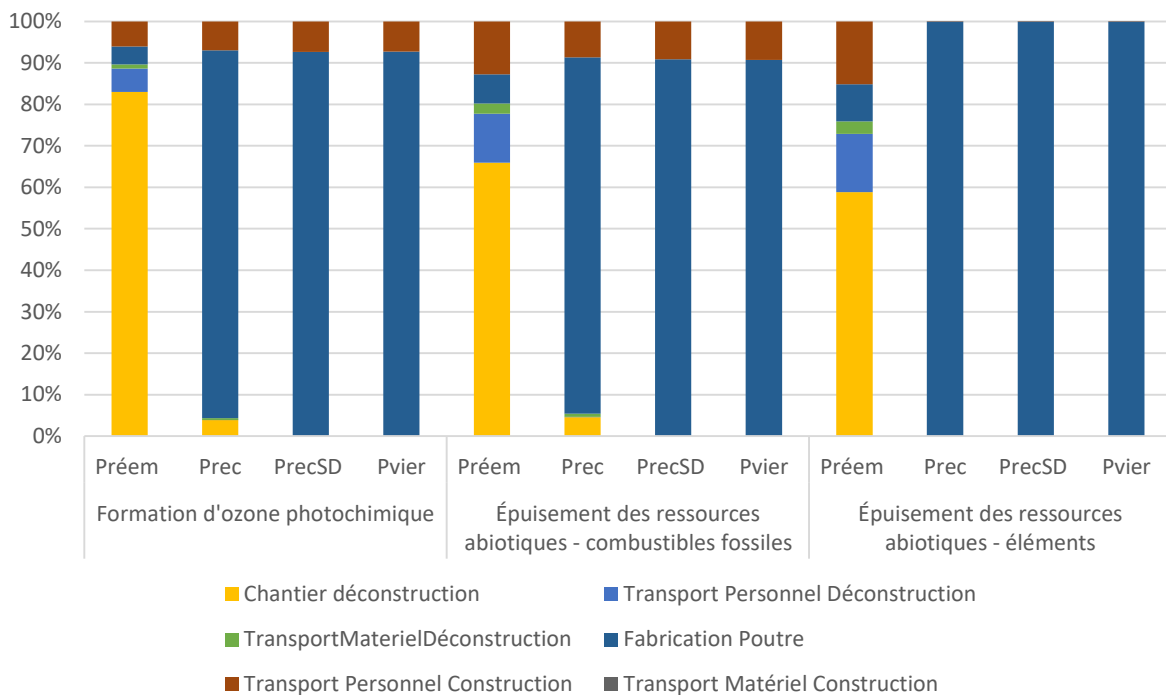


Figure 170 : Contribution à l'impact des quatre scénarios de l'Étude 1 pour les trois derniers indicateurs de la NF 15804+A1 retenus

En regardant plus en détail la contribution de la phase de fabrication de la poutre (Figure 171 et Figure 172), nous pouvons voir que les deux contributeurs principaux pour le scénario de recyclage et le scénario neuf sont la mise en place et la formulation du béton. Ces deux contributeurs ont un impact qui varie fortement d'un indicateur à l'autre. Par exemple, la formulation du béton est le contributeur majoritaire pour l'indicateur du *changement climatique* (environ 65 %) mais il n'est que le second après la mise en place sur chantier pour l'indicateur *formation d'ozone photochimique* (environ 20 %). Il faut nuancer toutefois par le fait que l'acier d'armature est compris dans la phase de mise en place sur chantier.

Phase de fabrication d'une poutre

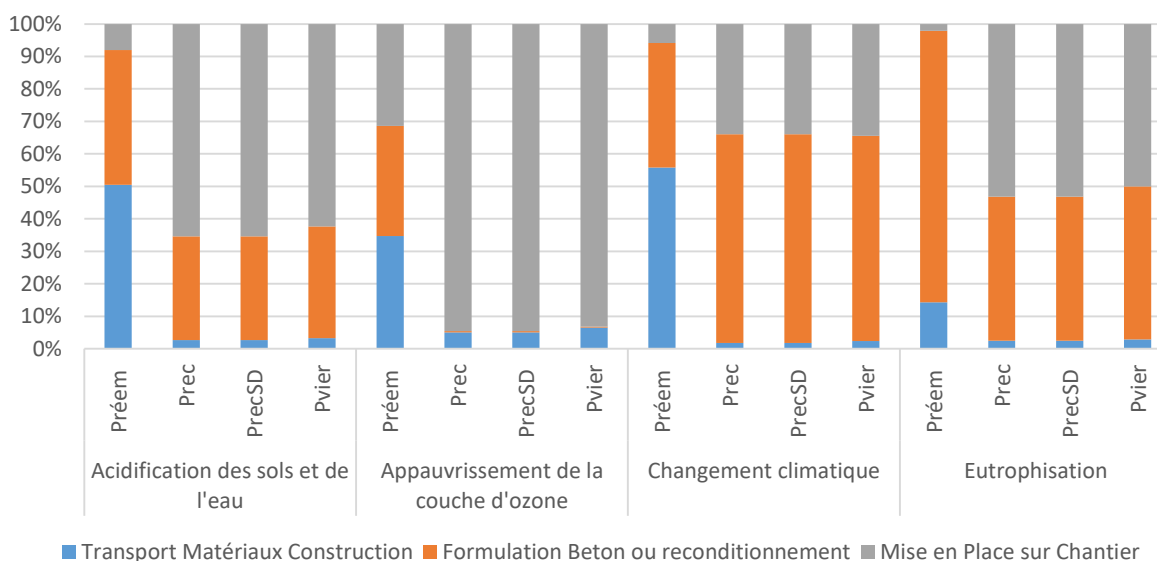


Figure 171 : Contribution à l'impact de la **phase de fabrication** des quatre scénarios de l'Etude 1 pour les quatre premiers indicateurs de la NF 15804+A1 retenus

Phase de fabrication d'une poutre

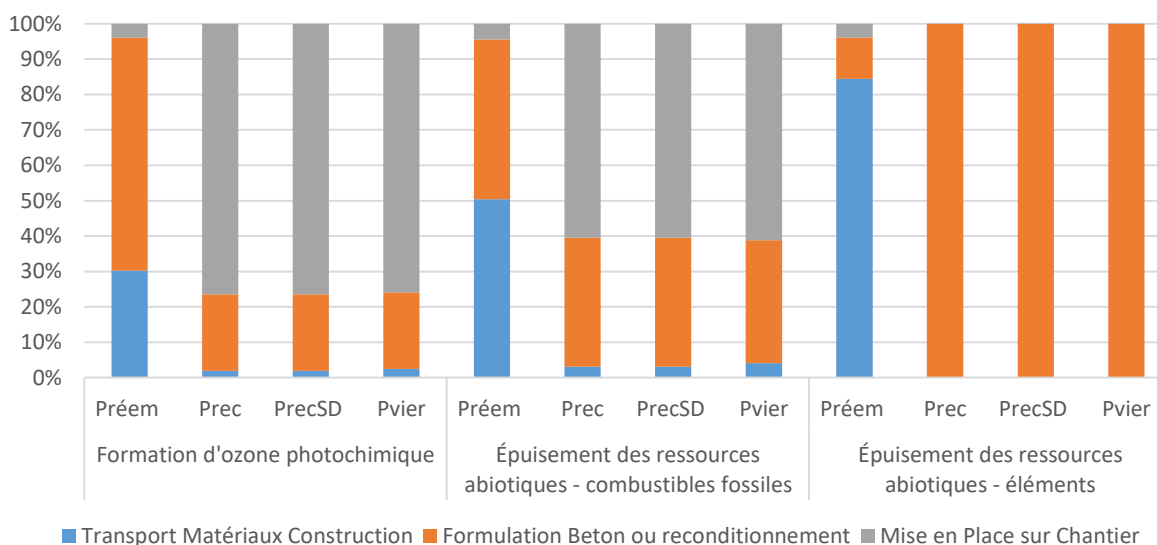


Figure 172 : Contribution à l'impact de la **phase de fabrication** des quatre scénarios de l'Etude 1 pour les trois derniers indicateurs de la NF 15804+A1 retenus

Enfin, nous avons précédemment vu que le scénario de réemploi était, significativement, le scénario le plus impactant pour l'indicateurs de *formation d'ozone photochimique*. À la vue des analyses de contribution nous pouvons dire que cela provient principalement de l'acier du disque de sciage pour la *formation d'ozone photochimique*.

Lorsque nous regardons les indicateurs de flux (Figure 173), nous observons que les tendances sont les mêmes que pour les indicateurs d'impact. En effet, nous observons que l'alternative de réemploi n'est pas la moins impactante sur tous les indicateurs. La poutre de réemploi est significativement moins

impactante pour 5 indicateurs sur 8 et significativement plus impactante pour 2 indicateurs (*déchets dangereux éliminés* et *déchets non dangereux éliminés*). De même, contrairement aux autres alternatives, les flux de la poutre de réemploi sont majoritairement liés à la phase de déconstruction (94 % pour les *déchets dangereux éliminés*).

Pour les deux indicateurs où l'impact du réemploi est supérieur (*déchets dangereux et non dangereux éliminés*), ceci est dû à la production d'acier pour le disque de sciage (84 % pour les *déchets dangereux éliminés* et 64 % pour les *déchets non dangereux éliminés*). Si l'usage du disque est doublé les indicateurs de flux pourraient être au moins équivalents. Ainsi, cela conforte la nécessité de bien connaître l'amortissement du disque mais également d'optimiser le processus de découpe.

Lorsque l'on regarde en détail la phase de fabrication des alternatives de recyclage et la poutre vierge (Figure 174), nous observons que pour la majorité des indicateurs, les indicateurs de flux sont liés à la mise en place sur chantier (dont l'acier d'armature) à l'exception de l'indicateur d'eau douce qui est lié à la formulation du béton (jusqu'à 99 % pour la poutre vierge).

Enfin, à l'échelle globale (Figure 173) le second contributeur pour toutes les alternatives de poutre et pour la majorité des scénarios est le transport du personnel (plus de 7,5 % pour les déchets non dangereux éliminés).

Pour synthétiser sur les indicateurs de flux, nous pouvons dire que les contributeurs et les tendances sont similaires aux résultats pour les indicateurs d'impact. On observe que la quantité de déchets (tous déchets confondus) est étonnamment plus importante pour la poutre de réemploi mais ceci est lié aux frontières de l'étude 1 qui se concentre sur l'approvisionnement en matière. Or, dans le cas de la poutre de réemploi, une mise en décharge a été évitée. Pour voir l'économie sur l'élimination des déchets, il est nécessaire d'étendre les frontières du système (étude 2).

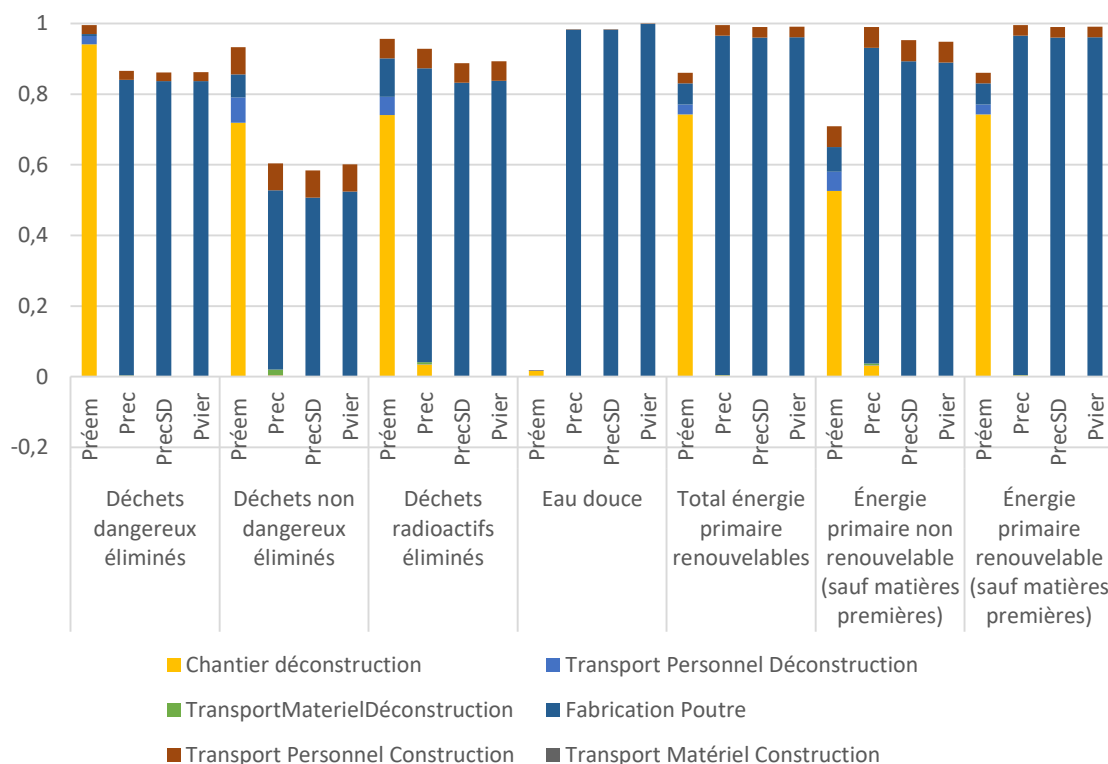


Figure 173 : Indicateurs de flux pour 4 scénarios de l'Étude 1 selon les indicateurs de la NF 15804+A1

Phase de fabrication d'une poutre

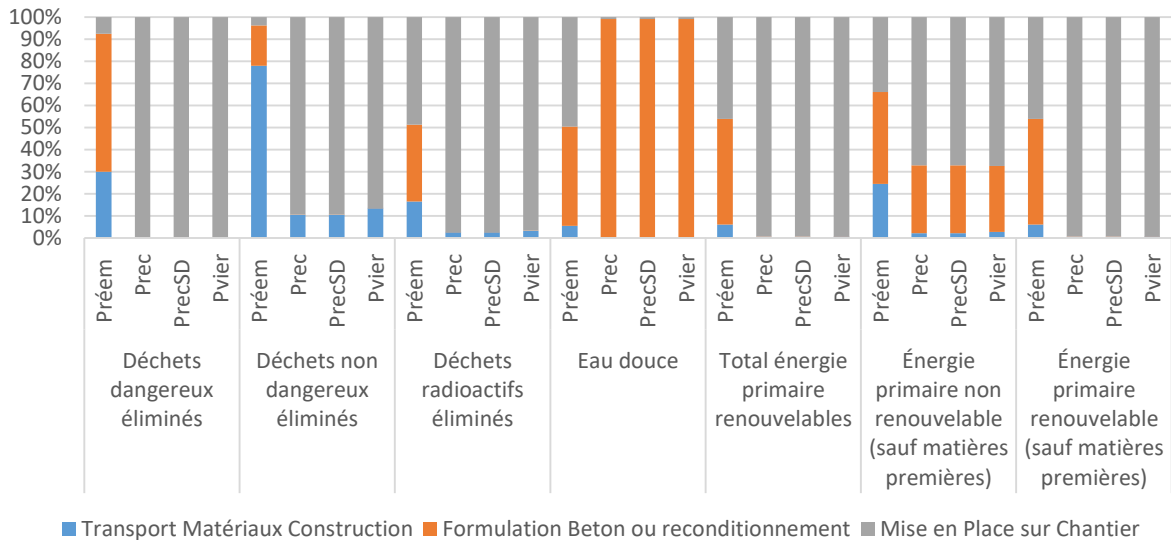


Figure 174 : Contribution à l'impact de la **phase de fabrication** des quatre scénarios de l'Étude 1 pour les indicateurs de flux de la NF 15804+A1

4.3.3.2 Étude 2 : extension des frontières, le cycle de la matière

Nous étudions maintenant le cycle de la matière complet de l'extraction à l'élimination lors de trois cycles consécutifs. Les scénarios étudiés sont les scénarios recyclé (P_{rec}), vierge (P_{vier}) et réemploi ($P_{réem}$). Les valeurs numériques des résultats sont présentées en annexe XII.

On peut observer (Figure 175) que le classement des scénarios entre eux est différent par rapport à l'Étude 1. Globalement, le scénario vierge est (sensiblement) le plus impactant pour 6 indicateurs sur 7. Ceci s'explique (Figure 176 et Figure 177) par un traitement du béton plus impactant lié à l'élimination lors de la fin du cycle 1 et du cycle 2. À noter que les différences sont faibles, notamment pour l'indicateur du changement climatique où la différence est comprise dans l'incertitude de 10 %.

À l'inverse, le scénario de réemploi est maintenant le moins impactant pour 4 indicateurs sur 7. Il reste l'un des plus impactants pour les indicateurs de *formation d'ozone photochimique* (c'est le scénario recyclage qui est le moins impactant sur cet indicateur). Néanmoins, les différences d'impact avec le scénario le plus impactant sont plus faibles (plus que 30 % moins impactant pour le changement climatique contre 50 % lors de l'Étude 1). Ceci s'explique par une dilution des bénéfices du réemploi du fait d'une construction 100 % vierge au début du cycle de la matière et une élimination totale à la fin du cycle. Pour limiter la dilution, il serait nécessaire d'augmenter le nombre de cycles de réemploi, ce qui est difficilement envisageable actuellement du fait d'un manque de données pour le réemploi de ce type d'élément (non conçu pour être réemployable), ne serait-ce que pour un cycle supplémentaire.

L'analyse de contribution du scénario réemploi (Figure 176 et Figure 177) montre une plus grande contribution de la déconstruction que les autres scénarios comme nous l'avons montré lors de l'Étude 1.

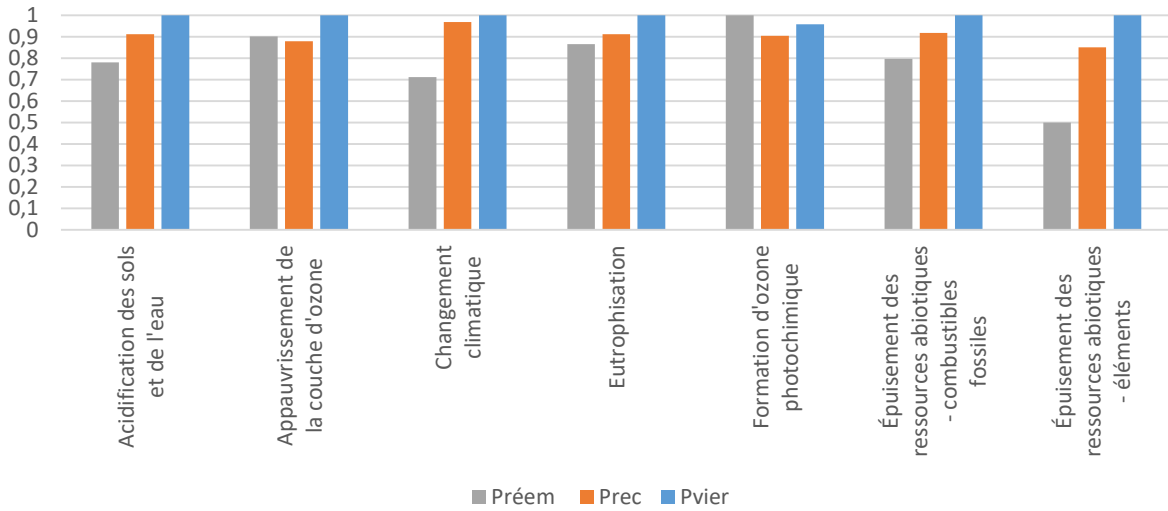


Figure 175 : Indicateurs d'impact (NF 15804+A1) du cycle de vie de la matière pour trois scénarios de l'Étude 2

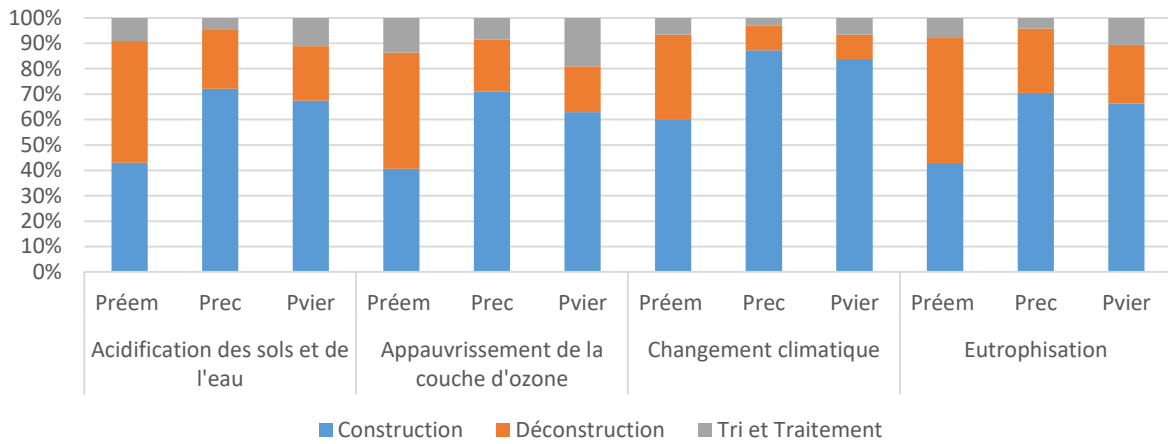


Figure 176 : Contribution des phases du cycle de vie à l'impact des quatre scénarios de l'Étude 2 pour les quatre premiers indicateurs de la NF 15804+A1 retenus

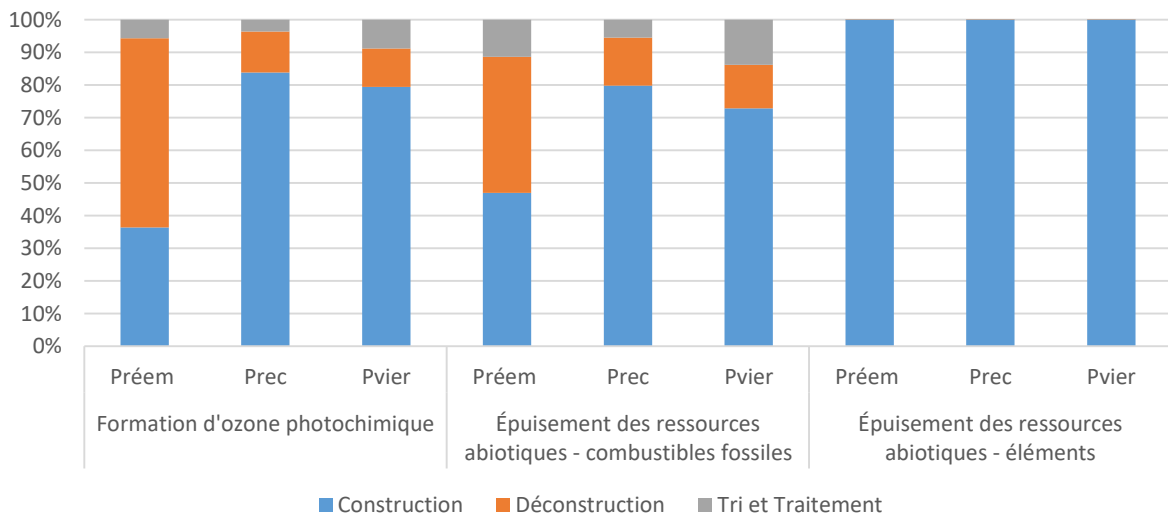


Figure 177 : Contribution des phases du cycle de vie à l'impact des quatre scénarios de l'Étude 2 pour les trois derniers indicateurs de la NF 15804+A1 retenus

Nous réalisons également une analyse de contribution des différents cycles intermédiaires (Figure 178 et Figure 179). Pour tracer ces graphiques, nous utilisons une allocation cut-off c'est-à-dire que l'impact d'un procédé est pris en compte au moment de sa réalisation. Ainsi, la construction 100 % neuve est prise en compte dans le cycle 1 et l'élimination en fin de cycle de la matière est prise en compte dans le cycle 3. Une analyse plus poussée des allocations est réalisée lors de l'étude 3 (section 4.3.3.3) sur le scénario de réemploi. Ces graphiques nous montrent que, pour tous les scénarios et pour tous les indicateurs, le cycle 1 est le plus impactant du fait de la construction neuve de la poutre la plus grosse (et la plus résistante). De même, le troisième cycle est le moins impactant sur tous les indicateurs et pour tous les scénarios. C'est un résultat qui confirme l'intuition.

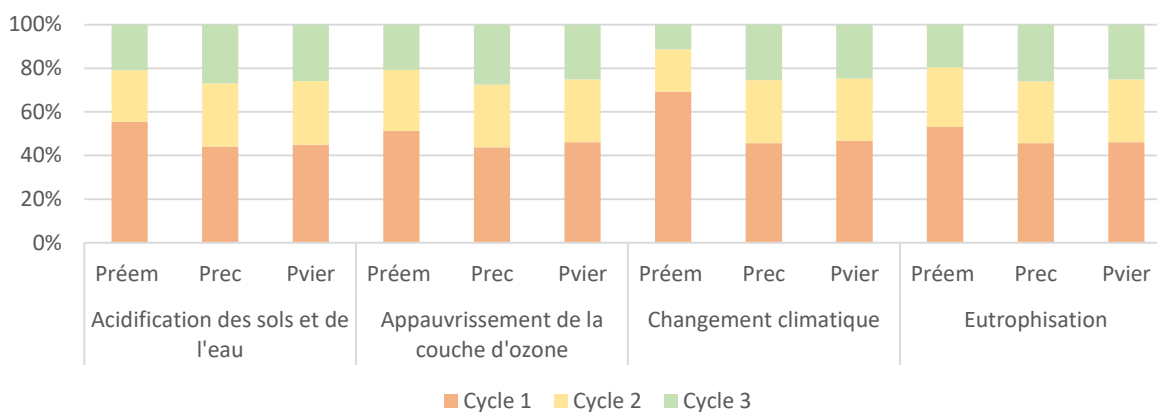


Figure 178 : Contribution des cycles à l'impact des quatre scénarios de l'Étude 2 pour les quatre premiers indicateurs de la NF 15804+A1 retenus

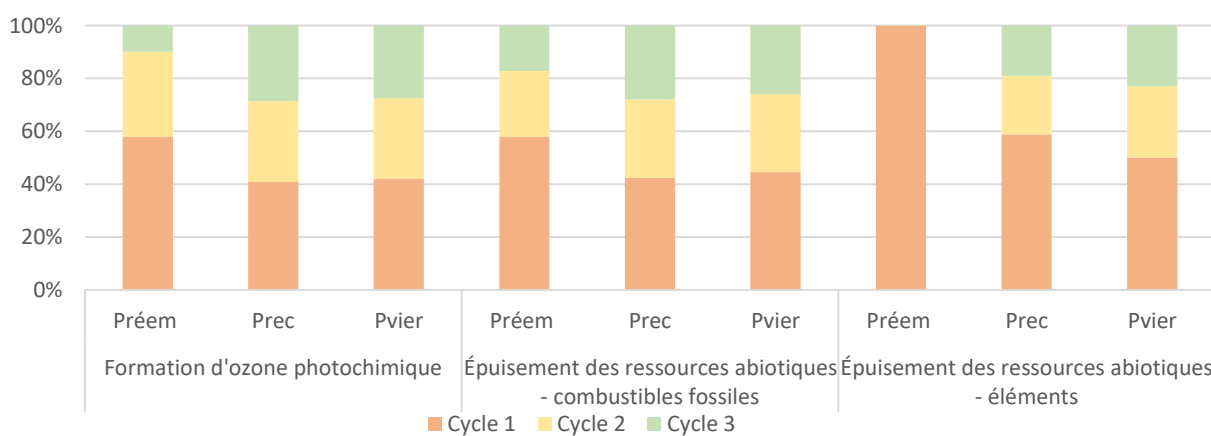


Figure 179 : Contribution des cycles à l'impact des quatre scénarios de l'Étude 2 pour les trois derniers indicateurs de la NF 15804+A1 retenus

Nous nous intéressons maintenant aux résultats pour les indicateurs de flux (Figure 180 et Figure 181). En raison de la construction de la poutre initiale, l'avantage du réemploi est dilué sur les autres cycles c'est-à-dire que la différence avec les autres alternatives devient moins importante (par exemple, nous n'obtenons plus qu'une différence de 50 % pour l'eau douce).

