

Effet de la durée de vie et des solutions de réparation du béton armé sur les impacts environnementaux calculés par une ACV

Robine Calixte^{1,2}, Fabrice Gatuingt², Fernando Lopez-Caballero²

¹ ESITC Paris, 79 avenue Aristide Briand – CS 80433 – 94234 Arcueil Cedex

² Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS, LMPS – Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, 4 avenue des Sciences, 91190 Gif-sur-Yvette, France.

RESUME En lien avec les problématiques environnementales qui touchent le secteur de la construction, de plus en plus de questions sur le choix de la durabilité des structures de Génie Civil se posent. De plus, la prise en compte de l'évolution des chargements au cours de la vie d'un ouvrage peut mener à des réévaluations et des optimisations du dimensionnement, qui peuvent être favorables à des réductions des impacts environnementaux sur l'ensemble de son cycle de vie. Cet article présente l'étude de poutres en béton armé soumises à de la flexion 3 points et dimensionnées selon l'Eurocode 2. Une comparaison des impacts environnementaux calculés par une analyse du cycle de vie (ACV) d'une poutre dimensionnée pour une durée de vie de 50 ans et d'autres dimensionnées pour une durée de vie de 25 ans avec la mise en place de solutions techniques pour prolonger leur durée de vie à 50 ans a été réalisée. L'analyse montre que selon la méthode de prolongation de la durée de vie des poutres sous-dimensionnées, une réduction de certains impacts environnementaux peut être observée alors que d'autres sont amplifiés par rapport à la poutre de référence (dimensionnée pour 50 ans). Ces résultats montrent un potentiel d'adaptation des structures au cours de leur cycle de vie, favorable à une optimisation des performances et une réduction des impacts environnementaux.

Mots-clefs Béton armé, ACV, optimisation, dimensionnement, durabilité

I. INTRODUCTION

Responsable de 34 % de la consommation d'énergie et de 21 % des émissions de gaz à effet de serre mondial ((ADEME, 2024), (UNEP, 2024)), de plus de 65 % des matières premières non-métalliques et minérales extraites au monde (OECD, 2019) ou encore de la production d'environ 213 millions de tonnes de déchets en 2020 en France (SDES, 2022), le secteur de la construction est en pleine évolution afin de réduire ses impacts environnementaux. Pour atteindre ces objectifs, l'idée d'utiliser « le bon matériau au bon endroit » (Feraille, et al., 2022) permet d'optimiser les quantités et les performances des matériaux utilisés et ainsi réduire les impacts environnementaux de la construction ((Mourad, et al., 2021), (Maitenaz, et al., 2024)). Pour atteindre cet optimal et pour éviter des transferts de pollution, il est nécessaire de prendre en compte l'ensemble du cycle de vie des constructions, de la phase d'extraction des matières à la phase de fin de vie et revalorisation de

matières. La question de la durée de vie de l'ouvrage est alors primordiale car elle détermine les résultats obtenus.

D'un autre côté, la dimension d'ouvrage de longue durée de vie, le changement climatique ainsi que les modifications des modes de vie des sociétés mènent à des interrogations sur la destination et les potentielles évolutions de l'utilisation et des contraintes vues par les structures. Aujourd'hui, il est nécessaire d'imaginer les ouvrages de demain encore plus résilients et adaptables aux besoins variables tout en réduisant leurs impacts environnementaux. L'optimisation des structures peut alors s'orienter vers la prise en compte de ces évolutions futures dès le dimensionnement des ouvrages ((Sánchez-Silva & Baker, 2024), (Dimova, et al., 2024)).

Afin d'explorer ces idées, l'influence de la durée de vie et des solutions de réparation de poutres en béton armé sur les impacts environnementaux est étudiée. Dans une première partie, la durabilité des poutres en béton armé et son influence sur le dimensionnement de ces structures sont présentés. Puis, à partir des poutres dimensionnées pour des durées de vie différentes, l'ACV de ces éléments est réalisée et les résultats sont comparés pour les solutions étudiées.

II. DURABILITÉ ET DIMENSIONNEMENT DE POUTRES EN BÉTON ARMÉ

A. Les phénomènes qui impactent la durabilité du béton armé

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde. Associé à des armatures en acier, la résistance, la durabilité, la facilité de mise en œuvre et la modularité de ce matériau composite ont favorisé son utilisation. Cependant, comme pour tout matériau, les chargements et conditions environnementales vont modifier ses performances au cours de sa vie.

La première pathologie qui affecte la durabilité du béton est la corrosion des armatures due à la carbonatation du béton. La carbonatation est causée par la diffusion de dioxyde de carbone (CO_2) présent dans l'atmosphère dans les pores du béton. Une réaction chimique entre ce CO_2 et les hydroxydes de calcium, produits de l'hydratation du ciment, forme du carbonate de calcium réduisant le pH du béton. La baisse du pH va compromettre la couche passive de protection des armatures en acier contre leur corrosion (Papadakis, et al., 1991).

La corrosion des armatures est un phénomène électrochimique qui se produit lorsque les aciers sont exposés à des agents agressifs tels que les ions chlorures ou le dioxyde de carbone. Elle mène à la production de produits de corrosion non résistants et volumineux (oxydes de fer) et qui exercent une pression interne provoquant une expansion et un éclatement ou une fissuration du béton de l'enrobage (Andrade & Alonso, 1996).

Il est donc important de prendre en compte dès le dimensionnement des ouvrages ce phénomène afin d'assurer la durabilité attendue. Dans la suite de cette étude, nous proposons le dimensionnement de poutres en béton armé en considérant cette pathologie par la définition de l'épaisseur de l'enrobage des aciers.

