

Louvain School of Management

Les stratégies d'économie circulaire appliquées au béton de construction en Belgique

Auteur·e(s) : **Alice GIOT, Louis SARTENAER**
Promoteur·rice(s) : **Emmanuel MOSSAY**
Année académique 2023-2024
Travail de fin d'études (TFE) en vue d'obtenir le titre de
Master [60] en sciences de gestion
Horaire de jour

RÉSUMÉ

Pour répondre à l'urgence climatique et à la surexploitation des ressources naturelles, de nombreux paradigmes ont vu le jour au cours des dernières décennies et notamment celui de l'économie circulaire.

Le secteur de la construction est le plus grand consommateur de matières premières (le béton à lui seul représente 6 milliards de m^3 par an) mais c'est aussi un des secteurs avec le plus d'opportunités pour implémenter des techniques de circularité, lesquelles se développent en nombre au cours des dernières années.

Ce travail de fin d'études (TFE) fait un état des lieux de ces différentes techniques d'économie circulaire appliquées au béton en Belgique, de leur maturité, des freins et des leviers à leur utilisation, en combinant les ressources publiquement disponibles avec une série d'entretiens avec un panel de professionnels du secteur du béton en Belgique.

Est ensuite présenté un processus décisionnel pour rendre l'utilisation du béton la plus "verte" possible, en combinant des approches "bas carbone" et ces approches circulaires tout au long de la chaîne de valeur du béton.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier les personnes à l'origine de notre réflexion vers nos questions de recherches : Eléonore de Roissart (Buildwise) pour avoir proposé une série de sujets combinant à la fois le génie civil et la gestion et Julie Hermans (LSM) pour les avoir initialement proposés comme sujet de mémoire. Évidemment nous remercions grandement Emmanuel Mossay d'avoir accepté d'encadrer ce TFE, de nous avoir aiguillés à plusieurs reprises dans notre recherche et pour ses mises en contact avec les professionnels du milieu. Enfin, nous remercions Jean-François Cap (EPL, SECO) de nous avoir cadrés pour les premiers aspects techniques concernant le béton de réemploi.

Nous remercions également tous les intervenants avec qui nous avons pu échanger sur le sujet de l'économie circulaire du béton, que ce soit au détour d'une job fair, via un échange de mails, lors d'une courte réunion ou encore lors de longs appels enrichissants. La liste complète des entreprises s'étant prêtées à l'exercice se retrouve dans le Tableau 1.1.

Enfin, nous remercions notre entourage, famille comme amis et plus particulièrement nos "compagnons de galère" avec qui nous terminons notre parcours académique. Un grand merci également à nos parents pour leur relecture.

TABLE DES MATIÈRES

1	Introduction	1
1.1	Motivations	1
1.2	Objectifs	3
1.3	Structure du TFE et méthodologie	3
2	Le béton et l'industrie de la construction en Belgique	5
2.1	Définitions importantes	5
2.2	Cadre légal et assurances	7
2.3	Acteurs de la construction	8
2.4	Le réemploi dans le secteur de la construction	9
3	La circularité du béton	13
3.1	Echelle de Lansink	13
3.2	Certifications et labels encourageant la circularité	15
3.3	Recyclage du béton	16
3.3.1	Granulats de béton	17
3.3.2	Impact environnemental du béton recyclé	20
3.3.3	Granulats mixtes et granulats fins	21
3.3.4	Rutte Groep et le projet UrbanMine	21
3.4	Réparation et protection des ouvrages en béton	23
3.5	Réemploi du béton	25
3.6	Repenser le modèle pour la circularité	28
3.7	Bétons "Bas Carbone"	30
4	Conclusions et recommandations	32
4.1	Conclusions	32
4.2	Recommandations	33
	Bibliographie	36

CHAPITRE

1

INTRODUCTION

1.1 Motivations

Dans le monde, le secteur de la construction est le premier consommateur de matières premières et de matériaux, avec en tête de proue le béton qui représente à lui seul 6 milliards de m^3 par an. En plus de l'impact écologique et sur les écosystèmes que génère l'exploitation de ces matières premières (eau, sable, granulats, calcaire, argile,...), les déchets de l'industrie de la construction représentent l'une des sources principales de déchets dans le monde avec par exemple près de 35% des déchets produits annuellement en Europe directement issus du secteur de la construction. Il en va de même en Belgique où chaque année plus de 20 millions de tonnes de déchets de construction et de démolition sont produits.[47]

L'impact sur l'environnement ne se limite malheureusement pas à l'extraction des matières premières. La transformation (production de ciment, de béton,...) et le transport (de milliards de tonnes par an) sont évidemment des facteurs principaux, mais même en fin de cycle de vie, les matériaux continuent à avoir un impact non négligeable car ils doivent encore être traités. En effet, les déchets pierreux mis en décharge occuperaient un espace précieux et pourraient engendrer des émissions dans le sol et dans les nappes phréatiques.[47]

Cependant, le secteur de la construction offre également une opportunité idéale de valorisation des déchets pierreux. Depuis des décennies, des solutions techniques et des systèmes de gestion ont été développés pour permettre le réemploi contrôlé des débris issus des bâtiments et des routes, sous forme de granulats recyclés. Ces mesures, combinées à l'intégration généralisée de granulats recyclés dans les cahiers des charges-types, ont favorisé la valorisation de ces flux de déchets, principalement dans la construction routière, particulièrement pour les remblais et les couches de fondation et de sous-fondation (où on peut utiliser jusqu'à 100% de granulats recyclés), mais également pour les fondations et les sous-fondations de bâtiments.

La Belgique se positionne ainsi comme l'un des leaders européens en matière de recyclage des déchets de construction et de démolition, avec un taux de recyclage dépassant les 90%. [47]

Ainsi, un béton fabriqué en partie ou en totalité avec des granulats recyclés obtient de meilleurs résultats qu'un béton à base de granulats primaires pour certains indicateurs environnementaux tels que l'utilisation du sol, l'épuisement des ressources,... Néanmoins, par rapport au score environnemental global du béton, la réduction de l'impact environnemental obtenue grâce au remplacement des granulats primaires par des granulats recyclés est limitée. Ce phénomène est lié à l'importante contribution de l'utilisation de ciment, lequel a un impact considérable sur l'environnement et notamment sur le réchauffement climatique en raison des importantes quantités de CO₂ émises lors de sa production. Dans le cas du béton armé, l'armature a, elle aussi, un impact environnemental non négligeable. [20] [32] [47]

De ces constatations est donc née l'idée d'appliquer un autre modèle de l'économie circulaire au cycle de vie du béton : le réemploi et/ ou la réutilisation au lieu du recyclage. Le réemploi, contrairement au concassage, consiste à utiliser de nouveau un élément de construction en préservant au maximum son intégrité formelle ainsi que ses qualités techniques et architecturales. [2] (voir Figure 1.1).

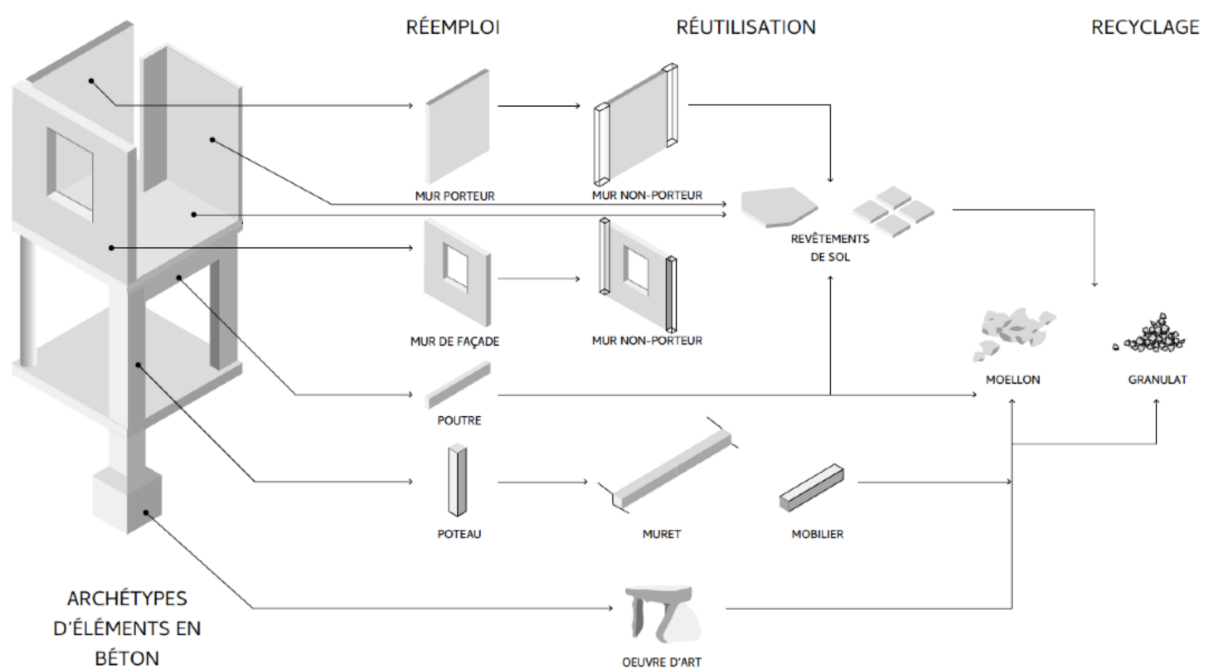


FIGURE 1.1 – Principales possibilités de réemploi et de réutilisation pour des éléments en béton. [2]

Ces deux paradigmes, le recyclage et le réemploi, ne sont que deux facettes des différents aspects de l'économie circulaire. Ces facettes ne sont ni mutuellement exclusives, ni incompatibles avec le reste des modèles d'économie circulaire, particulièrement dans un secteur aussi complexe que la construction et pour un matériau aussi important et complexe que le béton.

1.2 Objectifs

Le terme d'économie circulaire se réfère à de nombreux paradigmes et de nombreuses possibilités dans le domaine de la construction. Cependant, en dépit d'une bonne volonté générale de la part de la plupart des acteurs du secteur, beaucoup de pratiques restent encore marginalement adoptées malgré qu'elles aient pu faire leurs preuves dans des projets pilotes ou de recherche. Une partie du problème vient du fait que l'information reste encore fortement dispersée quant aux possibilités (mais également aux freins et législations) mais cela n'explique pas tout.

Les objectifs de ce TFE seront donc :

- Décrire les différents paradigmes d'économie circulaire applicables au béton de construction ;
- Mettre en évidence les techniques appliquées de manière industrielle et ayant fait leurs preuves dans le monde professionnel de la construction en Belgique ou dans des pays voisins ;
- Identifier les freins et les leviers à l'utilisation des différents paradigmes, tant d'un point de vue technique que légal, économique, environnemental,...
- Déterminer les pratiques à haut potentiel et les intégrer à un processus décisionnel pour rendre l'utilisation du béton la plus "verte" possible, en combinant des approches "bas carbone" et des approches circulaires.

Si l'ensemble des paradigmes applicables au béton seront couverts, une attention plus particulière sera portée au réemploi d'éléments en béton car c'est celui encore le plus marginalement appliqué à ce matériau et qui suscite donc le plus d'intérêt pour ce TFE.

1.3 Structure du TFE et méthodologie

Pour réaliser ces objectifs, ce TFE se base à la fois sur des publications scientifiques et des publications d'acteurs de la construction en Belgique, comme Buildwise, mais également sur un échange, sous forme d'entretiens non-directifs, avec un panel de professionnels de l'industrie (voir listing Table 1.1) afin d'identifier de manière plus pertinente la réalité du terrain.

Dans un premier temps, une description du contexte de l'industrie complexe de la construction (définitions du béton, acteurs, cadre légal, assurances,...) ainsi qu'une revue des implications du réemploi dans le secteur seront rapidement abordées afin de clarifier la complexité du secteur dans lequel s'inscrit ce TFE.

Par la suite, une revue des différentes pratiques circulaires sera entreprise en suivant la théorie de l'échelle de Lansink afin de mettre en évidence les freins et leviers à chacune d'entre elles et de permettre de conclure avec une série de recommandations pour le secteur du béton de construction en Belgique.

Entreprise	Description
	Label de certification de qualité des matériaux
	Bureau d'études et Entreprise de construction
	Bureau de consultance en durabilité de l'immobilier
	Bureau d'études et d'architecture
	Bureau d'études et Entreprise de construction
	Institut de recherche et conseil pour la construction en Belgique
	Plateforme de réemploi de matériaux
	Assureurs
	Entreprise de construction
	Fournisseur d'éléments préfabriqués
	Plateforme de réemploi de matériaux
	Bureau de contrôle et de certification
	Bureau d'études
	Entreprise de construction et Promoteur immobilier

TABLE 1.1 – Listing des entreprises interrogées sur la question de l'économie circulaire du béton en Belgique dans le cadre de ce TFE

CHAPITRE

2

LE BÉTON ET L'INDUSTRIE DE LA CONSTRUCTION EN BELGIQUE

2.1 Définitions importantes

Le **béton de ciment**, souvent désigné simplement comme le "béton", est un matériau composite constitué de sable, de gravier, de ciment (composé de calcaire et d'argile broyés, cuits à très haute température puis broyés à nouveau), et d'eau. Les proportions de ces composants varient en fonction de l'application spécifique du béton. Des adjuvants tels que des accélérateurs ou des retardateurs de prise ou de durcissement peuvent également être ajoutés à sa formulation pour lui conférer des propriétés spécifiques, ou encore pour modifier son ouvrabilité.

Derrière ce terme de béton se cachent donc une multitude de matériaux différents que l'on peut classer selon leur type (béton armé, fibré et précontraint) ou selon leur technique de mise en œuvre (béton préfabriqué ou coulé sur place)[2] :

- **Le béton armé** est une forme courante de béton dans laquelle des armatures en acier sont intégrées. Ces armatures, dont la disposition, les sections, la répartition, les ancrages et l'adhérence varient en fonction des charges à supporter, renforcent le béton et lui permettent de mieux résister aux forces de traction.
- **Le béton fibré**, également appelé béton de fibres, est un béton dans lequel des fibres (comme l'inox, le proplène, le verre filé, le carbone, etc.) sont incorporées. Ces fibres forment un maillage qui améliore la cohésion et la résistance du béton, le rendant ainsi plus adapté à certains usages spécifiques.
- **Le béton précontraint** est un type de béton auquel une force de compression permanente est appliquée avant sa mise en service. Cette compression est obtenue en tendant

les armatures, soit après le coulage du béton (post-contrainte), soit avant le coulage (pré-tension). Cette technique vise à empêcher le béton de subir des efforts de traction lors de son utilisation.

- **Le béton préfabriqué** désigne des éléments de béton fabriqués en dehors de leur emplacement final, puis assemblés sur le chantier. Cette méthode permet d'accélérer la construction en utilisant des composants préfabriqués, fabriqués en usine ou sur site, puis assemblés selon des systèmes de liaison appropriés.
- **Le béton coulé sur place** est mis en place dans des coffrages ou des banches sur le chantier lui-même. Il peut être produit sur place ou dans une centrale à béton à proximité du chantier. Cette méthode est utilisée pour des éléments de construction de tailles variées, et les coffrages peuvent être standards ou sur mesure selon les exigences du projet.