En plus des tendances vues lors de l'Étude 1 (section 4.3.3.1), on observe une différence importante pour l'indicateur de déchets non dangereux éliminés. En effet, la poutre de réemploi est 45 % moins impactante pour ce flux que la poutre neuve. Cependant, l'alternative de recyclage est encore moins productrice de déchets non dangereux éliminés avec un gain de 75 % par rapport à la poutre neuve. Le gain, dans le cas du réemploi, est lié à la non mise en décharge de la poutre en fin de vie du bâtiment.

Le meilleur score de la poutre de recyclage est lié aux frontières du système pour cette étude. Le devenir du surplus de granulat recyclé n'est pas pris en compte. Ainsi, la matière (béton) est préservée de l'élimination pour les deux premiers cycles, à l'instar de l'alternative de réemploi, et la poutre du troisième cycle est éliminée. Or, la poutre du troisième cycle contient moins de béton (donc moins de déchets) pour le cas du recyclage que la poutre de réemploi. En fait, cette étude est un bon exemple de valorisation sans perte de valeur d'usage mais avec perte de valeur intrinsèque : le recyclage du béton en granulat provoque une perte de valeur intrinsèque du béton. Ainsi, cette étude montre l'importance de la prise en compte de la valeur d'usage et de la valeur intrinsèque dans les indicateurs d'économie circulaire qui se veulent complémentaires à l'ACV. Dans notre cas, la valorisation par recyclage permet de produire moins de déchets mais on constate sur les autres indicateurs (d'impact et de flux) que le scénario de recyclage n'est pas idéal, notamment pour l'indicateur de *changement climatique*. Par conséquent, cela confirme l'importance, lorsque l'on parle d'économie circulaire, du choix des paramètres utilisés pour mesurer la circularité.

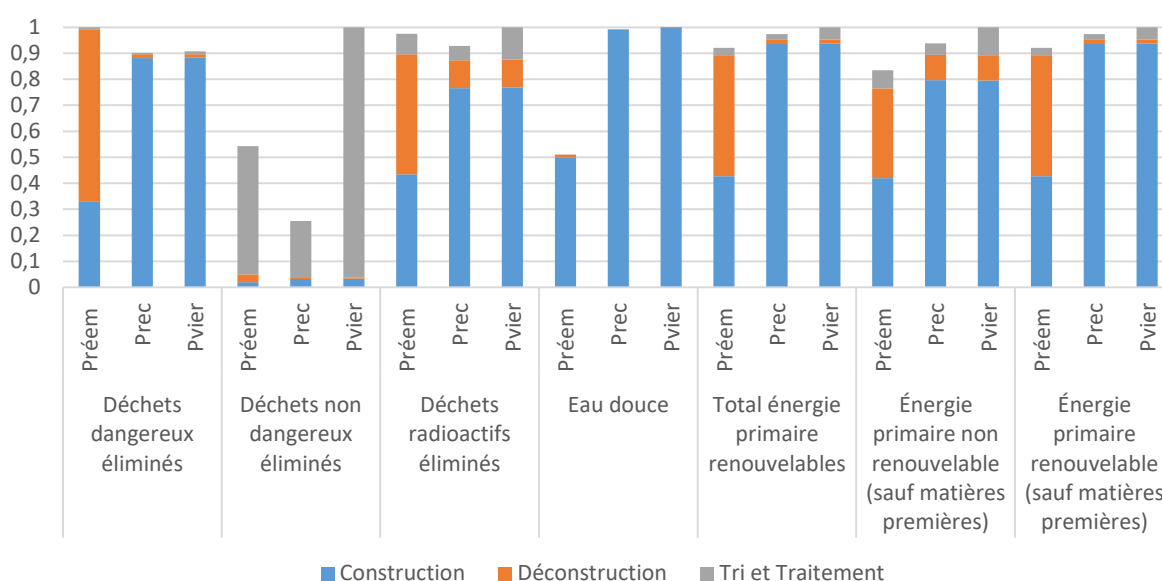


Figure 180 : Indicateurs de flux du cycle de vie de la matière pour trois scénarios de l'Étude 2 évalués par la NF 15804+A1

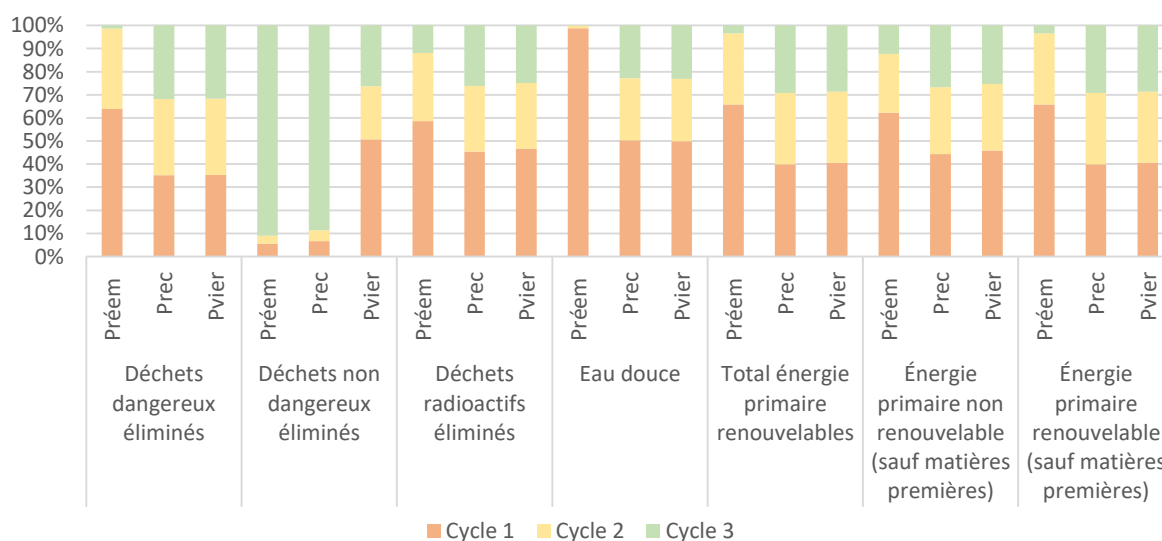


Figure 181 : Contribution des cycles pour les indicateurs de flux des quatre scénarios de l'Étude 2

4.3.3.3 Étude 3 : réflexion sur les allocations

La dernière étude consiste à comparer plusieurs méthodes d'allocation. Nous nous focalisons sur le scénario réemploi. Il s'agit de distribuer le surplus lié à la construction de la poutre de réemploi au début du premier cycle et la démolition et l'élimination des déchets à la fin du cycle de la matière comme expliqué dans la section 4.3.1.8. Pour cette analyse, par soucis de simplification de la présentation des résultats, nous nous concentrons sur l'indicateur du *changement climatique* néanmoins, les résultats de chaque indicateur d'impact sont présentés en annexe XIII et les indicateurs de flux en annexe XIV.

Nous nous intéressons dans un premier temps à l'analyse du cycle complet (Figure 182). Ce graphique présente l'impact alloué à chaque cycle. La référence correspond à la valeur d'un cycle de réemploi brut en amont et en aval avec une allocation Cut-off. Nous pouvons observer que la méthode d'allocation influe fortement sur le résultat global du cycle. En effet, la différence avec la référence peut être multipliée par 4 dans le cas de l'allocation Cut-off, cycle 1 et EoL cycle 3. On observe également, que le cycle 3 en Cut-off a un impact plus faible que la référence (26,4 kg CO₂ eq. au lieu de 31,7 kg CO₂ eq.). Ceci est lié à l'impact de l'élimination qui est plus faible que l'impact de fin de vie du réemploi (déconstruction : sciage, élingage). Cependant, on observe, grâce à la méthode Cut-off, que la majorité du surplus d'impact à allouer provient de la construction initiale de la poutre : un surplus de 93 kg CO₂ eq. est requis pour construire la poutre initiale par rapport à une poutre de réemploi.

Par ailleurs, on observe que les cycles les plus impactés par les méthodes d'allocation sont le premier et le dernier. Les cycles intermédiaires (dans notre cas, cela se résume uniquement au cycle 2) ne sont impactés que pour la méthode d'allocation Pas-2050 et SIA 2032.

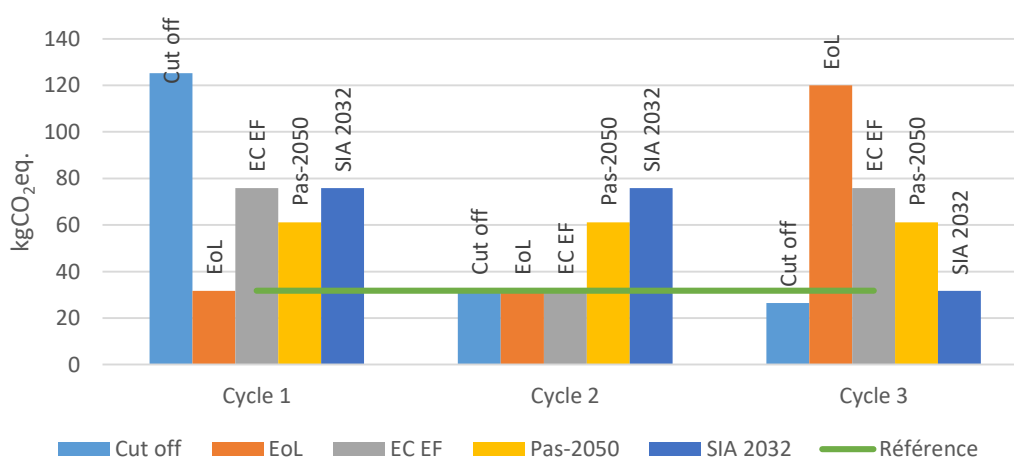


Figure 182 : Impact changement climatique en kg CO₂ eq. de chaque cycle pour différents scénarios d'allocation

Plus en détail on analyse la part de la phase de construction et de fin de vie (déconstruction et traitement) pour chaque méthode d'allocation et chaque cycle dans la Figure 183. Ce graphique confirme la part importante de la phase de construction (à l'instar de la Figure 177 vue précédemment). L'impact de la phase de fin de vie varie peu avec au maximum 5,4 kg CO₂ eq. de différence pour la fin de vie du cycle 3. En revanche, la phase de construction varie très fortement avec une différence maximale de 93,5 kg CO₂ eq. (soit 16 fois la valeur minimale atteinte pour EoL en cycle 1 ou Cut-off en Cycle 3).

Pour le cycle intermédiaire (cycle 2), et dans une moindre mesure pour les cycles 1 et 3, on observe qu'en fonction de la méthode d'allocation choisie, l'impact de la construction peut être supérieur à la fin de vie (Pas-2050 et SIA 2032) ou bien fortement inférieur à la déconstruction (Cut-off, EC EF, EoL).

Pour synthétiser, nous identifions les avantages, les inconvénients et les usages possibles de chaque méthode dans le Tableau 95.

Enfin, comme chaque cycle dispose d'une résistance différente, il serait possible en perspective de créer une dernière méthode d'allocation au prorata de la résistance à la flexion de la poutre.

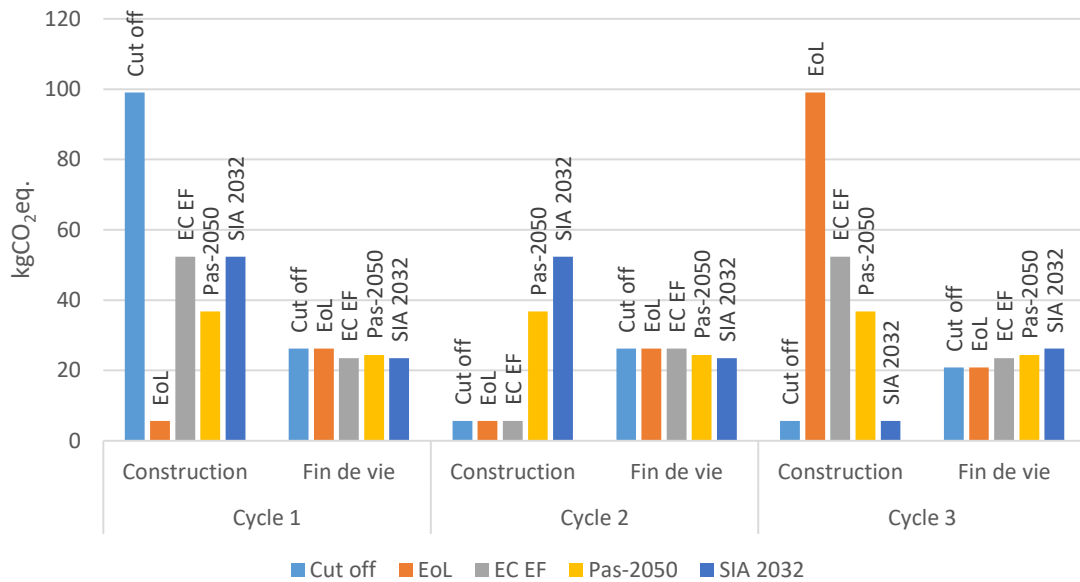


Figure 183 : Changement climatique des phases au sein des trois cycles pour différents scénarios d'allocation

Tableau 95 : Avantages et inconvénients des méthodes d'allocation

	Cut-off	EoL	EC EF	Pas-2050	SIA 2032
<i>Avantages</i>	Ne nécessite pas de connaître le nombre de cycles exact. Prend en compte l'impact au moment de sa réalisation	Permet de retarder la prise en compte de l'impact initial de la construction. Favorise la conception réemployable et dissuade la production de déchets ultimes car le cycle ultime (cycle 3) prend tout l'impact de la construction initiale et de la démolition ultime	Le surplus d'impact est réparti équitablement entre le premier cycle qui consomme de la matière vierge et le dernier qui élimine de la matière. C'est un compromis à la méthode Cut-off pour la conception réemployable	Répartition équitable entre l'ensemble des cycles, aucun cycle n'est avantagé ou désavantagé	Amortissement de l'impact en fonction de la durée de vie. La prise en compte de l'impact du surplus n'est pas retardée ce qui limite le risque d'oubli lors des derniers cycles. Incite à l'allongement de la durée de vie
<i>Inconvénients</i>	Dans le cas présent où la fabrication initiale est très impactante, le cycle 1 est désavantagé. Cette méthode n'incite pas à concevoir réemployable	Retarde au plus tard la prise en compte de la majorité de l'impact ce qui risque à terme de conduire au fait que l'impact ne soit pas pris en compte (changement des pratiques d'allocation, oubli du passif de la construction initiale...)	Retarde une partie de l'impact au cycle ultime, il y a un risque de perte de l'information et par conséquent de non prise en compte de l'impact	Il est nécessaire de connaître le nombre de cycles total	N'incite pas à concevoir réemployable pour les éléments dont la durée de vie théorique est inférieure à l'élément hôte
<i>Usages possibles</i>	Inciter à réemployer (le dernier cycle et les cycles intermédiaires étant peu impactants Figure 182)	Favoriser la conception réemployable	Inciter à équilibrer l'offre et la demande d'éléments réemployés	Usage courant dans le cas d'un marché développé et mature du réemploi (conception réemployable et réemploi)	Volonté d'allongement de la durée de vie tout en limitant le risque de non prise en compte de certains impacts

4.3.4 Perspectives et analyse de sensibilité

4.3.4.1 Sensibilité sur la perte de résistance de la poutre de réemploi

Dans la section 4.3.3.1 nous montrons que, selon l'indicateur, la poutre de réemploi n'est pas plus vertueuse que la poutre neuve. Or nous avons vu également que les impacts de la poutre neuve étaient fortement liés à la fabrication de la poutre et notamment à sa formulation. Ainsi, l'impact risque de varier fortement si la géométrie change et notamment si la résistance nécessaire change. Nous souhaitons mettre en avant les conséquences sur le résultat d'une modification de la résistance résiduelle de la poutre de réemploi et donc une poutre neuve équivalente de dimension différente. Cette analyse de sensibilité est d'autant plus importante que la perte de résistance actuellement utilisée est liée seulement à un seul retour d'expérience.

Nous construisons donc deux scénarios alternatifs. Le premier très optimiste où l'on considère qu'il n'y aurait aucune perte lors du réemploi de la poutre, la poutre neuve équivalente est donc construite à l'identique de la poutre de réemploi lors du cycle 1. Le second scénario considère que la perte de résistance équivaut directement au passage au cycle 3 soit une perte presque doublée (15 % de perte).

Nous réalisons cette étude de sensibilité seulement sur la poutre vierge car la poutre avec du granulat recyclé se comporterait de manière similaire.

Les résultats de ces scénarios sont présentés sur la Figure 184 où l'on normalise en fonction de la poutre de réemploi selon le système de l'Étude 1 (nous nous concentrons sur les indicateurs d'impacts car nous avons vu que le comportement est similaire pour les indicateurs de flux). On observe des variations très fortes notamment pour le scénario sans perte de résistance où l'augmentation de l'impact peut atteindre 50 % (*changement climatique*). De plus, avec ce scénario, le réemploi devient moins impactant ou égal pour tous les indicateurs (impact équivalent pour la *formation d'ozone photochimique*).

Le scénario comptabilisant une perte de résistance de 15 % impacte moins drastiquement le classement mais a pour conséquence de rendre ce scénario plus compétitif face à la poutre de réemploi. Ainsi, la poutre neuve devient moins impactante pour l'*eutrophisation*. Ce scénario reste significativement plus impactant pour l'indicateur de *changement climatique*.

On peut conclure que la détermination de la perte de résistance influe fortement sur l'avantage environnemental du réemploi. Il est donc important de déterminer au plus juste la résistance résiduelle d'une poutre de réemploi ce qui nécessite une étude technique plus poussée.

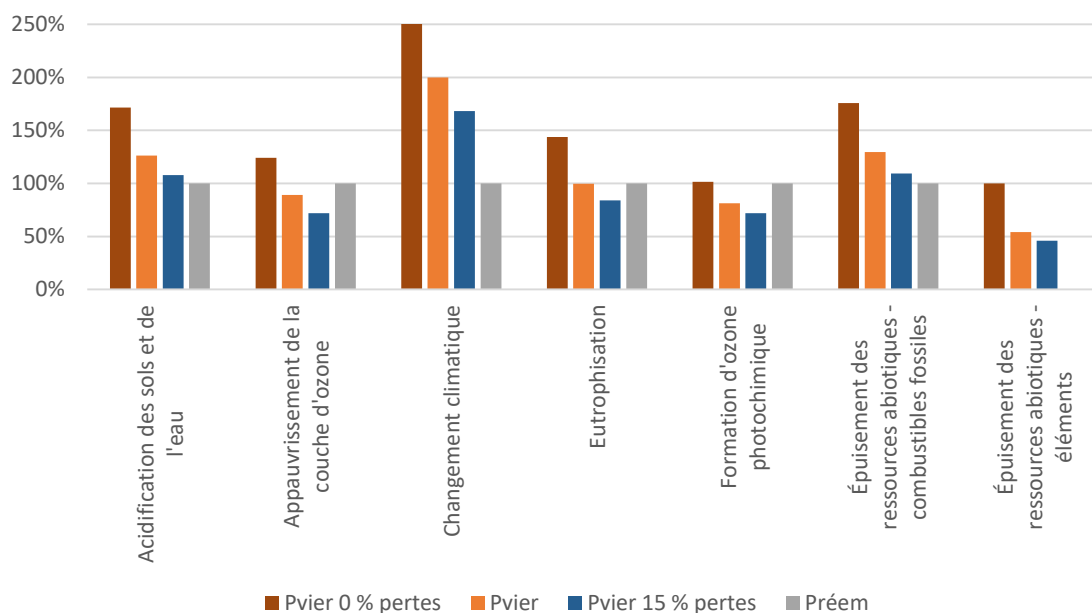


Figure 184 : Analyse de sensibilité sur la perte de résistance de la poutre de réemploi dans le cadre de l'Étude 1, normalisé par rapport à la solution de réemploi à l'exception du dernier indicateur (Pvier = 8 % de pertes)

4.3.4.2 Sensibilité sur l'amortissement du disque de scie

Précédemment (section 4.3.3.1) nous avons vu que le disque de scie utilisé pour le sciage de la poutre de réemploi impactait fortement les résultats et notamment l'indicateur de *formation d'ozone photochimique* en raison de l'acier consommé. Nous réalisons donc une étude de sensibilité sur l'amortissement du disque de scie. Nous construisons deux scénarios alternatifs : le premier où le disque permet de réaliser deux fois plus de travail (on divise donc l'impact du disque par deux) et le second considère que le disque permet de réaliser trois fois plus de travail (on divise donc l'impact par 3).

À l'instar de l'étude de sensibilité précédente, nous nous plaçons dans le cadre de l'Étude 1.

On observe (Figure 185) comme attendu que l'amortissement de ce disque influe fortement sur la plupart des indicateurs d'impact et permet à la poutre de réemploi de devenir significativement moins impactante que la poutre vierge sur tous les indicateurs à l'exception de l'indicateur *d'appauvrissement de la couche d'ozone* où il est équivalent. On observe qu'un amortissement entre 1/2 et 1/3 permet d'obtenir un bénéfice de 70 % sur le *changement climatique* au lieu de seulement 50 % avec un amortissement de 1.

Cette étude de sensibilité et dans une moindre mesure l'étude de sensibilité précédente nous montrent qu'il est possible techniquement d'améliorer le procédé de réemploi et notamment de déconstruction (moins de pertes de résistance et un sciage plus efficace) pour minimiser l'impact de cette solution et la rendre intéressante d'un point de vue environnemental. Il faut nuancer ce propos en soulignant que cette première étude exploratoire nécessite un approfondissement en étudiant d'autres types de méthodes de déconstruction et en analysant plusieurs cas réels (en limitant les hypothèses prises).

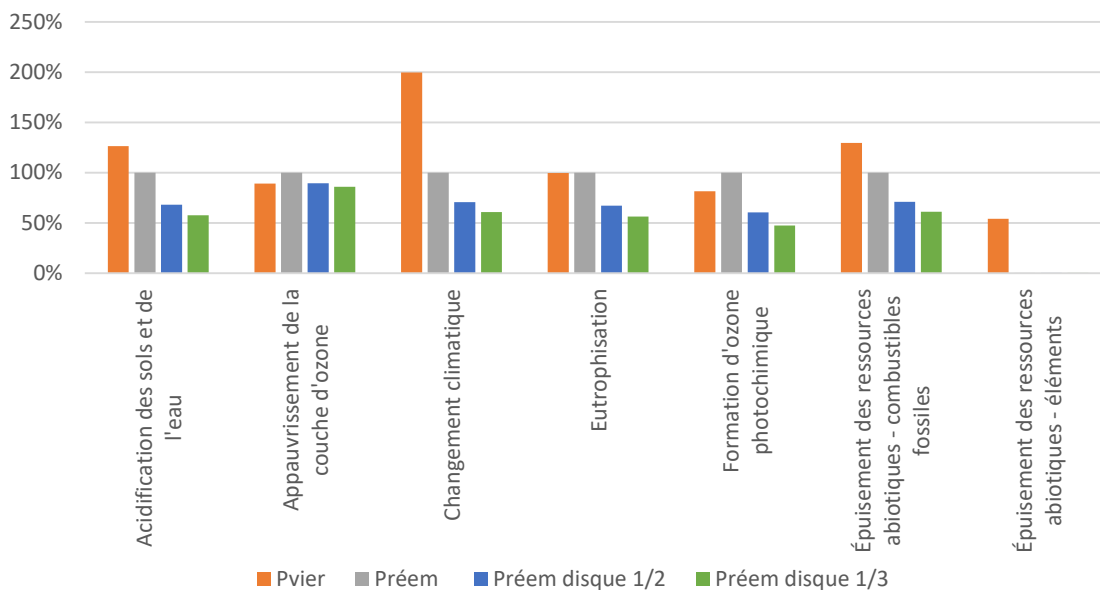


Figure 185 : Étude de sensibilité pour l'Étude 1 sur l'amortissement du disque de sciage pour la poutre de réemploi

4.3.4.3 Méthode des stocks et méthode d'impact évité

Une dernière analyse de sensibilité est conduite sur l'allocation des coproduits. En effet, la démolition d'une poutre permet de récupérer de l'acier et des granulats. Dans le cadre de la poutre de P_{rec} (avec granulats recyclés) dans l'étude 2, nous accumulons un stock de granulats à recycler et d'acier (méthode des stocks). Nous regardons maintenant quelles sont les conséquences si nous prenons en compte un impact évité pour le surplus de granulats recyclés et d'acier (méthode de l'impact évité).

Nous nous plaçons dans le cadre de l'Étude 2. Pour la poutre vierge P_{vier} , nous ne prenons en compte que le surplus d'acier, les déchets inertes étant éliminés en décharge. Pour la poutre en granulats recyclés P_{rec} , nous prenons à la fois le surplus d'acier et le surplus de granulat recyclé ; ce qui nécessite un recyclage des déchets inertes en surplus.

La Figure 186 présente les résultats avec ces deux méthodes. On observe que les conséquences du choix de la méthode sont faibles avec au maximum 8 % d'impact en moins pour l'eutrophisation et P_{rec} avec impact évité à l'exception du dernier indicateur (épuisement des ressources abiotiques – éléments) où l'impact pour P_{rec} devient inférieur de 8 % à la poutre de réemploi $P_{rém}$.

En ouverture, nous pouvons dire qu'il pourrait être intéressant de réfléchir sur l'allocation de l'impact de la déconstruction complète du bâtiment entre les différents déchets dont le second œuvre.

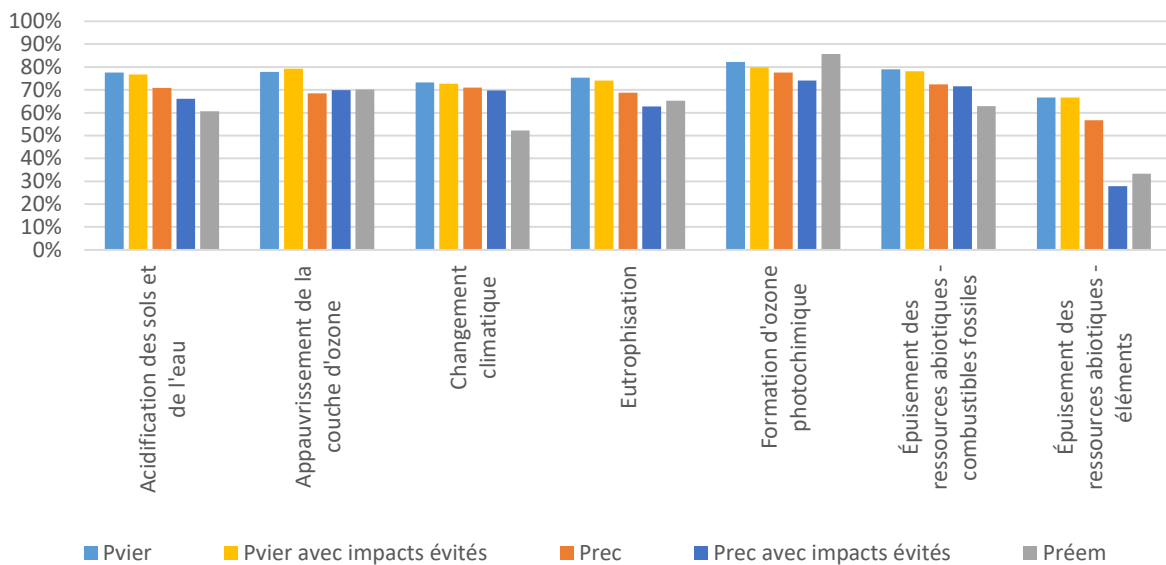


Figure 186 : Analyse de sensibilité sur la prise en compte de l'impact évité par la surproduction d'acier et de granulats recyclés pour les scénarios recyclés et vierge dans le cadre de l'Étude 2

4.4 SYNTHÈSE SUR L'ÉLÉMENT BÉTON ARMÉ

Nous avons analysé le potentiel de réemploi d'une poutre en béton armé dans la section 3.4. Nous avons analysé son impact environnemental dans la section 4.3. Il nous reste donc à connaître la circularité de cet élément pour pouvoir ensuite conclure sur l'intérêt du réemploi des éléments de structure (poutre) en béton armé.

4.4.1 Indicateur de circularité appliqué à la poutre de réemploi

Nous appliquons la méthode de calcul de l'indicateur de circularité modifié, développé dans la section 2.3, sur le cas d'étude de la poutre en béton armé (section 4.1.1).