B. *Impact de la corrosion par carbonatation du béton armé sur le dimensionnement de poutre en béton armé selon l'Eurocode 2*

Afin d'assurer une durée de vie attendue pour les ouvrages construits, la réglementation européenne de la construction en béton armé (EN 1992-1-1, 2005) impose de prendre en compte le risque de carbonatation du béton dès le dimensionnement des éléments en béton armé.

La durée de vie d'un ouvrage est définie dans le **TABLEAU 1** issu de l'Eurocode 0 (NF EN 1990, 2003) via la classe structurale. Cette classe catégorise la durée d'utilisation de projet de « Structures provisoires » avec une durée de vie de 10 ans à « Structures monumentales de bâtiments, ponts et autres ouvrages de génie civil » qui présentent une durée d'utilisation de 100 ans. Les durabilités proposées dans l'Eurocode 0 visent à fixer des performances attendues et réduire les dégradations pendant la durée projetée.

TABLEAU 1. Durée indicative d'utilisation de projet (NF EN 1990, 2003)

Catégorie de durée d'utilisation de projet	Durée indicative d'utilisation de projet (années)	Exemples
1	10	Structures provisoires ^{a)}
2	10 à 25	Éléments structuraux remplaçables, par exemple poutres de roulement, appareils d'appui
3	15 à 30	Structures agricoles et similaires
4	50	Structures de bâtiments et autres structures courantes
5	100	Structures monumentales de bâtiments, ponts, et autres ouvrages de génie civil

a) Les structures ou parties de structures qui peuvent être démontées dans un but de réutilisation ne doivent normalement pas être considérées comme provisoires.

La classe structurale est retrouvée dans l'Eurocode 2 de dimensionnement des structures en béton armé et plus particulièrement dans le calcul de l'enrobage des armatures dans le béton. En effet, afin de prévenir la corrosion des armatures en acier, la diffusion du dioxyde de carbone dans la couche d'enrobage en béton doit être plus longue que la durée de vie attendue pour la structure.

Dans la section 4.4 de l'Eurocode 2, l'épaisseur de l'enrobage est calculée à partir d'un enrobage minimal, nommé c_{min} , défini dans le **TABLEAU 2** à partir du croisement de la classe d'exposition (conditions d'exposition aux agents agressifs extérieurs tels que l'humidité, le CO₂ ou les ions chlorures) et de la classe structurale de l'élément étudié.

TABLEAU 2. Valeurs de l'enrobage minimal $c_{min,dur}$ requis vis-à-vis de la durabilité dans le cas des armatures de béton armé conformes à l'EN 10080 (EN 1992-1-1, 2005)

Classe Structurale	Classe d'exposition selon Tableau 4.1						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1 / XS1	XD2 / XS2	XD3 / XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

C. Dimensionnement d'une poutre en béton armé pour une durabilité de 50 ans

Dans cette étude, la structure étudiée est une poutre en béton armé soumise à de la flexion trois points. Une classe structurale S4 (structures de bâtiments et autres structures courantes, 50 ans de durée d'utilisation) et une classe d'exposition XC2 (humide, rarement sec) sont imposées. Un béton C30/37 a été choisi. Les données de sa formulation sont issues du projet PerfDuB (IREX / Projet National PerfDuB, 2023) d'étude de la durabilité du béton (la formulation et les quantités de matériaux sont visibles en Annexe 1). Des aciers B500A sont choisis pour le renforcement de la poutre en béton armé. La poutre, présentée en [FIGURE 1](#), est de longueur $L = 8,4 m$ et est chargée par une force verticale à mi-portée $F = 100kN$. La section de la poutre est de hauteur fixe, $h = 600mm$ et la largeur est calculée à partir des règles de dimensionnement d'une poutre en béton armé de l'Eurocode 2 (EN 1992-1-1, 2005).

Dans un premier temps, les armatures en acier sont dimensionnées afin de résister au chargement de la poutre. Les calculs montrent qu'une section d'aciers principaux $A_{s1} = 14,60 cm^2$ est nécessaire pour reprendre les efforts de traction dus à la flexion de la poutre. Le choix du ferrailage se porte alors sur 8 barres d'aciers haute adhérence de diamètre 16 mm (HA16) complétés pour leur assemblage d'un cadre HA8 et de deux étriers en HA8 (diamètre 8 mm). Le plan du ferrailage obtenu est visible en [FIGURE 2](#).

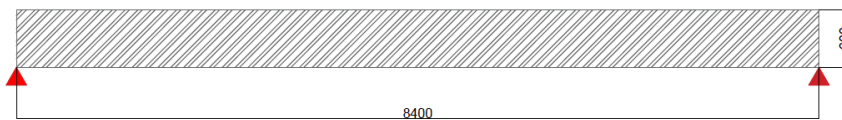


FIGURE 1 . Poutre étudiée

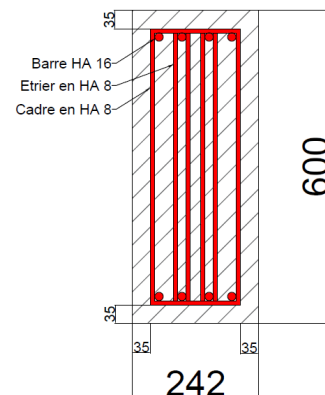


FIGURE 2 . Section et ferrailage de la poutre étudiée

Les armatures déterminées, l'enrobage de la poutre c_{nom} est calculé avec l'équation (1) selon l'Eurocode 2.