De par ses nombreux avantages le béton est donc le matériau de construction le plus utilisé dans le monde, ce qui veut dire, comme énoncé dans l'introduction de ce document, qu'il est aussi le principal déchet lors de la **démolition** des bâtiments et ouvrages. Heureusement, les modes de production de déchets dans le secteur de la construction ont connu une évolution significative en réponse aux législations récentes concernant la gestion des déchets. Cette évolution a conduit à des pratiques plus respectueuses de l'environnement, passant de simples démolitions à des concepts plus élaborés de démolition sélective et de déconstruction.[26]

- **La démolition sélective** représente une approche qui garantit la séparation des déchets inertes, sans contamination, et aptes au recyclage. Cette méthode permet la séparation des différentes fractions de déchets non inertes (bois, plastique, isolant, métaux, etc.) ainsi que des fractions dangereuses (comme l'amiante-ciment, le goudron, etc.) directement sur le chantier. En séparant soigneusement ces matériaux, la démolition sélective favorise la valorisation des déchets et réduit la quantité de déchets envoyés en décharge.
- **La déconstruction**, quant à elle, consiste à désassembler un bâtiment en préservant certains éléments dans le but de les réutiliser. Contrairement à la démolition traditionnelle qui vise à tout détruire, la déconstruction identifie les éléments pouvant être récupérés et réemployés dans d'autres projets. Cette approche contribue à réduire le gaspillage de matériaux de construction et à prolonger la durée de vie utile des ressources existantes. C'est cette méthode qui permet le réemploi d'éléments en béton.

La fraction minérale des déchets de construction et de déconstruction est considérée comme déchet inerte. Ces déchets inertes valorisables pour produire des granulats recyclés sont communément séparés en trois grandes sortes [26] :

- **Les déchets de béton** proviennent d'une démolition sélective ciblant spécifiquement les éléments en béton d'un ouvrage. Selon leur origine, ils peuvent être transformés en granulats de haute qualité. Les **granulats de béton** provenant de bétons de structure (poutre en béton armé, etc.) peuvent même être utilisés dans des ouvrages avec des taux de substitution (fraction des agrégats recyclés dans un béton) allant jusqu'à 30%.
- **Les déchets mixtes** représentent en tonnage la fraction la plus importante produite en Wallonie. Ils sont typiquement constitués d'un mélange de différents déchets de construction (briques, blocs en béton, tuiles, faïences, céramiques, etc.). Les **granulats mixtes** peuvent être utilisés pour différentes applications, avec la qualité diminuant proportionnellement à la fraction de briques dans le mélange. Un granulats avec >50% de briques ne pourra être utilisé que pour des applications de remblai.

- **Les déchets hydrocarbonés** proviennent essentiellement de la démolition sélective des voiries et de la déconstruction de parkings et autres surfaces asphaltées. Les **granulats d'hydrocarbonés** sont définis en fonction de leur composition (pourcentage des différents constituants). S'ils sont suffisamment purs et que leur qualité est suffisante, ils peuvent être considérés comme agrégats d'enrobés bitumineux (AEB) et être orientés vers la production de nouveaux hydrocarbonés.

2.2 Cadre légal et assurances

En Belgique, plusieurs assurances spécifiques au domaine de la construction existent, permettant de couvrir à la fois le chantier et les dégâts pouvant survenir après réception de l'ouvrage. Lorsqu'un entrepreneur souscrit à une assurance, il transfère une partie de ses responsabilités à l'assureur qui sera donc financièrement responsable des dégâts subits par l'ouvrage en cas d'aléa (imprévu, caractère aléatoire, comme des vols, intempéries, incendie, faute de l'assuré lui-même...). Ces différentes assurances sont :

- L'assurance **tous risques chantier** est une assurance volontaire qui a pour but de couvrir les opérations de chantier et les travaux jusqu'à la réception provisoire de l'ouvrage. Elle est en général souscrite par l'entrepreneur général et/ou le maître d'ouvrage mais couvre également les entrepreneurs associés, l'architecte et le bureau d'études.
- L'assurance **responsabilité décennale** permet aux entrepreneurs, architectes et bureaux d'études d'assurer les dommages subis après la réception de l'ouvrage sur la période de 10 ans couvrant sa responsabilité décennale, limités aux dommages affectant la solidité, la stabilité et l'étanchéité. Depuis 2018, cette assurance est obligatoire pour les habitations (ouvrages avec >50% de surface destinée à l'habitation) mais elle reste facultative pour les ouvrages de génie civil.
- Depuis 2019, la loi impose également aux professions intellectuelles comme les architectes de souscrire une assurance **responsabilité civile**. [5]

Il est cependant important de noter que la décision d'assurer ou non un chantier (et donc par extension les techniques utilisées dans ce chantier) revient à l'assureur qui engage sa responsabilité financière. Cette décision va donc dépendre de plusieurs critères, comme l'expertise et la réputation de l'entrepreneur mais également du type de techniques employées :

- En cas de **techniques courantes**, c'est-à-dire des pratiques ayant fait leur preuves, qui sont largement utilisées et qui font partie des compétences de l'entrepreneur, la décision est souvent positive, sous réserve d'une vérification par le bureau d'études interne de l'assureur pour les petits projets ou bien par un bureau de contrôle (ex : SECO) pour les projets plus conséquents, à charge de l'entrepreneur.
- A l'inverse, en cas de **techniques non courantes**, c'est-à-dire des pratiques déjà connues, avec un cadre légal mais dont l'expérience est encore limitée, le processus de décision est plus compliqué. En plus de la vérification par un bureau de contrôle, il sera demandé à l'entrepreneur de fournir un certificat de qualité (ex : BENOR) attestant que ces techniques suivent le cadre des normes de calcul (Eurocode, ...), des normes de mise en œuvre (Spécifications techniques unifiées (STS)), ainsi que certaines règles professionnelles. Ces réglementations et normes obligatoires ou non proviennent de différents pouvoirs publics (voir Figure 2.1). En cas de doute de la part de l'assureur, il

peut arriver que la demande d'assurance de technique non courante soit acceptée mais sous réserve d'une augmentation de la franchise de l'assuré.

- Finalement, pour les **techniques innovantes**, c'est-à-dire qui ne sont pas encore couvertes par un cadre normatif, la décision est en général négative et l'entièreté de la responsabilité reste à la charge de l'entrepreneur s'il décide tout de même d'appliquer ces techniques.

En comparaison avec d'autres pays, la Belgique est encore assez frileuse quand il s'agit d'assurer des techniques non courantes ou innovantes mais depuis quelques années une bonne tendance se dégage pour des projets d'économie circulaire. Malheureusement, malgré la bonne volonté de nombreux acteurs, les nouveautés se heurtent rapidement à la réalité financière du secteur et notamment à la prudence encore plus accentuée des réassureurs.

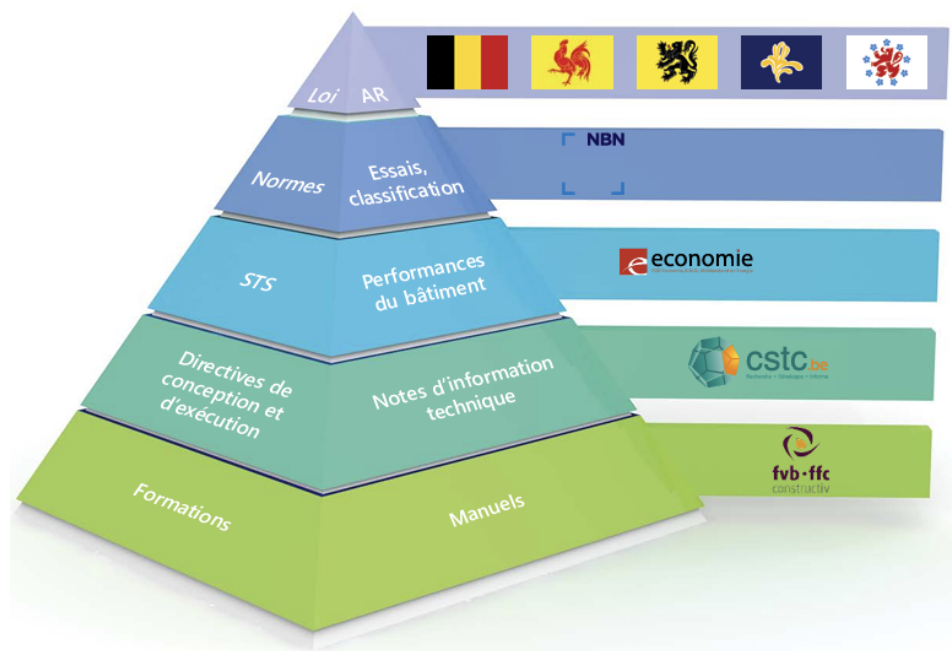


FIGURE 2.1 – Échelle des règles et normes du domaine de la construction en Belgique (Source [19])

2.3 Acteurs de la construction

Afin de comprendre les possibilités et les obstacles à la circularité du béton, il est nécessaire d'avoir une vision d'ensemble des différents acteurs concernés tout au long du cycle de vie d'une construction. (voir Figure 2.2). Dans la filière linéaire classique du béton, on peut identifier ces acteurs plus en détail :

Deux échelons de fournisseurs peuvent être distingués : les fournisseurs primaires, qui fournissent les matériaux nécessaires à la fabrication du béton, et les fournisseurs secondaires, qui fournissent du béton sous différentes formes. Sable, granulats, argiles et calcaire sont extraits dans des **carrières** et le ciment est ensuite fabriqué par des **cimentiers**. Les **fournisseurs de béton** se spécialisent quant à eux soit en béton coulé sur place, ce qui implique une logistique

de transport et de maintien du béton, soit en béton préfabriqué, ce qui implique des chaînes de production en usine.

Les caractéristiques du béton à fournir sont déterminées lors de la phase de conception pour correspondre aux attentes d'une série d'acteurs : le **client**, qui peut être un particulier, une entreprise ou un organisme public, détermine ses besoins qui sont ensuite transformés en projet par un **architecte** ou un bureau d'architecture, lesquels vont en général confier le dimensionnement du béton (volume, qualité, armatures,...) à un **bureau d'études** composé d'ingénieurs qui fait en sorte de rendre la structure conforme aux normes européennes et belges. Des **experts indépendants** sont ensuite missionnés pour vérifier et assurer la qualité et la stabilité des éléments en béton.

Une fois la conception terminée, un **entrepreneur général** est sélectionné sur base d'un appel d'offre pour conduire le chantier. C'est lui qui engage les différents fournisseurs et **sous-traitants** sur base du cahier des charges du projet. Tout ces acteurs sont responsables de la mise en oeuvre et doivent donc contracter des **assurances** spécifiques.

Une fois la construction achevée, une série d'acteurs vont s'occuper de la promotion, de la vente et de l'exploitation de l'ouvrage (voir Figure 2.2). Une fois l'ouvrage en fin de vie, le **propriétaire** engage une **société de démolition** qui est responsable de l'évacuation des matériaux, vers une décharge, vers un site d'enfouissement ou vers un **recycleur**.

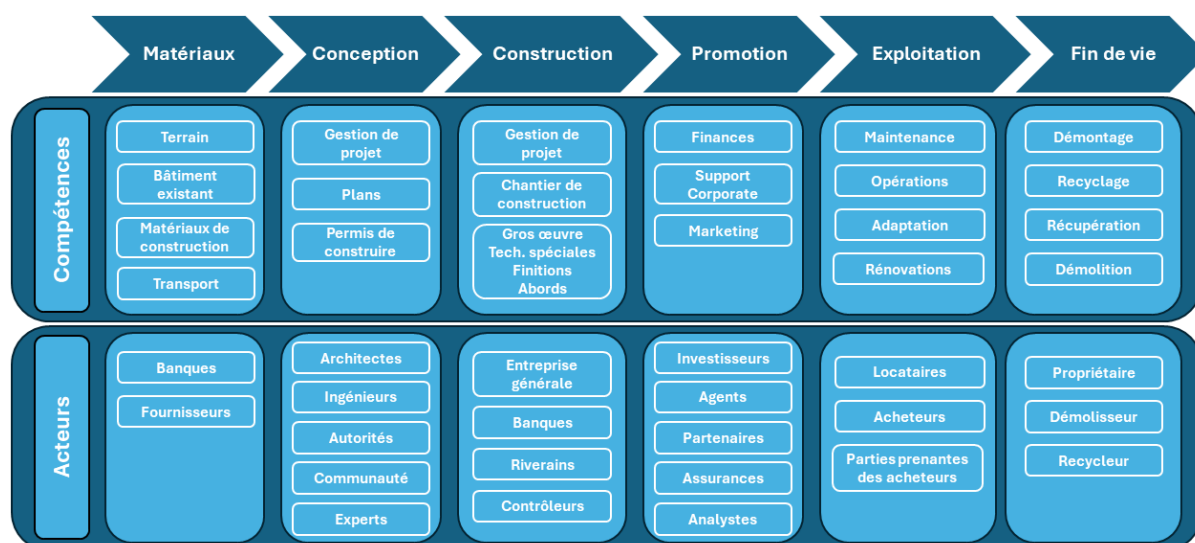


FIGURE 2.2 – Liste non exhaustive des acteurs de la construction. (Inspiré de [46])

2.4 Le réemploi dans le secteur de la construction

Le réemploi dans le secteur de la construction est un processus complexe, impliquant de nombreux acteurs du secteur. Dans le cadre d'une étude sur le potentiel du réemploi en France [4], le Centre Scientifique Et Technique Du Bâtiment (CSTB) a identifié les 4 étapes cruciales d'un projet de réemploi :

1. Les études en amont de l'opération

Lors de l'avant-projet de déconstruction d'un ouvrage, il est nécessaire d'identifier clairement les objectifs de réemploi (quels matériaux, quelles sections de l'ouvrage, quels volumes,...) afin de pouvoir programmer les opérations suivantes. C'est aussi lors de cette étape qu'une analyse des moyens financiers doit être effectuée pour déterminer la marge de manoeuvre (la déconstruction sélective étant généralement plus chère que la démolition).

Une fois les objectifs et moyens définis, il reste à faire une étude de l'ouvrage et de son implémentation. L'étude du site est nécessaire afin de déterminer les voies d'accès mais également les points d'interaction avec l'extérieur qui devront être pris en compte lors de la déconstruction (coupure des réseaux, ouvrages voisins, traitement sanitaire du site,...). Il est également nécessaire d'identifier l'amiante et le reste des déchets dangereux en vue de leur traitement, ainsi que d'identifier clairement les déchets non récupérables, les déchets recyclables et les "déchets" réemployables, soit in- ou ex-situ et d'en faire un inventaire complet.

2. La déconstruction des éléments existants

La déconstruction / démolition / rénovation peut être décomposée en cinq phases :

1. **La purge**, c'est-à-dire le retrait de tous les éléments non constructifs de l'ouvrage comme les équipements, meubles ou déchets laissés par les propriétaires.
2. **Le désamiantage et l'évacuation des déchets dangereux** ainsi que le nettoyage des surfaces qui pourraient être mises à profit du réemploi.
3. **Le curage**, c'est-à-dire le retrait des éléments constructifs mais non porteurs comme des fenêtres ou des faux-planchers. C'est à cette étape que ces éléments peuvent être récupérés en vue d'un réemploi.
4. **L'abattage** de la structure porteuse, avec une déconstruction sélective des éléments qui seront réemployés. Ces méthodes de réemploi, contrairement à celles utilisées pour les éléments non porteurs (lesquels nécessitent simplement plus d'attention et donc plus de temps), requièrent souvent l'utilisation plus intense de moyens mécaniques précis et donc plus de temps, plus de moyens et surtout de la main d'oeuvre plus qualifiée.
5. **Le tri** et l'isolation des éléments réemployables du reste des matériaux de déconstruction.

3. La préparation de la ressource en vue de son réemploi

Une fois les éléments démontés et triés, il est nécessaire de les évacuer chacun vers leur filière spécifique. Ainsi, les déchets dangereux seront évacués vers des centres de traitement, les déchets non valorisables vers des décharges, les déchets recyclables vers les différents centres de recyclage spécialisés et les "déchets" réemployables, soit directement vers une zone de stockage, soit vers une zone de remise en état.