Nous appliquons tout d'abord l'indicateur à l'élément « poutre en béton armé », pour cela nous énumérons les scénarios de vie probables pour cet élément en prenant pour hypothèse, à l'instar de la section 2.3, que le premier cycle est réalisé à partir de matière neuve (à l'exception des armatures dont l'acier est considéré recyclé et recyclable à l'infini par hypothèse simplificatrice) et que le troisième et dernier cycle mène à la démolition et mise en décharge de la matière. De plus, il est considéré au maximum un seul recyclage du béton en granulat. Enfin, pour l'élément poutre, un recyclage signifie un recyclage en granulat qui est ensuite en partie réutilisé pour la création d'une poutre neuve afin de garder l'iso fonctionnalité de l'élément ; il y a donc ajout de matière vierge. Ce surplus sera pris en compte dans le calcul final. La composition et résistance des éléments suivent les scénarios présentés précédemment en section 4.3.1.7, qui sont eux-mêmes indexés sur les caractéristiques de la poutre de réemploi. Notons que le coefficient de qualité de valorisation choisie est 0,8 (équivalent à une réparation) plutôt que 1 (équivalent à un réemploi parfait) car un procédé de scellement reste nécessaire pour la jonction avec les autres éléments du bâtiment.

Le détail des scénarios est présenté sur la Figure 187.

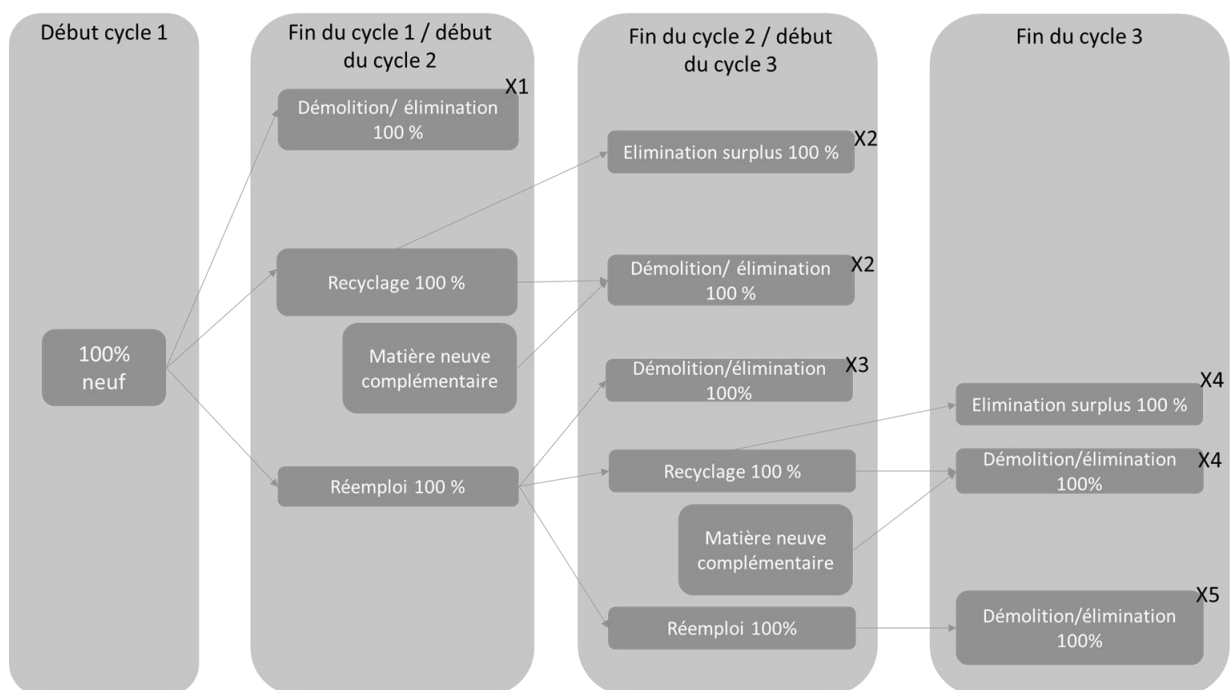


Figure 187 : Scénarios du cycle de la matière pour le cas d'étude sur l'indicateur de circularité

Les résultats du calcul intermédiaire sont présentés dans le Tableau 96 et la Figure 188. Les résultats finaux de l'indicateur sont présentés sur la Figure 189.

On observe sur la Figure 188 – et cela confirme les observations vues dans le Chapitre 2 – que les valeurs de l'indicateur de chaque cycle de la matière ne sont pas exactement proportionnelles à la durée d'usage. En effet, on observe que X3 a un indice kg.an moins fort mais une moyenne pondérée de l'indicateur plus élevée (circularité plus élevée) que X4. Ce résultat est d'autant plus intéressant dans ce cas car on voit que ces deux cycles de la matière consistent en un réemploi du cycle de vie 1 au cycle de vie 2 (Figure 187). Or, l'élément X4 est même recyclé en fin de cycle de vie 2 contrairement à X3. On aurait alors pu s'attendre à une meilleure circularité pour X4 mais le résultat est en fait pénalisé par l'ajout de matière vierge au début du cycle de vie 3 qui, selon nos scénarios, ne sera ni réemployée ni recyclée en fin de cycle de vie 3. Notons que l'élaboration d'autres scénarios de fin de vie en cycle 3 aurait pu éviter cela, mais ces résultats nous montrent qu'il est important d'être vigilant à la quantité de matière vierge incorporée tout au long de la vie de l'objet et à l'amortissement de la fin du cycle de la matière par rapport à l'ensemble du cycle.

La Figure 189 présente la valeur de l'indicateur de circularité (BC modifié) final pour différents scénarios de probabilité d'occurrence des cycles de la matière. Les scénarios correspondent aux mêmes scénarios que ceux utilisés dans le Chapitre 2. Pour rappel, les scénarios sont les suivants :

- **Sc1** : favorisation du recyclage ;
- **Sc2** : favorisation du réemploi ;
- **Sc3** : favorisation de l'allongement de l'usage/durée de vie via l'indice kg.an pour un équivalent de 810 kg de masse vierge.

Sur cette figure, nous observons que l'élément poutre peut obtenir un score de circularité entre 0,30 et 0,46 selon la politique suivie. Le meilleur score est atteint pour une politique de favorisation du réemploi. La valeur absolue est difficile à interpréter du fait du faible nombre de comparaisons possibles. Davantage de cas d'études doivent être étudiés afin de pouvoir créer une échelle de circularité.

Tableau 96 : Valeur intermédiaire de l'indicateur BC pour chaque cycle de l'objet pour chaque cycle de la matière pour le cas d'étude réemploi poutre béton armé

Cycles matière	Indice du cycle matière	Indicateur de circularité (BC)				
		Cycle 1	Cycle 2		Cycle 3	
Cycle de la matière 1	X1	0,02				
Cycle de la matière 2	X2	0,26	0,12	0,25		
Cycle de la matière 3	X3	0,41	0,41		0,2	
Cycle de la matière 4	X4	0,41	0,65		0,13	0,25
Cycle de la matière 5	X5	0,41	0,80		0,41	0,1

Par rapport au cas bois présenté dans le Chapitre 2, où nous obtenions une valeur entre 0,15 et 0,17, nous pouvons dire que le score de la poutre béton est bien meilleure. Cela est lié au fort taux de perte

matière d'un cycle à l'autre considéré pour le cas bois du fait de la non protection de la structure durant la vie de l'objet.

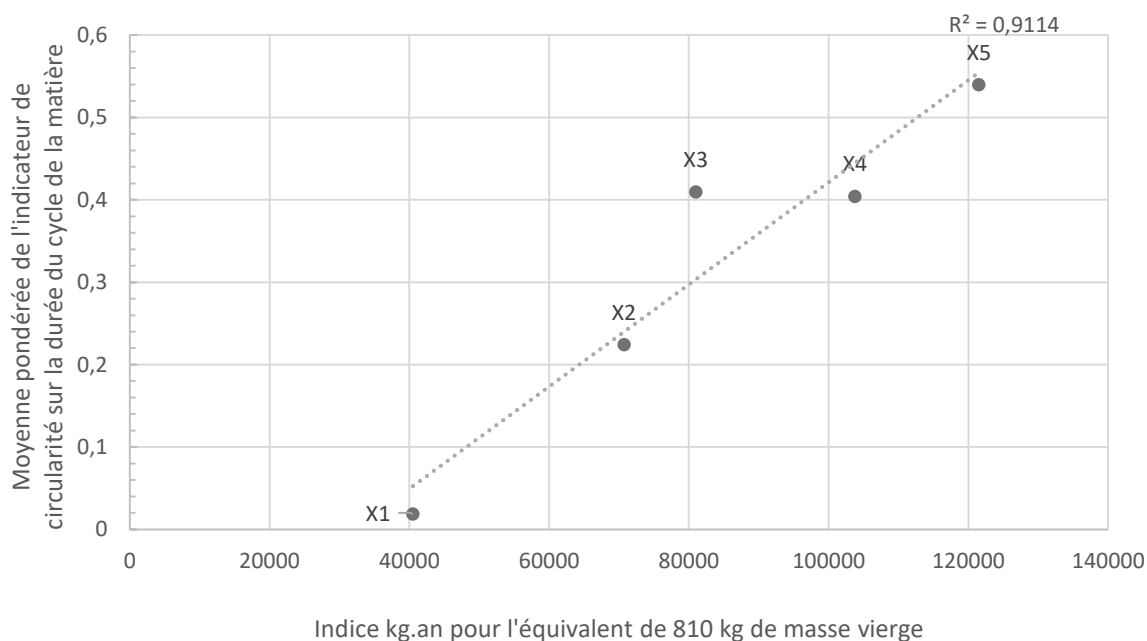


Figure 188 : Moyenne pondérée pour chaque cycle de vie de la matière en fonction de la durée de vie (selon l'indice kg.an pour l'équivalent de 810 kg de masse vierge)

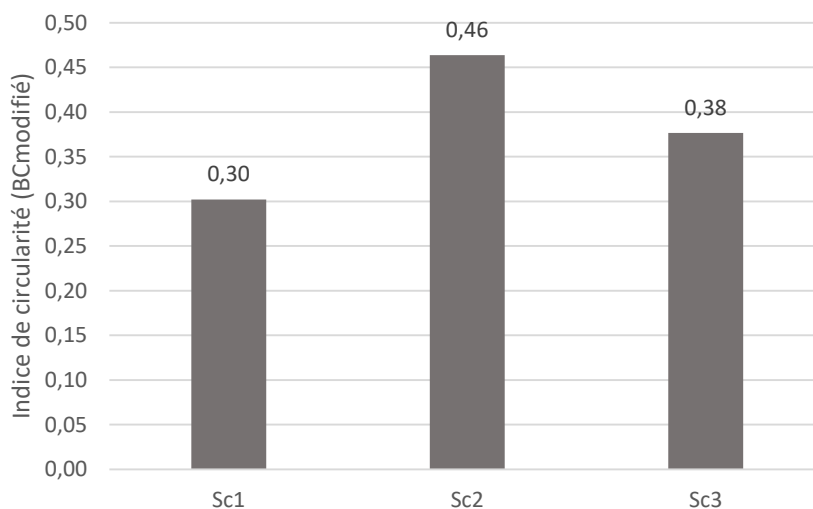


Figure 189 : Valeur de l'indicateur de circularité modifié pour différents scénarios de probabilité d'occurrence appliqués au cas d'étude réemploi poutre béton armé

Nous venons de voir l'indicateur de circularité pour l'élément poutre qui englobe plusieurs scénarios de fin de vie en fonction de leur probabilité d'occurrence. Nous souhaitons maintenant comparer cette valeur de circularité aux valeurs possibles des trois scénarios de vie de la poutre en béton armé dont nous avons réalisé l'ACV en section 4.3. Pour calculer l'indicateur de circularité de chaque scénario il s'agit de supposer qu'il existe un seul cycle de la matière possible pour chaque scénario. Les valeurs intermédiaires de l'indicateur sont présentées dans le Tableau 97 et les valeurs finales sur la Figure 190.

Pour rappel les trois scénarios sont :

- Vierge : la poutre est construite à partir de matériaux vierges pour les trois cycles ;
- Recyclage : les poutres sont recyclées en fin de vie et une partie du granulat est réutilisé dans la poutre du cycle suivant ;
- Réemploi : la poutre est réemployée.

On observe que l'amplitude des résultats entre les trois scénarios est grande (plus de 0,5). La valeur de 0,54 représente la valeur la plus élevée que l'on peut obtenir pour une étude sur trois cycles de vie pour cet élément. La valeur du scénario vierge n'est pas nulle car par défaut nous considérons l'acier d'armature recyclé et recyclable. Avec cette figure, nous voyons clairement l'avantage du scénario réemploi par rapport au recyclage d'un point de vue de la circularité.

Tableau 97 : Valeur intermédiaire de l'indicateur BC pour chacun des trois scénarios de circularité pour le cas d'étude poutre béton armé

Cycles matière	Indicateur de circularité (BC)				
	Cycle 1	Cycle 2		Cycle 3	
Scénario 1	0,02	0,03		0,04	
Scénario 2	0,26	0,36	0,25	0,13	0,25
Scénario 3	0,41	0,80		0,41	

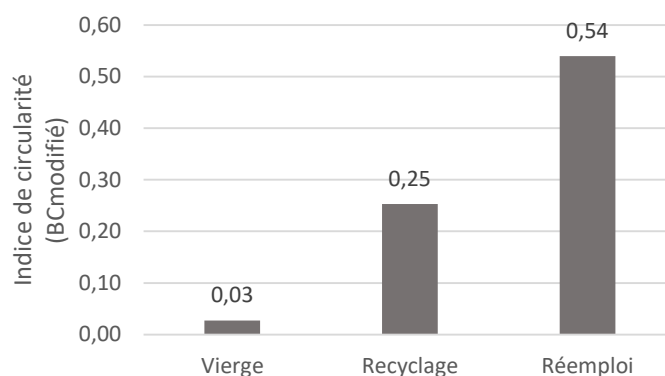


Figure 190 : Valeur de l'indicateur de circularité modifié pour trois scénarios de vie particulier de la poutre en béton armé

4.4.2 Intérêt du réemploi d'une poutre en béton armé

Si l'on combine le score de potentiel de réemploi obtenu dans la section 3.4 et l'indicateur de circularité, nous pouvons faire les observations suivantes. Pour rappel, nous avons à faire au *cas bois* et *cas béton* de la Figure 99 où nous obtenons un score de potentiel de réemploi (seulement pour l'indice des critères externes) respectivement de 0,19 (potentiel fort) et 0,64 (potentiel moyen). Ainsi, nous pouvons dire que le *cas bois* est faiblement circulaire du fait des pertes de matières entre les cycles mais qu'il est très bien réemployable ; il s'agirait donc d'optimiser le processus de réemploi (et de vie en œuvre) pour limiter la perte de matière et ainsi favoriser le réemploi face aux autres méthodes de valorisation pour améliorer la circularité de cet élément. De son côté, le *cas béton* fait face à de fortes contraintes pour être réemployé (potentiel de réemploi modéré) mais si ces contraintes sont

surmontées, l'élément poutre en béton peut faire preuve d'une relativement bonne circularité. Notons toutefois qu'il ne sera jamais possible d'atteindre une circularité parfaite (avec le processus de réemploi présenté dans le présent chapitre en section 4.2.1) car le processus de réemploi nécessite un reconditionnement des jonctions poutres/poteaux ce qui diminue la qualité de valorisation et limite également probablement le nombre de réemploi possible.

Pour le *cas béton* (poutre en béton armé), nous pouvons ajouter à la réflexion les résultats de l'ACV vus en section 4.3. Ceux-ci se montraient encourageants sur plusieurs indicateurs dont le changement climatique avec un gain de 30 % par rapport à un scénario vierge et 25 % par rapport à un scénario de recyclage (Figure 175, pour l'Étude 2 *i.e.* pour trois cycles successifs). Les résultats montraient également qu'il était possible d'améliorer le processus de réemploi. Ainsi, le réemploi d'éléments de structure en béton armé présente un intérêt certain par rapport à l'alternative actuelle consistant soit à une mise en décharge ou à un recyclage en granulat. En effet, ce processus est dans un premier temps techniquement faisable mais nécessite une implication forte de tous les acteurs comme le montre le score du potentiel de réemploi. Le réemploi permet d'améliorer drastiquement la circularité de la matière comme le montre l'indicateur de circularité en obtenant presque une valeur de 0,5. Toutefois, sans amélioration du processus proposé, l'atteinte d'une circularité parfaite est impossible. Dans un dernier temps, le réemploi permet une limitation d'impacts sur de nombreux indicateurs, notamment un impact plus limité sur le changement climatique.

Il est important d'ajouter en perspective la nécessité d'élargir la réflexion à l'échelle d'un bâtiment complet voire d'une ville afin de prendre en compte toute la complexité de ce système, en considérant l'ensemble des flux (énergétiques, fluides, transport...).

4.5 CONCLUSION DU CHAPITRE 4

Actuellement dans le secteur du BTP, le réemploi des structures en béton armé est très peu développé mais apparaît comme une solution intéressante pour contribuer à la réduction de l'impact environnemental d'une structure. Bien que l'enjeu technique soit très fort, la mise en place de protocoles détaillés semble être une possible solution pour faciliter le réemploi de structures. Des recherches sont nécessaires pour favoriser la démarche et c'est dans ce cadre que s'est inscrit ce chapitre.

Ainsi, dans une optique de développement du réemploi, des essais ont été réalisés sur plusieurs poutres en béton armé issues de la déconstruction d'un bâtiment. Nous nous plaçons dans un cas plus spécifique de réemploi structurel.

Avec une résistance résiduelle de minimum 70 % de la résistance initiale (selon les hypothèses de la structure neuve), la déconstruction par sciage de poutre apparaît comme une solution intéressante pour la valorisation des bâtiments déconstruits. Toutefois, afin de fiabiliser et améliorer ces conclusions, une démarche pour le réemploi structurel en béton a été explicitée. Le protocole consiste notamment à réaliser un diagnostic détaillé de la structure (en partie non destructif) pour connaître l'état de la structure. Une méthode de déconstruction, d'élingage et de transport est alors choisie. Différents protocoles de sécurité pour assurer la qualité de ces étapes doivent être suivis. Ces protocoles restent à être construits par expertises et retours d'expériences. Des études supplémentaires doivent être conduites pour augmenter la robustesse des différentes conclusions et valider la démarche de réemploi.

Enfin, une ACV des différentes méthodes de valorisation du béton en étudiant une poutre en béton armé est réalisée. La première étude placée sous le prisme de l'approvisionnement en matière nous montre que la solution de réemploi est moins impactante que les autres solutions pour l'indicateur sur le changement climatique mais qu'il y a un transfert d'impact notamment vers la formation d'ozone photochimique et un transfert de pollution de la phase de construction vers la phase de déconstruction de l'élément. Cependant lorsque l'on s'intéresse au cycle de la matière (en lien avec l'économie circulaire), le scénario de réemploi devient bénéfique (ou équivalent) pour presque tous les indicateurs. Il est également plus favorable que le scénario de recyclage pour plusieurs indicateurs dont le changement climatique (gain de 30 % par rapport au scénario vierge et gain de 25 % par rapport au scénario recyclé). Ceci confirme l'intérêt environnemental du réemploi. Enfin, l'analyse des principales méthodes d'allocation en cas de réemploi nous permet de mettre en parallèle une allocation avec la politique de développement du réemploi choisie. Dans le cadre d'une économie circulaire fortement développée (réemploi développé), la méthode d'allocation Pas-2050 permet de répartir équitablement l'impact sur le cycle de la matière.

Le réemploi des éléments structurels en béton armé est donc une alternative potentielle au recyclage du béton autant du point de vue environnemental que du point de vue de l'économie circulaire. Dans les faits, il s'agit de faire la part des choses et d'appliquer la bonne valorisation au bon élément. L'indicateur de potentiel de réemploi développé dans le Chapitre 3 est l'outil permettant de faire ce choix.

CONCLUSION GENERALE

Résultats

Ce travail de thèse interdisciplinaire avait un double objectif. Le premier, à une échelle globale, consistait à comprendre les enjeux du réemploi et à caractériser le gain de cette solution face aux autres méthodes de valorisation dans un cadre d'économie circulaire. Le second, à l'échelle du matériau béton, matériau et déchet important du secteur du BTP, consistait à proposer une vision détaillée de la fin de vie des structures en béton afin de cadrer le réemploi de ces structures. La thèse a ainsi été construite autour de quatre chapitres. Le premier chapitre s'est intéressé au contexte actuel de la production de déchets liés au BTP et du devenir de ces déchets, avec un focus particulier sur le matériau béton, et à l'évaluation environnementale de la fin de vie des bâtiments, par la méthode ACV. Le deuxième chapitre traite du cycle de la matière et de la mesure de l'économie circulaire. Le troisième s'intéresse au réemploi, sa définition et la détermination du potentiel de réemploi d'un élément. Et le dernier, se focalise sur le réemploi d'élément de structure en béton armé et s'attèle à comprendre les pertes mécaniques et le gain environnemental d'un tel réemploi.

Le premier chapitre nous montre dans un premier temps que le secteur du BTP est responsable de 70 % de la production des déchets français dont principalement des déchets inertes (environ 93 %). Parmi les déchets inertes, 9 % sont issus du béton. Pour le secteur du bâtiment, le gros œuvre est la source principale de ce béton. En parallèle, la production de béton est importante (le béton prêt à l'emploi représente 40 millions de m³ en 2018 en France) et fortement impactante environnementalement. Il existe donc un enjeu fort autour des déchets du BTP et notamment des déchets en béton. Le chapitre montre également que les structures en béton sont démolies en fin de vie. Les déchets inertes sont alors soit mis en décharge ou équivalent (comblement de carrières), soit recyclés en granulats pour servir en sous-couche routière ou en granulats pour le béton. Toutefois, l'ACV (outil multicritères et multi-étapes) du processus de la démolition et du processus de recyclage nous indique que le recyclage n'est pas significativement moins impactant sur plusieurs indicateurs de la NF EN 15804+A1 et de la NF EN15804/CN dont le changement climatique. À contrario, l'économie de matière liée au recyclage n'est pas valorisée dans l'ACV ce qui mène à la réflexion sur l'économie circulaire.

Le deuxième chapitre explore les définitions de l'économie circulaire, la pluralité des paramètres d'études et la mesure de la circularité. L'économie circulaire est, en effet, définie de nombreuses manières. La définition retenue est celle du code de l'environnement et de l'ADEME en se focalisant sur le paramètre ressource/matière. Nous avons mis en évidence par une recherche bibliographique que les principaux indicateurs pour mesurer la circularité d'un élément (dont le plus utilisé est le MCI de la fondation Ellen Mac Arthur) ont deux grandes lacunes. Premièrement, ils ne prennent pas en compte une différenciation entre les qualités de valorisation (réemploi, recyclage...) et donc les pertes de valeur intrinsèque et valeur d'usage. Deuxièmement, les indicateurs se focalisent sur un seul cycle de l'objet peu importe le passif de la matière et le devenir au-delà du premier cycle. Cette façon de présenter l'économie circulaire risque alors de perpétuer une économie linéaire légèrement allongée. Face à ces observations, nous n'avons trouvé que très peu d'indicateurs dont le BC (Building Circularity)

développé par (Zhang et al., 2021a), prenant en compte la qualité de valorisation. Concernant la prise en compte de plusieurs cycles, face à l'absence de recherche, nous avons développé une évolution de l'indicateur BC afin qu'il intègre le cycle complet de la matière et donc les différentes possibilités de vie futures. Basé sur un coefficient de probabilité d'occurrence d'un cycle de la matière, il permet d'obtenir une valeur d'indicateur unique au cycle de la matière représentative des possibilités de valorisation réelles.

Les troisièmes et quatrièmes chapitres réalisent un focus sur la valorisation par le réemploi. Ils constituent un des apports principaux de cette thèse. Nous avons analysé le recyclage du béton dans le premier chapitre, nous nous intéressons ici au réemploi du béton issu de structures, ce qui nous permet de comparer ces deux valorisations. L'apport se situe à deux échelles.

Après une revue de littérature sur le réemploi et la mesure du potentiel de réemploi, le troisième chapitre développe un indicateur original permettant de déterminer le potentiel de réemploi d'un élément du bâtiment *i.e.* d'obtenir un score caractérisant la capacité de l'élément d'étude à pouvoir être réemployé (ou réutilisé) dans la situation étudiée et pour le cadre de réemploi envisagé. L'indicateur de potentiel de réemploi (P_R) est constitué de deux indices prenant en compte plusieurs critères et plusieurs paramètres allant de la résistance résiduelle de l'élément à la santé des travailleurs en passant par les contraintes économiques, environnementales et techniques. Le premier étalonnage et les premières applications de cet indicateur sont concluantes : ils montrent que l'indicateur permet de discrétiser et classer les cas d'étude de manière cohérente. Les résultats de l'indicateur développé permettent de définir une échelle pour caractériser le potentiel en fonction du résultat de l'indicateur. De ces applications, nous voyons notamment l'enjeu de concevoir en amont réemployable par rapport à un élément non conçu pour l'être. Ce chapitre permet de mettre en évidence l'importance du savoir faire et de la qualification des acteurs de la construction.

Dans le quatrième chapitre, nous nous intéressons au réemploi des éléments de structure du bâtiment. Nous commençons par proposer une démarche pour caractériser et réemployer un élément de structure du bâtiment : définition de la géométrie de l'élément, détermination de l'état et des propriétés des matériaux constitutifs, évaluation des capacités techniques dont la résistance résiduelle, adaptation des protocoles de déconstruction, de transport et de stockage. Cette démarche est à réaliser en amont de la dépose et de l'application de l'indicateur du potentiel de réemploi si nécessaire. Après avoir théorisé ces étapes, nous avons réalisé de manière exploratoire une étude sur la détermination de la résistance résiduelle d'une poutre en béton armé issue d'un chantier de déconstruction réel. Des essais de durabilité et de capacité portante ont montré qu'avec une résistance résiduelle de plus de 70 % et une carbonatation faible (au maximum un demi centimètre), la poutre testée présente encore de bonnes caractéristiques, favorables à un réemploi du point de vue technique. Enfin, une ACV à l'échelle de la poutre et du cycle de la matière d'une poutre a été réalisée pour comparer l'impact environnemental d'un scénario de poutre neuve, de poutre recyclée et de poutre réemployée en s'appuyant sur les résistances observées lors des essais. Le scénario de réemploi est significativement (+ de 10 %) plus bénéfique d'un point de vue environnemental que les autres scénarios sur de nombreux indicateurs, dont l'indicateur sur le changement climatique avec des gains de 30 % ou 50 % selon les frontières du système. Le scénario de réemploi est en revanche aussi ou plus impactant sur certains indicateurs (dont la formation d'ozone photochimique) traduisant un report de pollution. Toutefois, ces impacts sont fortement liés au processus de déconstruction où il est actuellement possible d'agir et ainsi réduire les impacts tel que par exemple augmenter l'usage du disque de sciage.

Limites et Perspectives

Le travail réalisé dans cette thèse se veut une réflexion complète autour des gains liés au réemploi d'un point de vue de l'impact environnemental mais également de l'économie circulaire. La thèse présente entre autres plusieurs approches ou notions (cycle de la matière, approche par approvisionnement en matière, démarche de réemploi de structure) et développe également deux indicateurs (indicateur de circularité étendu, indicateur de potentiel de réemploi). Toutefois le travail réalisé est exploratoire, ce qui induit plusieurs limites et perspectives :

- Une nécessité d'approfondissement des concepts de circularité selon le cycle de la matière. L'indicateur de circularité adapté à plusieurs cycles doit être appliqué à un plus grand nombre de cas d'étude afin d'analyser plus en détail son comportement notamment pour des cas multi-matériaux ;
- Une nécessité de mise en application pratique et calibration pratique sur l'indicateur de potentiel de réemploi avec un groupe de travail et d'experts dans le but de confirmer la pertinence des critères sélectionnés pour le calcul de l'indicateur mais également d'affiner l'étalonnage de l'indicateur en adaptant les facteurs de pondération entre les niveaux et entre les critères. Ceci ne peut se faire qu'en appliquant l'indicateur à plus de cas réels ;
- La détermination de la résistance résiduelle doit être effectuée sur un panel plus large d'éléments afin de confirmer les valeurs obtenues. Il serait également intéressant de réaliser des essais sur des éléments d'autres typologies et de méthodes de déconstruction différentes (hydro démolition, piquage...). Il reste également à déterminer un ou plusieurs protocoles de déconstruction, transport, stockage afin de minimiser les pertes de résistance des éléments de structure ;
- Dans le domaine de l'ACV, les champs exploratoires sont vastes. Dans cette thèse, la méthode d'ACV et notamment la méthode d'impact ne sont pas discutées. Il pourrait être intéressant d'étudier les résultats avec d'autres méthodes de calcul d'impacts afin d'affiner les résultats. Par ailleurs, des réflexions sur les allocations ont été conduites. Il serait utile d'explorer la question du chantier comme producteur de nombreux co-matériaux destinés au recyclage et au réemploi ;
- De plus, une mise à l'échelle d'un bâtiment complet est nécessaire afin d'avoir une vision intégrée de ce système complexe. En outre, une analyse plus fine mettant en perspective les résultats avec la réhabilitation des bâtiments serait intéressante afin de mettre en avant l'importance de favoriser la réhabilitation à la déconstruction dans la mesure du possible.