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \quad (1)$$

Avec Δc_{dev} la tolérance de pose des aciers, $\Delta c_{dev} = 10 mm$ et c_{min} l'enrobage minimal pour assurer la transmission des forces d'adhésion, la durabilité et la protection au feu. c_{min} est calculé à partir de l'équation (2).

$$c_{min} = \max(c_{min,b}; c_{min,dur}) \quad (2)$$

$c_{min,b}$ est le diamètre des barres et $c_{min,dur}$ est défini à partir du [TABLEAU 2](#).

La largeur de la poutre est ensuite calculée en prenant en compte cet enrobage ainsi que l'espacement minimal des armatures donné dans l'Eurocode 2. Une vérification de la résistance au chargement de la poutre dimensionnée a également été réalisée.

Les caractéristiques géométriques de cette poutre dimensionnée pour 50 ans et nommée Poutre A sont données dans le [TABLEAU 4](#).

D. Dimensionnement d'une poutre en béton armé pour une durabilité de 25 ans et solutions de prolongement de la durée de vie

Afin d'étudier l'influence des choix de dimensionnement, une seconde poutre a été dimensionnée selon la même méthodologie mais pour une durée de vie de 25 ans. La variation de la durabilité d'une poutre est proposée dans le [TABLEAU 3](#) issu de l'annexe française de l'Eurocode 2. Ce tableau propose de minorer de 1 la classe structurale de la structure souhaitée si une durée d'utilisation du projet inférieure à 25 ans est souhaitée. Ainsi, pour le dimensionnement de cette poutre nommée B, une classe structurale S3 (durée de vie de 15 à 30 assimilée à « Structures agricoles et similaires ») est choisie et un nouvel enrobage des armatures inférieur à celui de la poutre A est calculé. Les caractéristiques géométriques de cette poutre B sont visibles dans le [TABLEAU 4](#).

TABLEAU 3 . Modulation de la classe structurale recommandée, en vue de la détermination des enrobages minimaux $c_{min,dur}$ dans les Tableaux 4.4N et 4.5NF de l'Eurocode 2 (EN 1992-1-1, 2005)

Critère	Classe d'exposition selon Tableau 4.1						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1/ XA1 ³⁾	XD2/XS2/ XA2 ³⁾	XD3/XS3/ XA3 ³⁾
Durée d'utilisation de projet	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2	100 ans : majoration de 2
	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1	25 ans et moins : minoration de 1

TABLEAU 4 . Caractéristiques géométriques des poutres A et B dimensionnées respectivement pour 50 ans et 25 ans selon l'Eurocode 2

Poutre A			Poutre B		
Durée de vie	50	ans	Durée de vie	25	ans
c_{nom}	35	mm	c_{nom}	30	mm
b	242	mm	b	232	mm
A_c	0,1434	m ²	A_c	0,1374	m ²
A_{s1}	0,001608	m ²	A_{s1}	0,001608	m ²
A_{s2} (cadre et étriers)	0,000163	m ³	A_{s2} (cadre et étriers)	0,000168	m ³

La carbonatation du béton est un phénomène irréversible et inévitable. Ainsi, une fois que le dioxyde de carbone s'est diffusé dans l'épaisseur d'enrobage en béton et que la couche de passivation de l'acier est atteinte, il n'est pas possible de stopper la corrosion des aciers sans modifications de la structure.

La première solution de réparation est de remplacer le béton atteint par la carbonatation avant que le front de diffusion n'atteigne les armatures. Cette réparation correspond à un ragréage du béton dégradé avec un piquage du béton pour retirer la partie carbonatée du béton (on garde une épaisseur d'enrobage des armatures résiduelle de 10 mm afin de garantir leur protection). Puis un béton de ragréage est appliqué afin de reconstituer la géométrie de la structure et l'enrobage des aciers. La protection des armatures est donc renouvelée car l'enrobage « neuf » n'est pas carbonaté.

Le phénomène s'initie à nouveau mais la nouvelle couche d'enrobage offre un temps supplémentaire de protection (Infociments, 2017).

Une autre solution, sans modification des caractéristiques du béton, est de mettre en place une couche de revêtement de protection anti-carbonatation en surface du béton. Ce revêtement va ralentir la propagation du CO₂ au sein du béton en augmentant artificiellement l'épaisseur de l'enrobage. Il va également réduire l'humidité dans le béton, paramètre important pour la diffusion du CO₂ dans les pores du matériau (Sharobim & Fouad, 2022). Il existe de nombreux revêtements de type peinture organique ou inorganique, enduit ou mortier de prévention contre la carbonatation du béton. Leur efficacité repose sur leur adhésion au béton, leur durabilité, leur étanchéité ainsi que leur coefficient de résistance à la diffusion du CO₂ (Merah, 2021). Dans son article, (Zafeiropoulou, et al., 2011) montre que les peintures acryliques présentent un niveau de protection satisfaisant contre la carbonatation. La revue de (Merah, 2021), souligne que, pour les mortiers, la résistance à la carbonatation est assurée lorsque l'épaisseur dépasse 50 mm, conformément aux travaux de (Huang, et al., 2012) et (Janoka, et al., 2018).

Deux solutions de prolongement de la durée de vie de la poutre B jusqu'à une durée de vie de 50 ans sont étudiées. Dans un premier cas, la poutre B subira un retrait puis un ragréage de son béton d'enrobage carbonaté. Cette opération a lieu au bout de 25 ans de vie de la poutre et consiste à retirer l'épaisseur de c_{min} de béton et de la renouveler avec un béton identique au béton initial. Cette solution est nommée poutre B+R.