Pour les éléments destinés au réemploi, il est souvent nécessaire de procéder à une standardisation. Cela passe d'abord par une validation des performances du matériau, soit via une expertise visuelle, soit via des tests normalisés selon le matériau. Une fois validés, les éléments sont préparés en vue de leur réutilisation : ils sont contrôlés, triés, nettoyés, réparés et parfois

même reformatés afin d'harmoniser et de standardiser le lot.

Dans le cas du réemploi de briques, cette phase correspond principalement au nettoyage des briques, le contrôle de la qualité ayant été réalisé dans la phase de tri. Dans le cas du réemploi de bétons, cette phase est a priori plus complexe, avec par exemple un découpage d'éléments de différentes longueurs pour avoir des éléments de formes et de dimensions identiques pouvant être réintégrés de façon standard dans un projet de construction.

4. L'intégration des matériaux issus du réemploi dans le nouveau projet de construction

Lors de la phase de pré-projet de construction, il est nécessaire de déterminer les objectifs en termes de réemploi de matériaux. Si un réemploi est envisagé, il s'accompagne en général d'une phase de conception plus longue et plus complexe, en particulier si les matériaux n'ont pas été standardisés. Cette intégration doit être négociée avec tous les acteurs du nouveau projet (client, maître d'ouvrage, assureur et parfois même législateur).

Une fois dans la phase d'exécution, si des matériaux de réemploi sont utilisés, ils sont en général combinés à des matériaux neufs. L'installation de ces éléments requiert en général des techniques spécifiques et une main d'oeuvre plus qualifiée qui se doivent d'être déterminées lors de la phase de pré-projet.

Il va de soi que chaque projet de réemploi aura des spécificités qui ne rentrent pas forcément dans le cadre de ce schéma. Certaines étapes pourront être réalisées directement in-situ, si l'environnement du chantier de déconstruction permet d'allouer plus d'espace aux déchets et si des experts sont présents sur place. Dans le cas d'une rénovation lourde ou bien d'une déconstruction en vue d'une reconstruction sur place, certains éléments peuvent également être conservés et/ou traités sur place en vue d'un réemploi sur le projet même.

Un schéma récapitulatif reprenant les différentes étapes détaillées ci-avant et identifiant les étapes supplémentaires liées au réemploi ainsi que les différents acteurs concernés est présenté dans la Figure 2.3.

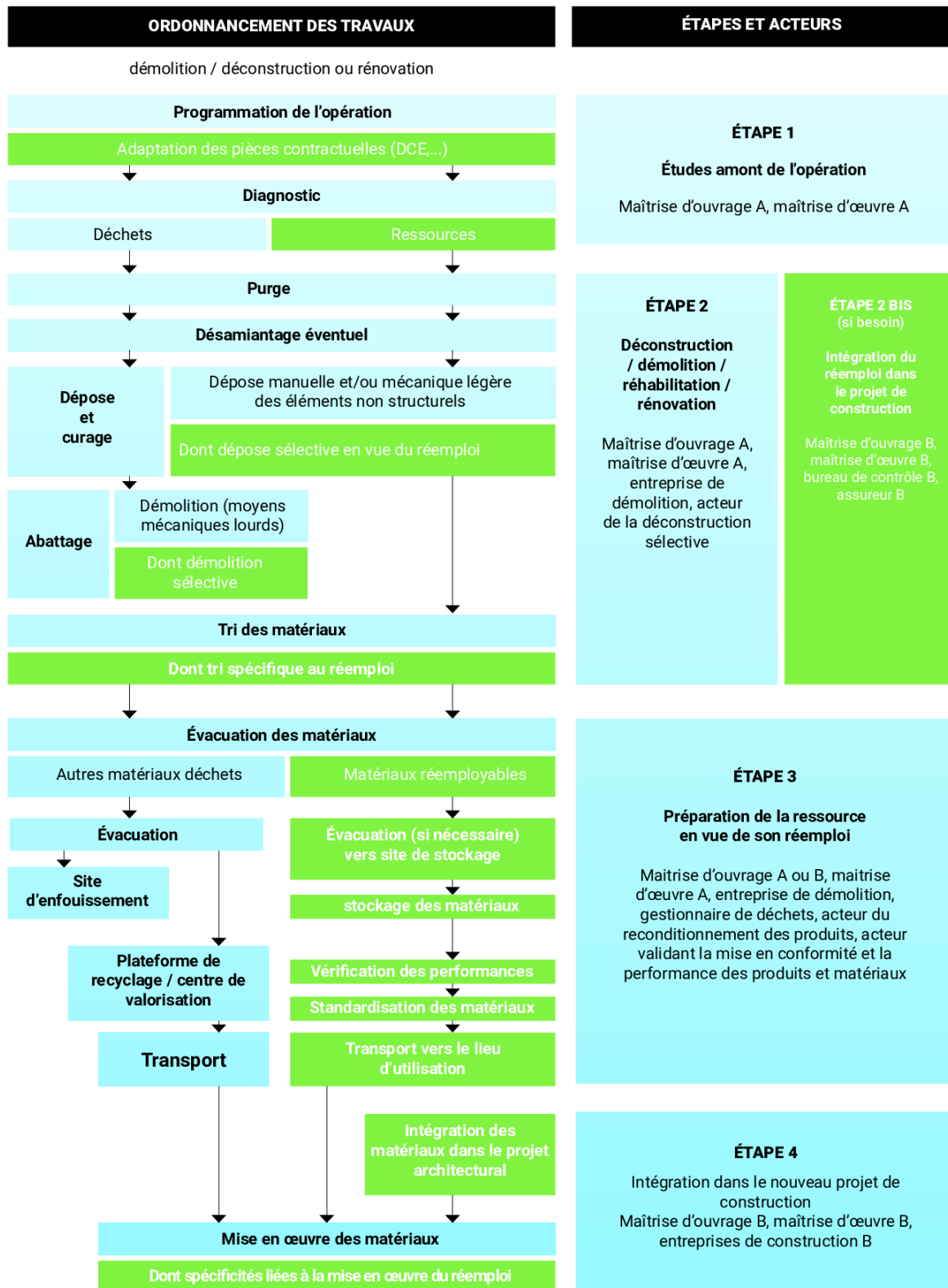


FIGURE 2.3 – Schéma général de l'ordonnancement d'un chantier impliquant du réemploi (Source [4])

CHAPITRE

3

LA CIRCULARITÉ DU BÉTON

3.1 Echelle de Lansink

Inventée par un ingénieur hollandais lui donnant son nom, l'échelle de Lansink (voir Figure 3.1) est un outil qui vise à classer les pratiques de traitement des déchets de la plus favorable à la durabilité et la préservation des ressources à la moins favorable. Elle se divise en quatre catégories ou étapes : repenser, prolonger, optimiser et détruire. Ces catégories sont elles-mêmes également détaillées en sous-étapes.[16]

Dans l'économie linéaire actuelle, ce sont les échelons les plus bas qui sont utilisés. La mise en décharge principalement par enfouissement est un véritable cache-misère qui crée une dette écologique pour le futur et se contente de reporter le problème. Une autre méthode de destruction, toujours à éviter mais déjà meilleure ou plutôt moins mauvaise, consiste à incinérer. Dans ce cas, le but est uniquement d'éviter la mise en décharge en détruisant le déchet et aucune énergie n'est récupérée.

Le fait de récupérer de l'énergie est l'échelon que l'on peut considérer comme le premier de l'économie circulaire. La destruction du déchet n'est pas évitée mais au moins elle est légèrement amortie par l'énergie récupérée. Malheureusement, c'est généralement à cette étape que l'on commence à parler de "valorisation" des déchets, ce qui permet trop souvent de cacher la réalité de la filière de "recyclage" des déchets et de présenter des taux trompeusement hauts de valorisation dans les différents rapports politiques. L'étape suivante est justement le recyclage au sens premier du terme, c'est-à-dire la transformation profonde des matériaux dans le but de les ramener à l'état de matières premières. Si le recyclage est généralement la figure de proue de l'économie circulaire, un simple coup d'oeil à sa position dans l'échelle permet de se rendre compte à quel point il n'est en réalité que la "moindre des choses".

Il existe diverses possibilités pour prolonger la vie d'un matériau, grimpant ainsi dans les échelons de la circularité. Tout d'abord le réusinage, qui consiste à utiliser des parties du produit désassemblé dans un produit avec la même fonction, ensuite le reconditionnement, qui permet au produit d'être remis à neuf, et enfin la réparation directe du produit. Cependant ces paradigmes ne se limitent pas à l'action de prolonger la durée de vie mais surtout à celle de concevoir les produits de façon à ce qu'ils puissent être réusinés, reconditionnés ou encore mieux réparés en temps voulu. Finalement, la manière la plus durable de prolonger la vie d'un produit est la réutilisation, c'est-à-dire le réemploi du même produit, dans la même fonction, éventuellement à un autre endroit, en conservant dans une très large mesure les éléments existants sous leur forme initiale [3].

Enfin, le pinacle de l'économie circulaire consiste à repenser le modèle de consommation actuel. La première étape consiste à réduire la quantité de ressources nécessaires à la production ou à l'utilisation d'un même produit [40], la seconde à repenser le modèle de consommation et de production en favorisant l'économie de la fonctionnalité et enfin la dernière étape, l'échelon le plus haut de l'échelle de Lansink consiste à renoncer à l'utilisation de matériaux non nécessaires. En effet, un matériau non utilisé ne peut pas devenir un déchet.

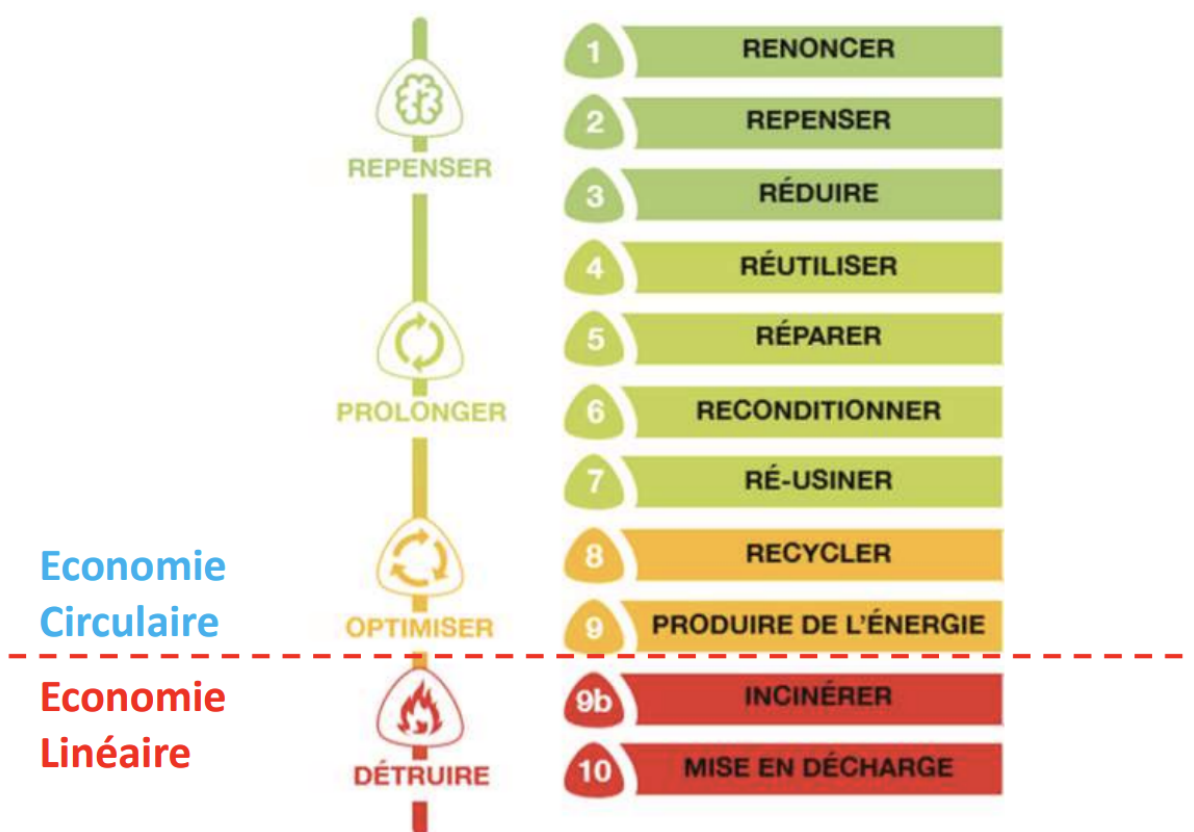


FIGURE 3.1 – Echelle de Lansink. [36]

D'autres échelles sont nées d'évolutions de l'échelle de Lansink, notamment l'échelle de Delft (voir Figure 3.2), spécifiquement conçue pour la gestion des déchets de construction. [30]

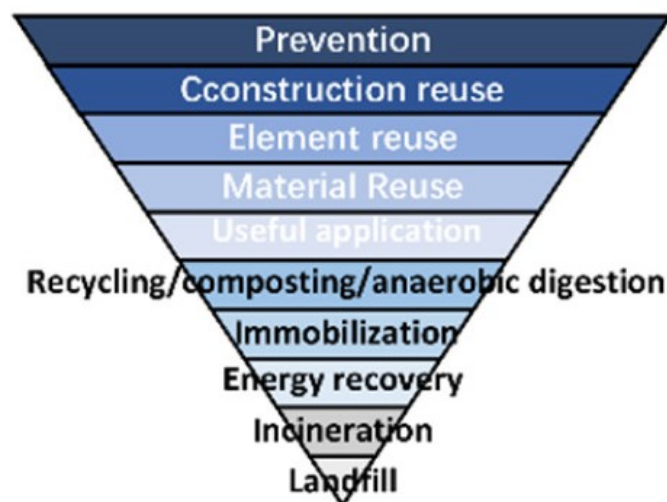


FIGURE 3.2 – Echelle de Delft (Source [50])

3.2 Certifications et labels encourageant la circularité

Dans un XXI^{ème} siècle où la prise de conscience écologique est de plus en plus importante, de nombreuses certifications et labels "verts" ont vu le jour pour assurer les performances écologiques des bâtiments. Depuis quelques années, ces certifications tendent à attribuer de plus en plus d'importance à la provenance des matériaux et non plus uniquement à leur performance écologique (impact carbone, performance thermique, ...). En reflet de la réflexion sur l'échelle de Lansink, l'utilisation de matériaux réemployés est souvent plus récompensée dans le système de notation que la simple utilisation de matériaux recyclés. L'obtention de ces labels et certifications est devenu un enjeu de taille car ils font désormais partie des exigences de la plupart des acteurs qui désirent construire ou acheter un bâtiment, qu'ils soient privés ou publics.

Il est opportun de préciser la distinction entre une certification et un label :

- **La certification environnementale** est une démarche volontaire (contrairement à d'autres certifications qui sont obligatoires), à l'initiative du maître d'ouvrage qui a pour objectif de faire reconnaître la qualité supérieure d'un bâtiment en matière d'environnement. Cette qualité sera validée par un organisme accrédité et indépendant qui jugera sur la base du cahier des charges.
- **Le label vert** est également toujours facultatif. Il correspond à une marque protégée qui dispose d'un logo et d'un nom. Cette marque garantit la performance d'un bâtiment ou d'un matériau sur un sujet spécifique (carbone, biodiversité, biosourcing, énergie,...). Les labels verts peuvent être subdivisés en labels d'État, encadrés par les pouvoirs publics et portés par un arrêté ministériel, et en labels privés, délivrés par des organismes privés ou des associations.

