

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

Ambroise LCHAT

Navier, École des Ponts, Univ Gustave Eiffel, CNRS, Marne-la-Vallée, France

RESUME Responsable de la moitié des extractions de matière première à l'échelle européenne, le secteur du bâtiment et des travaux publics fait face au risque de pénurie des ressources. Le réemploi se présente comme une alternative à développer. Néanmoins, pour que les matériaux de la construction puissent être réemployés à bon escient, il est nécessaire de disposer d'un outil d'aide à la décision multicritère et synthétique. Ainsi, ce travail, mené au sein du laboratoire Navier avec le soutien du lab Recherche Environnement, se propose de réfléchir à la systématisation du réemploi. Dans cette optique, une démarche exploratoire de caractérisation physique d'éléments de structure en béton existants ainsi qu'un indicateur d'aide à la décision traduisant le potentiel de réemploi d'un élément de construction ont été développés.

Mots-clefs réemploi, économie circulaire, structure, béton

I. INTRODUCTION

Il ne fait plus de doute que le changement climatique est réel. Ce changement se traduit par un dérèglement de la température sur toute la surface du globe (IPCC, 2021). En parallèle, on assiste progressivement au dépassement de l'ensemble des limites planétaires. Ces limites, introduites par (Rockström et al., 2009) puis complétées par (Steffen et al., 2015) définissent un « espace de développement sûr et juste pour l'humanité, fondé sur des processus biophysiques qui régulent la stabilité de la terre ». Par conséquent, leur dépassement impacte la durabilité de l'environnement. Or, six de ces neuf limites ont été franchies (Wang-Erlandsson et al., 2022).

Par ailleurs, le sable est, après l'eau, la deuxième ressource la plus exploitée dans le monde (UNEP, 2019). Dans le domaine de la construction, le sable entre dans la composition du béton et du verre. Son extraction augmente fortement et a atteint entre 40 et 50 milliards de tonnes en 2019 (UNEP, 2019). Le secteur du Bâtiment et des Travaux Publics (BTP) est ainsi responsable de la moitié des extractions des matières premières et de la consommation d'énergie à l'échelle européenne, mais également de la production de 46 millions de tonnes de déchets en 2014 en France, dont 23 issus de la démolition (MTECT, 2020a). De plus, en France, le secteur du Bâtiment représente 43 % des consommations énergétiques et 23 % des émissions de gaz à effet de serre (MTECT, 2020b).

L'ensemble de ces éléments chiffrés montre l'urgence d'agir sur nos consommations et modes de production. Aussi, dans leur rapport (UNEP, 2022), les nations unies recommandent de

reconnaître le sable comme une ressource stratégique et d'intégrer des politiques pour un avenir circulaire (promotion de l'usage efficace et de la circularité de la ressource).

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

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à la faisabilité technique et à l'intérêt environnemental du réemploi d'éléments de structures en béton armé, et en particulier au maintien de la performance de l'élément pour son futur usage. Dans un deuxième temps, nous avons analysé le réemploi structurel sous le prisme de l'économie circulaire en évaluant le gain en termes de consommation de matière. Enfin, nous avons proposé un indicateur multicritère pour déterminer le potentiel de réemploi d'un objet et ainsi mieux détecter les éléments réemployables.

Cet article présentera la démarche et les conclusions des deux premiers points de manière synthétique. Le reste de la réflexion est disponible dans le manuscrit de thèse et fera l'objet d'un article scientifique.

II. LE RÉEMPLOI DE POUTRES EN BETON ARMÉ

D'après les statistiques de l'observatoire bâtiment énergie carbone en date du 19 janvier 2022, sur plus de 1200 bâtiments de logement et tertiaire confondus, l'impact sur le changement climatique du lot structure est responsable de plus de 17 % du total de l'impact des produits de construction et équipements. Il semble donc que réutiliser et réemployer les structures des bâtiments soit un enjeu primordial. Pour les bâtiments en béton, des recherches et expérimentations sont en cours mais peu d'applications sont effectuées. À l'inverse, le bâtiment De Drie Hoven, conçu initialement par Herman Hertzberg pour être modulable à l'aide d'un système d'assemblage simple, a été malheureusement démolé de manière classique en 2015 (Ghyoot et al., 2018).