Une deuxième étude proposera de mettre en place un peinture acrylique de protection contre la carbonatation en surface de la poutre dès la fin du coulage de la poutre. Cette couche de peinture est ensuite renouvelée régulièrement à la fin de sa période d'efficacité (tous les 15 ans) afin d'atteindre une durée d'utilisation de la poutre B de 50 ans. Cette solution est nommée poutre B+C.

III. ACV DES POUTRES EN BÉTON ARMÉ ET INFLUENCE DE LA METHODE DE DIMENSIONNEMENT

La méthode de l'Analyse du Cycle de Vie est un outil d'évaluation des impacts environnementaux d'un projet. Cette approche normalisée ((ISO 14040, 2006) et (ISO 14044, 2006)) permet de prendre en compte l'ensemble du cycle de vie d'un produit et d'en évaluer les impacts vis-à-vis de plusieurs critères environnementaux. Dans le cadre de cette étude, l'ACV des poutres dimensionnées pour une durée de vie de 50 ans mais avec différentes méthodes de prolongement de la durabilité permettra de comparer les résultats et d'identifier les principaux gains des différentes solutions.

A. Objectif et cadre de l'analyse

Les poutres étudiées ont pour fonction de supporter les charges et autres éléments de plancher d'un bâtiment pour une durée de 50 ans. L'unité de référence utilisée est un mètre linéaire de poutre de 0,6 m de hauteur.

L'étude ACV du berceau à la tombe des trois solutions est réalisée. La méthode de calcul d'impacts sélectionnée pour réaliser l'étude est la méthode de la norme (EN 15804+A2, 2019). Les impacts étudiés ainsi que les étapes du cycle de vie de cette méthode de calcul ont été suivis. Les résultats

obtenus pour une sélection de 16 indicateurs environnementaux seront présentés dans la suite de cette étude.

Dans le cadre de cette étude, les éléments cités ci-dessous sont hors des frontières de l'étude :

- Éclairage, chauffage et nettoyage de l'atelier
- Département administratif
- Transport des employés
- Production et fin de vie des emballages des produits et des consommables
- Grue et ensemble des matériels communs au chantier (car dans le bilan total du bâtiment)

Les cycles de vie des poutres étudiés sont ainsi visibles dans les **FIGURE 3**, **FIGURE 4** et **FIGURE 5**.

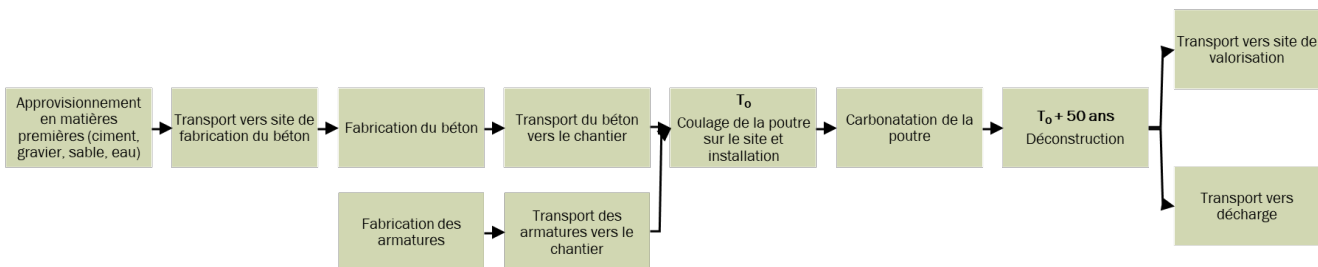


FIGURE 3 . Cycle de vie de la poutre A, dimensionnée pour 50 ans

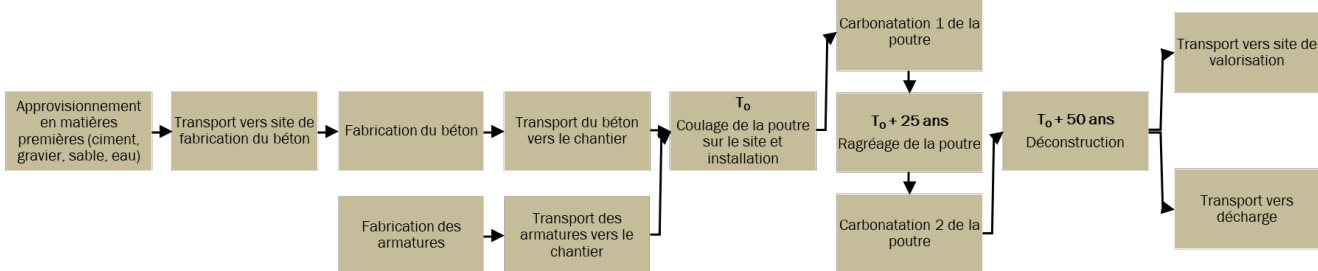


FIGURE 4 . Cycle de vie de la poutre B+R, dimensionnée pour 25 ans avec un ragréage à 25 ans pour prolonger la durée de vie à 50 ans