Voici une liste non exhaustive des différents labels et certifications accordant une importance à l'économie circulaire et plus particulièrement au réemploi de matériaux :

BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) est une certification britannique qui couvre un éventail de problèmes environnementaux. Ses catégories évaluent l'utilisation de l'énergie et de l'eau, la santé et le bien-être, la pollution, les transports, les matériaux, les déchets, l'écologie et les processus de gestion.[6] Un nombre de crédits important y est alloué à la valorisation des déchets de construction. C'est la certification environnementale la plus utilisée dans le monde.



LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) est une certification nord-américaine de standardisation de bâtiments à haute qualité environnementale. Les critères d'évaluation incluent : l'efficacité énergétique, l'efficacité de la consommation d'eau, l'efficacité du chauffage, l'utilisation de matériaux de provenance locale et la réutilisation de leur surplus.[34] Si jusqu'à présent elle faisait fi de l'économie circulaire, la dernière version LEED v5 prévue pour 2025 rectifiera le tir en l'introduisant comme facteur non-négligeable.[41]

HQE (Haute Qualité Environnementale) est un concept français auquel est rattaché une certification "NF Ouvrage Démarche HQE" qui vise à limiter à court et à long terme les impacts environnementaux d'une opération de construction ou de réhabilitation, tout en assurant aux occupants des conditions de vie saines et confortables.[29] Concernant le réemploi, des points sont accordés en fonction de : la réutilisation ou le réemploi de matériaux ; l'approvisionnement local des ces matériaux ; la déconstruction sélective ; la gestion des déchets de construction et plus largement, du cycle de vie. [43]



De nombreux labels prennent également en compte la circularité et/ou le réemploi, notamment le label BBKA (Bâtiments bas carbone), le label E+C- (Bâtiments à énergie positive et réduction carbone),...[43] Néanmoins ces labels ont une répercussion et une image moins importantes que les 3 certifications précédemment citées.

3.3 Recyclage du béton

Au niveau européen, la directive cadre 2008/98/CE relative aux déchets fixait un objectif ambitieux de 70% de valorisation sous forme de matière des déchets du secteur du bâtiment et des travaux publics pour 2020.[31] La Belgique fait figure de bon élève dans ce domaine en ayant déjà des réglementations en place, un taux de recyclage des déchets de construction et de démolition supérieur à 90 % et des objectifs à long terme.[47]

À l'heure actuelle, en Wallonie, le recyclage des déchets inertes issus de la construction et de la déconstruction est une obligation. Conformément à l'Arrêté du Gouvernement wallon du

18 mars 2004, la mise en centre d'enfouissement technique de certains déchets est interdite. Dans le cadre du Plan-wallon des déchets-ressources (PWDR), la Wallonie a intégré plusieurs objectifs de valorisation des granulats recyclés. Ces objectifs sont également présents dans la stratégie de déploiement récente de l'économie circulaire en Wallonie, connue sous le nom de Circular Wallonia. Plus précisément, il est question d'intégrer un minimum de 30% de granulats recyclés dans la totalité des granulats utilisés annuellement en travaux publics en Wallonie, sous réserve de faisabilité technique.[26]

3.3.1 Granulats de béton

La majorité des granulats recyclés utilisés en Belgique sont des granulats de béton. Le processus de revalorisation après déconstruction est le suivant : les débris sont tout d'abord soumis à un contrôle et à une séparation pour éliminer les matériaux indésirables facilement identifiables. Ensuite, les débris sont fragmentés et prêtamisés pour faciliter le processus de concassage. Les débris sont ensuite concassés pour produire des granulats recyclés. Pour éliminer les impuretés, diverses techniques sont utilisées, notamment l'utilisation d'aimants pour la déferrisation, de séparateurs à air pour souffler les particules légères, le triage manuel et le lavage des granulats. Une fois les impuretés éliminées, les granulats recyclés sont soumis à un criblage pour obtenir des granulats de taille uniforme. Enfin, les granulats recyclés sont stockés et peuvent être utilisés dans de nouveaux projets de construction. Le cycle de vie complet du béton recyclé est illustré dans la Figure 3.3.

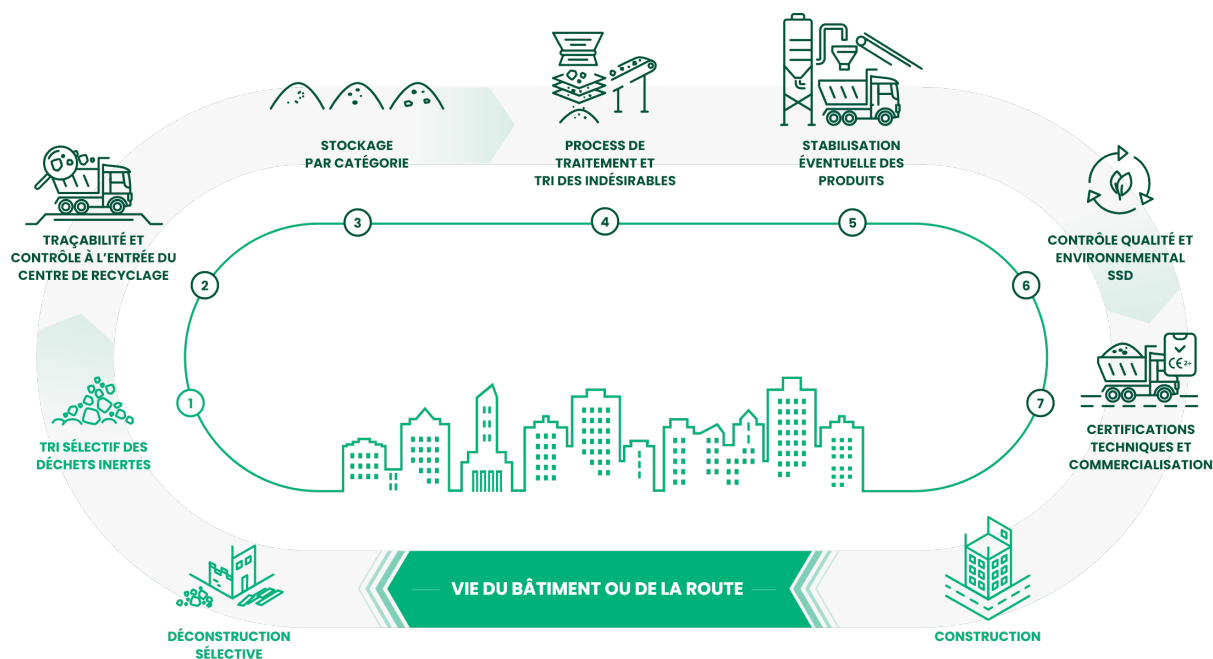


FIGURE 3.3 – Parcours du déchet de construction au granulat recyclés [26]

En Belgique, la plupart des granulats recyclés sont utilisés pour les routes, particulièrement pour les remblais et les couches de fondation et de sous-fondation où il est permis d'utiliser jusqu'à 100% de granulats recyclés [44] ou dans les fondations et sous-fondations de bâtiments. Cependant ces dernières années, ce processus est de plus en plus perçu comme du "sous-cyclage" (downcycling) plutôt que du "recyclage". Le sous-cyclage se produit lorsque

les matériaux recyclés sont utilisés dans une application moins performante ou de moindre qualité par rapport au produit original (ici du béton structural qui devient du béton "maigre"), entraînant ainsi une perte de valeur intrinsèque du produit recyclé. Dans cette optique, il est envisageable d'explorer l'utilisation des granulats recyclés dans des produits de gamme supérieure, tels que le béton structural. De plus, il est nécessaire de considérer que le principal champ d'application actuel des granulats recyclés, notamment dans les fondations de la construction routière, pourrait être saturé à long terme. Une diminution de la construction de nouvelles routes entraînerait une réduction de la demande de fondations, limitant ainsi les débouchés traditionnels. Par conséquent, il sera crucial d'identifier de nouveaux débouchés ou applications pour les granulats recyclés. En outre, en utilisant des granulats recyclés de qualité supérieure dans des applications telles que le béton, les matériaux de moindre qualité resteront disponibles pour les applications existantes, comme les fondations.[47]

Cependant, à l'heure actuelle, les professionnels de la construction sont encore très réticents à l'utilisation de granulats recyclés dans du béton structural, pour plusieurs raisons :

- Il est en réalité très difficile d'obtenir un béton de haute classe de résistance à partir de granulats recyclés. Pour une proportion équivalente ciment/eau et une même quantité de ciment dans le mélange, un béton fait à partir de granulats naturels sera pratiquement toujours plus résistant. Comme la plupart des différences entre les deux types de béton, cela s'explique par la composition d'un granulats recyclé. Au lieu d'être un simple granulats pierreux, il se compose d'un mélange qui comprend à la fois des granulats naturels et une pâte de ciment adhérente. La proportion de cette pâte ou de mortier adhérent varie généralement entre environ 20 et 60 %, ce qui influence plusieurs propriétés des granulats. Par exemple, les granulats recyclés ont tendance à absorber plus d'eau que les granulats naturels, et le mortier adhérent présente des propriétés mécaniques distinctes de celles des granulats naturels.[47] La seule possibilité pour compenser cette perte de résistance est de diminuer la proportion d'agrégat recyclés ou bien d'utiliser des granulats de très haute qualité.
- La qualité et la quantité disponible de granulats recyclés est trop variable pour la plupart des entreprises. La différence principale est l'origine du granulats : béton maigre, route, fondation, structure,... chacun ayant des propriétés physiques et chimiques différentes selon leur composition. Si pour des applications de remblais, routières ou pour des fondations l'incertitude peut être comblée par une utilisation plus importante de ciment, elle reste beaucoup trop élevée pour du béton structural. La variabilité de quantité d'intrants pose aussi problème pour des fournisseurs d'éléments préfabriqués qui ont non seulement besoin de pouvoir assurer une qualité constante mais aussi de rencontrer la demande de leur client à tout moment.
- A teneur en ciment et à granularité égales, un béton frais à base de granulats recyclés demandera beaucoup plus d'eau qu'un béton frais à base de granulats naturels pour obtenir une même consistance [47], ce qui rend plus compliquée l'utilisation de béton coulé sur place, alors même que c'est la pratique la plus répandue en Belgique. C'est encore une fois lié à la présence de pâte de ciment adhérente dans le mélange. Pour les bétons coulés sur place, cette propriété semble aussi entraîner une certaine incertitude sur le rapport réel eau/ciment dans le mélange, entraînant à son tour une incertitude dans les propriétés physiques du béton.[47]

- La durabilité des bétons recyclés est également remise en cause, principalement car la nature plus poreuse de ce type de béton par rapport à celui utilisant des granulats naturels augmente le risque de dégradation. Cette porosité accrue rend le béton recyclé moins adapté aux environnements exigeants, ce qui suscite des inquiétudes quant à sa durabilité à long terme. Pour pallier ces problèmes, il est nécessaire de prendre des précautions supplémentaires lors de l'utilisation de ce matériau, comme l'ajustement des proportions de ciment et d'eau ainsi que l'épaisseur accrue de l'enrobage des armatures. De plus, bien que le béton recyclé présente des performances comparables à celles du béton ordinaire en termes de résistance à la corrosion induite par la carbonatation et les chlorures, une attention particulière doit être portée aux risques potentiels de gel-dégel et de réaction alcalis-silice, qui peuvent être accentués en raison des caractéristiques spécifiques du béton recyclé.[47]
- L'utilisation de granulats recyclés étant une technique non-courante, les assureurs sont généralement plus prudents que pour des bétons classiques et demandent aux entrepreneurs les utilisant de se plier à plus de contrôles, notamment via une certification d'un bureau de contrôle, à la charge de l'entrepreneur. Même si la proportion de granulats recyclés utilisée dans le béton est dans le cadre des normes belges, ces mêmes assurances peuvent parfois être accordées sous réserve d'une augmentation de la franchise pour l'entrepreneur.
- De manière générale, la filière de recyclage du béton demande des ressources financières bien plus importantes que la filière classique. La démolition sélective entraîne en effet un surcoût important de main d'oeuvre (plus nombreuse, plus qualifiée, chantier de démolition plus long,...) pour assurer que les déchets soient proprement séparés, un surcoût technique pour assurer la qualité des agrégats dans le centre de recyclage et globalement un surcoût logistique lié au transport des matériaux.
- Plusieurs personnes interrogées ont également fait part du simple manque de confiance envers les granulats pour des projets à grande envergure. En effet, pour l'instant, l'utilisation des granulats dans des bétons structurants reste cantonnée à la recherche et à des projets pilotes à plus petite échelle. Aucun projet de grande ampleur en situation réelle n'a encore été entrepris en Belgique qui pourrait démontrer à la fois la faisabilité, la résistance et la finançabilité de tels projets.
- Enfin il est également bon de noter une grande disparité entre la Wallonie et la Flandre sur l'emploi de granulats recyclés. Cela s'explique en partie par l'attachement fort de la Wallonie aux granulats naturels qui y sont produits en grande quantité dans ses carrières (particulièrement dans le Hainaut) contrairement à la Flandre qui ne produit pratiquement aucun granulats naturel.

Pour toutes ces raisons, à l'heure actuelle, l'utilisation de granulats de béton recyclés dans du béton structurel semble à la fois plus risquée (autant en termes d'incertitude de résistance qu'en termes d'assurabilité et donc de responsabilité financière), moins performante, plus onéreuse et plus contraignante à mettre en place. Cependant, les mentalités pourraient être amenées à changer, notamment sous l'impulsion de la recherche et d'acteurs comme Buildwise qui ont permis aux cours des dernières années d'étendre le cadre juridique pour intégrer l'utilisation d'agrégats recyclés y compris pour des bétons structurels [8] [11] [13] ou des éléments préfabriqués [14], même si ceux-ci sont soumis à des exigences supplémentaires.

3.3.2 Impact environnemental du béton recyclé

Contrairement à ce qu'on pourrait penser au premier abord, on pourrait argumenter que l'impact environnemental d'un béton à base de granulats recyclés n'est en réalité pas beaucoup plus faible que celui d'un béton traditionnel. En effet :

- La quantité de ciment utilisée dans un béton recyclé est similaire, voire supérieure si l'on veut atteindre des performances similaires, à celle d'un béton ordinaire. Or, pour la plupart des indicateurs environnementaux, la production de ciment de haut fourneau et de ciment Portland pour le béton représente la plus grande contribution. [20]
- Même si un peu de consommation d'eau est évitée pour l'extraction des granulats [20], elle est souvent compensée par une consommation plus importante due aux propriétés chimiques de la pâte de ciment adhérente présente dans les granulats recyclés.
- Les seuls indicateurs qui bénéficient réellement de l'utilisation d'agrégats recyclés sont des indicateurs liés à la terre (occupation des sols, extraction,...), qui ont un impact trop faible dans la plupart des méthodes de calcul d'impact environnemental.[20]

C'est ainsi que pour la plupart des études, il en est conclu que l'impact environnemental est similaire voire plus important pour un béton recyclé. [20] [48] [35] Cependant, ces études ne prennent pas en compte l'impact des co-produits liés au recyclage du béton, comme la ferraille d'acier récupérée, l'évitement du transport des déchets de construction et de démolition vers le site d'enfouissement ou encore les impacts évités de leur élimination, qui peuvent faire pencher la balance fortement en faveur du béton recyclé. [32] Il est donc important lorsque l'on se pose la question de l'impact environnemental de prendre en compte non seulement le cycle de vie du béton et des agrégats mais également de leurs co-produits (voir Figure 3.4).