L'objectif à terme est de réussir le transfert des connaissances de la recherche vers l'industrie de la construction concernant les notions de cycle de la matière, de réemploi et d'économie circulaire et d'impliquer les diagnostiqueurs et les assistants à maîtrise d'ouvrage à l'approfondissement de l'indicateur de potentiel de réemploi.

BIBLIOGRAPHIE

- (Abdou, 2017) Abdou, K., 2017. Evaluation des impacts environnementaux du chalutage de fond et de l'aquaculture en Tunisie : approche comparative par les Analyses de Cycle Vie (ACV) Environmental assessment of seabass (*Dicentrarchus labrax*) and seabream (*Sparus aurata*) farming from a life cycle perspective: A case study of a Tunisian aquaculture farm, in *Aquaculture* 471, March 2017 Environmental life cycle assessment of seafood production: A case study of trawler catches in Tunisia, in *Science of The Total Environment* 610-611, January 2018 (These de doctorat). Brest.
- (ADEME, 2020) ADEME, 2020. Bilan national du Recyclage (BNR) 2008 - 2017 et ACV des flux de déchets recyclés (No. rapport final), Expertise. ADEME.
- (ADEME, 2014) ADEME, 2014. Comment réalise-t-on une ACV ? [WWW Document]. ADEME. URL <https://www.ademe.fr/expertises/consommer-autrement/passer-a-laction/dossier/lanalyse-cycle-vie/comment-realise-t-acv> (accessed 8.24.21).
- (ADEME, 2012) ADEME, 2012. Etude sur le prix d'élimination des déchets inertes du BTP (Synthèse).
- (ADEME, 2003) ADEME, 2003. Déconstruire les bâtiments- un nouveau métier au service du développement durable, ADEME Editions. ed, Connaitre pour agir - guides et cahier techniques. Valbonne.
- (ADEME, n.d.) ADEME, n.d. Les filières à Responsabilité élargie des producteurs (REP) [WWW Document]. ADEME. URL <https://www.ademe.fr/expertises/dechets/elements-contexte/filieres-a-responsabilite-elargie-producteurs-rep> (accessed 9.25.21).
- (ADEME and Laurent, 2016) ADEME, Laurent, C., 2016. Déchets du bâtiment, ADEME. ed, Fiche technique ADEME.
- (ADEME et al., 2016) ADEME, RDC Environment, éco BTP, I Care & Consult, Coppens, M., Jayr, E., Burre-Espagnou, M., Neveu, G., 2016. Identification des freins et des leviers au réemploi de produits et matériaux de construction - synthèse, ADEME. ed.
- (AFNOR, 2019) AFNOR, 2019. NF EN 15804+A2 - Octobre 2019 [WWW Document]. URL <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-15804a2/contribution-des-ouvrages-de-construction-au-developpement-durable-declarations-environnementales-sur-les-produits-regles-re/article/935172/fa198121> (accessed 8.24.21).
- (AFNOR, 2016) AFNOR, 2016. FD CEN/TR 16970 - Novembre 2016 [WWW Document]. URL <https://www.boutique.afnor.org/norme/fd-cen-tr-16970/contribution-des-ouvrages-de-construction-au-developpement-durable-lignes-directrices-pour-la-mise-en-application-de-l-en-15804/article/872388/fa187315> (accessed 8.24.21).
- (AFNOR, 2012) AFNOR, 2012. NF EN 15978 - Mai 2012 [WWW Document]. URL <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-15978/contribution-des-ouvrages-de-construction-au-developpement-durable-evaluation-de-la-performance-environnementale-des-batiments-m/article/714559/fa160273> (accessed 8.24.21).

- (Agamuthu et al., 2009) Agamuthu, P., Khidzir, K.M., Hamid, F.S., 2009. Drivers of sustainable waste management in Asia. *Waste Manag. Res.* 27, 625–633. <https://doi.org/10.1177/0734242X09103191>
- (Agrela et al., 2013) Agrela, F., Alaejos, P., De Juan, M.S., 2013. 12 - Properties of concrete with recycled aggregates, in: Pacheco-Torgal, F., Tam, V.W.Y., Labrincha, J.A., Ding, Y., de Brito, J. (Eds.), *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Woodhead Publishing, pp. 304–329. <https://doi.org/10.1533/9780857096906.2.304>
- (Ajdukiewicz and Kliszczewicz, 2007) Ajdukiewicz, A.B., Kliszczewicz, A.T., 2007. Comparative Tests of Beams and Columns Made of Recycled Aggregate Concrete and Natural Aggregate Concrete. *J. Adv. Concr. Technol.* 5, 259–273. <https://doi.org/10.3151/jact.5.259>
- (Akanbi et al., 2018a) Akanbi, L., Oyedele, L., Akinade, O., Ajayi, A., Delgado, M.D., Bilal, M., Bello, S., 2018. Salvaging building materials in a circular economy: A BIM-based whole-life performance estimator. *Resour. Conserv. Recycl.* 129, 175–186. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.026>
- (Akanbi et al., 2018b) Akanbi, L., Oyedele, L., Davila Delgado, J.M., Bilal, M., Akinade, O., Ajayi, A., Mohammed-Yakub, N., 2018. Reusability analytics tool for end-of-life assessment of building materials in a circular economy. *World J. Sci. Technol. Sustain. Dev.* 16, 40–55. <https://doi.org/10.1108/WJSTSD-05-2018-0041>
- (Akbarnezhad and Ong, 2013) Akbarnezhad, A., Ong, K.C.G., 2013. 10 - Separation processes to improve the quality of recycled concrete aggregates (RCA), in: Pacheco-Torgal, F., Tam, V.W.Y., Labrincha, J.A., Ding, Y., de Brito, J. (Eds.), *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Woodhead Publishing, pp. 246–269. <https://doi.org/10.1533/9780857096906.2.246>
- (Alliance HQE-GBC and AIMCC, n.d.) Alliance HQE-GBC, AIMCC, n.d. INIES – Les données environnementales et sanitaires de référence pour le bâtiment. URL <https://www.inies.fr/accueil/> (accessed 9.1.21).
- (Almohandiss, n.d.) Almohandiss, n.d. *Beton arme cours complet*.
- (Andrade and Alonso, 2004) Andrade, C., Alonso, C., 2004. Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. *Mater. Struct.* 37, 623–643. <https://doi.org/10.1007/BF02483292>
- (Androsevic et al., 2019) Androsevic, R., Durmisevic, E., Brocato, M., 2019. Measuring reuse potential and waste creation of wooden façades. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 225, 012017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012017>
- (Appendino et al., 2018) Appendino, F., Roux, C., Peuportier, B., 2018. *Projet Pulse Paris, livrable 1 : état de l’art et revue des choix méthodologiques*, Expertise. ADEME.
- (Arvalis, 2020) Arvalis, 2020. *GES’TIM+ : la référence méthodologique pour l’évaluation de l’impact des activités agricoles sur l’effet de serre, la préservation des ressources énergétiques et la qualité de l’air (No. Guide GES’TIM+)*. ADEME.
- (Aumard and Épaud, 2019) Aumard, S., Épaud, F., 2019. *La toiture en remploi : charpente et couvertures de la cathédrale Saint-Pierre de Lisieux*. *Archéologie Médiév.* <https://doi.org/10.4000/archeomed.23280>
- (Aye et al., 2012) Aye, L., Ngo, T., Crawford, R.H., Gammampila, R., Mendis, P., 2012. Life cycle greenhouse gas emissions and energy analysis of prefabricated reusable building modules. *Energy Build.* 47, 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.049>

- (Ben Fraj and Idir, 2017) Ben Fraj, A., Idir, R., 2017. Concrete based on recycled aggregates – Recycling and environmental analysis: A case study of paris’ region. *Constr. Build. Mater.* 157, 952–964. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.059>
- (Benachio et al., 2020) Benachio, G.L.F., Freitas, M. do C.D., Tavares, S.F., 2020. Circular economy in the construction industry: A systematic literature review. *J. Clean. Prod.* 260, 121046. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121046>
- (Benoît et al., 2010) Benoît, C., Norris, G.A., Valdivia, S., Citroth, A., Moberg, Å., Bos, U., Prakash, S., Ugaya, C., Beck, T., 2010. The Guidelines for Social Life Cycle Assessment of products: Just in time! *Int. J. Life Cycle Assess.* 15, 156–163.
- (Benoit, 2018) Benoit, J., 2018. REPAR #2 - le réemploi passerelle entre architecture et industrie - résumé scientifique., Bellastock. ed.
- (Benoit et al., 2018) Benoit, J., Saurel, G., Billet, M., Laurenceau, S., Bougrain, F., 2018. REPAR #2 - le réemploi passerelle entre architecture et industrie, Bellastock, CSTB, ADEME. ed.
- (Bernardi and Dessales, 2017) Bernardi, P., Dessales, H., 2017. Les réemplois en architecture, entre Antiquité et Moyen Âge : introduction à l’école d’été (Rome, 19-23 septembre 2016). *Mélanges L’École Fr. Rome - Moyen Âge.* <https://doi.org/10.4000/mefrm.3550>
- (Bertin, 2020) Bertin, I., 2020. Conception des bâtiments assurant leur réversibilité, leur déconstruction et leur réemploi, méthodologie de suivi et évaluation environnementale sur les cycles de vie (These de doctorat). Paris Est.
- (Bertin et al., 2019) Bertin, I., Jaeger, J.-M., LE ROY, R., 2019. Construction, déconstruction, réemploi de la structure : le numérique au service de l’économie circulaire, in: *GC’2019 , Le Génie Civil Au Coeur Des Mutations Technologiques et Numériques, Le BIM : Un Outil Multiservice.* Cachan, France, p. 11p.
- (Bertin et al., 2022) Bertin, I., Saadé, M., Le Roy, R., Jaeger, J.-M., Feraille, A., 2022. Environmental impacts of Design for Reuse practices in the building sector. *J. Clean. Prod.* 349, 131228. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131228>
- (Boissard, 2020) Boissard, E., 2020. Jeu de Tétris entre réemploi, grand appareil et ornementation : les élévations romanes de la cathédrale de Lyon, in: *Baud, A., Charpentier, G. (Eds.), Chantiers et Matériaux de Construction : De l’Antiquité à La Révolution Industrielle En Orient et En Occident, Archéologie(s).* MOM Éditions, Lyon, pp. 95–110.
- (Bourg, 2018) Bourg, D., 2018. De l’économie circulaire à l’économie permacirculaire. *Ann. Mines - Responsab. Environ.* 89, 30–33. <https://doi.org/DOI : 10.3917/re1.089.0030>.
- (Bouteiller et al., 2012) Bouteiller, V., Toque, C., Cury, A., Cherrier, J.-F., Diday, E., Cremona, C., 2012. Non-destructive electrochemical characterizations of reinforced concrete corrosion: basic and symbolic data analysis 30, 47–62. <https://doi.org/10.1515/corrrev-2011-0029>
- (Bouzidi, 2021) Bouzidi, N., 2021. Techniques de tri des déchets, Université A/Mira-Bejaia. ed.
- (Brachet and Mace, 2020) Brachet, L., Mace, E., 2020. Economie circulaire des bâtiments - contexte local, allongement du cycle de la matière. *Fondation Bâtiment Energie.*
- (Bracquené et al., 2020) Bracquené, E., Dewulf, W., Duflou, J.R., 2020. Measuring the performance of more circular complex product supply chains. *Resour. Conserv. Recycl.* 154, 104608. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104608>
- (Brander, M et al., 2008) Brander, M, Tipper, R, Hutchison, C, Davis, G, 2008. Technical Paper | Consequential and Attributional Approaches to LCA: a Guide to Policy Makers with Specific Reference to Greenhouse Gas LCA of Biofuels, Ecometrica press. ed.

- (Braymand et al., 2018) Braymand, S., Feraille, A., Serres, N., Idir, R., 2018. Analyse du cycle de vie du béton de GBR, in: *Le béton recyclé*. Marne la Vallée.
- (Breyse and Abraham, 2005) Breyse, D., Abraham, O., 2005. *Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton* > Notre librairie : Presses des Ponts, Presse de l'école nationale des ponts et chaussées. ed, AFGC, COFREND. Paris.
- (Brière, 2016) Brière, R., 2016. *Etude ACV des chantiers de démolition en vue de la préservation des ressources : focus sur les procédés de transport et de décharge* (These de doctorat). Paris Est.
- (Bulle et al., 2019) Bulle, C., Margni, M., Patouillard, L., Boulay, A.-M., Bourgault, G., De Bruille, V., Cao, V., Hauschild, M., Henderson, A., Humbert, S., Kashef-Haghighi, S., Kounina, A., Laurent, A., Levasseur, A., Liard, G., Rosenbaum, R.K., Roy, P.-O., Shaked, S., Fantke, P., Jolliet, O., 2019. IMPACT World+: a globally regionalized life cycle impact assessment method. *Int. J. Life Cycle Assess.* 24, 1653–1674. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01583-0>
- (Buyle et al., 2013) Buyle, M., Braet, J., Audenaert, A., 2013. Life cycle assessment in the construction sector: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 26, 379–388.
- (Buyle et al., 2019) Buyle, M., Galle, W., Debacker, W., Audenaert, A., 2019. Sustainability assessment of circular building alternatives: Consequential LCA and LCC for internal wall assemblies as a case study in a Belgian context. *J. Clean. Prod.* 218, 141–156. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.306>
- (Cabeza et al., 2014) Cabeza, L.F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., Castell, A., 2014. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 29, 394–416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>
- (Calzolari et al., 2022) Calzolari, T., Genovese, A., Brint, A., 2022. Circular Economy indicators for supply chains: A systematic literature review. *Environ. Sustain. Indic.* 13, 100160. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2021.100160>
- (Campos da Cruz Rios et al., 2018) Campos da Cruz Rios, F., Grau, D., Chong, O., Grau, D., Chong, O., Parrish, K., Arizona State University, 2018. *Beyond Recycling: Design for Disassembly, Reuse, and Circular Economy in the Built Environment*, in: ASU Electronic Theses and Dissertations. Arizona State University.
- (Carlos Hernandez and Diaz Jimenez, 2021) Carlos Hernandez, S., Diaz Jimenez, L., 2021. Life Cycle Assessment of a Biofertilizer Production Process from Waste Fats. *Dyna* 96. <https://doi.org/10.6036/9874>
- (CEREMA, 2020) CEREMA, 2020. *Analyse des risques appliquée aux murs en maçonnerie*, CEREMA. ed, Références. Bron.
- (CGDD and SOeS, 2010) CGDD, SOeS, 2010. 254 millions de tonnes de déchets produits par l'activité de construction en France en 2008 | Données et études statistiques. Chiffres et statistiques.
- (Choppin and Delon, 2014) Choppin, J., Delon, N., 2014. *Matière grise, Pavillon de l'arsenal*. ed, Encore Heureux. Paris.
- (Christmann, 2016) Christmann, P., 2016. Economic development and the growing uses of metals. *Ann. Mines - Responsab. Environ.* 82, 8–15.
- (Ciroth et al., 2016) Giroth, A., Muller, S., Weidema, B., Lesage, P., 2016. Empirically based uncertainty factors for the pedigree matrix in ecoinvent. *Int. J. Life Cycle Assess.* 21, 1338–1348. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0670-5>
- (Citherlet and Defaux, 2007) Citherlet, S., Defaux, T., 2007. Energy and environmental comparison of three variants of a family house during its whole life span. *Build. Environ.* 42, 591–598. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.09.025>

- (Coelho and De Brito, 2013) Coelho, A., De Brito, J., 2013. 7 - Conventional demolition versus deconstruction techniques in managing construction and demolition waste (CDW), in: Pacheco-Torgal, F., Tam, V.W.Y., Labrincha, J.A., Ding, Y., de Brito, J. (Eds.), Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Woodhead Publishing, pp. 141–185. <https://doi.org/10.1533/9780857096906.2.141>
- (Coelho and De Brito, 2013) Coelho, A., De Brito, J., 2013. 9 - Preparation of concrete aggregates from construction and demolition waste (CDW), in: Pacheco-Torgal, F., Tam, V.W.Y., Labrincha, J.A., Ding, Y., de Brito, J. (Eds.), Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Woodhead Publishing, pp. 210–245. <https://doi.org/10.1533/9780857096906.2.210>
- (Colas, 2017) Colas, A.-S., 2017. Étude des ouvrages en maçonnerie du génie civil : aptitude au service, sécurité et performances environnementales (Habilitation à diriger des recherches). Université Paris-Est.
- (Cottafava and Ritzen, 2021) Cottafava, D., Ritzen, M., 2021. Circularity indicator for residential buildings: Addressing the gap between embodied impacts and design aspects. Resour. Conserv. Recycl. 164, 105120. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105120>
- (Crawford et al., 2017) Crawford, R.H., Mathur, D., Gerritsen, R., 2017. Barriers to Improving the Environmental Performance of Construction Waste Management in Remote Communities. Procedia Eng., Creative Construction Conference 2017, CCC 2017, 19-22 June 2017, Primosten, Croatia 196, 830–837. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.014>
- (Cremona et al., 2011) Cremona, C., Adélaïde, L., Berthaud, Y., Bouteiller, V., L’Hostis, V., Poyet, S., Torrenti, J.-M., 2011. Probabilistic and predictive performance-based approach for assessing reinforced concrete structures lifetime: The applet project. EPJ Web Conf. 12, 01004. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20111201004>
- (CtoCPII, 2020) CtoCPII, 2020. Guidance for the Cradle to Cradle Certified™ Product Standard, Version 3.1. Cradle to Cradle Products Innovation Institute.
- (Dandres, 2012) Dandres, T., 2012. Développement d’une méthode d’analyse du cycle de vie conséquente prospective macroscopique : évaluation d’une politique de bioénergie dans l’union européenne à l’horizon 2025. undefined.
- (Dautremont et al., 2018) Dautremont, C., Dagnelie, C., Jancart, S., 2018. Le BIM6D comme levier pour une architecture circulaire. SHS Web Conf. 47, 01005. <https://doi.org/10.1051/shsconf/20184701005>
- (de Bruijn et al., 2002) de Bruijn, H., van Duin, R., Huijbregts, M.A.J., Guinee, J.B., Gorree, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., van Oers, L., Wegener Sleswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, H.A., 2002. Impact assessment, in: de Bruijn, H., van Duin, R., Huijbregts, M.A.J., Guinee, J.B., Gorree, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., van Oers, L., Wegener Sleswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, H.A. (Eds.), Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards, Eco-Efficiency in Industry and Science. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 161–388. https://doi.org/10.1007/0-306-48055-7_14
- (de Larrard and Colina, 2018) de Larrard, F., Colina, H., 2018. Le béton recyclé, Ifsttar. ed. Marne la Vallée.
- (De Wolf et al., 2020) De Wolf, C., Hoxha, E., Fivet, C., 2020. Comparison of environmental assessment methods when reusing building components: A case study. Sustain. Cities Soc. 61, 102322. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102322>

- (Deloitte and BRE, 2015) Deloitte, BRE, 2015. Construction and Demolition Waste management in France (No. V2).
- (Deodonne, 2015) Deodonne, K., 2015. Etudes des caractéristiques physico-chimiques de bétons de granulats recyclés et de leur impact environnemental (These de doctorat). Strasbourg.
- (Desbois et al., 2020) Desbois, T., Yazoghli-Marzouk, O., Feraille, A., 2020. LCA of construction and demolition waste recycling: Case study of production phase, in: Pavement, Roadway, and Bridge Life Cycle Assessment 2020. CRC Press.
- (Deshayes, 2012) Deshayes, P., 2012. Le secteur du bâtiment face aux enjeux du développement durable : logiques d'innovation et/ou problématiques du changement. *Innovations* 37, 219–236.
- (Devènes et al., 2022) Devènes, J., Brütting, J., Küpfer, C., Bastien-Masse, M., Fivet, C., 2022. Re:Crete – Reuse of concrete blocks from cast-in-place building to arch footbridge. *Structures* 43, 1854–1867. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.07.012>
- (Deweerd and Mertens, 2020) Deweerd, M., Mertens, M., 2020. Un guide pour l'identification du potentiel de réemploi des produits de construction (version préliminaire). Interreg North-West Europe.
- (Dixit et al., 2010) Dixit, M.K., Fernández-Solís, J.L., Lavy, S., Culp, C.H., 2010. Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review. *Energy Build.* 42, 1238–1247. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.02.016>
- (Douthe et al., 2018) Douthe, C., Mesnil, R., Baverel, O., Gobin, T., Tellier, X., Ducoulombier, N., Montagne, N., 2018. Design and construction of a shell-nexorade hybrid timber structure. Presented at the IASS Annual Symposium 2018 Creativity in Structural Design (IASS 2018).
- (Dräger et al., 2022) Dräger, P., Letmathe, P., Reinhart, L., Robineck, F., 2022. Measuring circularity: evaluation of the circularity of construction products using the ÖKOBAUDAT database. *Environ. Sci. Eur.* 34, 13. <https://doi.org/10.1186/s12302-022-00589-0>
- (Durmisevic, 2006) Durmisevic, E., 2006. Transformable building structures: Design for disassembly as a way to introduce sustainable engineering to building design & construction.
- (Durmisevic et al., 2017) Durmisevic, E., Beurskens, P.R., Adrosevic, R., Westerdijk, R., 2017. Systemic view on reuse potential of building elements, components and systems: comprehensive framework for assessing reuse potential of building elements, in: Hiser International Conference: Advances in Recycling and Management of Construction and Demolition Waste. Presented at the HISER International Conference 2017: Advances in Recycling and Management of Construction and Demolition Waste, pp. 275–280.
- (Ekvall et al., 2016) Ekvall, T., Azapagic, A., Finnveden, G., Rydberg, T., Weidema, B.P., Zamagni, A., 2016. Attributional and consequential LCA in the ILCD handbook. *Int. J. Life Cycle Assess.* 21, 293–296. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-1026-0>
- (El Hagggar, 2007) El Hagggar, S., 2007. Sustainable Industrial Design and Waste Management - 1st Edition, Academic press. ed.
- (Elias-Ozkan, 2014) Elias-Ozkan, S.T., 2014. Demolition Versus Deconstruction: Impacts of Fenestration Disposal in Building Renovation Projects. *Open House Int.* 39, 48–55. <https://doi.org/10.1108/OHI-01-2014-B0006>
- (EPA, 2010) EPA, 2010. Building Deconstruction and design for reuse (No. FY2002), OSWER Innovation Pilot Results Fact Sheet -. United States Environmental Protection Agency.
- (EUROCODE 2, 2005) EUROCODE 2, 2005. Calcul des structures en béton Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments. (NF EN 1992-1-1). AFNOR.

- (European Commission, 2015) European Commission, 2015. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2008/98/EC on waste.
- (Fageria et al., 2006) Fageria, N.K., Baligar, V.C., Clark, R., 2006. Physiology of Crop Production. CRC Press, Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/9781482277807>
- (FBE, 2020) FBE, 2020. méthodologie de diagnostic et d'évaluation des performances pour le réemploi de briques. Fondation Bâtiment Energie.
- (Fischedick et al., 2014) Fischedick, M., Roy, J., Abdel-Aziz, A., Acquaye, A., Allwood, J., Ceron, J.-P., Geng, Y., Kheshgi, H., Lanza, A., Perczyk, D., Price, L., Santalla, E., Sheinbaum, C., Tanaka, K., 2014. Industry, in: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change - [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (Eds.)], IPCC. Cambridge and New York.
- (Fleury and Mouterde, 2019) Fleury, François, Mouterde, R., 2019. Comprendre simplement- la résistance des matériaux, 3^{ème} édition. ed. Editions Le Moniteur.
- (FNADE, 2012) FNADE, 2012. Etat des lieux des centres de tri des déchets non dangereux des activités économiques en France- données 2010 (No. rapport final). ADEME.
- (Fonseca i Casas and Fonseca i Casas, 2017) Fonseca i Casas, P., Fonseca i Casas, A., 2017. Using Specification and Description Language for Life Cycle Assessment in Buildings. Sustainability 9, 1004. <https://doi.org/10.3390/su9061004>
- (Frischknecht et al., 2007) Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.-J., Bauer, C., Gabor Doka, Roberto Dones, Roland Hischier, Stefanie Hellweg, Sébastien Humbert, Thomas Köllner, Yves Loerincik, Manuele Margni, Thomas Nemecek, 2007. Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods Data v2.0 (2007), Swiss Center for Life Cycle Inventories. ed. Dübendorf, Suisse.
- (Frischknecht et al., 2005) Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.-J., Doka, G., Dones, R., Heck, T., Hellweg, S., Hischier, R., Nemecek, T., Rebitzer, G., Spielmann, M., 2005. The ecoinvent Database: Overview and Methodological Framework (7 pp). Int. J. Life Cycle Assess. 10, 3–9. <https://doi.org/10.1065/lca2004.10.181.1>
- (Frischknecht et al., 2015) Frischknecht, R., Wyss, F., Büsser Knöpfel, S., Lützkendorf, T., Balouktsi, M., 2015. Cumulative energy demand in LCA: the energy harvested approach. Int. J. Life Cycle Assess. 20, 957–969. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0897-4>
- (Frossard, 2020) Frossard, M., 2020. Optimisation robuste multicritère pour l'écoconception de bâtiments zéro-énergie (These de doctorat). Université Paris sciences et lettres.
- ("GaBi Databases," n.d.) n.d. URL <https://gabi.sphera.com/france/bases-de-donnees-acv/gabi-databases/> (accessed 9.1.21).
- (Gala, 2015) Gala, A.B., 2015. DOCTORAL DISSERTATION: METHODOLOGICAL ADVANCEMENTS IN LCA OF WASTE MANAGEMENT SYSTEMS. Universitat Autònoma de Barcelona.
- (Geissdoerfer et al., 2017) Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N.M.P., Hultink, E.J., 2017. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? J. Clean. Prod. 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- (Getas, 2016) Getas, F., 2016. Recommandations sur la Mise en Place d'une Economie Circulaire Autour des Chantiers de Déconstruction par une Ap-proche d'Analyse de Cycle de Vie (masters). Université de Technologie de Troyes, Troyes.