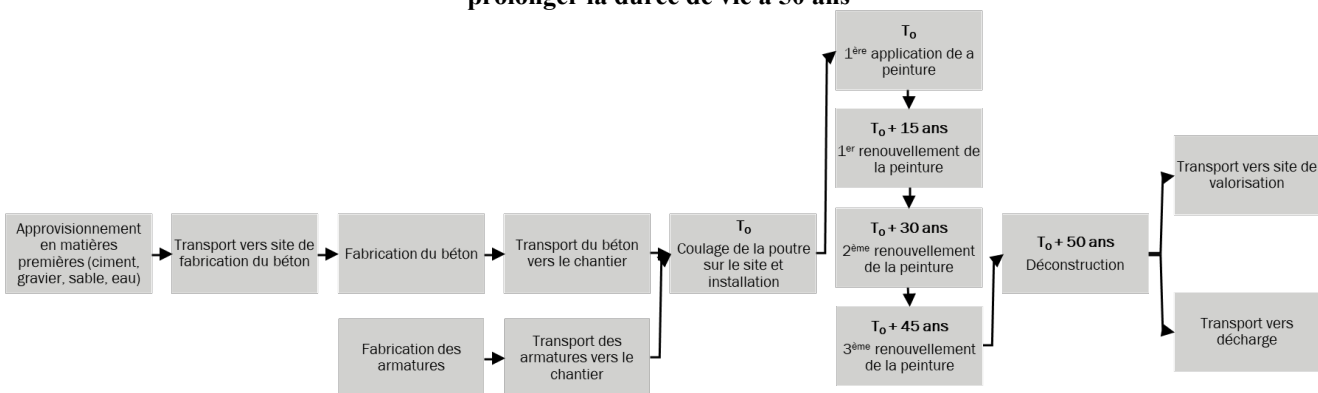


FIGURE 5 . Cycle de vie de la poutre B+C, dimensionnée pour 25 ans avec une peinture de protection régulièrement renouvelée pour prolonger la durée de vie à 50 ans

Les hypothèses suivantes, concernant les étapes du cycle de vie, ont été prises :

- Une FDES (fiches de déclarations environnementales et sanitaires) pour le ciment CEM III/A issue de (InfoCiments, 2024) a été utilisée en donnée pour les étapes d’approvisionnement en ciment et ragréage de la poutre. De même, les informations environnementales de la peinture de protection sont issues d’une FDES provenant de la base INIES (INIES, 2017). Ces FDES présentent les ACV de ces produits du berceau à la porte.
- Un pourcentage de perte de béton de 3% a été choisi pour les processus de fabrication et de ragréage de la poutre (selon les hypothèses prises dans les FDES de poutres en béton armée disponibles dans la base INIES (INIES, 2017)).
- L’étape de carbonatation correspond à l’étape de la vie en œuvre de la poutre. La captation de CO₂ n’a pas été prise en compte dans cette étude.
- La fin de vie de la poutre correspond à sa déconstruction entraînant la production de 75% de déchets valorisables et de 25% de déchets non valorisables. Ils sont ensuite transportés respectivement vers un site de valorisation et en décharge.

À partir des bases de données ELCD 3.2 (JRC, 2016) utilisées avec le logiciel OpenLCA (OpenLCA, s.d.) et de FDES extraites de (INIES, 2017) et (InfoCiments, 2024), l’inventaire des flux entrants et sortants ainsi que l’évaluation des impacts environnementaux des poutres ont été faits. Les quantitatifs des poutres ainsi que les processus utilisés pour réaliser les ACV sont visibles en Annexe 2. Les résultats sont comparés et présentés dans la partie suivante.

B. Résultats, comparaisons et analyses

Les ACV réalisées avec le logiciel OpenLCA permettent d’obtenir les valeurs des indicateurs environnementaux des trois solutions étudiées. Une comparaison des résultats pour 16 indicateurs environnementaux principaux de la norme (EN 15804+A2, 2019) est proposée dans la [FIGURE 6](#) sous forme de diagramme radar présentant les valeurs relatives à la valeur maximale ramené à l’unité.

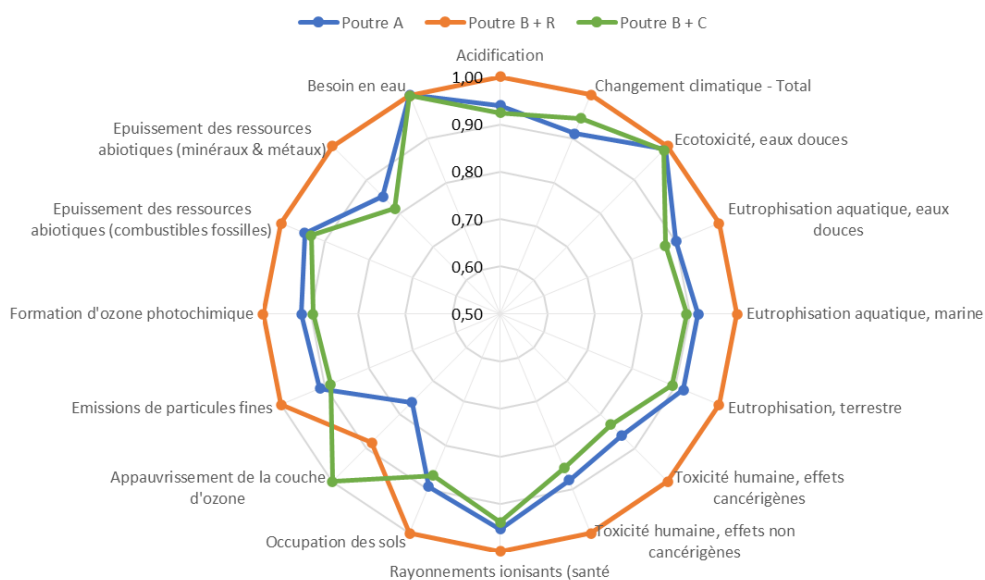


FIGURE 6. Comparaison des impacts environnementaux des poutres A, B+R et B+C à partir de leurs ACV