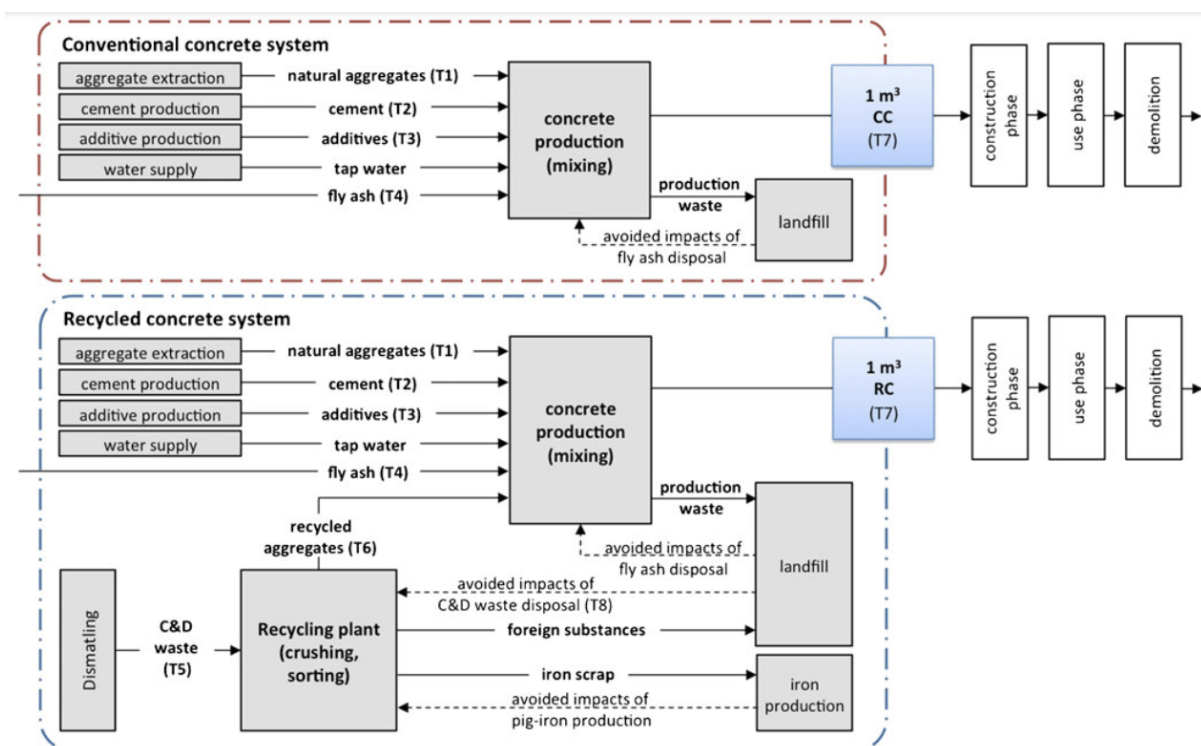


FIGURE 3.4 – Illustration d'un système prenant en compte les co-produits d'un béton recyclé et leur impact, Knoeri et al. 2013 [32]

Cependant toutes ces études s'accordent sur le fait que le résultat final dépendra énormément de la distance de transport des déchets de construction et de démolition vers le centre de recyclage. Les seules façons de garantir un impact inférieur pour un béton recyclé sont soit d'avoir un maillage de centres de recyclage fixes assez dense que pour garantir une proximité suffisante avec tous les sites de déconstruction, soit de traiter directement sur place les déchets à l'aide de centres de recyclage mobiles, ce qui est encore mieux. Le maillage belge fait partie des plus développés en Europe, notamment grâce à la densité démographique, à la part importante de l'industrie de la construction dans l'économie et aux réglementations régionales en place.

Par contre, ce qu'aucune de ces études ne prend en compte mais qui a pourtant été soulevé comme un point d'interrogation par certains professionnels de la construction est l'impact de la durée de vie du bâtiment. En effet, comme il a été détaillé précédemment, à composition égale un béton recyclé aurait une durabilité plus faible et devrait donc potentiellement être reconstruit plus fréquemment, ce qui contrebalancerait les effets positifs du béton recyclé. Malheureusement à ce jour, il est encore difficile de s'accorder sur ce point, les pratiques de bétons recyclés étant encore trop récentes que pour avoir des exemples concrets. Un rare exemple d'étude sur la question semble cependant suggérer que les agrégats recyclés diminuent les performances sismiques des bâtiments en béton et donc par extension leur durée de vie.[49]

3.3.3 Granulats mixtes et granulats fins

Contrairement à l'utilisation de granulats de béton recyclé, il y a un grand manque d'expérience en utilisation de granulats mixtes et granulats fins en Belgique. La plupart des recherches et innovations sont pour l'instant concentré aux Pays-Bas, pionniers en la matière.

Malgré l'existence d'un cadre normatif belge permettant l'utilisation de granulats mixtes dans du béton de classe de résistance allant jusque C30/37 (béton classique à résistance moyenne) [11] et de normes néerlandaises plus détaillées [18] [37], ces granulats ne sont en général utilisés que pour des remblais, des bétons maigres à faible résistance ou comme béton de revêtement (béton poli "granito" ou "terrazo", utilisé depuis l'Antiquité pour son aspect esthétique).

Pour ce qui est des granulats fins, l'expérience est encore plus limitée. Le seul cadre normatif sur lequel se baser est néerlandais [17] et ne permet que des applications limitées. Le projet belge RecyScreed a montré que l'utilisation de granulats fins recyclés demande un soin extrême dans la composition du mélange, surtout à cause de l'absorption d'eau beaucoup plus importante, laquelle entraîne également un retrait de séchage beaucoup plus important qui doit être anticipé.

3.3.4 Rutte Groep et le projet UrbanMine

Une solution possible à une grande partie des problèmes du béton recyclé serait de changer la manière traditionnelle dont il est concassé et préparé actuellement en Belgique. Des recherches menées à la TU Eindhoven ont démontré la viabilité et l'efficacité d'un nouveau type de concasseur.[27] Depuis, ce processus a été adapté et industrialisé à grande échelle

dans le projet "UrbanMine" par le groupe Rutte, qui a développé leur propre "Smart Crusher" (voir Figure 3.5).

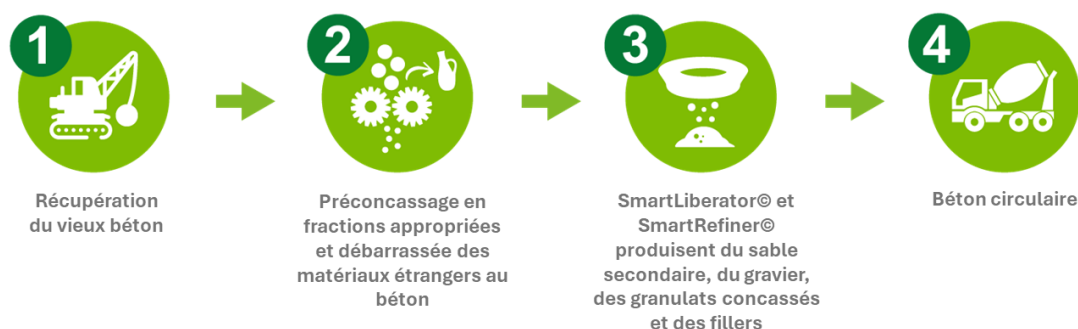


FIGURE 3.5 – Processus de "Smart Crushing" de Rutte Groep

La plus grande différence entre les concasseurs de béton existants et le Smart Crusher réside dans la manière dont ils traitent le ciment durci, la "colle" qui lie le sable et le gravier. Dans les concasseurs traditionnels, les débris résultants sont un mélange indissociable de sable, de gravier, de ciment durci et non durci, ce qui le rend moins adapté à la production de nouveau béton, le ciment durci dans les débris empêchant une bonne liaison et affaiblissant donc le nouveau béton. Selon le ciment utilisé, entre 50 % et 70 % de celui-ci est durci. Le smart crusher tire parti de la différence entre les propriétés des différents matériaux dans les débris de béton : une pression bien plus grande est nécessaire pour écraser le sable, le gravier et le ciment non durci que pour le ciment durci, par un facteur de dix. La particularité de la machine est donc de pouvoir réguler la pression avec laquelle les débris livrés sont écrasés, de sorte que seul le ciment durci est réduit en poudre comme s'il s'agissait de talc. Le sable, le gravier et le ciment encore non durci restent intacts. Le ciment concassé est ensuite évacué du flux de débris à l'aide de ventilateurs et collecté séparément. Le flux de matériaux de sable, de gravier et de ciment non durci est alors adapté pour fabriquer un nouveau béton avec l'ajout de ciment frais. La poussière de ciment durci collectée séparément appelée "freement" ayant déjà la composition de ciment désirée, il suffit de la convertir à son état non durci d'origine en la chauffant à environ 1400°C. C'est un processus fort énergivore, mais qui nécessite toujours moins d'énergie que la production de ciment original. [45]

Cette solution alternative permet donc de régler une partie des problèmes évoqués précédemment :

- Les granulats et le ciment étant finement séparés, les problèmes liés à la composition habituelle des granulats recyclés (mélange de granulats et de pâte de ciment) peuvent être évités : consommation d'eau plus importante, composition chimique différente, nécessité d'ajouter plus de ciment,... On retourne à des intrants pratiquement similaires à des intrants naturels.
- La fraction de granulats fins récupérée est de bien meilleure qualité que les granulats fins habituellement recyclés, limitant ainsi les incertitudes qui y sont liées et leur consommation accrue d'eau. [27]
- L'impact environnemental du béton recyclé serait donc largement diminué si on utilisait les différents produits du Smart Crusher, l'impact principal étant celui lié au ciment. Un

béton produit à base de ces produits aurait 80% moins d'impact selon Rutte Groep. Il reste cependant à conduire une étude poussée et indépendante pour quantifier cet impact.

3.4 Réparation et protection des ouvrages en béton

Au vu de la nature foncièrement lourde et coûteuse des structures en béton, leur protection et réparation est toujours préférée à un remplacement lorsque c'est possible. Cependant leur durée de vie reste toujours limitée. En Belgique, l'Eurocode 2 recommande un enrobage minimal des armatures pour garantir une durée de vie minimale de 50 ans [10], qui peut être majoré de 10 mm pour atteindre une durée de vie de 100 ans.[23] Des exigences strictes en termes de composition sont également de rigueur selon la classe d'exposition du béton pour assurer sa résistance à son environnement. [11] [13]. Malheureusement, ces recommandations sont encore aujourd'hui basées sur des expériences empiriques et non sur des bases scientifiques. Néanmoins, un projet de recherche belge, DurOBet, est en cours pour développer "une méthode belge basée sur les performances du béton dans le but de concevoir des ouvrages plus durables".[23]

Cette limite de durée de vie est due aux nombreuses contraintes et pathologies que subit le béton et ses armatures. Ces contraintes peuvent être physiques, mécaniques ou environnementales. Une liste récapitulative est reprise dans la Figure 3.6.

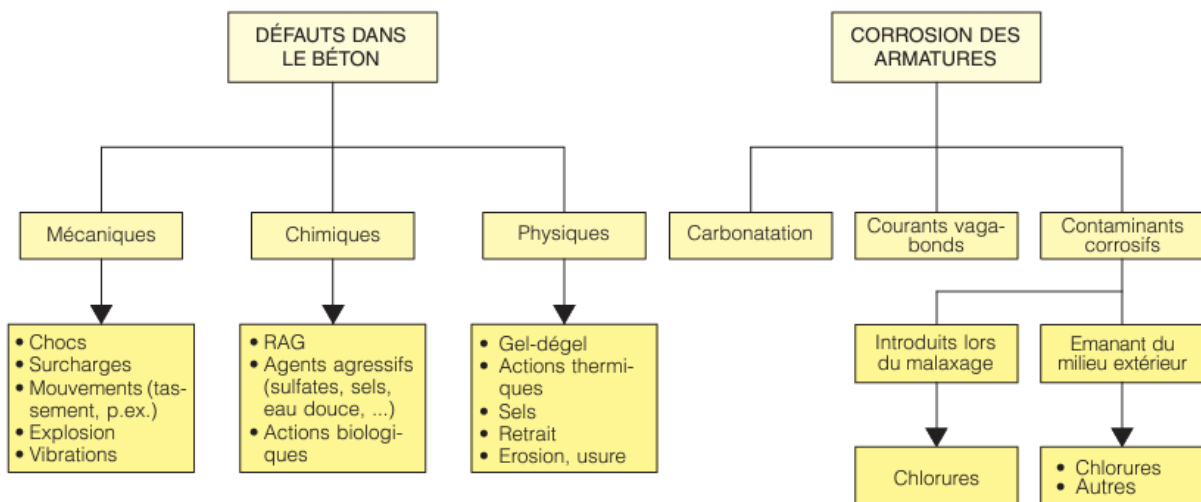


FIGURE 3.6 – Causes des dégradations selon la norme NBN ENV 1504-9 [12] (Source [23])

Cette durée de vie peut être prolongée avec un design soigné du béton et de la structure. Ainsi, si des matériaux de qualité sont utilisés (notamment un béton avec une plus haute classe de résistance) et que des solutions de protection et/ou d'étanchéité sont ajoutées à l'extérieur du béton, les risques de dommages et de détériorations sont largement atténués. La conception d'un élément doit donc prendre en compte les conditions environnementales en plus des charges anticipées.

Pour garantir la durabilité et la sécurité à long terme des structures en béton, il est également nécessaire de faire des inspections régulières afin d'identifier tout signe de dommage ou d'usure, permettant ainsi d'effectuer des réparations avant l'aggravation des problèmes. En Belgique, les normes [12] requièrent qu'une évaluation préalable de l'état de l'ouvrage en béton soit entreprise avant toute intervention afin de déceler plus précisément la cause et l'étendue des dégâts ainsi que le potentiel de dégâts ultérieurs.[22] Selon l'ampleur des dégradations subies par une structure, différentes options peuvent être ensuite envisagées : [39]

- laisser l'ouvrage en l'état
- restreindre son usage
- protéger la construction en empêchant ou en limitant tout risque de détériorations ultérieures
- procéder à des réparations
- consolider la structure
- démolir et éventuellement remplacer la structure ou certains de ses éléments

La politique de fréquence d'inspection et de choix des procédures est laissé à charge du responsable de l'ouvrage. Cependant, il est vivement conseillé d'adopter une stratégie de maintenance régulière (et donc par extension d'inspections régulières), qui malgré un surcoût à court terme permet à long terme des économies conséquentes, en plus de significativement prolonger la durée de vie de l'ouvrage (voir Figure 3.7)

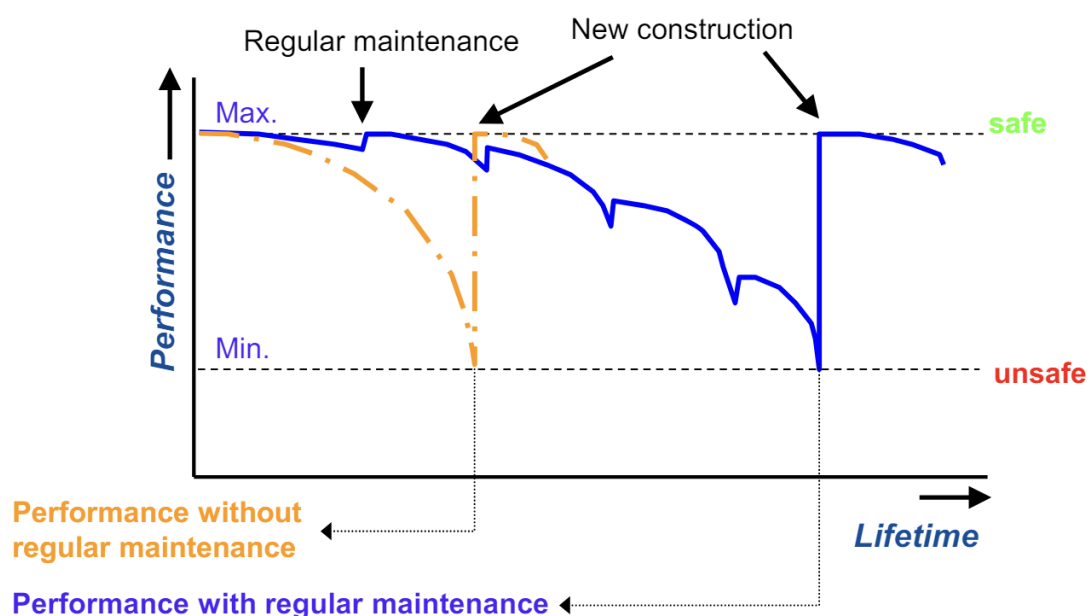


FIGURE 3.7 – Impact d'une maintenance régulière sur un ouvrage en béton (Source [24])

La Wallonie fait d'ailleurs office de mauvais élève avec sa gestion des ouvrages d'art publics (ponts, écluses,...). En effet, et particulièrement dans le Hainaut, les années 1960-1970 ont vu une frénésie de construction d'infrastructures en béton qui répondaient à un besoin et aux capacités techniques de l'époque. Malheureusement, aucun plan concret de maintenance n'avait été réellement déterminé à l'époque et le Service Public de Wallonie se retrouve donc depuis plusieurs années à devoir inspecter, parfois pour la première fois depuis

leur construction, une quantité (trop) importante d'ouvrages d'art et très souvent devoir entreprendre des travaux de maintenance.