- (Ghyoot, 2017) Ghyoot, M., 2017. Objectif réemploi Pistes d'action pour développer le secteur du réemploi des éléments de construction en Région de Bruxelles-Capitale (projet de recherche BBSM). Rotor, Bruxelles.
- (Ghyoot et al., 2018) Ghyoot, M., Devlieger, L., Billet, L., Warnier, A., 2018. Déconstruction et réemploi - Comment faire circuler les éléments de construction, Rotor. ed, (EAN13 : 9782889152391). Presse polytechnique et Universitaire Romande, Lausanne.
- (Glias, 2013) Glias, A., 2013. The Donor Skelet: Designing with reused structural concrete elements (masters). TU Delft.
- (Grosse, 2011) Grosse, F., 2011. Quasi-Circular Growth: a Pragmatic Approach to Sustainability for Non-Renewable Material Resources. SAPIENS Surv. Perspect. Integrating Environ. Soc.
- (Grosse, 2010a) Grosse, F., 2010. Is recycling “part of the solution”? The role of recycling in an expanding society and a world of finite resources. SAPIENS Surv. Perspect. Integrating Environ. Soc.
- (Grosse, 2010b) Grosse, F., 2010. Le découplage croissance / matières premières. De l'économie circulaire à l'économie de la fonctionnalité : vertus et limites du recyclage. Futuribles 99–124.
- (Guinée, 2001) Guinée, J., 2001. Handbook on life cycle assessment — operational guide to the ISO standards. Int. J. Life Cycle Assess. 6, 255–255. <https://doi.org/10.1007/BF02978784>
- (Habert et al., 2010) Habert, G., Billard, C., Rossi, P., Chen, C., Roussel, N., 2010. Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives. Cem. Concr. Res. 40, 820–826. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.09.031>
- (Heisel and Rau-Oberhuber, 2020) Heisel, F., Rau-Oberhuber, S., 2020. Calculation and evaluation of circularity indicators for the built environment using the case studies of UMAR and Madaster. J. Clean. Prod. 243, 118482. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118482>
- (Hoarau, 2017) Hoarau, C., 2017. Contribution à l'analyse de la qualité environnementale d'un projet d'aménagement périurbain/rural en milieu tropical : méthodes et outils d'aide à la décision (phdthesis). Université de la Réunion.
- (HOP, 2022) HOP, 2022. Manifeste pour une société sans obsolescence programmée -les 20 propositions de l'HOP. Halte à l'Obsolescence Programmée.
- (Hossain and Ng, 2018) Hossain, Md.U., Ng, S.T., 2018. Critical consideration of buildings' environmental impact assessment towards adoption of circular economy: An analytical review. J. Clean. Prod. 205, 763–780. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.120>
- (Hoxha, 2015) Hoxha, E., 2015. Amélioration de la fiabilité des évaluations environnementales des bâtiments (phdthesis). Université Paris-Est.
- (Hoxha and Fivet, 2018) Environmental Benefits when Reusing Load-Bearing Components in Office Buildings: A Case Study, 2018. , in: Proceedings of the PLEA 2018 Conference. Presented at the 34th PLEA Conference, “Smart & Healthy within the 2 degree limit.”
- (Hoxha et al., 2021) Hoxha, E., Maierhofer, D., Saade, M.R.M., Passer, A., 2021. Influence of technical and electrical equipment in life cycle assessments of buildings: case of a laboratory and research building. Int. J. Life Cycle Assess. 26, 852–863. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01919-9>
- (Huijbregts et al., 2017) Huijbregts, M.A.J., Steinmann, Z.J.N., Elshout, P.M.F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M.D.M., Hollander, A., Zijp, M., Zelm, R. van, 2017. ReCiPe (A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization No. RIVM Report 2016-0104a). National Institute for Public Health and the Environment, The Netherlands.

- (Huuhka and Hakanen, 2015) Huuhka, S., Hakanen, J.H., 2015. POTENTIAL AND BARRIERS FOR REUSING LOAD-BEARING BUILDING COMPONENTS IN FINLAND. *Int J. Hous. Sci.* 39, 215–224.
- (Huuhka et al., 2015) Huuhka, S., Kaasalainen, T., Hakanen, J.H., Lahdensivu, J., 2015. Reusing concrete panels from buildings for building: Potential in Finnish 1970s mass housing. *Resour. Conserv. Recycl.* 101, 105–121. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.05.017>
- (Huuhka et al., 2019) Huuhka, S., Naber, N., Asam, C., Caldenby, C., 2019. Architectural potential of deconstruction and reuse in declining mass housing estates. *Nord. J. Archit. Res.* 31, 139–179.
- (IEA, 2018) IEA, 2018. Global Status Report: Towards a Zero-Emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector.
- (Inaba and Itsubo, 2018) Inaba, A., Itsubo, N., 2018. Preface. *Int. J. Life Cycle Assess.* 23, 2271–2275. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1545-6>
- (Inddigo et al., 2019) Inddigo, Enotiko, Enckell Avocats, 2019. Etude de scénarii pour la mise en place d'une organisation permettant une gestion efficace des déchets du bâtiment dans le cadre d'une économie circulaire - synthèse.
- (Infociments, 2020) Infociments, 2020. La norme béton NF EN 206/CN : les granulats recyclés. Infociments.
- (International Organization of standardization, 2006a) International Organization of standardization, 2006. ISO 14040:2006 [WWW Document]. ISO. URL <https://www.iso.org/cms/render/live/fr/sites/isoorg/contents/data/standard/03/74/37456.html> (accessed 8.23.21).
- (International Organization of standardization, 2006b) International Organization of standardization, 2006. ISO 14044:2006 [WWW Document]. ISO. URL <https://www.iso.org/cms/render/live/fr/sites/isoorg/contents/data/standard/03/84/38498.html> (accessed 8.23.21).
- (IPCC, 2021) IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Full report). Cambridge University Press.
- (Ipsen et al., 2021) Ipsen, K.L., Pizzol, M., Birkved, M., Amor, B., 2021. How Lack of Knowledge and Tools Hinders the Eco-Design of Buildings—A Systematic Review. *Urban Sci.* 5, 20. <https://doi.org/10.3390/urbansci5010020>
- (IREX, n.d.) IREX, n.d. PN RECYBETON [WWW Document]. RECYBETON. URL <https://www.pnrecybeton.fr/> (accessed 9.25.21).
- (Itsubo and Inaba, 2003) Itsubo, N., Inaba, A., 2003. A new LCIA method: LIME has been completed. *Int. J. Life Cycle Assess.* 8, 305–305. <https://doi.org/10.1007/BF02978923>
- (Joensuu et al., 2022) Joensuu, T., Leino, R., Heinonen, J., Saari, A., 2022. Developing Buildings' Life Cycle Assessment in Circular Economy—Comparing methods for assessing carbon footprint of reusable components. *Sustain. Cities Soc.* 77, 103499. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103499>
- (Joint Research Centre., 2010) Joint Research Centre., 2010. General guide for Life Cycle Assessment : provisions and action steps, European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability. ed. Publications Office of the European Union, LU.
- (Joint Research Centre (European Commission) et al., 2016) Joint Research Centre (European Commission), Schau, E., Sala, S., Zampori, L., Cristobal, J., Saouter, E., Castellani, V., 2016. Guide for interpreting life cycle assessment result. Publications Office of the European Union, LU.

- (Joint Research Centre. and Institute for Environment and Sustainability, 2012) Joint Research Centre., Institute for Environment and Sustainability, 2012. Characterisation factors of the ILCD Recommended Life Cycle Impact Assessment methods - Database and supporting information, Publications Office of the European Union. ed. European Commission, Luxembourg.
- (Jolliet et al., 2003) Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., Rosenbaum, R., 2003. IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. *Int. J. Life Cycle Assess.* 8, 324–330. <https://doi.org/10.1007/BF02978505>
- (Jolliet et al., 2017) Jolliet, O., Saadé, M., Crettaz, P., Jolliet-Gavin, N., Shaked, S., 2017. Analyse du cycle de vie: comprendre et réaliser un écobilan.
- (Jolliet et al., 2015) Jolliet, O., Saade-Sbeih, M., Shaked, S., Jolliet, A., Crettaz, P., Saade-Sbeih, M., Shaked, S., Jolliet, A., Crettaz, P., 2015. Environmental Life Cycle Assessment. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b19138>
- (JORF n°0012 du 14 janvier 2012, n.d.) JORF n°0012 du 14 janvier 2012, n.d. Arrêté du 19 décembre 2011 relatif au diagnostic portant sur la gestion des déchets issus de la démolition de catégories de bâtiments.
- (JORF n°0035 du 11 février 2020, 2020) JORF n°0035 du 11 février 2020, 2020. LOI n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire (1), 2020-105.
- (Kamp, 2021) Kamp, B., 2021. Assessment of the reuse potential of existing concrete: Enhancing circularity in the Dutch building sector by harvesting structural elements from demolition projects (Master thesis). TU Delft.
- (Kamrath, 2013) Kamrath, P., 2013. 8 - Demolition techniques and production of construction and demolition waste (CDW) for recycling, in: Pacheco-Torgal, F., Tam, V.W.Y., Labrincha, J.A., Ding, Y., de Brito, J. (Eds.), *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Woodhead Publishing, pp. 186–209. <https://doi.org/10.1533/9780857096906.2.186>
- (Kartam et al., 2004) Kartam, N., Al-Mutairi, N., Al-Ghusain, I., Al-Humoud, J., 2004. Environmental management of construction and demolition waste in Kuwait. *Waste Manag.* 24, 1049–1059. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.06.003>
- (Kirchherr et al., 2017) Kirchherr, J., Reike, D., Hekkert, M., 2017. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resour. Conserv. Recycl.* 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- (Kozlov et al., 2021) Kozlov, A.V., Porsin, A.V., Dobrovol'skii, Yu.A., Kashin, A.M., Terenchenko, A.S., Gorin, M.A., Tikhonov, A.N., Milov, K.V., 2021. Life Cycle Assessment of Powertrains Based on a Battery, Hydrogen Fuel Cells, and Internal Combustion Engine for Urban Buses under the Conditions of Moscow Oblast. *Russ. J. Appl. Chem.* 94, 793–812. <https://doi.org/10.1134/S1070427221060136>
- (Küpfer and Fivet, 2021) Küpfer, C., Fivet, C., 2021. Déconstruction sélective - Construction Réversible: recueil pour diminuer les déchets et favoriser le réemploi dans la construction., EPFL. ed. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4314325>
- (Kuzmenko et al., 2019a) Kuzmenko, K., Douthe, C., Feraille, A., Baverel, O., 2019. Towards Methodology of Life Cycle Analysis for Structural Reuse. *Proc. IASS Annu. Symp.* 2019, 1–10.
- (Kuzmenko et al., 2019b) Kuzmenko, K., Feraille, A., Baverel, O., 2019. Improving Construction Efficiency with Digital Fabrication. An Environmental Insight. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 323, 012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/323/1/012014>

- (Kuzmenko et al., 2020) Kuzmenko, K., Roux, C., Feraille, A., Baverel, O., 2020. Assessing environmental impact of digital fabrication and reuse of constructive systems. *Structures*. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.05.035>
- (Lachat, 2019) Lachat, A., 2019. Préparation à la réglementation environnementale de 2020 (masters). ENTPE, Lyon.
- (Lachat et al., 2021a) Lachat, A., Kuzmenko, K., Colas, A.-S., Feraille, A., 2021. Evaluating Circular-Economy Indicators: A Case Study.
- (Lachat et al., 2021b) Lachat, A., Mantalovas, K., Desbois, T., Yazoghli-Marzouk, O., Colas, A.-S., Di Mino, G., Feraille, A., 2021. From Buildings' End of Life to Aggregate Recycling under a Circular Economic Perspective: A Comparative Life Cycle Assessment Case Study. *Sustainability* 13, 9625. <https://doi.org/10.3390/su13179625>
- (Lacy and Rutqvist, 2015) Lacy, P., Rutqvist, J., 2015. *Waste to Wealth*. Palgrave Macmillan UK, London. <https://doi.org/10.1057/9781137530707>
- (Langston, 2012) Langston, C., 2012. Validation of the adaptive reuse potential (ARP) model using iconCUR. *Facilities* 30, 105–123. <https://doi.org/10.1108/02632771211202824>
- (Langston et al., 2008) Langston, C., Wong, F.K.W., Hui, E.C.M., Shen, L.-Y., 2008. Strategic assessment of building adaptive reuse opportunities in Hong Kong. *Build. Environ.* 43, 1709–1718. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.10.017>
- (Langston, 2011) Langston, C.A., 2011. Estimating the useful life of buildings: 36th Annual Conference for Australasian University Building Educators Association. *Proc. 36th Annu. Conf. Australas. Build. Educ. Assoc. AUBEA* 418–432.
- (LCPC, 2005) LCPC, 2005. Présentation des techniques de diagnostic de l'état d'un béton soumis à un incendie, Ifsttar. ed, *Méthodes d'essai des lpc*. Paris.
- (Légifrance, 2021) Légifrance, 2021. Décret n° 2021-950 du 16 juillet 2021 relatif au tri des déchets de papier, de métal, de plastique, de verre, de textiles, de bois, de fraction minérale et de plâtre, 2021-950.
- (Légifrance, 2020) Légifrance, 2020. Article R541-8 - Code de l'environnement - Légifrance, code de l'environnement.
- (Légifrance, 2016) Légifrance, 2016. Décret n° 2016-288 du 10 mars 2016 portant diverses dispositions d'adaptation et de simplification dans le domaine de la prévention et de la gestion des déchets, 2016-288.
- (Légifrance, 2015) Légifrance, 2015. Article L110-1-1 -loi de transition énergétique pour la croissance verte du 17 Aout 2015, Code de l'environnement.
- (Légifrance, n.d.) Légifrance, n.d. Article L541-1-1, Code de l'environnement.
- (Leising et al., 2018) Leising, E., Quist, J., Bocken, N., 2018. Circular Economy in the building sector: Three cases and a collaboration tool. *J. Clean. Prod.* 176, 976–989. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.010>
- (Leonardon et al., 2019) Leonardon, P., Laurenceau, S., Louerat, M., 2019. Prospective de consommation de matériaux pour la construction des bâtiments neufs aux horizons 2035 et 2050 (Rapport d'étude), Expertise. ADEME, CSTB, CORE E.
- (Leroy and Lasvaux, 2013) Leroy, Y., Lasvaux, S., 2013. De la gestion des incertitudes en analyse de cycle de vie. *Marche Organ.* N° 17, 65–82.

- (Leshchinsky et al., 1990) Leshchinsky, A.M., Leshchinsky, M.Yu., Goncharova, A.S., 1990. Within-test variability of some non-destructive methods for concrete strength determination. *Mag. Concr. Res.* 42, 245–248. <https://doi.org/10.1680/mac.1990.42.153.245>
- (Loziquez and Barthelemy, 2017) Loziquez, E., Barthelemy, J.-F., 2017. La protection cathodique des aciers dans le béton « atmosphérique », les rapports Cerema- infrastructures de transport et matériaux. Cerema.
- (Ma et al., 2014) Ma, S., Wen, Zong-guo, Chen, J., Wen, Zhi-chao, 2014. Mode of circular economy in China's iron and steel industry: a case study in Wu'an city. *J. Clean. Prod.* 64, 505–512. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.008>
- (Madaster Services BV., 2018) Madaster Services BV., 2018. Madaster Circularity Indicator Explained.
- (Mai-Nhu, 2015) Mai-Nhu, J., 2015. Corrosion des armatures : intérêt des inhibiteurs de corrosion et méthodologies pour le suivi durant la vie de l'ouvrage (Rapport d'étude et de recherche No. 276.E), Développement durable, Durabilité. Cerib.
- (Marchais-Roubelat and Mondon, 2020) Marchais-Roubelat, A., Mondon, S., 2020. Pratique d'anticipation et anticipation de pratiques : événement, imprévu et stratégie. Presented at the XXIXe Conférence Internationale de Management Stratégique.
- (Martín-Morales et al., 2013) Martín-Morales, M., Zamorano, M., Valverde-Palacios, I., Cuenca-Moyano, G.M., Sánchez-Roldán, Z., 2013. 11 - Quality control of recycled aggregates (RAs) from construction and demolition waste (CDW), in: Pacheco-Torgal, F., Tam, V.W.Y., Labrincha, J.A., Ding, Y., de Brito, J. (Eds.), *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Woodhead Publishing, pp. 270–303. <https://doi.org/10.1533/9780857096906.2.270>
- (Meadows et al., n.d.) Meadows, D.H., Meadows, D.M., Randers, J., Behrens III, W.W., n.d. The Limits to Growth [WWW Document]. Club Rome. URL <https://www.clubofrome.org/publication/the-limits-to-growth/> (accessed 8.23.21).
- (Mercante et al., 2012) Mercante, I.T., Bovea, M.D., Ibáñez-Forés, V., Arena, A.P., 2012. Life cycle assessment of construction and demolition waste management systems: a Spanish case study. *Int. J. Life Cycle Assess.* 17, 232–241. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0350-2>
- (Mesnil et al., 2018) Mesnil, R., Douthe, C., Gobin, T., Baverel, O., 2018. Form finding and design of a timber shell-nexorade hybrid, in: *Advances in Architectural Geometry 2018 (AAG 2018)*. Göteborg, Sweden.
- (Michel et al., 2010) Michel, P., Vaxelair, S., Villeneuve, J., Jayr, E., Vernus, E., BUCLET, N., RENAULT, V., DE CAZENOVE, A., VEDRINE, H., 2010. *Projet ANR ASURET -Revue de l'existant (Tâche 1) - rapport final (No. BRGM/RP-58935-FR)*. Agence Nationale de la Recherche.
- (Ministère de la transition écologique et solidaire, 2021) Ministère de la transition écologique et solidaire, C. général au développement durable, 2021. Les producteurs de déchets [WWW Document]. *Environ. En Fr. - Rapp. Sur L'état Environ.* URL <https://ree.developpement-durable.gouv.fr//themes/pressions-exercees-par-les-modes-de-production-et-de-consommation/production-de-dechets/production/article/les-producteurs-de-dechets> (accessed 9.21.21).
- (Minunno et al., 2020) Minunno, R., O'Grady, T., Morrison, G.M., Gruner, R.L., 2020. Exploring environmental benefits of reuse and recycle practices: A circular economy case study of a modular building. *Resour. Conserv. Recycl.* 160, 104855. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104855>
- (Mommer et al., 2004) Mommer, P., Dondonne, E., Demars, PH., 2004. Dégradation de dalles de tablier de ponts en région wallonne. *Etude d'une pathologie complexe. Rev. Sci. ISILF* 25.

- (Mosley et al., 1996) Mosley, W.H., Hulse, R., Bungey, J.H., 1996. Reinforced concrete design to EuroCode 2 (EC2), Basingstoke : Macmillan. ed.
- (MTE, 2021) MTE, 2021. Arrêté du 4 août 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine et portant approbation de la méthode de calcul prévue à l'article R. 172-6 du code de la construction et de l'habitation, code de la construction et de l'habitation.
- (MTECT, 2020a) MTECT, 2020. Déchets du bâtiment [WWW Document]. Ministères Écologie Énerg. Territ. URL <https://www.ecologie.gouv.fr/dechets-du-batiment> (accessed 6.28.22).
- (MTECT, 2020b) MTECT, 2020. Construction et performance environnementale du bâtiment [WWW Document]. Ministères Écologie Énerg. Territ. URL <https://www.ecologie.gouv.fr/construction-et-performance-environnementale-du-batiment> (accessed 6.28.22).
- (Muller et al., 2016a) Muller, S., Lesage, P., Citroth, A., Mutel, C., Weidema, B.P., Samson, R., 2016. The application of the pedigree approach to the distributions foreseen in ecoinvent v3. *Int. J. Life Cycle Assess.* 21, 1327–1337. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0759-5>
- (Muller et al., 2016b) Muller, S., Lesage, P., Samson, R., 2016. Giving a scientific basis for uncertainty factors used in global life cycle inventory databases: an algorithm to update factors using new information. *Int. J. Life Cycle Assess.* 21, 1185–1196. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1098-5>
- (Muñoz Ortiz, 2006) Muñoz Ortiz, I., 2006. Life Cycle Assessment as a Tool for Green Chemistry: Application to Different Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment (Ph.D. Thesis). TDX Tesis Dr. En Xarxa. Universitat Autònoma de Barcelona.
- (Murray et al., 2017) Murray, A., Skene, K., Haynes, K., 2017. The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context. *J. Bus. Ethics* 140, 369–380. <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>
- (Negishi, 2019) Negishi, K., 2019. Development of a methodology of Dynamic LCA applied to the buildings (phdthesis). INSA de Toulouse.
- (Nguyen et al., 2015) Nguyen, M., Wardeh, G., Ghorbel, E., 2015. Etude de l'endommagement des bétons à granulats recyclés.
- (Nguyen, 2014) Nguyen, N. tan, 2014. Évaluation non destructive des structures en béton armé : étude de la variabilité spatiale et de la combinaison des techniques (These de doctorat). Bordeaux.
- (NREL, n.d.) NREL, n.d. U.S. Life Cycle Inventory Database [WWW Document]. URL <https://www.nrel.gov/lci/index.html> (accessed 9.1.21).
- (Ogunmakinde, 2019) Ogunmakinde, O.E., 2019. Developing a circular-economy-based construction waste minimisation framework for Nigeria. University of Newcastle.
- (Omary et al., 2014) Omary, S., Wardeh, G., Ghorbel, E., Gomart, H., 2014. Comportement à la flexion des poutres en béton armé à base de graviers recyclés.
- (Osman and Ries, 2004) Osman, A., Ries, R., 2004. Life-Cycle Impact Analysis of Energy Systems for Buildings. *J. Infrastruct. Syst.* 10, 87–97. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2004\)10:3\(87\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2004)10:3(87))
- (Osmani, 2012) Osmani, M., 2012. Construction Waste Minimization in the UK: Current Pressures for Change and Approaches. *Procedia - Soc. Behav. Sci., ASIA PACIFIC BUSINESS INNOVATION AND TECHNOLOGY MANAGEMENT SOCIETY* 40, 37–40. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.158>

- (Osmani, 2011) Osmani, M., 2011. Construction waste. Loughborough University.
- (Osobajo et al., 2020) Osobajo, O.A., Oke, A., Omotayo, T., Obi, L.I., 2020. A systematic review of circular economy research in the construction industry. *Smart Sustain. Built Environ.* 11, 39–64. <https://doi.org/10.1108/SASBE-04-2020-0034>
- (Pacheco-Torgal, 2013) Pacheco-Torgal, F., 2013. Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste. Elsevier Science.
- (Papadakis et al., 1991a) Papadakis, V.G., Vayenas, C.G., Fardis, M.N., 1991. Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation. *Mater. J.* 88, 363–373. <https://doi.org/10.14359/1863>
- (Papadakis et al., 1991b) Papadakis, V.G., Vayenas, C.G., Fardis, M.N., 1991. Experimental investigation and mathematical modeling of the concrete carbonation problem. *Chem. Eng. Sci.* 46, 1333–1338. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(91\)85060-B](https://doi.org/10.1016/0009-2509(91)85060-B)
- (Paprec Group, n.d.) Paprec Group, n.d. La classification des types de matières plastiques. Paprec. URL <https://www.paprec.com/fr/comprendre-le-recyclage/tout-savoir-sur-les-matieres-recyclables/plastiques/la-classification-des-types-de-matieres-plastiques/> (accessed 10.13.21).
- (Park and Chertow, 2014) Park, J.Y., Chertow, M.R., 2014. Establishing and testing the “reuse potential” indicator for managing wastes as resources. *J. Environ. Manage.* 137, 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.11.053>
- (Parrish and Chester, 2014) Parrish, K., Chester, M., 2014. Life-Cycle Assessment for Construction of Sustainable Infrastructure. *Pract. Period. Struct. Des. Constr.* 19, 89–94. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000187](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000187)
- (Parrot, 2002) Parrot, L., 2002. Cement, concrete and sustainability. A report on the progress of the UK cement and concrete industry towards sustainability, British Cement Association - Publication Index | NBS. British Cement Association.
- (Pauliuk, 2018) Pauliuk, S., 2018. Critical appraisal of the circular economy standard BS 8001:2017 and a dashboard of quantitative system indicators for its implementation in organizations. *Resour. Conserv. Recycl.* 129, 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.019>
- (Pawlak et al., 2020) Pawlak, S., Peupartier, B., Saade-Sbeih, M., Erradhouani, B., Roux, C., 2020. PULSE-PARIS livrable 3 Etude de cas (rapport de recherche). ADEME.
- (Pearce et al., 1990) Pearce, D.W., Turner, R.K., Turner, P.R.K., 1990. Economics of Natural Resources and the Environment. JHU Press.
- (Peupartier, 2021) Peupartier, B., 2021. L’analyse de cycle de vie dynamique décryptée.
- (Peupartier et al., 2013) Peupartier, B., Thiers, S., Guiavarch, A., 2013. Eco-design of buildings using thermal simulation and life cycle assessment. *J. Clean. Prod.* 39, 73–78. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.041>
- (Philie Marcangelo-Leos, 2021) Philie Marcangelo-Leos, 2021. Tri à la source des déchets : un décret acte le passage aux “sept flux.” Banq. Territ.
- (Philip et al., 2006) Philip, J.-C., Bouyahbar, F., Muzeau, J.-P., 2006. Guide pratique de la démolition des bâtiments -, Librairie Eyrolles. ed, Collection Blanche BTP. Paris.
- (Piccinno et al., 2018) Piccinno, F., Hischier, R., Seeger, S., Som, C., 2018. Predicting the environmental impact of a future nanocellulose production at industrial scale: Application of the life cycle assessment scale-up framework. *J. Clean. Prod.* 174, 283–295. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.226>

- (platform CB'23, 2020) platform CB'23, 2020. Guide, Measuring circularity, Working agreements for circular construction (No. Version 2.0). platform CB'23.
- (Polster, 1995) Polster, B., 1995. Contribution à l'étude de l'impact environnemental des bâtiments par analyse du cycle de vie (These de doctorat). Paris, ENMP.
- (Pomponi and Moncaster, 2017) Pomponi, F., Moncaster, A., 2017. Circular economy for the built environment: A research framework. *J. Clean. Prod.* 143, 710–718. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.055>
- (Prassianakis et al., 2003) Prassianakis, I.N., Sideridis, E., Vamvakousis, A., 2003. The characterisation of old concrete using destructive and the ultrasonic non-destructive testing methods. *Insight* 45, 827–830. <https://doi.org/10.1784/insi.45.12.827.52985>
- (Prieto-Sandoval et al., 2018) Prieto-Sandoval, V., Jaca, C., Ormazabal, M., 2018. Towards a consensus on the circular economy. *J. Clean. Prod.* 179, 605–615. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.224>
- (Queheille et al., 2019) Queheille, E., Taillandier, F., Saiyouri, N., 2019. Optimization of strategy planning for building deconstruction. *Autom. Constr.* 98, 236–247. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.007>
- (Radhia et al., 2018) Radhia, C., Ferhoune, N., Bouabdallah, F., 2018. Les essais non destructifs du béton comme outils d'aide à la gestion du patrimoine baties. Presented at the 1st International Conference on Vulnerability and Rehabilitation of Structures VUREST-2018 (7th & 8th of May 2018).
- (Rakhshan et al., 2021) Rakhshan, K., Morel, J.-C., Daneshkhah, A., 2021. A probabilistic predictive model for assessing the economic reusability of load-bearing building components: Developing a Circular Economy framework. *Sustain. Prod. Consum.* 27, 630–642. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.01.031>
- (Reap et al., 2008a) Reap, J., Roman, F., Duncan, S., Bras, B., 2008. A survey of unresolved problems in life cycle assessment. *Int. J. Life Cycle Assess.* 13, 290. <https://doi.org/10.1007/s11367-008-0008-x>
- (Reap et al., 2008b) Reap, J., Roman, F., Duncan, S., Bras, B., 2008. A survey of unresolved problems in life cycle assessment. *Int. J. Life Cycle Assess.* 13, 374. <https://doi.org/10.1007/s11367-008-0009-9>
- (Récyclum et al., 2016) Récyclum, GTM Bâtiment, Nantet, Arès associations, 2016. Démocles- les clés de la démolition durable-rapport d'étude, Ademe. ed.
- (Reike et al., 2018) Reike, D., Vermeulen, W.J.V., Witjes, S., 2018. The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? — Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options. *Resour. Conserv. Recycl., Sustainable Resource Management and the Circular Economy* 135, 246–264. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.027>
- (Richardson, 2013) Richardson, A.E., 2013. 13 - Strength and durability of concrete using recycled aggregates (RAs), in: Pacheco-Torgal, F., Tam, V.W.Y., Labrincha, J.A., Ding, Y., de Brito, J. (Eds.), *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Woodhead Publishing, pp. 330–348. <https://doi.org/10.1533/9780857096906.2.330>
- (Rockström et al., 2009) Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F.S., Lambin, E.F., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H.J., Nykvist, B., de Wit, C.A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K.,

- Crutzen, P., Foley, J.A., 2009. A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472–475. <https://doi.org/10.1038/461472a>
- (Rosenbaum et al., 2008) Rosenbaum, R.K., Bachmann, T.M., Gold, L.S., Huijbregts, M.A.J., Jolliet, O., Juraske, R., Koehler, A., Larsen, H.F., MacLeod, M., Margni, M., McKone, T.E., Payet, J., Schuhmacher, M., van de Meent, D., Hauschild, M.Z., 2008. USEtox—the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. *Int. J. Life Cycle Assess.* 13, 532. <https://doi.org/10.1007/s11367-008-0038-4>
- (Roux, 2016) Roux, C., 2016. Analyse de cycle de vie conséquentielle appliquée aux ensembles bâtis (These de doctorat). Paris Sciences et Lettres (ComUE).
- (Roux et al., 2016) Roux, C., Schalbart, P., Peuportier, B., 2016. Accounting for temporal variation of electricity production and consumption in the LCA of an energy-efficient house. *J. Clean. Prod.* 113, 532–540. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.052>
- (Saade-Sbeih et al., 2019) Saade-Sbeih, M., Roux, C., Pawlak, S., Peuportier, B., 2019. PULSE-PARIS livrable 2 Développement méthodologique de l'ACV à l'échelle d'un projet urbain (projet de recherche). ADEME.
- (Sénat, 2021) Sénat, 2021. Transport de marchandises face aux impératifs environnementaux (rapport d'information), travaux parlementaires. Sénat.
- (SENAT, 2005) SENAT, 2005. Le drame de l'amiante en France : comprendre, mieux réparer, en tirer des leçons pour l'avenir (rapport) [WWW Document]. URL <https://www.senat.fr/rap/r05-037-1/r05-037-1101.html> (accessed 9.25.21).
- (Service de l'observation et des statistiques, 2017) Service de l'observation et des statistiques, 2017. Enquête sur les déchets et déblais produits par l'activité BTP en 2014 (EDD 2014) | Données et études statistiques. MEEM, La Défense.
- (SETAC, 1991) SETAC, 1991. A technical framework for life-cycle assessment. SETAC, Pensacola, USA.
- (Seys, 2017) Seys, S., 2017. Réemploi et marquage CE – Rotor – WP7 – Décembre 2017. Rotor.
- (Sillero et al., 2021) Sillero, L., Morales, A., Fernández-Marín, R., Hernández-Ramos, F., Dávila, I., Erdocia, X., Labidi, J., 2021. Life Cycle Assessment of various biorefinery approaches for the valorisation of almond shells. *Sustain. Prod. Consum.* 28, 749–759. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.07.004>
- (Sinclair, 2006) Sinclair, R., 2006. An Analysis of Ressource Recovery Opportunities in Canada and the Projection of Greenhouse Gas Emission Implications. Government of Canada.
- (SNBPE, 2018) SNBPE, 2018. Poutre en béton de dimension 0.30x0.20 m, C25/30 XF1 CEM II/A (v.1.5) [WWW Document]. Base INIES. URL <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/infos-produit> (accessed 5.14.22).
- (Stahel, 2016) Stahel, W.R., 2016. The circular economy. *Nature* 531, 435–438. <https://doi.org/10.1038/531435a>
- (Steffen et al., 2015) Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S.E., Fetzer, I., Bennett, E.M., Biggs, R., Carpenter, S.R., Vries, W. de, Wit, C.A. de, Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G.M., Persson, L.M., Ramanathan, V., Reyers, B., Sörlin, S., 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- (te Dorsthorst and Kowalczyk, 2005) te Dorsthorst, B.J.H., Kowalczyk, T., 2005. State of deconstruction in the netherlands (No. 5). TU Delft, Rotterdam (Netherlands).