Le diagramme radar de comparaison des résultats sur tous le cycle de vie des ACV des trois poutres étudiées (FIGURE 6) montre, d'une manière globale, que la solution poutre B+R est celle présentant des impacts environnementaux les plus importants sur tous les critères. En effet, on observe une augmentation moyenne des indicateurs de 9,34% par rapport à la poutre A de référence. L'augmentation des impacts environnementaux est principalement observable pour les indicateurs d'utilisations des ressources minérales et métalliques, l'indicateur toxicité humaine - risque de cancer et l'indicateur appauvrissement de l'ozone stratosphérique. Pour ces trois indicateurs, les valeurs des critères pour la poutre B+R sont supérieures à ceux de la poutre A de plus de 15%. Cela est en lien avec l'ajout de béton supplémentaire qui entraîne une augmentation de la consommation de ressource naturelle (minéraux nécessaires à la production du ciment et des granulats) ainsi qu'à l'augmentation des diverses émissions défavorables à l'environnement et la santé humaine (émissions de substance nocive dans le sol, l'air et l'eau pour l'indicateur toxicité humaine et l'émission d'autres polluants dégradant la couche d'ozone stratosphérique).

La poutre B+C présente, elle, des impacts environnementaux légèrement moins importants que la poutre A, avec une réduction moyenne de 0,12% de leurs valeurs. Cependant, les indicateurs environnementaux dégradation de l'ozone stratosphérique et changement climatique ont des valeurs plus importantes d'environ 31% et 3,8% par rapport à la poutre A respectivement. La valeur de l'indicateur de dégradation de l'ozone est également plus importante que celle de la poutre B+R. Cela est dû à la composition de la peinture acrylique choisie présentant des éléments chimiques défavorables à ces critères environnementaux.

En revanche, les indicateurs écotoxicité sur l'eau potable et consommation de l'eau montrent de très faibles écarts entre les trois solutions. Ces résultats révèlent que les différentes méthodes de dimensionnement présentent des consommations et pollutions de l'eau équivalentes.

Concernant l'indicateur changement climatique, en lien avec les émissions des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, la poutre B+R est ici aussi la plus émettrice de GES avec un total de 39,9 kg de CO₂ éq sur tous son cycle de vie. La solution poutre B+C est la deuxième plus défavorable avec des émissions de GES de 37,8 kg de CO₂ éq, contre 36,4 kg de CO₂ éq pour la poutre A.

Ces résultats montrent des variations non négligeables des impacts environnementaux en fonction des solutions de dimensionnement des poutres en béton armé. Selon si la poutre est dimensionnée directement pour toute sa vie d'utilisation ou si sa durabilité est sous-dimensionnée, les indicateurs environnementaux peuvent changer. Le choix de la meilleure solution va alors dépendre de l'importance portée aux différents critères.

IV. CONCLUSION

Cette étude explore le potentiel d'optimisation de dimensionnement de poutre en béton armé vis-à-vis de ses impacts environnementaux. A partir d'un dimensionnement selon l'Eurocode 2 prenant en compte la durabilité du béton armé face à sa carbonatation, les ACV de poutres dimensionnées pour 50 ans et pour 25 ans avec deux solutions de prolongement de la durée de vie jusqu'à 50 ans ont été réalisées. La comparaison des résultats montre une réduction de certains impacts environnementaux si une solution de prolongement de la durabilité avec une peinture de protection est choisie. En revanche, le prolongement par remplacement du béton d'enrobage carbonaté par un

béton sain augmente la majorité des impacts environnementaux. Concernant les émissions de GES, la solution de dimensionnement à 50 ans est la plus favorable. Ainsi en fonction des critères sélectionnés, une solution de sous-dimensionnement avec prolongement de la durée de vie permettrait des réductions des émissions nocives pour l'environnement sur tout le cycle de vie de la poutre.

Un potentiel d'optimisation est identifié ici. En effet, le sous-dimensionnement de structure permettrait de réduire certains indicateurs environnementaux et d'optimiser la fonctionnalité et l'utilisation de l'élément au besoin identifié aujourd'hui et dans le futur. De plus, l'intégration d'une ACV dynamique (prenant en compte la temporalité des émissions de GES) permettrait de réduire les impacts des émissions futures en lien avec le stockage de carbone et la Stratégie Nationale Bas Carbone française ((Levasseur, 2011), (SNBC, 2020)).

Des études supplémentaires prenant en compte différents bétons, différents chargements, d'autres solutions de prolongement ou encore d'autres types de structures permettraient de poursuivre ces analyses et d'identifier de nouveaux leviers d'optimisation. En complément, les données environnementales utilisées pourraient être mises en concurrence avec d'autres bases de données afin d'appuyer ou de relativiser les résultats obtenus avec la prise en compte de différentes sources de données plus récentes ou encore spécifiques à la France.

REFERENCES

ADEME, 2024. Le bâtiment sur la voie de la décarbonation. *ADEMEINTERNATIONAL*, Septembre.Issue #63.

Andrade, C. & Alonso, C., 1996. Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site. *Construction and Building Materials*, 10(15), pp. 315-328.

Dimova, S. et al., 2024. *Impact of climate change on the corrosion of the European reinforced concrete building stock.*, s.l.: Joint Research Centre.

EN 15804+A2, 2019. *Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction*, s.l.: AFNOR.

EN 1992-1-1, 2005. *Eurocode 2 - Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments*, Brussels: European committee for standardisations.

Feraille, A., Desbois, T. & Saadé, M., 2022. L'ACV dans le domaine de la construction : le cas du matériau béton. *Academic Journal of Civil Engineering*, 40(4).

Huang, N., Chang, J. & Liang, M., 2012. Effect of plastering on the carbonation of a 35-year-old reinforced concrete building. *Construction and Building Materials*, Volume 29, pp. 206-214.