3.5 Réemploi du béton

Un exemple de réemploi qui a participé au développement de la question de recherche initiale de ce TFE est le projet ZIN in No(o)rd à Bruxelles. Anciennement connu comme les tours World Trade Center, la rénovation accueille désormais 200 chambres d'hôtel, 100 appartements et espaces de coliving, 75 000 m^2 de bureaux ainsi que 5 281 m^2 de bureaux et retail avec une entrée privative.[51]

La spécificité de ce bâtiment est le maintien des deux noyaux centraux, visibles à la figure 3.8, et de la structure du sous-sol permettant respectivement d'économiser 16 000 m^3 et 50 000 m^3 de béton[1].

Toujours dans l'optique de circularité, 30 000 tonnes de débris ont été transformés en 3 500 tonnes d'agrégats de qualité A+ [21]. Ces agrégats ont ensuite été utilisés dans le nouveau béton qui a reçu la certification Cradle to cradle argent.



La certification Cradle to cradle est remise par le Cradle to Cradle Products Innovation Institute aux produits conçus de manière durable. Elle s'articule autour de cinq critères : la non-toxicité, la circularité, la protection de l'air et du climat, la gestion de l'eau et des sols, et l'équité sociale. Les critères sont plus ou moins sévères selon le niveau obtenu (bronze, argent, or ou platine).[38]



FIGURE 3.8 – Les deux noyaux centraux du projet ZIN maintenus (Source [51]).

Malgré ce projet prometteur dont le chantier s'est déroulé de 2020 à 2023, aucun autre réemploi de béton de cette envergure n'a été recensé en Belgique. Certains professionnels interrogés étaient perplexes face à cette méthode, d'autres y croient mais n'avaient pas (encore ?) eu l'occasion de le mettre en place. Dans les deux cas, différentes raisons sont avancées :

- Le motif qui est le plus revenu, tant chez les réfractaires que chez les plus enthousiastes, est le manque de certifications et normes liées au réemploi. En effet, les normes actuelles en Belgique concernent principalement le béton neuf ou recyclé et il n'y a pas de cadre pour le béton de réemploi. Étant un gage de qualité vérifiée, son absence induit indirectement un manque de confiance envers le béton réemployé. Cela influence notamment l'assureur dans la prise de décision d'assurer ou non un chantier, comme mentionné dans la section 2.2.
- Le manque d'informations sur l'élément réemployé induit également un manque de confiance. La méthode utilisée pour le mettre en place, le ferrailage ou encore les charges subies ne peuvent pas être déduits de la simple vision de celui-ci. Aussi, le fait que le démolisseur ne soit pas l'entreprise qui utilisera les éléments par après ajoute une part d'incertitude liée à la qualité du démontage. Il faut effectuer plusieurs tests pour s'assurer de la qualité de l'élément. Pour reprendre l'exemple du bâtiment ZIN cité plus haut, alors même que les éléments en béton n'ont pas été déplacés et que les équipes disposaient des données du bâtiment initial, tout a été refait : de l'étude de stabilité à la certification. Plus de neuf mois ont été nécessaires pour ces tests.
Une autre raison au manque de confiance dans les éléments de réemploi de béton est le caractère récent de cette pratique. En effet, la durabilité (en termes de temps) n'a pas encore pu être attestée dans les faits.
- Le manque d'information implique un manque d'inventaire qui implique à son tour une diminution de la rencontre entre l'offre et la demande. Un intervenant mentionne une

tentative de revente de pré-murs qui n'a finalement pas abouti par absence d'acquéreur. Pour pallier à cela, des plateformes recensant les matériaux disponibles se sont mises en place. Les grands groupes possèdent parfois leur propre plateforme permettant de faire des échanges en interne mais il existe également des entreprises qui se dédient à la facilitation du réemploi. A ce jour, les plateformes ne proposent pas d'éléments en béton soit parce qu'aucune entreprise ne leur a proposé d'en récupérer soit parce qu'elles ne trouvent pas cela économiquement intéressant.

- Le réemploi permet de faire des économies sur les matières premières mais celles-ci sont compensées voire dépassées par les coûts additionnels liés à ce dernier. Contrairement à d'autres éléments souvent réemployés tel que l'acier, le coût d'un béton neuf est relativement faible. Au niveau du réemploi, le démontage nécessite plus de temps, des outils spécifiques et de la main d'oeuvre qualifiée, le reconditionnement comme la réparation ou le nettoyage sont parfois nécessaires, la phase de tests est coûteuse en termes économiques et en termes de planning et finalement le transport ainsi que la remise en place ont les mêmes désavantages que lors du démontage.

D'un point de vue social par contre, il est possible de voir un avantage économique à la pratique malgré le surcoût. En effet, la fabrication et l'importation de matériaux neufs sont diminués en faveur d'une main d'oeuvre locale. Le réemploi permet également d'imaginer la création de nouveaux métiers tels que des facilitateurs de réemploi ou des assesseurs de qualité et potentiel de réemploi. [33] Dès lors, les autorités ont un rôle à jouer, et ce rôle n'est pas assez développé, selon différentes personnes interrogées. En effet, le réemploi n'est pas assez valorisé. Il existe des primes mais celles-ci sont dérisoires comparées aux coûts engendrés par les efforts à entreprendre pour mettre en place le réemploi.

- Les différentes étapes supplémentaires permettant le réemploi citées ci-dessus ont chacune leur propre impact environnemental. A l'heure actuelle, il n'y a aucune étude qui quantifie l'impact environnemental du réemploi, il est donc difficile d'affirmer s'il s'agit d'un gain ou non. Il faudrait étudier le cycle de vie entier d'un élément pour pouvoir l'attester. Cependant, un parallèle avec le recyclage peut-être utilisé afin de se faire une idée qualitative de l'incidence du réemploi. En effet, les conditions de transport sont similaires et la distance sera donc un facteur déterminant. Les étapes de concassage et de triage ne sont pas applicables dans le cas du réemploi mais le démantèlement est plus minutieux et les réparations peuvent s'avérer nécessaires. Comme pour le recyclage, la diminution de production de déchets et d'utilisation de matières premières peuvent également peser dans la balance de l'impact environnemental du réemploi.
- Une particularité du béton est sa dualité entre le sur mesure et le standardisé. D'un côté les formes possiblement données au béton sont très flexibles, ce qui constitue un avantage non négligeable souvent mis en avant. De l'autre, les éléments préfabriqués comme les linteaux ou les hourdis sont beaucoup plus standardisés permettant une rentabilité des chaînes de production. Lorsqu'il s'agit du réemploi, la flexibilité du sur mesure est perdue et l'élément n'est pas forcément dans des dimensions standards. Il y a une réelle nécessité d'adaptation lorsque du réemploi est mis en place. Or, le secteur de la construction, bien qu'il soit conscient de la situation et de son pouvoir dans le changement, est un secteur qui se conforte souvent dans ses habitudes. Cela se reflète par exemple dans la tendance qu'ont les ingénieurs à toujours se baser sur du béton

neuf pour leurs calculs.

- Contrairement à une porte qu'il suffit de sortir de ses gonds pour la déplacer, le béton est généralement lié avec d'autres éléments, notamment pour assurer ses fonctions dans la stabilité et la descente des charges. Il est quelque peu difficile pour les professionnels du secteur d'imaginer comment séparer un hourdis de sa chape dans un temps, un budget et avec une empreinte raisonnables. De plus, il y a un manque d'outils et méthodes appropriées et approuvées.
- Finalement la quantité de béton disponible pour du réemploi est variable et limitée[33]. De fait, il ne peut pas y avoir plus de réemploi que de déconstruction. Un plus grand volume de béton utilisable pour le réemploi serait bénéfique au développement de cette pratique mais ce serait un non sens et contraire à la philosophie de celle-ci que de détruire des bâtiments encore en bon état pour cette raison. Selon un des intervenants, les démolitions actuelles concernent principalement du bâti avec beaucoup de briques. Cela n'est pas étonnant vu que le béton a eu un essor après la guerre et les constructions arrivent seulement en fin de vie.

En réalité, le seul exemple en Belgique cité ici (ZIN) n'est pas à proprement parler du réemploi mais plutôt du maintien de structure portante. Dans l'échelle de Delft (voir Figure 3.2), la distinction se fait entre "Element reuse" et "Construction reuse". Ainsi si le réemploi d'éléments en béton semble encore assez utopique à mettre en place en Belgique à l'heure actuelle, le "réemploi de structure" quant à lui a déjà fait ses preuves et s'avère être non seulement une possibilité techniquement et économiquement viable (le ZIN a engendré un surcoût mais qui reste encore acceptable pour des acteurs publics), mais également une pratique avec un excellent impact environnemental.

Une nuance peut être apportée en distinguant le réemploi selon 3 niveaux sur base de la différence d'attentes de fonction entre la structure d'origine et la nouvelle structure : il s'agit de réemploi équivalent lorsque les attentes structurelles sont similaires, de réemploi "*upcycling*" si les attentes sont supérieures dans le nouveau bâtiment et de réemploi "*downcycling*" si les fonctions de l'élément sont moindres.[33] Le réemploi *downcycling* est mis en pratique avec le béton. Ainsi par exemple des voiles de béton peuvent être utilisés pour des murs non porteurs ou des blocs de béton brut pour des bordures ou du pavage. [2] Cette pratique de réemploi pour les finitions explose dans la construction. En effet, comme il s'agit souvent d'éléments n'ayant pas de fonction dans la stabilité, il est plus facile de s'imaginer pouvoir les remplacer en cas de défaut.

3.6 Repenser le modèle pour la circularité

Si de nos jours le réemploi d'éléments en béton fait face à de nombreux obstacles, il est possible de significativement les réduire pour la fin de vie des structures construites de nos jours. Cette nouvelle façon de construire, le "Design for Dissassembly" (DfD) des bâtiments est une notion déjà bien mise en application pour des structures en bois et en acier, notamment en Belgique. Cependant le DfD de bâtiments en béton reste encore ultra-marginal. Certains projets ont pourtant prouvé que de telles techniques rendent le processus de désassemblage économiquement, écologiquement et socialement viable. [42]

Cependant le DfD demande de repenser entièrement la manière dont sont conçus les bâtiments, notamment via "l'émancipation des couches, la séparation des fonctions ainsi que l'indépendance et l'échangeabilité des niveaux physiques"[42] (Illustration du principe des couches d'un bâtiment dans la Figure 3.9). Plus particulièrement pour les structures en béton, des connexions spécifiques se doivent d'être mises en place pour assurer une démontabilité des différents éléments structurants. (Voir Figure 3.10).

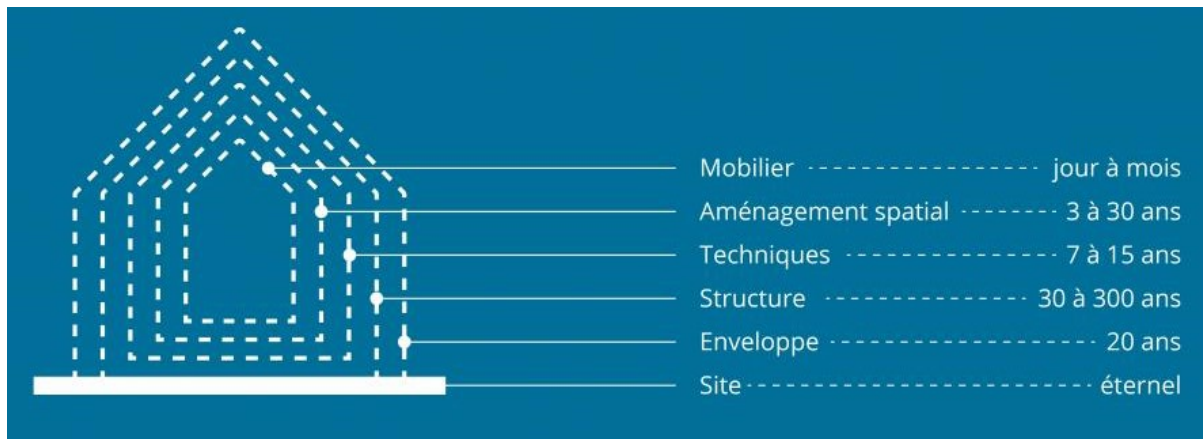


FIGURE 3.9 – Structuration des couches fonctionnelles en fonction de leur durée de vie (Source : S. Brand © Bruxelles Environnement [7])

Il semble ainsi que pour assurer une telle démontabilité, il est préférable d'utiliser des éléments préfabriqués qui permettent plus facilement d'ajouter des armatures d'attente et autres connexions build-in, tout en assurant une continuité structurelle au sein de l'élément. Ces éléments sont également les plus aptes au transport du site de déconstruction au site du repreneur car ils ont été conçus dans le but de pouvoir être amenés sur chantiers et montés à l'aide d'engins de levage. Enfin, l'utilisation d'éléments préfabriqués permet une standardisation plus aisée des éléments qui pourraient ainsi être plus facilement réemployés dans des projets similaires, notamment dans le domaine du logement individuel qui est non seulement très homogénéisé (les façades utilisent en général toujours des linteaux de 14cm) mais qui offre également un grand marché à la fois de déconstruction/rénovation et de construction dans des zones assez proches que pour éviter les transports sur de longues distances.