Concernant les éléments en béton coulés en place, le réemploi est une « pratique exceptionnelle ». Toutefois, pour des raisons de déconstruction en zone urbaine dense, des techniques de « démontage soigneux » (Küpfer and Fivet, 2021) ont été développées. Ces techniques pourraient ouvrir la voie au réemploi d'éléments de structure en béton. Il existe un réel besoin d'étude sur la possibilité du réemploi d'éléments en béton armé coulés en place.

A. Faisabilité technique

Pour proposer une première étude de faisabilité technique du réemploi de structure en béton (poutre en béton), nous entreprenons une série de tests sur deux éléments de structure (poutres) que nous avons pu récupérer sur un chantier de déconstruction du groupe Vinci, situé en région parisienne, grâce au lab Recherche Environnement. Il s'agit de poutres provenant de l'intérieur d'un bâtiment tertiaires, et qui n'ont donc pas subi d'agressions du milieu extérieur.

Pour évaluer la résistance résiduelle des éléments déconstruits, nous réalisons un essai de flexion trois points sur ces poutres (FIGURE 1).

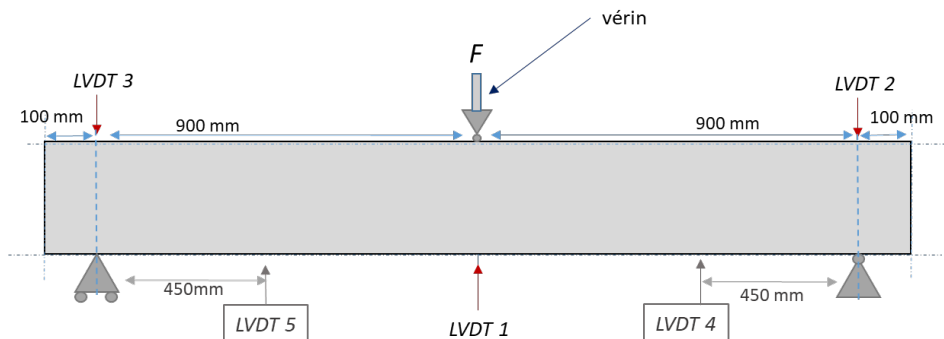


FIGURE 1. Évaluation de la résistance résiduelle d'une poutre en béton armé issue de la démolition d'un bâtiment : essai de flexion 3 points

Les résultats des essais FIGURE 2 montrent un comportement élasto-plastique classique pour une poutre en béton armé. La rupture apparaît à 421 kN pour cet essai, soit une perte de résistance de 8 % par rapport à une poutre neuve théorique similaire (par un calcul de structure : même dimension, même ferrailage) en prenant des hypothèses réalistes sur les caractéristiques des matériaux. Sur l'ensemble des essais et en retenant les hypothèses les plus défavorables, la perte de résistance obtenue est au maximum de 30 %. Ces résultats ne sont valables que pour un seul chantier et une seule typologie de structure, ils permettent de proposer une méthodologie et un premier ordre de grandeur ; de nouveaux essais sont nécessaires pour généraliser ces conclusions.

En complément, nous évaluons la durabilité de ces éléments en analysant l'avancée de la carbonatation, qui nous renseigne sur le risque de corrosion des armatures, la principale cause de ruine des structures en béton armé. Pour ce faire, nous réalisons ainsi des tests à la phénolphthaléine sur des carottes fendues prélevées sur les poutres (FIGURE 3) selon la norme NF EN 14630. Nous obtenons une profondeur du front de carbonatation d'au maximum 1 cm sur l'ensemble des carottes testées. La poutre ayant un enrobage de 2,5 cm mesuré, la durabilité face à la carbonatation est encore bonne après 50 ans de vie en œuvre (bâtiment des années 80).