Infociments, 2017. *Réparation des ouvrages en béton armé dégradés par corrosion des armatures*. [En ligne] Available at: <https://www.infociments.fr/autres-ouvrages-de-genie-civil/reparation-des-ouvrages-en-beton-arme-degrades-par-corrosion-des-armatures> [Accès le octobre 2024].

InfoCiments, 2024. *Déclarations Environnementales Produit (DEP) Ciments*. [En ligne] Available at: <https://www.infociments.fr/ciments/declarations-environnementales-produit-dep-ciments-telecharger> [Accès le 2025].

INIES, 2017. *base inies Espace de consultation*. [En ligne] Available at: <https://base-inies.fr/consultation/tableau-de-bord> [Accès le 2025].

IREX / Projet National PerfDuB, 2023. *Approche performantielle de la durabilité des ouvrages en béton - De la qualification en laboratoire au suivi d'exécution*. Editions Eyrolles éd. s.l.:s.n.

ISO 14040, 2006. *Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre*, s.l.: ISO.

ISO 14044, 2006. *Management environnemental - analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices*, s.l.: ISO.

Janoka, I., Bačuvčík, M. & Paulík, P., 2018. Low carbonation of concrete found on 100-year-old bridges. *Case Studies in Construction Materials*, Volume 8, pp. 97-115.

JRC, 2016. *ELCD 3.2 Database*. [En ligne] Available at: <https://nexus.openlca.org/database/ELCD>

Levasseur, A., 2011. *Développement d'une méthode d'analyse du cycle de vie dynamique pour l'évaluation des impacts sur le réchauffement climatique*. s.l.:s.n.

Maitenaz, S., Mesnil, R., Feraille, A. & Caron, J.-F., 2024. Materialising structural optimisation of reinforced concrete beams through digital fabrication. *Structures*, Volume 59.

Merah, A., 2021. Concrete anti-carbonation coatings : a review. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 35(4), pp. 337-356.

Mourad, L. et al., 2021. Topology optimization of load-bearing capacity. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Volume 64, pp. 1367-1383.

NF EN 1990, 2003. *Eurocode 0 - Base de calcul des structures*, Brussels: European committee for standardisation.

OECD, 2019. *Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences*, Paris: OECD Publishing.

OpenLCA, s.d. *openLCA.org*. [En ligne] Available at: <https://www.openlca.org/>

Papadakis, V., Vayenas, C. & Fardis, M., 1991. Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete. *Materials Journal*, 88(2), pp. 186-196.

Sánchez-Silva, M. & Baker, J. W., 2024. Dynamic Infrastructure Systems: advancing sustainable urbanization and climate change. *Environment Systems and Decisions*, Volume 44, pp. 489-499.

SDES, 2022. *Bilan 2020 de la production de déchets en France*, s.l.: DATALAB.

Sharobim, K. G. & Fouad, M. I., 2022. Prevention of Carbonation of RC Structures (Critical Review). *International Journal of Advances in Structural and Geotechnical Engineering*, 06(04), pp. 96-109.

SNBC, 2020. *Stratégie nationale bas-carbone - Transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone*. s.l.:Ministère de la Transition Ecologique et solidaire.

UNEP, 2024. *United Nations Environment Programme. Global Status Report for Buildings and Construction : Beyond foundations : Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector*, Nairobi: s.n.

Zafeiropoulou, T., Rakanta, E. & Batis, G., 2011. Performance Evaluation of Organic Coatings Against Corrosion in Reinforced Cement Mortars. *Progress in Organic Coatings*, 72(1-2), pp. 175-180.

ANNEXE 1. Quantitatifs des poutres

TABLEAU 5. Quantités et types des matériaux des formulations du béton des poutres A et B

Poutre A			Poutre B		
Ciment			Ciment		
type	CEM III/A		type	CEM III/A	
quantité	40,152	kg/ml	quantité	38,472	kg/ml
Eau			Eau		
quantité	25,095	l/ml	quantité	24,045	l/ml
Sable			Sable		
type	Alluvionnaire silico-calcaire roulés avec absorption supérieur à 2,5% (S2) (0/4)		type	Alluvionnaire silico-calcaire roulés avec absorption supérieur à 2,5% (S2) (0/4)	
quantité	119,31	kg/ml	quantité	114,32	kg/ml
Granulats			Granulats		
type	Alluvionnaire silico-calcaire roulés avec absorption supérieur à 2,5% (6/20)		type	Alluvionnaire silico-calcaire roulés avec absorption supérieur à 2,5% (6/20)	
quantité	130,21	kg/ml	quantité	124,76	kg/ml
Plastifiant/réducteur d'eau			Plastifiant/réducteur d'eau		
quantité	0,3012	kg/ml	quantité	0,2886	kg/ml
Acier			Acier		
quantité	13,91	kg/ml	quantité	13,95	kg/ml

TABLEAU 6. Quantité de matériaux des solutions de prolongement de la durée de vie de la poutre B

Solution prolongement 1 - Ragréage		
type	béton initial	
quantité	0,0315	m ³ /ml
Masse du ragréage	72,86	kg/ml
Solution prolongement 2 - Revêtement anti-carbonatation		
type	Peinture acrylique renouvelée 4 fois	
surface	0,00143	mm ² /ml
Durée de vie peinture	15	ans