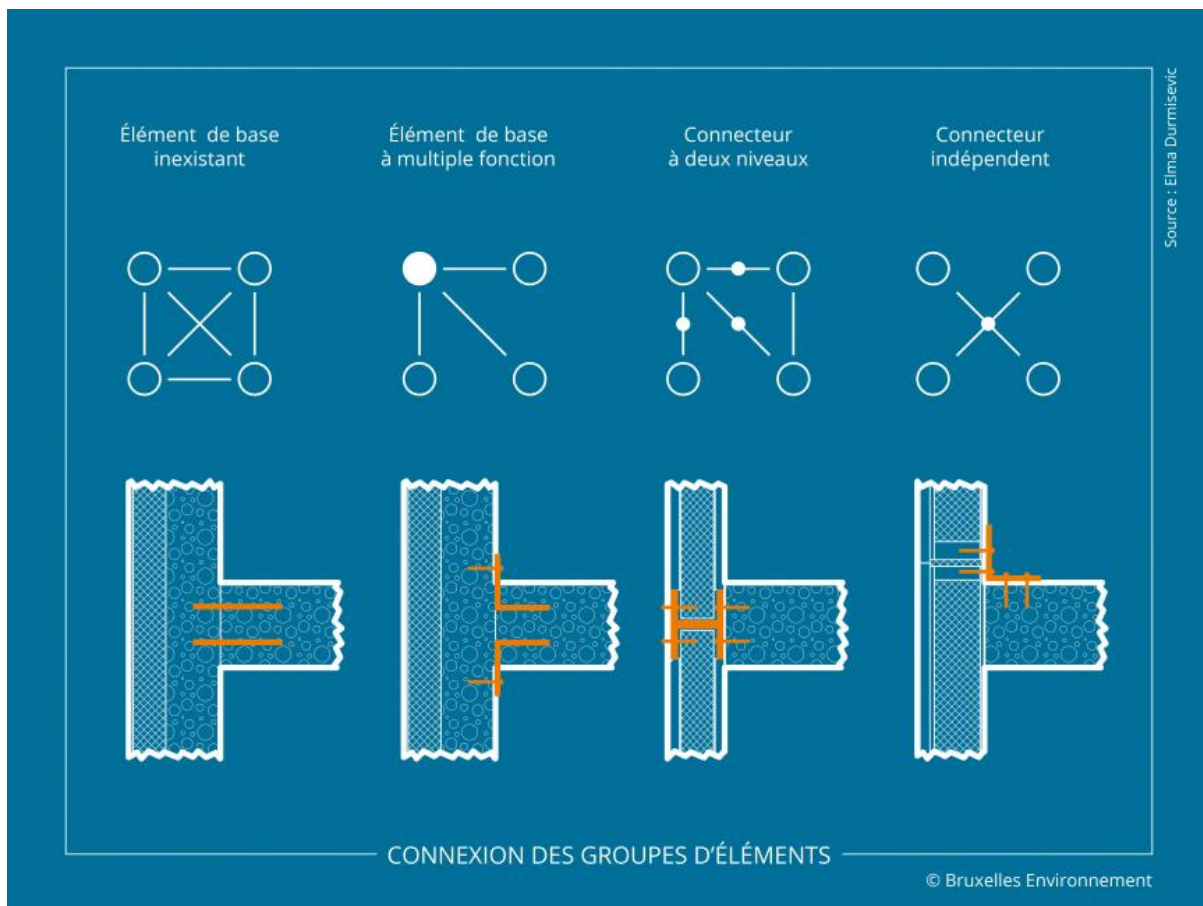


FIGURE 3.10 – Connexion des groupes d'éléments, du moins au plus réversible (Source : S. Brand © Bruxelles Environnement [7])

En parallèle du développement de bâtiments DfD, une autre pratique déjà bien mise en place en Belgique est le développement des pratiques de Building Information Modelling/-Management (BIM) qui rassemblent l'ensemble des informations d'un bâtiment et des ses composants (modèles 2D, 3D, 4D,..., métadonnées des éléments,...). En effet, lors du démantèlement d'un ouvrage, avoir en sa possession des informations précises non seulement sur le détail des matériaux et des assemblages mais aussi sur le phasage des opérations de construction ou encore sur l'origine des éléments permet non seulement d'être plus efficace mais également d'assurer plus facilement la qualité des éléments destinés au réemploi. Ainsi un marché parallèle au marché de matériaux de réemploi, celui de l'information, se profile pour les décennies à venir et ne doit pas être négligé.

3.7 Bétons "Bas Carbone"

Même quand il n'est pas possible d'utiliser une solution 100% circulaire, d'autres options sont possibles pour réduire l'impact environnemental du béton. Les bétons dits "bas carbone" sont en général des bétons qui utilisent un ciment de classe différente du traditionnel ciment Portland de classe CEM I. En effet, de nombreuses autres classes de ciment à empreinte carbone plus faible existent (voir Figure 3.11), notamment les familles de ciment CEM II,

CEM III et CEM V qui sont de plus en plus utilisés en Belgique. Malheureusement ces ciments produisent souvent des bétons de classe de résistance plus faible et les normes belges tardent à suivre le rythme, les rendant plus risqués à utiliser. Cependant le sujet semble avancer avec notamment l'apparition de nouvelles normes encadrant l'utilisation de nouveaux ciments bas carbone comme les CEM II/C-M et CEM VI. [9] [9]

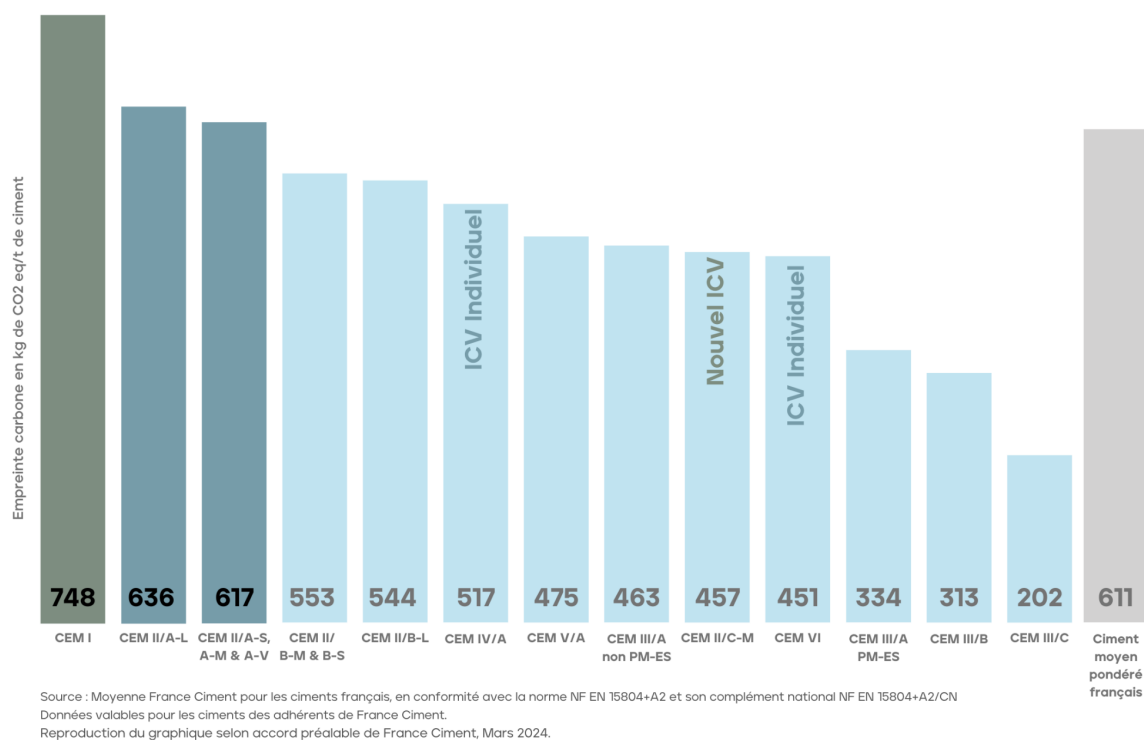


FIGURE 3.11 – Empreinte carbone en kg de CO2 eq/t de ciment pour chaque ciment normalisé (Source [15])

De nouveaux types de ciment ont également émergé en France dans l'entreprise Hoffman Green Cement, qui propose une gamme de ciments alternatifs avec la teneur en carbone la plus faible d'Europe, jusqu'à 5 fois moins carbonés qu'un ciment CEM I classique. Selon les témoignages disponibles sur leur site web, leur ciment H-UKR produirait des bétons au moins aussi résistants que des bétons classiques, avec des propriétés physiques et une ouvrabilité similaires. Bien qu'ils commencent également à être utilisés en Belgique, ils ne sont pas encore non plus encadrés par des normes.

Tout ces bétons "bas carbone", qu'ils le soient parce qu'ils emploient des ressources circulaires ou non, ainsi que les ciments et agrégats circulaires, peuvent être reconnus et valorisés par une certification CSC (Concrete Sustainability Council). La certification CSC est reconnue comme certification responsable par le BREEAM et est notamment reconnue par le gouvernement bruxellois, permettant ainsi l'attribution de primes ou de subsides plus élevés pour les projets certifiés CSC. [25]



CHAPITRE

4

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

4.1 Conclusions

Des techniques de circularité existent pour le béton, à différents niveaux de maturité, d'impact écologique et de faisabilité. Le focus actuel de la recherche, de l'industrie et du législateur est fortement porté sur le recyclage du béton et l'utilisation de granulats recyclés, pratiques de plus en plus utilisées mais qui restent tout de même majoritairement limitées à des applications considérées de "downcycling" et qui se heurtent toujours à des craintes et a priori de la part des professionnels du secteur. Les pratiques de réemploi d'éléments en béton sont quant à elles encore ultra-marginales en Belgique et se cantonnent à quelques projets pilotes et de recherche. Finalement, les techniques de maintien et réparation des structures sont toujours utilisées quand elles sont possibles et que les besoins sont repérés à temps de par leur nature intrinsèquement bénéfique d'un point de vue économique.

Les différents paradigmes d'économie circulaire ne sont pas du tout exclusifs entre eux. Il est en effet relativement utopiste d'envisager la construction de bâtiments uniquement à base d'éléments issus de la filière de réemploi ou encore de valoriser 100% des déchets d'un bâtiment vers le réemploi et/ou le recyclage. Le schéma repris à la Figure 4.1 reprend une synthèse des pratiques de circularité applicables tout au long de la chaîne de valeurs du béton, illustrant également que ces différents paradigmes peuvent intervenir à différentes étapes du cycle de vie du béton. Toutefois, un classement des priorités de ces paradigmes se dégage de cette étude avec dans l'ordre le maintien avant le réemploi et ensuite le recyclage.

Ces techniques de circularité sont également compatibles avec des stratégies directes de réduction de l'impact environnemental comme la sobriété, les énergies et ressources alter-

natives et toutes autres techniques de béton "vert" ou "bas carbone". En effet, l'économie circulaire ne suffira pas à résoudre tous les problèmes environnementaux et elle se doit d'être combinée à toutes les techniques possibles de réduction d'émissions.

Enfin, il est bon de noter que malgré une réticence et une certaine lenteur d'adoption, particulièrement pour le béton, ces dernières années ont vu un intérêt et surtout une reconnaissance grandissante envers les pratiques d'économie circulaire dans le domaine de la construction, autant d'un point de vue normatif (notamment avec des taux autorisés d'utilisation d'agrégats recyclés dans le béton de plus en plus hauts, le développement de certifications BENOR,...) que par les différents acteurs du secteur qui osent de plus en plus utiliser ces nouvelles techniques. Une autre tendance notable est celle de l'adoption de ces techniques comme techniques reconnues pour l'attribution de points dans les certifications et labels "verts" (BREEAM, LEED, CSC, ...) et la reconnaissance de ces certifications par des instances publiques comme critère d'attribution de subsides.

Cependant, la plupart de ces techniques doivent encore atteindre un certain niveau de maturité avant d'être plus largement adoptées par les professionnels de la construction. Cette maturité, qui entraînera la confiance nécessaire à l'adoption de nouvelles techniques, dépend largement des travaux de recherche et surtout de publicité menés par des instituts comme Buildwise et poussés par des projets comme "Circular Concrete" ou "be circular" de la région Bruxelles-Capitale et par extension du soutien législatif et financier des instances publiques belges. Il serait également intéressant de s'inspirer des politiques et avancées techniques de nos voisins comme l'Allemagne et surtout les Pays-Bas qui sont bien plus avancés sur le sujet que la Belgique. Enfin, il est important de reconnaître que pour que des projets de circularité soient effectivement entrepris, il faudra que l'ensemble des acteurs du projet, du client aux autorités en passant par l'architecte, le bureau d'études et l'entrepreneur, décident de s'y engager. Actuellement, de tels projets sont bien plus onéreux que des projets de construction traditionnels et requièrent donc un apport financier que ne peuvent en général se permettre que les clients publics qui veulent encourager ces pratiques.

De plus, il faut reconnaître que l'industrie du béton ne pourra probablement jamais être 100% circulaire, notamment à cause des problèmes d'approvisionnement et de disponibilité des ressources. Déjà de nos jours, c'est un frein pour la plupart des fournisseurs qui ne peuvent pas garantir un flux suffisant, ce qui ralentit énormément l'adoption de ces techniques de manière industrielle.

4.2 Recommandations

Si chaque technique de circularité dans le béton peut avoir ses avantages, certaines devraient être toujours appliquées en priorité. Ce principe de priorité est illustré dans la Figure 4.1 et peut se décrire comme suit :

1. La première priorité est le maintien des structures. Si les techniques d'entretien et de réparation sont largement utilisées pour prolonger la durée de vie des structures lorsqu'elles sont possibles, la question ne se pose pas encore assez fréquemment lorsqu'il s'agit de la fin de vie du bâtiment. Ainsi, lorsqu'il est décidé de démolir un bâtiment pour

en reconstruire un nouveau, il est nécessaire de se poser les questions "Faut-il réellement démolir ou peut-on simplement rénover?" et si ce n'est pas le cas "Peut-on maintenir la structure portante en béton?" comme cela a été le cas pour le projet ZIN). En effet, la structure portante d'un bâtiment représentant une majorité de son énergie incorporée et jusqu'à 90 % de son poids et il est donc primordial de favoriser son maintien à tout autre paradigme.

2. La seconde priorité est en théorie le réemploi d'éléments en béton. Cependant avec le vivier actuel de bâtiments, les freins à l'utilisation de ces techniques surpassent largement les avantages environnementaux qu'elles représentent. Ainsi, il serait surtout bon de concevoir les nouveaux bâtiments pour permettre ces techniques une fois leur fin de vie atteinte (Design for Dissassembly, BIM,...). Cependant il semblerait que ces techniques soient plus pertinentes pour les éléments préfabriqués et bien plus difficiles à mettre en place pour les éléments coulés sur place qui devraient alors plutôt suivre d'autres filières.
3. Enfin la troisième priorité est le recyclage du béton et l'utilisation d'agrégats recyclés dans les nouveaux bétons. Cette filière est déjà bien développée en Belgique mais se doit encore d'évoluer pour garantir un approvisionnement plus stable et de meilleure qualité et ainsi encourager son adoption pour des applications structurantes. Une possibilité serait l'adoption généralisée des techniques de "Smart Crushing" apparues récemment aux Pays-Bas (Rutte Groep).

Un moyen d'encourager l'adoption de ces techniques et surtout de les rendre économiquement viables serait une intervention des pouvoirs publics, qui pourraient imposer des taux de recyclage/réemploi minimum. Cependant, de telles mesures semblent actuellement encore bien loin. Un moyen détourné d'atteindre ces objectifs serait alors de développer une reconnaissance plus poussée des certifications "vertes", notamment en les intégrant plus systématiquement dans des critères de subsides ou de déductions fiscales.