- (Techniques de l'Ingénieur, 2005) Techniques de l'Ingénieur, 2005. Le béton précontraint. Tech. Ing. 56.
- (technobeton, 2016) technobeton, A., 2016. Les contrôles non destructifs des ouvrages en béton. Technol. Bétons. URL <https://technobeton.wordpress.com/2016/11/28/les-contrôles-non-destructifs-des-ouvrages-en-beton/> (accessed 9.28.21).
- (Teo and Lin, 2010) Teo, E.A.-L., Lin, G., 2010. Framework for Evaluating Co2 Emissions of Buildings within Singapore's Building Sector: A Review Article. Int. J. Sustain. Build. Technol. Urban Dev. 1, 128–136. <https://doi.org/10.5390/SUSB.2010.1.2.128>
- (Thomsen et al., 2011) Thomsen, A., Schultmann, F., Kohler, N., 2011. Deconstruction, demolition and destruction. Build. Res. Inf. 39, 327–332. <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.585785>
- (Thormark, 2002) Thormark, C., 2002. A low energy building in a life cycle - its embodied energy, energy need for operation and recycling potential. Build. Environ. 37, 429–435. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00033-6](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00033-6)
- (Tiruta-Barna and Barna, 2013) Tiruta-Barna, L., Barna, R., 2013. Assessing the potential environmental hazards of concrete made using recycled aggregates (RAs), in: Pacheco-Torgal, F., Tam, V.W.Y., Labrincha, J.A., Ding, Y., de Brito, J. (Eds.), Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Woodhead Publishing, pp. 605–629. <https://doi.org/10.1533/9780857096906.4.605>
- (Torrenti and Barre, 2016) Torrenti, J.M., Barre, F., 2016. Fissuration et durabilité des structures en béton armé. Tech. Ing. C6 152, 13.
- (Trocmé and Peuportier, 2008) Trocmé, M., Peuportier, B., 2008. Analyse de Cycle de Vie d'un bâtiment. <https://doi.org/10.1051/J3EA:2008034>
- (UNEP, 2022) UNEP, 2022. Sand and sustainability: 10 strategic recommendations to avert a crisis. GRID-Geneva, United Nations Environment Programme, Geneva, Switzerland.
- (UNEP, 2019) UNEP, 2019. Sand and Sustainability: Finding New Solutions for Environmental Governance of Global Sand Resources.
- (UNICEM, 2021) UNICEM, 2021. L'Industrie Française des Granulats, édition 2021, données 2019. UNICEM et UNPG.
- (UNICEM and SNBPE, 2020) UNICEM, SNBPE, 2020. L'industrie française du béton prêt à l'emploi - édition 2020 (No. données 2018).
- (U.S. EPA, 2016) U.S. EPA, 2016. Advancing Sustainable Materials Management: 2014 Fact Sheet Assessing Trends in Material Generation, Recycling, Composting, Combustion with Energy Recovery and Landfilling in the United States.
- (UVED, n.d.) UVED, n.d. MOOC : Economie circulaire et innovation.
- (Van Der Werf and Petit, 2002) Van Der Werf, H., Petit, J., 2002. Évaluation de l'impact environnemental de l'agriculture au niveau de la ferme. Comparaison et analyse de 12 méthodes basées sur des indicateurs. Courn. Environ. INRA 121–133.
- (Ventura, 2022) Ventura, A., 2022. Conceptual issue of the dynamic GWP indicator and solution. Int. J. Life Cycle Assess. <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02028-x>
- (Ventura and Feraille, 2021) Ventura, A., Feraille, A., 2021. Recommandations pour l'introduction de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) dans la Réglementation Environnementale (RE) 2020 des bâtiments. Université Gustave Eiffel.
- (Wang-Erlandsson et al., 2022) Wang-Erlandsson, L., Tobian, A., van der Ent, R.J., Fetzer, I., te Wierik, S., Porkka, M., Staal, A., Jaramillo, F., Dahlmann, H., Singh, C., Greve, P., Gerten, D., Keys, P.W.,

- Gleeson, T., Cornell, S.E., Steffen, W., Bai, X., Rockström, J., 2022. A planetary boundary for green water. *Nat. Rev. Earth Environ.* 3, 380–392. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00287-8>
- (Weidema and Wesnæs, 1996) Weidema, B.P., Wesnæs, M.S., 1996. Data quality management for life cycle inventories—an example of using data quality indicators. *J. Clean. Prod.* 4, 167–174. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(96\)00043-1](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(96)00043-1)
- (Weill, 2021) Weill, J.-M., 2021. *Les BFUP :béton fibrés à ultra-hautes performances*, Eyrolles. ed.
- (Wilson, 2007) Wilson, D.C., 2007. Development drivers for waste management. *Waste Manag. Res.* 25, 198–207. <https://doi.org/10.1177/0734242X07079149>
- (Yagoub, 2009) Yagoub, M., 2009. Evaluation de la qualité du béton de fibres in situ - cas de béton autoplaçant avec des fibres mixtes (masters). Université Mohamed Khider - Biskra.
- (Yuan et al., 2006) Yuan, Z., Bi, J., Moriguchi, Y., 2006. The Circular Economy: A New Development Strategy in China. *J. Ind. Ecol.* 10, 4–8. <https://doi.org/10.1162/108819806775545321>
- (Zaman and Lehmann, 2013) Zaman, A.U., Lehmann, S., 2013. The zero waste index: a performance measurement tool for waste management systems in a 'zero waste city.' *J. Clean. Prod., Special Issue: Advancing sustainable urban transformation* 50, 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.11.041>
- (Zhang et al., 2021a) Zhang, N., Han, Q., de Vries, B., 2021. Building Circularity Assessment in the Architecture, Engineering, and Construction Industry: A New Framework. *Sustainability* 13, 12466. <https://doi.org/10.3390/su132212466>
- (Zhang et al., 2021b) Zhang, N., Han, Q., de Vries, B., Zhai, J., 2021. A BIM-based Building Circularity Assessment tool for the early design stage: 13th European Conference on Product and Process Modeling 2020-2021. *13th Eur. Conf. Prod. Process Model. 2020-2021* 490–499.
- (Zink and Geyer, 2017) Zink, T., Geyer, R., 2017. Circular Economy Rebound. *J. Ind. Ecol.* 21, 593–602. <https://doi.org/10.1111/jiec.12545>

TABLE DES SIGLES ET ABBREVIATIONS

ACV : <i>Analyse du Cycle de Vie</i>	ISDI : <i>Installation de Stockage de Déchets Inertes</i>
AICV : <i>Analyse de l'Impact du Cycle de Vie</i>	ISDND : <i>Installation de Stockage des DND</i>
ARP : <i>Adaptative Reuse Potential</i>	LCC : <i>Life Cycle Cost</i>
BAMB : <i>Building As Material Banks</i>	LTECV : <i>Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte</i>
BC : <i>Building Circularity</i>	MCI : <i>Material Circularity Indicator</i>
BIM : <i>Building Information Modeling</i>	MIE : <i>Module d'Information Environnemental</i>
BRH : <i>Brise Roche Hydraulique</i>	MOA : <i>Maitre d'OuvrAge</i>
BTP : <i>Bâtiment et des Travaux Publics</i>	MOE : <i>Maitre d'OEuvre</i>
CMU : <i>Circular Material Use rate</i>	MRS : <i>Material Reutilisation Score</i>
CSR : <i>Combustible Solide de Récupération</i>	PCI : <i>Product Circularity Indicator</i>
DD : <i>Déchets Dangereux</i>	PNPD : <i>Plan National de Prévention des Déchets</i>
DEEE : <i>Déchets d'Équipement Électriques et Électroniques</i>	PNUE : <i>Programme des Nations Unies pour l'Environnement</i>
DI : <i>Déchets Inertes</i>	Pr : <i>Potentiel de Réemploi</i>
Diagnostic PEMD : <i>Diagnostic Produit, Équipement, Matériaux et Déchets</i>	PSE : <i>Polystyrènes Expansés</i>
DND : <i>Déchets Non Dangereux</i>	RE 2020 : <i>Règlementation Environnementale 2020</i>
DNDNI : <i>Déchets Non Dangereux et Non Inertes</i>	REP : <i>Responsabilité Élargie des Producteurs</i>
EAD : <i>Document d'Évaluation Européen</i>	SDES : <i>Service des Données et des Études Statistiques</i>
EC : <i>Économie Circulaire</i>	TGAP : <i>Taxe Générale sur les Activités Polluantes</i>
EID : <i>Element Identity</i>	Tval : <i>Taux de valorisation matière</i>
ETA : <i>Évaluation Technique Européenne</i>	UF : <i>Unité Fonctionnelle</i>
FDES : <i>Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire</i>	UV : <i>UltraViolet</i>
GES : <i>Gaz à Effets de Serre</i>	ZWI : <i>Zero Waste Index</i>
ICV : <i>Inventaire du Cycle de Vie</i>	
IR : <i>InfraRouge</i>	
ISDD : <i>Installation de Stockage des Déchets Dangereux</i>	

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Les limites planétaires (Source : Stockholm Resilience Center, 2022 Trad : Sydney Thomas pour Bon Pote)	16
Figure 2 : Répartition de la production des déchets en France en 2018 entre les différents secteurs économiques (Ministère de la transition écologique et solidaire, 2021)	20
Figure 3 : Diagramme soleil pour le type de déchets par secteur du BTP en France en 2008 (a) et en 2014 (b) . Ce diagramme présente la répartition des déchets pour chaque sous-secteurs et sous-sous-secteur. Pour rappel DNDNI= déchets non dangereux et non inertes ; DI = déchets inertes ; DD= déchets dangereux. Les parties non légendées pour les travaux publics sont des DD et DNDNI. Les parties non légendées pour le Bâtiment sont des DD.....	24
Figure 4 : Diagramme présentant les principaux déchets inertes produits en 2014 par le secteur du BTP en France. Données issues de (Service de l'observation et des statistiques, 2017)	25
Figure 5 : Diagramme présentant les principaux déchets non dangereux et non inertes pour 2014 par le secteur du BTP en France. Données issues de (Service de l'observation et des statistiques, 2017)	25
Figure 6 : Diagramme présentant les déchets dangereux produits en 2014 par le secteur du BTP en France. Données issues de (Service de l'observation et des statistiques, 2017)	26
Figure 7 : Exemple de méthodes de tri des déchets de la construction (Récyclum et al., 2016).	31
Figure 8 : Fonctionnement général de la filière des déchets non dangereux (FNADE, 2012)	31
Figure 9 : Schéma illustrant la valorisation en boucle ouverte et la valorisation en boucle fermée (image : collect CMBH)	32
Figure 10 : Les filières de la REP et les chiffres clefs de la REP (données de 2019) (ADEME, n.d.)	36
Figure 11 : Extrait du diagnostic déchet préalable à la démolition selon l'Arrêté du 19/12/11 relatif au diagnostic portant sur la gestion des déchets issus de la démolition de catégories de bâtiments. Extrait provenant de Diagademe.....	37
Figure 12 : Évolution de la production de béton prêt à l'emploi de 1996 à 2018 (indice base 100 par rapport à 2010) (UNICEM and SNBPE, 2020)	38
Figure 13 : Réduction de l'impact carbone du ciment pour différents bétons par rapport au CEM I (ciment portland) (Lachat, 2019) pour trois classes d'exposition pour 1 m ² de voile d'épaisseur 20 cm.	39
Figure 14 : Corrosion des aciers en milieu marin à gauche (images CEBTP https://www.experts-cebtpti.org) et réaction d'alcali-granulat dans un sommier de pont à droite (Mommer et al., 2004). .	40
Figure 15 : Illustration d'outils ou résultats de mesure pour le diagnostic non destructif et l'instrumentation. (a) un scléromètre (https://www.es-france.com) ; (b) une jauge de mesure de fissuration (https://www.saugnac-jauges.fr) ; (c) un résultat de Ferrosca	

(http://www.ccstructures.com) ; (d) principe de la mesure du potentiel de corrosion des armatures (Lozinguez and Barthelemy, 2017).....	42
Figure 16 : Test à la phénophtaléine d'une carotte de béton (image de https://www.groupe-licef.fr consulté en septembre 2021)	43
Figure 17 : (a) Bâtiment en phase de désamiantage et curage à gauche, bâtiment curée du second œuvre et de la façade rideau au milieu, bâtiment en attente de déconstruction à droite. (Image LACHAT, chantier CARDEM) ; (b) Tri des matériaux du gros œuvre (Image LACHAT, Chantier CARDEM) ; (c) Bâtiment en phase de curage et tas de déblais suite à la démolition de la structure d'un bâtiment (Image LACHAT, Chantier CARDEM).....	45
Figure 18 : (a) Démolition au Brise Roche Hydraulique (BRH) (https://www.blanchard-tp.com consulté le 01/10/2021) ;(b) Méthode de coupe à la pince hydraulique d'éléments en acier (photo : Ambroise LACHAT) ; (c) Méthode par découpage d'une poutre à la scie diamantée (photo : Ambroise LACHAT) ; (d) Tri des éléments acier après découpe (photo : Ambroise LACHAT)	46
Figure 19 : Tours démolies par foudroyage, Saint Quentin, Ginger Deleo (https://www.ginger-deleo.com consulté le 01/10/2021).....	47
Figure 20 : Vérinage de deux tours (Premys-Ferrari démolition).....	47
Figure 21 : Hydro démolition (https://www.diamantex.ca , consulté le 01/10/2021)	48
Figure 22 : Critères de choix d'une technique de déconstruction ou démolition (Michel et al., 2010)	48
Figure 23 : Procédés de production des granulats recyclés (Ben Fraj and Idir, 2017)	50
Figure 24 : Concasseur mobile sur chenilles marque MEKA (https://www.mekaglobal.com , consulté le 02/10/2021)	50
Figure 25 : Les étapes du cycle de vie d'un objet (Abdou, 2017; Benoît et al., 2010; Hoarau, 2017)...	53
Figure 26 : Les étapes de réalisation de l'ACV selon la norme ISO 14040 : 2006 et exemples d'applications (ADEME, 2014).....	54
Figure 27 : Les itérations lors du processus de l'ACV selon l'ILCD (Frossard, 2020; Joint Research Centre., 2010).....	54
Figure 28 : Diagramme (flowchart) présentant le système et ses frontières. le système est composé de procédés et étapes du cycle de l'objet d'étude (Jolliet et al., 2015).....	56
Figure 29 : Présentation des différentes limites temporelles, le scénario en pointillé correspond aux éléments abordés principalement au cours de la thèse.	57
Figure 30 : Flowchart de l'ACV d'une ampoule pour la réalisation de l'Inventaire du cycle de vie (ICV) (cours ACVMU, VET , Ecole des Ponts Paristech 2020). En fonction du type d'éclairage, les quantité d'éléments ainsi que les processus peuvent varier.....	60
Figure 31 : Schéma de principe de l'analyse de l'impact du cycle de vie (extrait de (Abdou, 2017) selon (International Organization of standardization, 2006a))	62
Figure 32 : Consommation de ressources du logement et tertiaire neuf en 2015 (Leonardon et al., 2019)	72
Figure 33 : Modules de la vie d'un bâtiment pour l'ACV selon la norme EN 15804 (AFNOR, 2019, 2012; Joint Research Centre (European Commission) et al., 2018; Vilches et al., 2017). Les étapes surlignées correspondent aux étapes particulièrement étudiées dans cette thèse.	73

Figure 34 : Bâtiment A : (i) Bâtiment principal en arrière-plan et annexe en premier plan, (ii) Bâtiment principal.....	76
Figure 35 : Bâtiment B : (i) barre de logement à 4 étages, (ii) tour de logement à 5 étages.....	76
Figure 36 : Frontières du système. Le système étudié est entouré en rouge.....	78
Figure 37 : Diagramme présentant les éléments inclus dans le modèle de la démolition	80
Figure 38 : Impacts relatifs et répartition entre les catégories des bâtiments A et B pour les différents indicateurs d'impact.....	89
Figure 39 : Impacts relatifs et répartition entre les catégories des bâtiments A et B pour les indicateurs de flux. Pour 1 m ² de bâtiment démolit	91
Figure 40 : Impact relatif de la phase chantier de démolition des bâtiments A et B pour les indicateurs d'impact.....	92
Figure 41 : Impact relatif du traitement des déchets et de la phase de transport (hors amiante) pour les bâtiments A et B pour les indicateurs d'impact.....	93
Figure 42 : Impact relatif d'une tonne de granulats recyclés provenant du bâtiment A et du bâtiment B et d'une tonne de granulats recyclés et granulats vierges provenant de l'UNPG.	96
Figure 43 : Flux relatifs d'une tonne de granulats recyclés du bâtiment A, et du bâtiment B et d'une tonne de granulats recyclés et granulats vierges provenant de l'UNPG	97
Figure 44 : Étude de sensibilité de l'impact relatif de l'utilisation des engins de démolition à +10 % ou -10 % pour le chantier complet du bâtiment A	99
Figure 45 : Impacts relatifs de la production de granulats recyclés pour trois scénarios d'allocation (0/100, 50/50, 100/0) et impact des granulats vierges (UNPG). Pour l'appauvrissement de la couche d'ozone, l'impact des granulats vierges n'est pas disponible. Pour l'épuisement des ressources abiotiques (éléments), les valeurs des granulats recyclés sont trop faibles pour être visibles sur le graphique. .	100
Figure 46 : Nombre d'articles et documents scientifiques issus du web-of-science par année pour le sujet de l'économie circulaire (Geissdoerfer et al., 2017)	104
Figure 47 : Les 3 domaines et 7 piliers de l'économie circulaire selon l'ADEME. Source : ADEME	108
Figure 48 : Principe de l'économie linéaire. Extrait de (UVED, n.d.) d'après F. Grosse (Forcity)	110
Figure 49 : Principe de l'économie en partie circulaire. Extrait de (UVED, n.d.) d'après F. Grosse (Forcity)	110
Figure 50 : Évolution au cours de trois périodes (1964-2013 : 50 ans, 1984-2013 : 30 ans, et 1999-2013 : 15 ans) de la production annuelle moyenne d'une sélection de matières premières minérales. Extrait de (Christmann, 2016) données : USGS Data Series 140 et World Mining Data.....	111
Figure 51 : Contraintes pour obtenir une économie circulaire. Extrait de (UVED, n.d.) d'après F. Grosse (Forcity)	111
Figure 52 : Évolution de la production de granulats. Données : UNPG	112
Figure 53 : Évolution des modes de consommation pour une pratique plus durable. Extrait de (UVED, n.d.) d'après S. Gombert -Courvoisier.....	114
Figure 54 : Points clés pour une transition vers l'économie circulaire. Source : A. Gendron (ADEME)	116

Figure 55 : Nombre de publication par année concernant l'économie circulaire appliquée au BTP (Benachio et al., 2020) et nombre de publication par année concernant l'économie circulaire en général (Geissdoerfer et al., 2017).....	116
Figure 56 : Relations entre les six dimensions et les approches de recherche pour le bâtiment (Pomponi and Moncaster, 2017)	118
Figure 57 : Modèle de circularité pour l'élaboration d'un bâtiment circulaire (Zhang et al., 2021a) .	123
Figure 58 : Prototype d'une shell-nexorade hybride en bois (principe et photo) (Mesnil et al., 2018, 2018; Kuzmenko et al., 2020).....	127
Figure 59 : Cycles de vie du cas d'étude nexorade (librement inspiré de (Kuzmenko et al., 2020)) ..	128
Figure 60 : Indicateurs Taux de valorisation matière (Tval), Material Reutilisation Score (MRS) et Material Circularity Indicator (MCI) en fonction des scénarios de fin de vie de la nexorade en prenant en compte le premier cycle seul	131
Figure 61 : Indicateurs Taux de valorisation matière (Tval), Material Reutilisation Score (MRS) et Material Circularity Indicator (MCI) en fonction des scénarios de fin de vie de la nexorade en prenant en compte des frontières du système étendues (i.e. deux cycles consécutifs).....	131
Figure 62 : Circularité parfaite et circularité imparfaite.....	136
Figure 63 : Principe d'adaptation de l'indicateur de circularité BC pour la prise en compte de plusieurs cycles	138
Figure 64 : Scénarios du cycle de la matière pour le cas d'étude nexorade sur l'indicateur de circularité développé.....	139
Figure 65 : Moyenne pondérée pour chaque cycle de vie de la matière en fonction de la durée de vie (selon l'indice volume.an)	140
Figure 66 : Valeur de l'indicateur de circularité modifié pour différents scénarios de probabilité d'occurrence.....	142
Figure 67 : Valeur de l'indicateur de circularité modifié et sans double comptage pour différents scénarios de probabilité d'occurrence	143
Figure 68 : Moyenne pondérée de l'indicateur BC pour chaque cycle de la matière en fonction de la moyenne pondérée de l'indicateur sans double comptage.....	143
Figure 69 : Hiérarchie des modes de traitement des déchets (Design : Ekopolis).....	146
Figure 70 : La frontière produit-déchet d'un matériau (Benoit et al., 2018)	147
Figure 71 : Exemples de traces de réemploi et de réutilisation dans l'histoire	148
Figure 72 : Infographie sur le plan national de prévention des déchets 2021-2027 (MTE).....	150
Figure 73 : Impact économique de la filière Brique selon une étude du CSTB (images : Julie Benoit, Bellastock)	156
Figure 74 : Comparaison d'un m ² de bâtiment contenant soit une structure en réemploi soit une structure neuve (Glias, 2013) en fonction de la distance de transport des structures réemployées. 157	
Figure 75 : Mise en perspective des étapes de l'économie linéaire et des étapes de l'économie circulaire pour le secteur du BTP. Les phases de la démarche du réemploi, du démontage au remontage : (a)	

FCRBE (Les étapes nécessaires au réemploi sont notées en jaune) (Image : Bellastock) (b) Repar#2 (c) (Kamp, 2021) (d) Démarche proposée dans cette thèse	159
Figure 76 : Méthode de caractérisation d'un matériau pour un domaine d'emploi. Extrait REPAR 2 (Benoit et al., 2018).....	160
Figure 77 : Dispositif de nettoyage de Ballast intégré au train usine. Il intègre un crible de tri et un crible-laveur à haute pression	163
Figure 78 : Éléments à réemployer et stockage sur un chantier pour la métropole du Grand Paris (chantier de 2021) : (a) stockage pour exposition de bureaux et étagères ; (b) stockage pour exposition de bureaux et casiers ; (c) fiche de communication pour la mise en valeur du réemploi des faux planchers et dalles de moquette.....	165
Figure 79 : Photographie de l'extension de la librairie Aizkibel (Espagne) par Estudio Beldarrain (photo Jon Cazenave). Réemploi des traverses de voies de chemin de fer en façade	166
Figure 80 : « La Glaneuse » Luminaire urbain réalisé à partir d'éléments du bâtiment. Exemple de réutilisation d'éléments issus du bâtiment pour le mobilier urbain (photo et image : Bellastock)....	167
Figure 81 : Dépose par déboulonnage et élingage de la structure métallique du pavillon provisoire à Versailles (Benoit et al., 2018).....	168
Figure 82 : De Drie Hoven (maison pour personnes âgées - Amsterdam) projet conçu selon le principe mis au point par Herman Hertzberg. Photo et schéma constructif poteau poutre et dalles préfabriquées. Exemple de conception pour le réemploi.....	168
Figure 83 : Plattenpalast, architecte : Carsten Wiewiorra, 2009, Prototype de maison construite à partir de dalles et voiles préfabriqués issus de la déconstruction d'ancien HLM	169
Figure 84 : Exemple de rénovation et de réemploi : (a) Ahrensfelder Terrassen (Berlin) Barre d'immeubles remaniée, avec plusieurs étages déconstruits puis rénovés ; (b) maison individuelle construite à partir des éléments préfabriqués provenant des étages déconstruits (images : Claus Asam)	169
Figure 85 : Principe de réemploi et répartition du rôle des acteurs, cas de la fabrique du clos, Stains (Benoit et al., 2018)	170
Figure 86 : Exemples de réalisation par l'association Bellastock à partir d'éléments en béton (Clos Saint Lazare - Stains).....	170
Figure 87 : Passerelle du Projet Re:Crete (image : EPFL)	171
Figure 88 : Critères pour évaluer la capacité d'une structure de bâtiment à être transformée et désassemblée sans être endommagée selon le modèle de (Durmisevic et al., 2017)	176
Figure 89 : Concept de l'indicateur ARP (Adaptative Reuse Potential) (Langston et al., 2008).....	178
Figure 90 : Méthodologie pour le calcul de l'indicateur de réemploi selon (Park and Chertow, 2014)	179
Figure 91 : Exemple de valeurs de l'indicateur de potentiel de réemploi (RP) développé par (Park and Chertow, 2014).....	179
Figure 92 : Grille pour le calcul du critère de décomposition fonctionnelle (Durmisevic, 2006).....	181
Figure 93 : Application de la méthode Durmisevic sur une façade bois classique de 11 couches (Androsevic et al., 2019).....	181