ANNEXE 2. PROCEDURES DES ACV DES POUTRES A, B+C ET B+R

Procédure	Flux sortant	Flux entrant	Source	unité	Quantité		
					Poutre A	Poutre B+R	Poutre B+C
transport du ciment	Ciment CEM III/A transporté			kg	40,152	38,472	38,472
		CEM III/A sans PM et ES	InfoCiments - CEM III/A - en vrac sans caractéristiques PM et ES	kg	40,152	38,472	38,472
		transport in t*km	Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER	kg*km	4970,8	4762,83	4762,83
		transport in t*km	Rail transport, technology mix, electricity driven, cargo - RER	kg*km	730,77	700,19	700,19
		transport in t*km	Barge, technology mix, 1.228 t pay load capacity - RER	kg*km	1043,95	1000,27	1000,27
transport des graviers	Graviers transporté			kg	130,21	124,76	124,76
		gravel 2/32	Gravel 2/32, production mix, at plant, wet and dry quarry, undried - RER	kg	130,21	124,76	124,76
		transport in t*km	Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER	kg*km	2897,11	2744,7	2744,7
		transport in t*km	Barge, technology mix, 1.228 t pay load capacity - RER	kg*km	2864,56	2775,89	2775,89
transport du sable	Sable transporté			kg	119,31	114,32	114,32
		sand 0/2	Sand 0/2, production mix, at plant, wet and dry quarry, undried - RER	kg	119,31	114,32	114,32
		transport in t*km	Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER	kg*km	2624,79	2514,97	2514,97
		transport in t*km	Barge, technology mix, 1.228 t pay load capacity - RER	kg*km	2654,62	2543,55	2543,55
Fabrication du béton	Béton sortie d'usine			m3	0,1434	0,1374	0,1374
		Ciment CEM III/A transporté	transport du ciment	kg	40,152	38,472	38,472
		Graviers transporté	transport des graviers	kg	130,21	124,76	124,76
		Sable transporté	transport du sable	kg	119,31	114,32	114,32
		eau	Liquid Packaging Board (LPB) production, production mix, at plant, production, mineral coated LPB (n=4), basis weight: 266 g/m2 - EU-27	kg	25,095	24,045	24,045
		diesel	Diesel, consumption mix, at refinery, from crude oil, 200 ppm sulphur - EU-15	MJ	0,00287	0,00275	0,00275
Transport du béton		électricité	electricity mix, aluminium industry Scenario: Today - GLO	kWh	0,65964	0,63204	0,63204
	Béton chantier			m3	0,1434	0,1374	0,1374
		Béton sortie d'usine	Fabrication du béton	m3	0,1434	0,1374	0,1374
		transport in t*km	Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER	kg*km	6133,5	5876,87	5876,87
Transport des armatures	Armatures chantier			kg	13,91	13,95	13,95
		steel rebar	Steel rebar, production mix, at plant, blast furnace and electric arc furnace route, - GLO	kg	13,91	13,95	13,95
		transport in t*km	Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER	kg*km	1947,4	1953	1953
Coulage et installation poutre BA	Poutre BA			unité	1	1	1
		Armatures chantier	Transport des armatures	kg	13,91	13,95	13,95
		Béton chantier	Transport du béton	m3	0,1434	0,1374	0,1374
		électricité	electricity mix, aluminium industry Scenario: Today - GLO	MJ	46,22	46,22	46,22
		coffrage	Steel Engineering steel Global 2020, production mix, at plant, electric arc furnace route, 1kg - GLO	kg	0,14	0,14	0,14
		Chute de béton		m3	0,0043	0,00412	0,00412
Carbonatation du béton	Poutre BA carbonaté			unité	1	1	-
		Poutre BA	Coulage et installation poutre BA	unité	1	1	-
		CO2	ressource	kg	2,14	1,07	-
Démolition de la poutre	déchets recyclables			kg	248,66	238,25	238,25
	déchets non recyclables			kg	82,89	79,42	79,42
		Poutre BA carbonaté	Carbonatation du béton	unité	1	1	1
Transport déchets vers décharge	Déchets non recyclables transportés			kg	82,89	79,42	79,42
		déchets non recyclables	Démolition de la poutre	kg	82,89	79,42	79,42
		transport in t*km	Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER	kg*km	2486,56	2382,52	2382,52
Transport déchets vers centre de valorisation	Déchets recyclables transportés			kg	248,66	238,25	238,25
		déchets recyclables	Démolition de la poutre	kg	248,66	238,25	238,25
		transport in t*km	Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER	kg*km	7459,67	7147,55	7147,55
Application d'une couche de peinture de protection sur la poutre	Poutre BA			unité	-	-	1
		Poutre BA	Coulage et installation poutre BA	unité	-	-	1
		Peinture acrylique	INIES - FDES peinture de ravalement en phase aqueuse, classe D2 (SIPEV)	m2	-	-	0,00143
Réparation de l'enrobage de la poutre	Poutre BA			unité	-	1	-
		Poutre BA carbonaté	Carbonatation du béton	unité	-	1	-
		Béton pour réparation	Fabrication du béton de réparation	m3	-	0,0315	-
Fabrication du béton de réparation		Chute de béton		m3	-	0,0315	-
		Béton pour réparation		m3	-	0,0315	-
		Ciment CEM III/A transporté	InfoCiments - CEM III/A - en vrac sans caractéristiques PM et ES	kg	-	8,82	-
		Graviers transporté	Gravel 2/32, production mix, at plant, wet and dry quarry, undried - RER	kg	-	28,602	-
		Sable transporté	Sand 0/2, production mix, at plant, wet and dry quarry, undried - RER	kg	-	26,208	-
	eau	Liquid Packaging Board (LPB) production, production mix, at plant, production, mineral coated LPB (n=4), basis weight: 266 g/m2 - EU-27	kg	-	5,5125	-	