Finalement, il sera également nécessaire de surmonter l'importante "inertie" qui freine les acteurs du secteur du béton en Belgique. Malgré le développement de nouvelles techniques circulaires et les moyens de financement disponibles, la réaction prédominante parmi les intervenants est de rejeter ces techniques, souvent en invoquant des raisons vagues liées à la finançabilité ou aux performances. Si ces arguments sont en effet pertinents, comme ce document a pu le montrer, le véritable problème réside souvent ailleurs. Beaucoup d'acteurs trouvent le mode opératoire actuel si simple et efficace qu'ils ne prennent même pas la peine de se renseigner sur les possibilités d'intégrer la circularité dans leurs projets. Cette réticence à changer les habitudes et à explorer de nouvelles approches empêche une adoption plus large de pratiques circulaires dans le béton, malgré les avantages potentiels pour l'environnement et l'industrie. Il est donc essentiel d'améliorer la diffusion de l'information et de sensibiliser davantage les professionnels aux bénéfices et aux méthodes de la circularité pour surmonter ces blocages humains.

Cependant, il reste important d'être prudent avec la manière dont sont présentées et encouragées ces différentes pratiques pour éviter que le béton soit qualifié de matériau réutilisable, permettant ainsi une récupération par l'industrie et devenant un alibi pour continuer la production, alors même que le meilleur moyen de limiter notre impact environnemental est la sobriété, ce qui passe par une diminution progressive de la production de ciment et de béton.

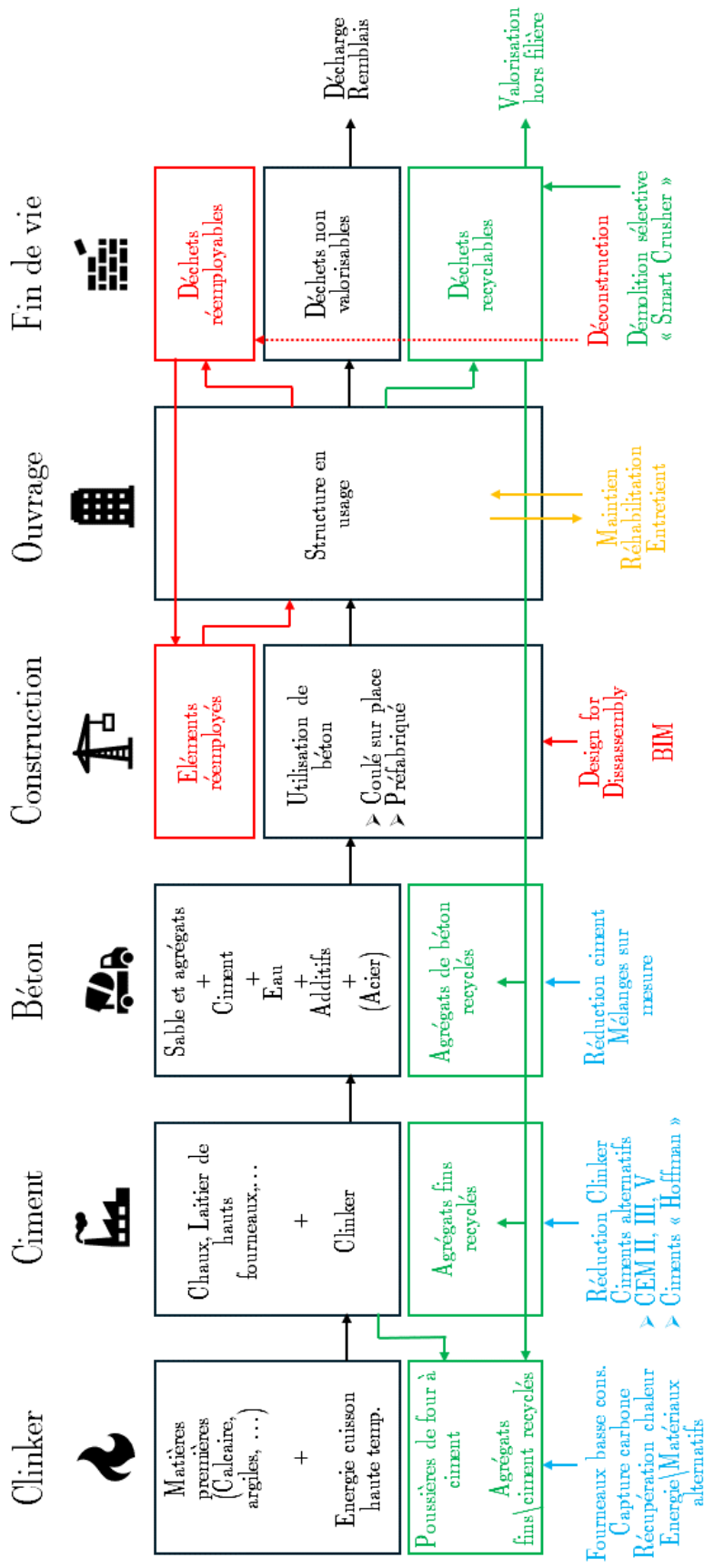


FIGURE 4.1 – Chaîne de valeurs du béton. En noir le cycle de production classique, en bleu les stratégies directes de réduction de l'impact environnemental, en jaune les stratégies de prolongations de la durée de vie (priorité n°1), en rouge les stratégies de réemploi (priorité n°2), en vert les stratégies de recyclage (priorité n°3). Adapté de Küpfer et al., 2022 [33] et Habert et al., 2020 [28].

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Copyright Bureau Greisch - 2024. *ZIN in No(o)rd à Bruxelles*. 2024. URL : <https://www.greisch.com/projet/zin-in-noord-a-bruxelles/> (visité le 05/10/2024).
- [2] BELLASTOCK. "Fiches réemploi - Introduction au réemploi des éléments en béton de ciment". In : *Interreg FCRBE - Facilitating the Circulation of Reclaimed Building Elements* (2021).
- [3] BELLASTOCK. "Stratégies de prescription - Intégrer le réemploi dans les projets de grande échelle et les marchés publics". In : *Interreg FCRBE - Facilitating the Circulation of Reclaimed Building Elements* (2021).
- [4] J. BENOIT et al. "REPAR2". In : *Bellastock and CSTB - Le réemploi : passerelle entre architecture et industrie* (mars 2018).
- [5] F. BOUGRAIN et al. "L'assurance et le réemploi : enseignements des études de cas et perspectives". In : *Facilitating the Circulation of Reclaimed Building Elements (FCRBE)* (2023).
- [6] "BREEAM". In : *Wikipédia* (2024). URL : <https://en.wikipedia.org/wiki/BREEAM>.
- [7] BRUXELLES ENVIRONNEMENT. "Réversibilité technique". In : *Guide Bâtiment Durable* (2023).
- [8] BUREAU DE NORMALISATION (NBN). "NBN EN 12620 + A1 : Granulats pour béton." In : (2008).
- [9] BUREAU DE NORMALISATION (NBN). "NBN EN 197-5 : Ciment - Partie 5 : Ciment Portland composé CEM II/C-M et Ciment composé CEM VI". In : (2021).
- [10] BUREAU DE NORMALISATION (NBN). "NBN EN 1992-1-1 : Eurocode 2 : Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments (+AC :2010)". In : (2005).
- [11] BUREAU DE NORMALISATION (NBN). "NBN EN 206 :2013+A2 : Béton - Partie 1 : Spécification, performances, production et conformités". In : (2021).

- [12] BUREAU DE NORMALISATION (NBN). "NBN ENV 1504-9 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton. Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité. Partie 9 : principes généraux d'utilisation des produits et systèmes". In : (2005).
- [13] BUREAU DE NORMALISATION (NBN). "Norme NBN B 15-001 : Béton - Spécification, performances, production et conformité - Complément national à la NBN EN 206 :2013+A2 :2021". In : (2022).
- [14] BUREAU DE NORMALISATION (NBN). "Norme NBN EN 13369 : Règles communes pour les produits préfabriqués en béton". In : (2013).
- [15] France CIMENT. "Les ciments « bas carbone »". In : (2023).
- [16] Economie CIRCULAIRE. *Découverte de l'échelle de Lansink*. Youtube. 2020. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=6njp8qn95rQ&t=50s>.
- [17] CIVIELTECHNISCH CENTRUM UITVOERING RESEARCH EN REGELGEVING (CUR). "CUR-Aanbeveling 106 : beton met fijne fracties uit recyclinggranulaten als fijn toeslagmateriaal," in : (2014).
- [18] CIVIELTECHNISCH CENTRUM UITVOERING RESEARCH EN REGELGEVING (CUR). "CUR-Aanbeveling 80 : beton met menggranulaten als grof toeslagmateriaal". In : (2014).
- [19] I. DE POT. "Quelles règles et normes belges respecter?" In : *Publication Buildwise* (2019).
- [20] W. DEBACKER et al. *Milieugerelateerde materiaalprestatie van gebouwelementen*. Maastricht : OVAM, 2012.
- [21] Laurence DECROIX. *Le Groupe CFE remporte le prix du béton circulaire à grande échelle dans le projet ZIN IN NO(O)RD*. 2023. URL : <https://bpcgroup.be/actualite/le-groupe-cfe-remporte-le-prix-du-beton-circulaire-a-grande-echelle-dans-le-projet-zin-in-noord/> (visité le 05/10/2024).
- [22] B. DOOMS. "Evaluation de l'état des ouvrages en béton : pourquoi, quand et comment?" In : *Publication Buildwise* (2020).
- [23] B. DOOMS et al. "Concevoir des ouvrages en béton en estimant mieux leur durée de vie". In : *Publication Buildwise* (2018).
- [24] Koenders EDDIE. "Concrete Durability WS22/23". In : *Institute of Construction and Building Materials, Technische Universitat Darmstadt* (2022).
- [25] CSC FEDEBETON. *Concrete Sustainability Concil*. 2024. URL : <https://www.csc-be.be/fr/> (visité le 05/10/2024).
- [26] FEREDCO ASBL. "Guide technique pour l'utilisation des granulats recyclés en Wallonie". In : *Projet "Les Granulats Recyclés"* (2023).
- [27] MVA FLOREA, Z NING et HJH BROUWERS. "Smart crushing of concrete and activation of liberated concrete fines". In : *University of Eindhoven, Department of the Built Environment, Unit Building Physics and Services : Eindhoven, The Netherlands* (2012).

- [28] G. HABERT et al. "Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries". In : *Nat Rev Earth Environ* (2020). DOI : <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>.
- [29] "Haute qualité environnementale". In : *Wikipédia* (2024). URL : https://fr.wikipedia.org/wiki/Haute_qualit%C3%A9_environnementale.
- [30] C.F. HENDRIKS et BJH TE DORSTHORST. "Re-use of constructions at different levels : construction, element or material". In : *CIB World Building Congress* (2001).
- [31] IREX. "Comment recycler le béton dans le béton". In : *Recommandations du projet national recybeton* (2018).
- [32] C. KNOERI, E. SANYÉ-MENGUAL et H.-J. ALTHAUS. "Comparative LCA of recycled and conventional concrete for structural applications". In : *The International Journal of Life Cycle Assessment* 18.5 (2013), p. 909-918.
- [33] C. KÜPFER, M. BASTIEN-MASSE et C. FIVET. "Reuse of concrete components in new construction projects : Critical review of 77 circular precedents". In : *Journal of Cleaner Production* (2022). DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135235>.
- [34] "LEED". In : *Wikipédia* (2024). URL : <https://en.wikipedia.org/wiki/LEED>.
- [35] S. MARINKOVIĆ et al. "Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete". In : *Waste Management* 30.11 (2010), p. 2255-2264. DOI : 10.1016/j.wasman.2010.04.012.
- [36] Emmanuel MOSSAY. "Principes Enjeux de l'Economie Circulaire". In : 2021.
- [37] NEDERLANDS INSTITUUT VOOR NORMALISATIE (NEN). "NEN 8005 : Nederlandse invulling van de NEN EN 206. Beton. Specificatie, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit." In : (2014).
- [38] C2C PLATFORM. *Cradle to Cradle Certified* ®. 2024. URL : <https://www.c2cplatform.eu/c2c-certified/?lang=fr>.
- [39] V. POLLET, B. DOOMS et J. JACOBS. "Réparation et protection des ouvrages en béton (bâtiment et génie civil)". In : *Publication Buildwise* (2007).
- [40] José POTTING et al. "Circular economy : measuring innovation in the product chain". In : *Planbureau voor de Leefomgeving* 2544 (2017).
- [41] J. RUSK et E. WOODWARD. "A closer look at the LEED v5 approach to circularity". In : *Publications Rheaply* ().
- [42] Wasim SALAMA. "Design of concrete buildings for disassembly : An explorative review". In : *International Journal of Sustainable Built Environment* 6.2 (2017), p. 617-635. ISSN : 2212-6090. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ijjsbe.2017.03.005>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212609016301741>.
- [43] SARAH. "Réemploi de matériaux de construction : les certifications et labels environnementaux". In : *Articonnex* (2021).
- [44] SERVICE PUBLIC DE WALLONIE. "Cahier des charges type Qualiroutes". In : *Site "Qualité Construction"* (2024).
- [45] "Smart Crusher saves concrete and CO2". In : *De Ingenieur* (2018).

- [46] Gilles VANVOLSEM. "Approche durable dans le secteur immobilier : contrainte ou opportunité?" In : 2024.
- [47] J. VRIJDERS et De Bock L. "Utilisation de granulats de béton recyclés dans le béton". In : *Publication Buildwise* (2019).
- [48] M. WEIL, U. JESKE et L. SCHEBEK. "Closed-loop recycling of construction and demolition waste in Germany in view of stricter environmental threshold values". In : *Waste Management & Research* 24.3 (2006), p. 197-206. DOI : 10.1177/0734242x06063686.
- [49] Sarah J. WELSH-HUGGINS, Abbie B. LIEL et Sherri M. COOK. "Reduce, Reuse, Resilient? Life-Cycle Seismic and Environmental Performance of Buildings with Alternative Concretes". In : *Journal of Infrastructure Systems* 26.1 (2020), p. 04019033. DOI : 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000510.
- [50] Chunbo ZHANG et al. "An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe". In : *Science of The Total Environment* 803 (2022), p. 149892. ISSN : 0048-9697. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149892>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721049676>.
- [51] ©2024 ZIN. ZIN 2020-2023. 2024. URL : <https://zin.brussels/fr/> (visité le 05/10/2024).

Résumé :

Pour répondre à l'urgence climatique et à la surexploitation des ressources naturelles de nombreux paradigmes ont vu le jour au cours des dernières décennies, notamment celui de l'économie circulaire. Le secteur de la construction étant à la fois le plus grand consommateur de matières premières, notamment avec le béton qui représente à lui seul 6 milliards de m^3 par an, et à la fois un des secteurs avec le plus d'opportunités pour implémenter des techniques de circularité, de nombreuses techniques ont vu le jour au cours des dernières années.

Ce TFE fait un état des lieux de ces différentes techniques d'économie circulaire appliquées au béton en Belgique, de leur maturité, des freins et des leviers à leur utilisation, en combinant les ressources publiquement disponibles avec une série d'entretiens avec un panel de professionnels du secteur du béton en Belgique.

Abstract :

To address the climate emergency and the overexploitation of natural resources, many paradigms have emerged in recent decades, notably that of the circular economy. The construction sector, being both the largest consumer of raw materials, particularly with concrete alone accounting for 6 billion m^3 per year, and one of the sectors with the most opportunities to implement circular techniques, has seen many techniques emerge in recent years.

This dissertation provides an overview of these various circular economy techniques applied to concrete in Belgium, their maturity, the barriers, and drivers to their use, combining publicly available resources with a series of interviews with a panel of concrete industry professionals in Belgium.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
Louvain School of Management

Place des Doyens, 1 bte L2.01.01, 1348 Louvain-la-Neuve
Boulevard Emile Devreux 6, 6000 Charleroi, Belgique
Chaussée de Binche 151, 7000 Mons, Belgique

www.uclouvain.be/lsm