Figure 94 : (a) Variables d'études pour la détermination du potentiel de réemploi selon (Rakhshan et al., 2021) ; (b) graphique barre présentant les variables par importance pour la détermination du potentiel de réemploi en utilisant le machine learning sur un échantillon issu d'un questionnaire..	182
Figure 95 : Termes pour qualifier les variables en fonction des échelons du processus de calcul de l'indicateur.....	187
Figure 96 : Principe de calcul d'un critère pour le calcul de l'indice <i>ICext</i>	197
Figure 97 : Évolution des mesures de l'indice de critère externe pour plusieurs cas d'études lors des phases de calibration. Les courbes de niveau correspondent au résultat pour chaque niveau individuellement.....	221
Figure 98 : Diagrammes circulaires présentant la répartition des critères pour chaque niveau.....	222
Figure 99 : Indice de critères externes pour tous les cas d'études. Les courbes indiquent l'indice de critères externes pour chaque niveau pris individuellement.....	223
Figure 100 : Seuils de réemployabilité pour l'indice <i>ICext</i>	226
Figure 101 : Répartition des critères pour le calcul de l'indice de critères externes pour les différents cas d'études.....	227
Figure 102 : Indice de critères externes. Les courbes indiquent l'indice de critère pour chaque niveau pris individuellement.....	232
Figure 103 : Chantier de rénovation à Levallois Perret (92) appelé dans la suite de la thèse « chantier de Paris » : (a) bâtiment avant travaux, (b) bâtiment après curage.	239
Figure 104 : Principe de déconstruction des poutres pour le chantier de Paris	239
Figure 105 : présentation de la poutre PuP1 (chantier de Paris)	240
Figure 106 : Présentation de la poutre PuP2 (chantier de Paris)	241
Figure 107 : Présentation de la poutre PuP3 et PuP4 (chantier de Paris).....	241
Figure 108 : Hypothèse d'extraction des poutres PuP1 et PuP2.....	242
Figure 109 : Chantier de rénovation de bureaux à Champagne au Mont d'Or (69), appelé dans la suite de la thèse « chantier de Lyon » (Image google maps).....	242
Figure 110 : Vue en plan du plancher du bâtiment déconstruit sur le chantier de Lyon.....	243
Figure 111 : Démontages des poteaux coulés sur place au chantier de Lyon	243
Figure 112 : Présentation du poteau « PL1 » (chantier de Lyon).....	244
Figure 113 : Présentation du poteau « PL2 » (chantier de Lyon).....	245
Figure 114 : Présentation de la poutre « PuL3 » (la poutre est actuellement installée sur sa fibre supérieure i.e. la partie normalement en compression) (chantier de Lyon)	245
Figure 115 : Protocole de caractérisation d'un élément (étapes 1,2 et 3) de structure en vue du réemploi (étape 4). * Maître d'Ouvrage ; **Contrôles Non Destructifs ; ***Dossier des Ouvrages Exécutés.....	247
Figure 116 : Extrait du plan de ferrailage disponible dans le Dossier des Ouvrages Exécutés du Maitre d'Ouvrage pour le chantier de Lyon	249

Figure 117 : Courbe de comportement force déplacement de l'acier, diagramme à palier horizontal (EUROCODE 2, 2005).....	250
Figure 118 : Schéma flexion 3 points	250
Figure 119 : Schéma flexion 4 points	251
Figure 120 : Carottage des éprouvettes béton : (a) carottage ; (b) éprouvettes béton après rectification	254
Figure 121 : Surfaçage au souffre(a) et compression des éprouvettes (b)	255
Figure 122 : Test de compression des éprouvettes : (a) vue globale de la presse ; (b) vue de l'éprouvette	256
Figure 123 : Dispositif de fendage des carottes de béton.....	257
Figure 124 : Photographie des essais à la phénophtaléine : (a) mortier de surface, partie supérieure des poutres (coté revêtement de sol) ; (b) béton en sous face de la poutre (coté faux plafond)	257
Figure 125 : Test à la phénophtaléine sur deux éprouvettes de la poutre PL2.....	258
Figure 126 : Schéma du dispositif expérimental pour les poutres PuP1 et PuP2 . Dispositif d'essai de flexion 3 points. Essais à l'ENPC, éléments issus du chantier de Paris.....	259
Figure 127 : Schéma du dispositif expérimental pour le poteau PL1 . Dispositif d'essai de flexion 4 points de l'ENTPE, éléments issus du chantier de Lyon.	259
Figure 128 : Détail concernant les appuis : (a) appui poutre/bati ; appui du vérin sur la poutre : (b) presse de l'ENPC, (c) presse de l'ENTPE	260
Figure 129 : Poste de commande de la presse, dispositif de l'ENPC.....	260
Figure 130 : Déformètre à billes et positionnement des billes	261
Figure 131 : Repérage de fissures de la poutre PuP1.....	262
Figure 132 : Schéma de principe du placement de la caméra pour le suivi de l'expérience.	262
Figure 133 : Poutres PuP2 et PuP1 installées et instrumentées au laboratoire Navier, ENPC	263
Figure 134 : Valeur de la force appliquée en fonction du déplacement pour le capteur LVDT central pour l'élément PuP2 et PuP1	264
Figure 135 : Mise en évidence des phases sur la courbe force-déplacement pour les poutres PuP2 (a) et PuP1 (b)	265
Figure 136 : Valeur de la force appliquée en fonction du déplacement pour les capteurs LVDT 1, 4 et 5 (fibre inférieure) pour l'essai sur l'élément PuP2 à l'ENPC.....	266
Figure 137 : Valeur de la force appliquée en fonction du déplacement pour les capteurs LVDT 1, 4 et 5 (fibre inférieure) en pour l'essai sur l'élément PuP1 à l'ENPC.....	267
Figure 138 : Photographies et localisation des fractures visibles à l'état initial sur les poutres PuP1 et PuP2.....	267
Figure 139 : Extrait représentatif de la fissuration pour la poutre PuP2 (vert : 200 kN, bleu : 250 kN ; rouge : 270 kN).....	268
Figure 140 : Extrait représentatif de la fissuration proche de la ruine pour la poutre PuP1 (vert (sous le bleu) : 150 kN, bleu : 200 kN, rouge : 250 kN, vert (sur le bleu) : 270 kN).....	268

Figure 141 : Poutre PuP1 après rupture (à l'ENPC).....	269
Figure 142 : Poutre PuP2 après rupture (à l'ENPC).....	269
Figure 143 : Détail de la rupture sur la fibre supérieure (PuP2)	269
Figure 144 : Détail de la rupture sur la fibre inférieure (PuP2).....	270
Figure 145 : Dessin d'illustration du ferrailage d'une poutre en béton armé (Almohandiss, n.d.)....	270
Figure 146 : Hypothèse de situation des poutres PuP1 et PuP2 au sein de la poutre complète avant déconstruction	270
Figure 147 : Poteaux PL1 et PL2 installées au laboratoire LTDS, ENTPE	272
Figure 148 : Caméra et mouchetis pour l'analyse du déplacement par corrélation d'image.....	273
Figure 149 : Valeur de la force appliquée en fonction du déplacement mesuré par la presse pour l'élément PL1	273
Figure 150 : Mise en évidence des phases sur la courbe force-déplacement pour le poteau PL1	274
Figure 151 : (a) Connection mur/poutre par insertion d'armature (Glias, 2013) ; (b) MX5 system ; les éléments sont boulonnés entre eux. (te Dorsthorst and Kowalczyk, 2005) ; (c) Platine métallique pour support de dalles réemployées (Glias, 2013) ; (d) Assemblage hydro démolé (Bertin, 2020).....	277
Figure 152 : Synthèse des restrictions de performance pour la poutre de référence.....	280
Figure 153 : Vue d'ensemble des différents processus détaillés	281
Figure 154 : Frontières du sous-système de la déconstruction du bâtiment en vue du réemploi de la poutre.....	281
Figure 155 : Frontières du sous-système de la démolition du bâtiment en vue du traitement des déchets.....	282
Figure 156 : Frontières du sous-système pour le traitement en fin de vie de la structure du bâtiment en vue du réemploi	282
Figure 157 : Frontières du sous-système pour le traitement des déchets issus de la démolition.....	283
Figure 158 : Frontières du système pour le traitement des déchets de la démolition en vue du recyclage des granulats	283
Figure 159 : Frontières du sous-système de la construction d'une nouvelle structure à partir d'une poutre de réemploi	284
Figure 160 : Frontières du sous-système de la construction d'une poutre neuve à partir de granulats neuf ou recyclé.....	284
Figure 161 : Système pour l'étude 1 « cradle to gate » (les frontières sont représentées par la ligne en pointillé)	286
Figure 162 : Différentes approches méthodologiques de définition des frontières du système pour l'ACV dans un cadre d'économie circulaire (Joensuu et al., 2022)	287
Figure 163 : Système et scénario d'extension des frontières à trois cycles pour différents scénarios de traitement et valorisation	287
Figure 164 : Méthode de déconstruction de la poutre dans le cadre du chantier de Levallois Perret (92) appelé chantier de Paris.....	292

Figure 165 : Redécoupage des poutres à l'ENPC par l'entreprise Forbéton	292
Figure 166 : Impact relatif des quatre scénarios de l'Étude 1 pour les quatre premiers indicateurs de la NF 15804+A1 retenus	302
Figure 167 : Impact relatif des quatre scénarios de l'Étude 1 pour les trois derniers indicateurs de la NF 15804+A1 retenus	302
Figure 168 : Analyse de contribution pour la phase de « chantier de déconstruction » du scénario de réemploi (P _{réem})	303
Figure 169 : Contribution à l'impact des quatre scénarios de l'Étude 1 pour les quatre premiers indicateurs de la NF 15804+A1 retenus	303
Figure 170 : Contribution à l'impact des quatre scénarios de l'Étude 1 pour les trois derniers indicateurs de la NF 15804+A1 retenus	304
Figure 171 : Contribution à l'impact de la phase de fabrication des quatre scénarios de l'Étude 1 pour les quatre premiers indicateurs de la NF 15804+A1 retenus	305
Figure 172 : Contribution à l'impact de la phase de fabrication des quatre scénarios de l'Étude 1 pour les trois derniers indicateurs de la NF 15804+A1 retenus	305
Figure 173 : Indicateurs de flux pour 4 scénarios de l'Étude 1 selon les indicateurs de la NF 15804+A1	306
Figure 174 : Contribution à l'impact de la phase de fabrication des quatre scénarios de l'Étude 1 pour les indicateurs de flux de la NF 15804+A1	307
Figure 175 : Indicateurs d'impact (NF 15804+A1) du cycle de vie de la matière pour trois scénarios de l'Étude 2	308
Figure 176 : Contribution des phases du cycle de vie à l'impact des quatre scénarios de l'Étude 2 pour les quatre premiers indicateurs de la NF 15804+A1 retenus	308
Figure 177 : Contribution des phases du cycle de vie à l'impact des quatre scénarios de l'Étude 2 pour les trois derniers indicateurs de la NF 15804+A1 retenus	308
Figure 178 : Contribution des cycles à l'impact des quatre scénarios de l'Étude 2 pour les quatre premiers indicateurs de la NF 15804+A1 retenus	309
Figure 179 : Contribution des cycles à l'impact des quatre scénarios de l'Étude 2 pour les trois derniers indicateurs de la NF 15804+A1 retenus	309
Figure 180 : Indicateurs de flux du cycle de vie de la matière pour trois scénarios de l'Étude 2 évalués par la NF 15804+A1	310
Figure 181 : Contribution des cycles pour les indicateurs de flux des quatre scénarios de l'Étude 2	310
Figure 182 : Impact changement climatique en kg CO ₂ éq. de chaque cycle pour différents scénarios d'allocation	311
Figure 183 : Changement climatique des phases au sein des trois cycles pour différents scénarios d'allocation	312
Figure 184 : Analyse de sensibilité sur la perte de résistance de la poutre de réemploi dans le cadre de l'Étude 1, normalisé par rapport à la solution de réemploi à l'exception du dernier indicateur (P _{vier} = 8 % de pertes)	315

Figure 185 : Étude de sensibilité pour l'Étude 1 sur l'amortissement du disque de sciage pour la poutre de réemploi	316
Figure 186 : Analyse de sensibilité sur la prise en compte de l'impact évité par la surproduction d'acier et de granulats recyclés pour les scénarios recyclés et vierge dans le cadre de l'Étude 2	317
Figure 187 : Scénarios du cycle de la matière pour le cas d'étude sur l'indicateur de circularité	318
Figure 188 : Moyenne pondérée pour chaque cycle de vie de la matière en fonction de la durée de vie (selon l'indice kg.an pour l'équivalent de 810 kg de masse vierge).....	320
Figure 189 : Valeur de l'indicateur de circularité modifié pour différents scénarios de probabilité d'occurrence appliqués au cas d'étude réemploi poutre béton armé	320
Figure 190 : Valeur de l'indicateur de circularité modifié pour trois scénarios de vie particulier de la poutre en béton armé.....	321
Figure 191 : Capture d'écran du document Excel pour la collecte des données. Cette image présente les données nécessaires au transport d'une personne.....	368

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : La production de déchets du BTP (* par rapport à la dernière donnée antérieure disponible)	22
Tableau 2 : Production de déchets du BTP par sous-secteur en 2008 (inspiré de (CGDD and SOeS, 2010))	23
Tableau 3 : Production de déchets du BTP par sous-secteur en 2014 (inspiré de (Ministère de la transition écologique et solidaire, 2021; Service de l'observation et des statistiques, 2017))	23
Tableau 4 : Les moteurs pour une minimisation et une gestion durable des déchets (traduit de (Ogunmakinde, 2019), adapté de (Agamuthu et al., 2009; Wilson, 2007)	26
Tableau 5 : Tableau présentant les avantages et les inconvénients du contrôle non destructif. Inspiré de (Breyse and Abraham, 2005; Leshchinsky et al., 1990; Radhia et al., 2018; technobeton, 2016; Yagoub, 2009).....	40
Tableau 6 : Présentation non exhaustives des méthodes de caractérisation existantes	64
Tableau 7 : Matrice de qualification de la qualité des données selon le JRC pour l'étude d'un PEF (product environmental footprint) (Joint Research Centre (European Commission) et al., 2016) pour chaque procédé inclus dans l'ACV une note de 1 à 5 est donnée pour chaque critère puis une moyenne est effectuée par critère puis pour l'étude complète. Les niveaux des critères peuvent évoluer selon le type d'étude ACV.....	66
Tableau 8 : Matrice de pédigrée Ecoinvent d'après (Ciroth et al., 2016) inspirée de (Brière, 2016)....	68
Tableau 9 : Principales différences entre l'ACV conséquentielle et l'ACV attributionnelle (traduit et inspiré de (Brander, M et al., 2008; Roux, 2016))	70
Tableau 10 : Procédés pour le transport du personnel Bâtiment A.....	81
Tableau 11 : Procédés pour le transport du personnel Bâtiment B.....	81
Tableau 12 : Procédés pour le transport de l'équipement pour la déconstruction du bâtiment A.....	82
Tableau 13 : Procédés pour le transport de l'équipement pour la déconstruction du bâtiment B.....	82
Tableau 14 : Procédés pour le transport et le traitement des déchets amiantés pour le bâtiment A .	82
Tableau 15 : Procédés pour le transport et le traitement des déchets amiantés pour le bâtiment B .	82
Tableau 16 : Procédés pour le recyclage des granulats. Quantités pour le traitement d' une tonne de déchets inertes.	83
Tableau 17 : Procédés pour le transport et le traitement des autres déchets pour le bâtiment A.....	84
Tableau 18 : Procédés pour le transport et le traitement des autres déchets pour le bâtiment B.....	84
Tableau 19 : Procédés pour la phase chantier, pour la démolition du bâtiment A	85
Tableau 20 : Procédés pour la phase chantier, pour la démolition du bâtiment B	85

Tableau 21 : Matrice d'analyse de qualité des données appliquées à l'étude	87
Tableau 22 : Valeurs des indicateurs d'impacts environnementaux pour 1 m ² de bâtiment démolli. Comparaison entre les bâtiments A et B.....	88
Tableau 23 : Tableau présentant les valeurs des indicateurs de flux pour les bâtiments A et B.....	90
Tableau 24 : Tableau comparatif de deux scénarios sur le bâtiment B (avec ou sans autoconsommation des granulats recyclés). Comparaison des modifications sur le modèle et comparaison des impacts sur le changement climatique pour l'échelle fin de vie et l'échelle granulat	94
Tableau 25 : Impact environnemental d'une tonne de granulat recyclé provenant du bâtiment A et du bâtiment B et d'une tonne de granulat recyclé et de granulat vierge provenant de l'UNPG (l'appauvrissement de la couche d'ozone pour les granulats UNPG n'est pas calculée dans la MIE). .	95
Tableau 26 : Impact d'une tonne de granulat recyclé provenant du bâtiment A et du bâtiment B et d'une tonne de granulat recyclé et granulat vierge provenant de l'UNPG.....	97
Tableau 27 : Tableau présentant la part d'impact attribuée au bâtiment déconstruit et au granulat recyclé pour trois scénarios d'allocation. * Impact de la fin de vie du bâtiment sans transport et traitement des gravats	100
Tableau 28 : Plusieurs définitions d'économie circulaire (extrait, traduit et adapté de (Appendino et al., 2018; Prieto-Sandoval et al., 2018)).....	107
Tableau 29 : Synthèse concernant les indicateurs de circularité. Inspiré et complété de (Zhang et al., 2021a).....	125
Tableau 30 : Synthèse concernant la partie technique des indicateurs de circularité. Inspiré de (Zhang et al., 2021a).....	125
Tableau 31 : Liste des matériaux composant la structure nexorade étudiée	128
Tableau 32 : Scénarios étudiés pour la fin de vie de la structure nexorade	129
Tableau 33 : Résultats de différents indicateurs de circularité en fonction des différents scénarios de fin de vie de la structure nexorade	130
Tableau 34 : Application de l'indicateur de (Zhang et al., 2021a) au cas d'étude de la nexorade.....	135
Tableau 35 : Valeur de l'indicateur BC pour chaque cycle de l'objet pour chaque cycle de la matière	140
Tableau 36 : Probabilité d'occurrence de chaque cycle de la matière et indicateur de circularité global	141
Tableau 37 : Les freins au réemploi et à la réutilisation dans le bâtiment. Adapté de (ADEME et al., 2016). Les freins en gras sont les freins principaux abordés dans cette revue de littérature.	151
Tableau 38 : Principaux éléments des Travaux Publics pouvant faire l'objet de réemploi ou de réutilisation. Adapté de (ADEME et al., 2016).....	162
Tableau 39 : Principaux éléments de Bâtiment pouvant faire l'objet de réemploi ou de réutilisation. Adapté de (ADEME et al., 2016).....	163
Tableau 40 : Les principales définitions du potentiel de réemploi et proposition d'indicateur (liste non exhaustive)	174
Tableau 41 : Matrice simplifiée des critères internes pour le calcul de <i>IPrés</i>	186

Tableau 42 : Matrice simplifiée des critères externes pour le calcul de <i>ICext</i>	186
Tableau 43 : Matrice de détermination de la note concernant le critère Type et la Géométrie de l'élément. *score à affiner après retours d'expériences	190
Tableau 44 : Score du critère Type et Géométrie	190
Tableau 45 : Matrices de détermination du niveau d'état de l'élément	191
Tableau 46 : Extrait de feuille de calcul du score de performance des paramètres techniques. La feuille complète est disponible en annexe VI	194
Tableau 47 : Détermination du résultat du critère Performance en croisant le score de résistance résiduelle et le score des autres paramètres techniques	195
Tableau 48 : Tableau de calcul de l'indice <i>IPrés</i>	195
Tableau 49 : Thématiques et critères pour le calcul de l'indice <i>ICext</i>	196
Tableau 50 : Matrice des niveaux pour les critères techniques.....	198
Tableau 51 : Tableau d'aide à la décision pour la détermination de la mesure du couple vulnérabilité x enjeu dans le cadre d'éléments du bâtiment.....	202
Tableau 52 : Notation du couple vulnérabilité x enjeu	203
Tableau 53 : Liste pour déterminer le score d'accessibilité des sites (pt =point, pts=points) les éléments dans une même case ne peuvent être additionnés	204
Tableau 54 : Score d'accessibilité.....	204
Tableau 55 : Types de connexion définis par (Durmisevic, 2006).....	206
Tableau 56 : Matrice de détermination de l'état de l'élément récupéré à l'interface de l'assemblage	206
Tableau 57 : État de l'interface en fonction du score type x état	207
Tableau 58 : Matrice des critères pour le thème juridique.....	207
Tableau 59 : Matrice de détermination du score de contrainte assurantiel et de garantie	208
Tableau 60 : Enjeu de garantie et assurantiel	209
Tableau 61 : Matrice de niveaux pour les critères économiques	209
Tableau 62 : Matrice de détermination du score de maturité du marché. Il faut additionner les points vérifiés. Un seul choix par case	210
Tableau 63 : Niveau de maturité du marché en fonction du score obtenu	210
Tableau 64 : Ratios de la construction par activité en 2019 (INSEE).....	211
Tableau 65 : Matrice des niveaux de la thématique environnementale	212
Tableau 66 : Matrice de complication santé	213
Tableau 67 : Niveaux de santé	213
Tableau 68 : Liste des risques et nuisances sur chantier pour les travailleurs et les riverains	214
Tableau 69 : Note pour la sécurité des travailleurs et des riverains	215
Tableau 70 : Matrice des niveaux pour le thème social et acteurs.....	215

Tableau 71 : Mesure de la sensibilisation des acteurs	217
Tableau 72 : niveau de sensibilisation des acteurs	217
Tableau 73 : Évolution de la valeur des niveaux de la matrice <i>ICext</i> lors de la calibration (V0 : valeurs initiales, V1 : première calibration, V2 : seconde calibration) les cases en surbrillance (orange) présentent les valeurs effectivement modifiées. Les niveaux correspondent aux niveaux de chaque critère dans la matrice de calcul (Tableau 42). La nomenclature des critères est présentée dans le Tableau 49.	220
Tableau 74 : Liste des critères pour obtenir un score d'indice (critères externes) de 1 ou bien de 0	226
Tableau 75 : Détail de notation des critères pour le calcul de l'indice <i>IPrés</i> pour le cas béton et le cas béton réemployable	228
Tableau 76 : Valeur des niveaux pour l'analyse de sensibilité Variation 2	230
Tableau 77 : Mesure de la dégradation de l'indice <i>IPrés</i> et de l'indicateur <i>PR</i> lors de variations sur deux points de vigilance (Variation 1 et variation 2)	230
Tableau 78 : Indicateur de potentiel de réemploi (<i>PR</i>) obtenu en croisant les variations de l'indice <i>IPrés</i> (lignes) et de l'indice <i>ICext</i> (colonnes)	233
Tableau 79 : Tableaux des résultats théoriques. * et ** : variations des hypothèses de résistance et ferrailage, *** borne supérieure (atteinte dans le cas où l'ensemble des armatures sont assimilées à la position la plus basse).....	253
Tableau 80 : Valeur de résistance des poutres de Paris en prenant en compte un béton de résistance 35 MPa et 22,3 MPa. *si deux lits d'armatures.....	256
Tableau 81 : Placement des billes pour la mesure de la déformation au déformètre à billes	261
Tableau 82 : Estimation de la longueur d'ancrage (l_s) pour différentes résistances d'acier (F_eE) et résistance de béton à 28 jours (f_{c28}) en fonction du diamètre des armatures (\emptyset). (Almohandiss, n.d.)	277
Tableau 83 : Scénario de fin de vie et de construction pour chaque structure étudiée.....	286
Tableau 84 : Scénarios d'allocation (on considère que la structure du bâtiment est dimensionnée pour 100 ans, mais le bâtiment a une durée de vie de 50 ans).....	289
Tableau 85 : Récapitulatif des paramètres de la poutre neuve	289
Tableau 86 : Temps de grue et consommation de la grue pour une UF	293
Tableau 87 : Procédés pour la déconstruction de la poutre étudiée en vue du réemploi	294
Tableau 88 : Procédé de tri et traitement de la poutre étudiée en vue du réemploi.....	294
Tableau 89 : Procédé de construction/ montage d'une poutre en réemploi	295
Tableau 90 : Procédé de démolition d'une poutre pour une tonne de poutre	296
Tableau 91 : Procédé de tri et traitements des déchets du béton armé pour une tonne de poutre démolie.....	297
Tableau 92 : Processus et quantités pour la phase de construction.....	298
Tableau 93 : Sources des distances de transport des constituants du béton armé.....	298

Tableau 94 : Procédé de construction d'une poutre en béton armé à partir de granulats recyclés ou de granulats vierges. Pour une poutre de 437 kg (poutre équivalente réemploi pour le cycle 2)	299
Tableau 95 : Avantages et inconvénients des méthodes d'allocation	313
Tableau 96 : Valeur intermédiaire de l'indicateur BC pour chaque cycle de l'objet pour chaque cycle de la matière pour le cas d'étude réemploi poutre béton armé	319
Tableau 97 : Valeur intermédiaire de l'indicateur BC pour chacun des trois scénarios de circularité pour le cas d'étude poutre béton armé.....	321

ANNEXES

I. HISTORIQUE DE L'ACV (JOLLIET ET AL., 2015)

	Historical Dates of LCA Development
1972	Publication of Limits to Growth by the recently founded Club of Rome, which broadly increased awareness of the limited availability of resources and development based on simulations. Early LCA studies on bottle packaging in the United States.
1973	Energy crisis: Generalization of the balance approach (mainly energy balance).
1977	First life cycle impact assessment method: Swiss ecoscarcity.
1984 and 1991	Ecological balance of packaging materials (Bus 1984; Habersatter and Widmer 1991): Comprehensive packaging LCA that also provided data on energy and materials, acting as a precursor to existing LCA databases.
1992	Club of Rome's founder claimed that the first limitation encountered was typically environmental pollution rather than lack of resources.
1992	CML guide to LCA published by the University of Leiden (the Netherlands) (Heijungs et al. 1992). Rather than focusing simply on air, water, or soil damage, this guide organized environmental impacts into effect-oriented categories, such as acidification and climate change.
1993	LCA "code of practice" published by SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) (SETAC 1993). SETAC is one of the main international scientific organizations involved in developing structural aspects of LCA through various SETAC working groups.
1996	Creation of International Journal of Life Cycle Assessment.
1997–2006	ISO (International Organization for Standardization) published a series of ISO 14000 norms on LCA, in response to the demand to internationally harmonize various methodologies used in LCA. The most recent ISO 14040/14044 standards were published in 2006 (ISO 2006).
2002	Launch of the Life Cycle Initiative, a collaboration between UNEP (United Nations Environmental Program) and SETAC.
2003	Ecoinvent life cycle inventory database released by the ecoinvent center within the Swiss Federal Institutes of Technology.
2008	USEtox toxicity model by UNEP-SETAC Life Cycle Initiative. 2008 Marked interest by large global distributors and manufacturers in life cycle approaches and evaluation of their products.
2009	Extension of LCA application to non-OECD countries—conference on life cycle management in South Africa.

2010	ReCiPe released as a successor to the impact assessment methods Eco-indicator 99 and CML 2002 (Goedkoop et al. 2009).
2011	Global guidance principles for LCA databases by UNEP-SETAC Life Cycle Initiative.
2012	European impact assessment method (Hauschild et al. 2012) in conjunction with a new database proposed by the Joint Research Center (JRC) (Sala et al. 2012) (http://www.mdpi.com/2071-1050/4/7/1412).
2012	IMPACTWorld+ released as a successor to IMPACT2002+.
2013–2015	Flagship project of the Life Cycle Initiative on global guidance for LCA methods with initial focus on climate change, water use, land use, particulate matter impacts, and LCIA framework.

II. LES DECHETS DU BTP

Quantitatifs des natures de déchets pour le BTP en France en 2014 (Service de l'observation et des statistiques, 2017)

Nature des déchets inertes	Quantité totale de déchets inertes (en millions de tonnes)
Béton	19,1
Briques, tuiles, céramiques, ardoises	4,2
Verre	0,2
Enrobés et produits à base de bitume ne contenant ni goudron ni amiante	11,2
Terres et matériaux meubles non pollués	114,8
Graves et matériaux rocheux (hors matériaux de chaussée)	25,0
Matériaux de démolition de chaussées autres que ceux inclus dans les rubriques de ce tableau	12,5
Ballast de voie non pollué	2,2
Boues de dragage et de curage non polluées (hors sédiments de dragage réimmergés)	2,8
Mélanges de déchets inertes	18,1
Autres types de déchets inertes	1,1
Total des déchets inertes	211,2
Nature des déchets non inertes non dangereux	Quantité totale de déchets non inertes non dangereux (en millions de tonnes)
Bois brut ou traité avec des substances non dangereuses (palettes, bois A, bois B, etc.)	1,6
Matières plastiques (y,c sols souples, polystyrène, etc,)	0,6
Métaux ferreux (fer et acier)	1,0
Métaux non ferreux (cuivre, laiton, aluminium, plomb, zinc, inox, étain, etc.)	0,1
Mélange de métaux ferreux et non ferreux	1,7
Matériaux isolants (laine de verre, laine de roche, etc.)	2,4
Plâtre	0,4
Déchets végétaux (souches, etc.)	0,6
Pneus usagés (m3 non décheté)	0,0
Mélanges de déchets non inertes, non dangereux avec une majorité de déchets inertes	1,5
Mélanges de déchets non inertes, non dangereux avec une minorité de déchets inertes	2,0
Autres types de déchets non inertes non dangereux	1,3
Total des déchets non inertes non dangereux	13,2
Nature des déchets dangereux	Quantité totale de déchets dangereux (en millions de tonnes)
Terres et cailloux pollués	1,4

Matériaux contenant de l'amiante	0,6
Enrobés, mélanges bitumineux et produits contenant du goudron	0,4
Huiles hydrauliques, huiles de véhicules	0,1
Déchets de peintures, colles et vernis	0,1
Bois, verre, plastique et emballages souillés avec des substances dangereuses	0,1
Autre	0,1
Total	2,8

III. LES TYPES DE CIMENT

Sources : <https://www.infociments.fr/ciments/types-et-composition> consulté en septembre 2022

CEM I : Le ciment CEM I également appelé ciment Portland, contient au minimum 95 % de clinker et au maximum 5 % de constituants secondaires.

CEM II : Les ciments CEM II (version A ou B), contiennent au minimum 65 % de clinker et au maximum 35 % d'autres constituants comme le laitier de haut-fourneau, « la fumée de silice » (limitée à 10 %) (D), la pouzzolane naturelle (P), les cendres volantes (V), les calcaires (L ou LL), les schistes calcinés (T), les laitiers de Haut fourneau (S). Les ciments CEM II sont bien adaptés pour les travaux massifs.

CEM III : Les CEM III A, B ou C également appelé Ciment de Haut-Fourneau, sont principalement obtenus grâce au mélange de 5 à 64 % de clinker avec 36 à 95 % de laitier de haut-fourneau. Le CEM III/ C (également dit ciment de haut-fourneau) contient au moins 81 % de laitier de haut fourneau.

CEM IV : Les CEM IV A ou B sont des ciments de type pouzzolanique. Ils sont constitués de 45 à 89 % de clinker et de 11 à 55 % d'autres constituants comme le laitier de haut-fourneau, « la fumée de silice », le schiste calciné, la pouzzolane naturelle, les cendres volantes, les calcaires, etc.

Cem V : Les CEM V A ou B sont des ciments qui contiennent entre 20 et 64 % de clinker, 18 à 50 % de laitier de haut-fourneau et 18 à 50 % de cendres volantes siliceuse et/ou de pouzzolanes. Ces ciments sont bien adaptés aux travaux hydrauliques, souterrains, fondations et injections par exemple.

IV. INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE DU PROCESSUS DE RECYCLAGE DES GRANULATS, DU BATIMENT A ET DU BATIMENT B

La collecte des données a été réalisée grâce à un document Excel. Ce document comportait plusieurs onglets : généralités sur le chantier, construction du chantier, déchets, matériaux, machines de construction, équipements, transport des personnes et installations du chantier. Tous les onglets étaient composés d'un tableau regroupant les données nécessaires. La Figure 191 présente un exemple de ce tableau pour le transport d'une personne. Le document Excel a été complété par des entreprises de démolition.

TRANSPORT OF PERSONNEL FROM DIFFERENT COMPANIES AND ORGANIZATIONS							
Date	Name	First name	Distance home/company (km) Outward and Return	Means of transport	Distance company/worksite (km) Outward and return	Means of transport	Comments

Figure 191 : Capture d'écran du document Excel pour la collecte des données. Cette image présente les données nécessaires au transport d'une personne.

V. EXTRAIT DU CCTP DEMOLITION DESAMIANTAGE POUR UN CHANTIER DE LA METROPOLE DU GRAND PARIS

10.4 DEPOSE SOIGNEE POUR REEMPLOI

10.4.1 Réemploi des matériaux, mobiliers, appareillages

Les matériels et mobiliers en bon état du site seront déposés pour réemploi de manière privilégiée.

L'offre de l'entreprise intègre dans son offre les moins-values pour revente de ces produits, avec traçabilité complète de toutes les filières et évacuations par Bordereau de suivi des déchets.

Les opérations d'isolement électrique, isolements aux réseaux, dépose soignée pour réemploi, condition et transport jusqu'à le site de transfert ou de réemploi sont inclus dans l'offre.

10.4.1.1 Le mobilier

Comme évoqué ci-avant, une partie importante du mobilier de bureaux d'ENGIE, va être maintenu en place dans les bâtiments lors du déménagement.

Il sera demandé à l'entreprise de remployer en l'état au maximum, via des filières et entreprises de réemploi, et il est exigé sur le site un réemploi minimal de 30 % en unité de bureaux, armoires, ou désertes.

10.4.1.2 DEEE, Groupes électrogènes, appareillages divers, transformateurs.

L'entreprise intègre avant retrait une mise en sécurité de ces éléments par :

- Isolement électrique via l'entreprise qualifiée du groupement, avec certificat de mise hors exploitation.
- Le retrait préalable de tous les éléments polluants des éléments, y compris gestion de ces derniers en ISDD ou site de traitement spécifique
 - o Vidange des groupes électrogènes et groupes de transformation, sauf conditions de transport spécifique permettant la preuve d'une absence de risque de dispersion d'agents polluants sur le trajet.
 - o Retrait des éléments DEEE dangereux et ou conditionnement spécifique avant transport.
 - o Tous travaux requis pour conformité parfaite de la prestation au code de l'environnement, code de la route et réglementation ADR.
- La traçabilité complète des évacuations de chaque produit, avec photo de chaque élément revalorisé et BSD spécifique

VI. FEUILLE DE CALCUL DES PARAMETRES DE PERFORMANCE POUR L'INDICE DE PERFORMANCE RESIDUELLE (POUR LE CALCUL DE L'INDICATEUR DE POTENTIEL DE REEMPLOI)



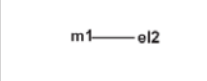


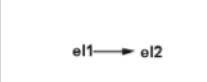

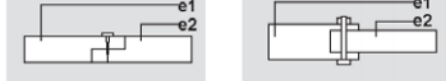
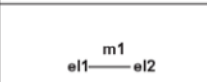





		Exigence requise ? 1 =oui 0=Non	Si l'exigence est requis e pour l'usage future mais non respectée par l'objet à réemployer	Score à reporter dans cette colonne	Partie à réemplir en pourcentage pour chaque paramètre où l'exigence est requise et respectée								Total si exigence requise et respectée
					Risque de pertes ou de dégradations lors des étapes								
					Dépose		Transport		Stockage		Nouvelle installation		
					Pertes	Dégradation	Pertes	Dégradation	Pertes	Dégradation	Pertes	Dégradation	
Mécanique	M1 Effondrement de l'ouvrage (résistance résiduelle): Calculé par ailleurs	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
	M2 Déformation excessive (ELS)	1	10										0
	M3 Conséquences sur les autres ouvrages	1	2	2									0
	M4 Résistances aux accidents	1	4	4									0
Sécurité Incendie	SI1 Stabilité des éléments au feu	1	5										0
	SI2 Apparition et propagation limitée du feu et des fumées	1	5										0

OU :
(si l'exigence est respectée)

	SI3	Sécurité des occupants et des équipes de secours	1	5															0
Hygiène santé	HS1	Mauvaise évacuation des déchets	0	1															0
	HS2	Humidité et transferts hydrique	0	2															0
Sécurité d'utilisation	S1	Glissade, chutes, brulures, ...	0	1															0
	S2	Accessibilité des personnes en situation de handicap	0	1															0
A1		Qualité acoustique	0	1															0
T1		Qualité thermique	0	1															0
Utilisation durable	UD 1	Durabilité	1	2	2														0
	UD 2	Réemployabilité ou recyclabilité	1	2	2														0
QE1		Qualité esthétique	1	2	2														0
Nombre d'exigences			9	Sous Total	12													Sous Total	0
						Total	12												
						Score sur les paramètres techniques (hors résistance résiduelle)	1,33												

Mesure de la résistance résiduelle								
Calcul simplifié de la performance théorique d'un élément neuf de même caractéristiques	Risque de pertes ou de dégradations lors des étapes (en pourcentage)							
Calcul estimé/ approché de la résistance résiduelle au vue de l'état après dépose OU Résistance résiduelle représentative suite à un ou des test destructifs	Dépose		Transport		Stockage		Nouvelle installation	
	Pertes	Dégradation	Pertes	Dégradation	Pertes	Dégradation	Pertes	Dégradation
	/	/						
$Ratio = \frac{R_{rés}}{R_{théo}}$	Total						0 %	
Ratio corrigé des risques de pertes et dégradations				0				

VII. TYPES DE CONNEXIONS DEFINIS PAR (DURMISEVIC, 2006)

	type of connection	graphic representation	dependence in assembly
fixed	 I Direct chemical connection two elements are permanently fixed (no reuse, no recycling)		$m1 \text{---} e12$
	 II direct connections between two pre-made components two elements are dependent in assembly/disassembly (no component reuse)		$e11 \rightarrow e12$
	 III indirect connection with third chemical material two elements are connected permanently with third material (no reuse, no recycling)		$e11 \text{---} m1 \text{---} e12$
	 IV direct connections with additional fixing devices two elements are connected with accessory which can be replaced. If one element has to be removed than whole connection needs to be dismantled		$e11 \rightarrow c1 \rightarrow e12$
	 V indirect connection via dependent third component two elements/components are separated with third element/component, but they have dependence in assembly (reuse is restricted)		$e11 \rightarrow c1 \rightarrow e12$
	 VI indirect connection via independent third component there is dependence in assembly/disassembly but all elements could be reused or recycled		$e11 \rightarrow c1 \leftarrow e12$
	 VII indirect with additional fixing device with change of one element another stays untouched all elements could be reused or recycled		$e3 \rightarrow C \leftarrow e1$ $e2 \uparrow$
flexible			

VIII. EXTRAIT DE LA FEUILLE DE CALCUL EXCEL UTILISEE POUR LA MESURE DE LA RESISTANCE SOUS FLEXION 3 ET 4 POINTS DES POUTRES ET POTEAUX ISSUS DE LA DECONSTRUCTION. POUTRE PUP1.

variables (géométrie)	valeur	unité
Lbis (longueur tot)	1,84	m
L (longueur entre appuis)	1,8	m
b (largeur)	0,5	m
h (hauteur tot)	0,36	m
d (hauteur sans enrobage)	0,32	m
As(aire de ferrailage, en traction)	0,000942478	m ²
a	0,6	m
b' (pour nos calcul a=b')	0,6	m
diamètre armature	20	mm

nombre d'armature	3	unité
-------------------	---	-------

Constantes (hypothèses)	valeur	unité
α_e	15	sans unité
(rapport du module d'élasticité longitudinal de l'acier à celui du béton= coef d'équivalence)		
E (module d'young)	23700	MPa
fck	35	MPa
fctm (résistance en traction)	3,13477348	MPa
fcd	23,33333333	MPa
ρ	2,5	tonnes/m ³
g	10	m/s ⁻²
σ_s (déformation de l'acier élastique)	500	MPa
ϵ_{cu3}	0,00035	sans unité

variables calculées et résultats	valeur	unité
Yg (distance centre de gravité)	0,19019	m
Iz (inertie)	0,00220	m ⁴
Première Fissuration		
Mf (moment)	40,6	kN.m
Qf (force)	64,7	kN
2*Qf (force appliquée par le verin)	1,29E+02	kN
Ff (flèche première fissuration)	2,57E-04	m
flèche dû au poid propre	non calculé	
Rupture		
y (position axe neutre)	0,050	m
Fbc (force reprise par le béton)	0,471	MN
Fs (force reprise par l'acier)	0,471	MN
Mr (moment)	141,3	kN.m
Qr (force rupture)	232,4	kN
2*Qr (force appliquée par le vérin)	4,65E+02	kN

fr (flèche avant rupture) (hyp sans fissuration)	9,22E-04	m
Force vérin (Test flexion 3 points)	3,10E+02	kN
Flèche (Flexion 3 points)	7,22E-04	m

$$Yg = \frac{b * \frac{h^2}{2} + ae * As * d}{b * h + ae * As}$$

$$Iz = ae * As * (d - Yg)^2 + b * (h - Yg)^3 + b * \frac{Yg^3}{3}$$

$$Mf = \frac{fctm * Iz}{h - Yg}$$

$$\text{Flèche} = \frac{Q/1000 * a(3L^2 - 4a^2)}{24 * E * I}$$

$$y = \frac{As * \sigma_s}{0,8 * b * fcd}$$

$$Mr = Fbc * (d - 0,4 * y) = 0,8 * b * y * fcd * (d - 0,4 * y)$$

$$Q = \frac{3}{L} * (M - \rho * g * b * h * \frac{L^2}{8})$$

IX. RESULTAT DES ESSAIS DE COMPRESSION SUR EPROUVETTE DE BETON



PROCES-VERBAL D'ESSAIS
DE RESISTANCE MECANIQUE
SUR BETON HYDRAULIQUE



Cerema - Direction Territoriale Ile-de-France

65 avenue Faidherbe - 93 310 Le Pré Saint Gervais
Téléphone 01 48 38 81 98

Essais de résistance effectués par : CEREMA
Date réception des carottes : 16/02/2022

Conservation dans de l'eau à 20°C à +/- 2°C

ESSAIS SUR BETON DURCI – COMPRESSION

Selon la NF EN 12390-3

N° Prél	Age/date	Haut (mm)	Diam côté	Masse (g)	M.V.A g/cm3	Type essai	F.rupt (KN)	Résist (MPa)	Observations	n° éprouv	Annulé Refusé	Surfaçage	
1	16/02/2022	165	75	1635	2,24	Comp	94,7	21,4		1	Non	Non	LAP
		165	75	1639	2,25	Comp	84	19,0		4	Non	Non	LAP
		165	75	1633	2,24	Comp	117	26,5		7	Non	Non	LAP
Moyenne préél. n° 1 : 22,3									MPa				

ESSAIS SUR BETON DURCI – FENDAGE

Selon la NF EN 12390-6

N° Prél	Age/date	Haut (mm)	Diam côté	Masse (g)	M.V.A g/cm3	Type essai	F.rupt (KN)	Résist (MPa)	Observations	n° éprouv	Annulé Refusé	Surfaçage	
2	16/02/2022	210	75	1883	2,03	Fend	62,1	2,50		1	Non	Non	LAP
Moyenne préél. n° 2 : 2,50									MPa				

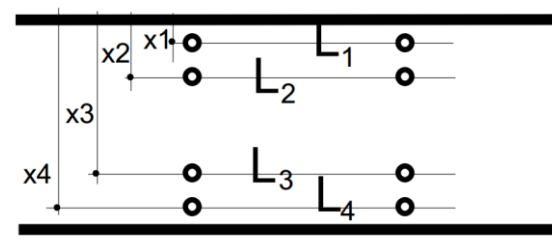
Le Responsable d'Essais :

V. FORTADO

PV. du 16/02/2022

X. PALIERS DES ESSAIS PUP1 ET PUP2 ET RELEVÉ DU DÉFORMÈTRE À BILLE

La distribution des déformations linéaires dans la hauteur de la poutre via un déformètre à bille se calcule de la manière suivante : $\varepsilon_i = \Delta L_i / L_{0i}$ pour chaque ligne i et pour chaque palier. Ln au chargement 1 correspond à la référence pour une sollicitation presque nulle. Les côtes exactes sont notées pour chaque essai, le collage des billes nécessitant une marge de manœuvre.



Élément PuP1 :

Indice (par rapport au haut)	Côte gauche (mm)	Côte droite (mm)
x1	37	35
x2	140	135
x3	233	233
x4	325	320

Numéro du chargement	Couleur de craie	Sollicitation (kN)	L_{n1}	L_{n2}	L_{n3}	L_{n4}
0 (référence)	blanche	0 (2 kN)	0,28	1,05	1,14	1,06
1		50	0,38	1,036	1,12	1,116
2		100	0,29	1,042	1,12	1,044
3		120	0,22	1,04	1,11	1,018
4	Vert	150	0,33	0,99	1,06	1,186
5	Bleu	200	0,31	1,034	1,084	0,962
6		10 (dernier déchargement (après 210))	0,28	1,058	1,132	1,038
7	Rouge	250	0,31	1,042	1,086	0,956
8	vert	270	0,23	1,126	1,094	0,956
9		290	0,25	1,11	1,092	0,976
10	Vert (côté gauche)	300	0,22	1,074	1,078	0,926
11		330	0,2	1,07	1,06	0,892
12	bleu	351	0,252	1,088	1,076	0,906

13	Vert (côté droit vers l'appui)	360	Non mesurable*	1,084	1,088	0,89
14		rupture	Non mesurable*	1,11	1,138	1,03

*lié aux difficultés d'installation des billes, l'espacement possible par le déformètre est dépassé. La mesure n'a donc pas pu être réalisée.

Elément PuP2 :

Indice	Côte gauche (mm)	Côte droite (mm)
x1	35	30
x2	137	135
x3	238	230
x4	323	320

Numéro du chargement	Couleur de craie	Sollicitation (environ) (kN)	L _{n1}	L _{n2}	L _{n3}	L _{n4}
0 (référence)	blanche	0	0,980	0,330	1,490	1,27
1		50	0,990	0,200	1,38	1,04
2		100	0,84	0,30	1,28	1,15
3		120	0,86	0,34	1,255	1,07
4		150	1,07	0,28	1,18	1,106
5	Vert	200	1,112	0,324	1,172	1,09
6	Bleu	240	1,168	0,234	1,34	1,22
7		10 (dernier déchargement)	1,048	0,25	1,36	1,19
8	rouge	270	1,192	0,26	1,25	1,17
9	vert	300	1,22	0,31	1,356	1,10
10	Bleu (côté droit)	310				
11		330	1,258	0,37	1,02	1,08
12	Vert	360	1,28	0,26	1,30	1,17
13	Bleu	380	1,326	0,17	1,29	1,14
14		400	1,32	0,23	1,16	1,13
15	vert	420	1,334	0,25	1,072	1,114
16		Rupture	1,43	0,36	1,44	1,17

17		Déchargement final	1,284	0,34	1,336	1,25
----	--	--------------------	-------	------	-------	------

XI. RESULTATS NUMERIQUES DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX EVALUES POUR L'ETUDE 1

Impact category	Reference unit	P _{rec}	P _{vier}	P _{réem}	P _{recSD}
Acidification des sols et de l'eau	kg SO ₂ eq.	1,8E-01	1,7E-01	1,3E-01	1,6E-01
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC-11 eq.	5,4E-06	4,9E-06	5,5E-06	4,8E-06
Changement climatique	kg CO ₂ eq.	6,7E+01	6,3E+01	3,2E+01	6,4E+01
Eutrophisation	kg PO ₄ ³⁻ eq.	3,4E-02	3,2E-02	3,2E-02	3,0E-02
Formation d'ozone photochimique	kg ethylene eq.	1,1E-02	1,0E-02	1,3E-02	1,0E-02
Épuisement des ressources abiotiques - combustibles fossiles	MJ	6,6E+02	6,1E+02	4,7E+02	6,2E+02
Épuisement des ressources abiotiques - éléments	kg antimony eq.	2,4E-06	3,4E-06	9,9E-10	2,4E-06

XII. RESULTATS NUMERIQUES DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX EVALUES POUR L'ETUDE 2

Catégorie d'impact	Unité de référence	P _{vier}	P _{rec}	P _{réem}
Acidification des sols et de l'eau	kg SO ₂ eq.	8,1E-01	7,4E-01	6,3E-01
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC-11 eq.	2,5E-05	2,2E-05	2,2E-05
Changement climatique	kg CO ₂ eq.	2,6E+02	2,5E+02	1,8E+02
Eutrophisation	kg PO ₄ ⁻⁻⁻ eq.	1,6E-01	1,5E-01	1,4E-01
Formation d'ozone photochimique	kg ethylene eq.	4,1E-02	3,8E-02	4,3E-02
Épuisement des ressources abiotiques - combustibles fossiles	MJ	2,7E+03	2,5E+03	2,1E+03
Épuisement des ressources abiotiques - éléments	kg antimony eq.	1,3E-05	1,1E-05	6,7E-06

XIII. RESULTATS NUMERIQUES DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX EVALUES POUR L'ETUDE 3

	Cycle 1		Cycle 2		Cycle 3	
	Const	FdV	Const	FdV	Const	FdV
Cut off	2,3E-01	1,1E-01	2,1E-02	1,1E-01	2,1E-02	1,3E-01

Acidification des sols et de l'eau (kg SO2 eq.)	EoL	2,1E-02	1,1E-01	2,1E-02	1,1E-01	2,3E-01	1,3E-01
	EC EF	1,3E-01	1,2E-01	2,1E-02	1,1E-01	1,3E-01	1,2E-01
	Pas-2050	9,1E-02	1,2E-01	9,1E-02	1,2E-01	9,1E-02	1,2E-01
	SIA 2032	1,3E-01	1,2E-01	1,3E-01	1,2E-01	2,1E-02	1,1E-01
Appauvrissement de la couche d'ozone (kg CFC-11 eq.)	Cut off	6,8E-06	4,3E-06	1,2E-06	4,3E-06	1,2E-06	4,7E-06
	EoL	1,2E-06	4,3E-06	1,2E-06	4,3E-06	6,8E-06	4,7E-06
	EC EF	4,0E-06	4,5E-06	1,2E-06	4,3E-06	4,0E-06	4,5E-06
	Pas-2050	3,0E-06	4,4E-06	3,0E-06	4,4E-06	3,0E-06	4,4E-06
	SIA 2032	4,0E-06	4,5E-06	4,0E-06	4,5E-06	1,2E-06	4,3E-06
Changement climatique (kg CO2 eq.)	Cut off	9,9E+01	2,6E+01	5,6E+00	2,6E+01	5,6E+00	2,1E+01
	EoL	5,6E+00	2,6E+01	5,6E+00	2,6E+01	9,9E+01	2,1E+01
	EC EF	5,2E+01	2,3E+01	5,6E+00	2,6E+01	5,2E+01	2,3E+01
	Pas-2050	3,7E+01	2,4E+01	3,7E+01	2,4E+01	3,7E+01	2,4E+01
	SIA 2032	5,2E+01	2,3E+01	5,2E+01	2,3E+01	5,6E+00	2,6E+01
Eutrophisation (kg PO4--- eq.)	Cut off	4,6E-02	2,6E-02	6,4E-03	2,6E-02	6,4E-03	2,7E-02
	EoL	6,4E-03	2,6E-02	6,4E-03	2,6E-02	4,6E-02	2,7E-02
	EC EF	2,6E-02	2,6E-02	6,4E-03	2,6E-02	2,6E-02	2,6E-02
	Pas-2050	2,0E-02	2,6E-02	2,0E-02	2,6E-02	2,0E-02	2,6E-02
	SIA 2032	2,6E-02	2,6E-02	2,6E-02	2,6E-02	6,4E-03	2,6E-02
Formation d'ozone photochimique (kg ethylene eq.)	Cut off	1,3E-02	1,1E-02	1,3E-03	1,1E-02	1,3E-03	4,2E-03
	EoL	1,3E-03	1,1E-02	1,3E-03	1,1E-02	1,3E-02	4,2E-03
	EC EF	7,1E-03	7,8E-03	1,3E-03	1,1E-02	7,1E-03	7,8E-03
	Pas-2050	5,2E-03	9,0E-03	5,2E-03	9,0E-03	5,2E-03	9,0E-03
	SIA 2032	7,1E-03	7,8E-03	7,1E-03	7,8E-03	1,3E-03	1,1E-02
Épuisement des ressources abiotiques - combustibles fossiles (MJ)	Cut off	8,3E+02	3,8E+02	8,8E+01	3,8E+02	8,8E+01	3,7E+02
	EoL	8,8E+01	3,8E+02	8,8E+01	3,8E+02	8,3E+02	3,7E+02
	EC EF	4,6E+02	3,8E+02	8,8E+01	3,8E+02	4,6E+02	3,8E+02
	Pas-2050	3,4E+02	3,8E+02	3,4E+02	3,8E+02	3,4E+02	3,8E+02
	SIA 2032	4,6E+02	3,8E+02	4,6E+02	3,8E+02	8,8E+01	3,8E+02

Épuisement des ressources abiotiques - éléments (kg antimony eq.)	Cut off	6,4E-06	7,7E-10	2,2E-10	7,7E-10	2,2E-10	1,9E-09
	EoL	2,2E-10	7,7E-10	2,2E-10	7,7E-10	6,4E-06	1,9E-09
	EC EF	3,2E-06	1,4E-09	2,2E-10	7,7E-10	3,2E-06	1,4E-09
	Pas-2050	2,1E-06	1,2E-09	2,1E-06	1,2E-09	2,1E-06	1,2E-09
	SIA 2032	3,2E-06	1,4E-09	3,2E-06	1,4E-09	2,2E-10	7,7E-10

XIV. RESULTATS NUMERIQUES DES INDICATEURS DE FLUX EVALUES POUR L'ETUDE 3

		Cycle 1		Cycle 2		Cycle 3	
		Const	FdV	Const	FdV	Const	FdV
Déchets dangereux éliminés (kg)	Cut off	5,0	5,3	0,2	5,3	0,2	0,2
	EoL	0,2	5,3	0,2	5,3	5,0	0,2
	EC EF	2,6	2,8	0,2	5,3	2,6	2,8
	Pas-2050	1,8	3,6	1,8	3,6	1,8	3,6
	SIA 2032	2,6	2,8	2,6	2,8	0,2	5,3
Déchets non dangereux éliminés (kg)	Cut off	22,7	23,9	4,0	23,9	4,0	789,2
	EoL	4,0	23,9	4,0	23,9	22,7	789,2
	EC EF	13,3	406,5	4,0	23,9	13,3	406,5
	Pas-2050	10,2	279,0	10,2	279,0	10,2	279,0
	SIA 2032	13,3	406,5	13,3	406,5	4,0	23,9
Déchets radioactifs éliminés (kg)	Cut off	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	EoL	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	EC EF	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Pas-2050	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	SIA 2032	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Eau douce (m3)	Cut off	17,7	0,2	0,0	0,2	0,0	0,0
	EoL	0,0	0,2	0,0	0,2	17,7	0,0
	EC EF	8,8	0,1	0,0	0,2	8,8	0,1
	Pas-2050	5,9	0,1	5,9	0,1	5,9	0,1
	SIA 2032	8,8	0,1	8,8	0,1	0,0	0,2
Total énergie primaire non renouvelables (MJ)	Cut off	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	EoL	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	EC EF	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Pas-2050	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

	SIA 2032	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Total énergie primaire renouvelables (MJ)	Cut off	58,4	36,0	4,2	36,0	4,2	5,0
	EoL	4,2	36,0	4,2	36,0	58,4	5,0
	EC EF	31,3	20,5	4,2	36,0	31,3	20,5
	Pas-2050	22,2	25,7	22,2	25,7	22,2	25,7
	SIA 2032	31,3	20,5	31,3	20,5	4,2	36,0
Énergie primaire non renouvelable (sauf matières premières) (MJ)	Cut off	1421,5	623,2	128,6	623,2	128,6	412,3
	EoL	128,6	623,2	128,6	623,2	1421,5	412,3
	EC EF	775,1	517,8	128,6	623,2	775,1	517,8
	Pas-2050	559,6	552,9	559,6	552,9	559,6	552,9
	SIA 2032	775,1	517,8	775,1	517,8	128,6	623,2
Énergie primaire non renouvelable utilisée comme matière première (MJ)	Cut off	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	EoL	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	EC EF	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Pas-2050	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	SIA 2032	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Énergie primaire renouvelable (sauf matières premières) (MJ)	Cut off	58,4	36,0	4,2	36,0	4,2	5,0
	EoL	4,2	36,0	4,2	36,0	58,4	5,0
	EC EF	31,3	20,5	4,2	36,0	31,3	20,5
	Pas-2050	22,2	25,7	22,2	25,7	22,2	25,7