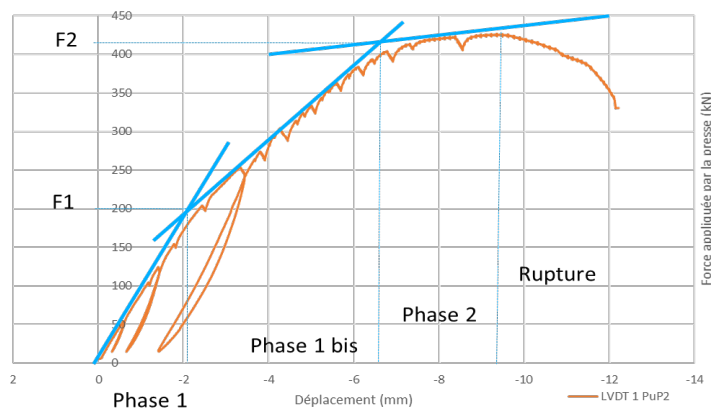


FIGURE 2. Évolution de l'effort appliqué par la presse en fonction du déplacement (flèche) au centre de la poutre lors d'un essai de flexion 3 points sur une poutre en béton armé issue de la démolition d'un bâtiment

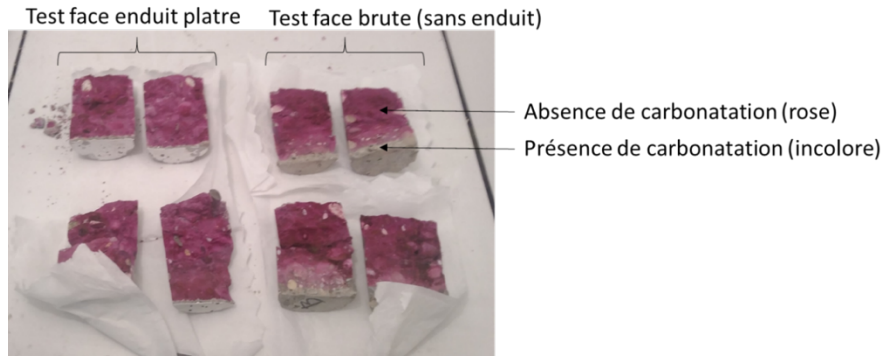


FIGURE 3. Évaluation de la durabilité d'une poutre en béton armé issue de la démolition d'un bâtiment : analyse de l'avancée du front de carbonatation par un test à la phénolphthaléine

B. Intérêt environnemental

Le réemploi de poutres en béton armé est donc techniquement faisable (techniques de déconstruction existantes et résistance résiduelle significative), mais est-ce environnementalement intéressant ? Pour répondre à cette question, nous réalisons une Analyse du Cycle de Vie (ACV) (Jolliet et al., 2010), selon la norme EN NF 15804+A1 sur trois cycles de vie consécutifs : de l'extraction de la matière à la mise en décharge. L'ACV est réalisée sur le logiciel OpenLCA de Greendelta et utilise la base de données Ecoinvent 3.5. Nous analysons trois scénarios de vie : poutre réemployée, poutre contenant du granulat recyclé, poutre à partir de matière vierge (

FIGURE 4). L'unité fonctionnelle de notre étude est la suivante : *Poutre permettant de franchir une portée de 1,80 m et de supporter une charge maximale (ponctuelle en son centre) de 463 kN pendant 50 ans puis de 426 kN pendant 50 ans supplémentaires et enfin de 393 kN pendant encore 50 ans.*

Les résultats de cette ACV sont présentés sur la FIGURE 5. On peut observer que le scénario de réemploi est le moins impactant (en prenant une incertitude de 10 %) pour 5 indicateurs sur les 7. Pour l'indicateur de formation d'ozone photochimique, nous observons que le scénario de réemploi semble équivalent voire plus impactant que le scénario vierge en raison de l'utilisation de la lame de scie pour démonter la poutre. Ainsi, dans un objectif d'écoconception, il s'agirait de minimiser les coups de scie pour minimiser le transfert de pollution en vue d'obtenir un procédé à minima égal à la poutre neuve. Le réemploi est donc une solution de valorisation pertinente du point de vue environnemental, avec un gain de 30 % pour l'indicateur sur le changement climatique notamment. Toutefois, il serait intéressant de comparer cette solution avec une réhabilitation, où la structure resterait en place et où il y aurait donc peu d'impact supplémentaire d'un cycle à l'autre.

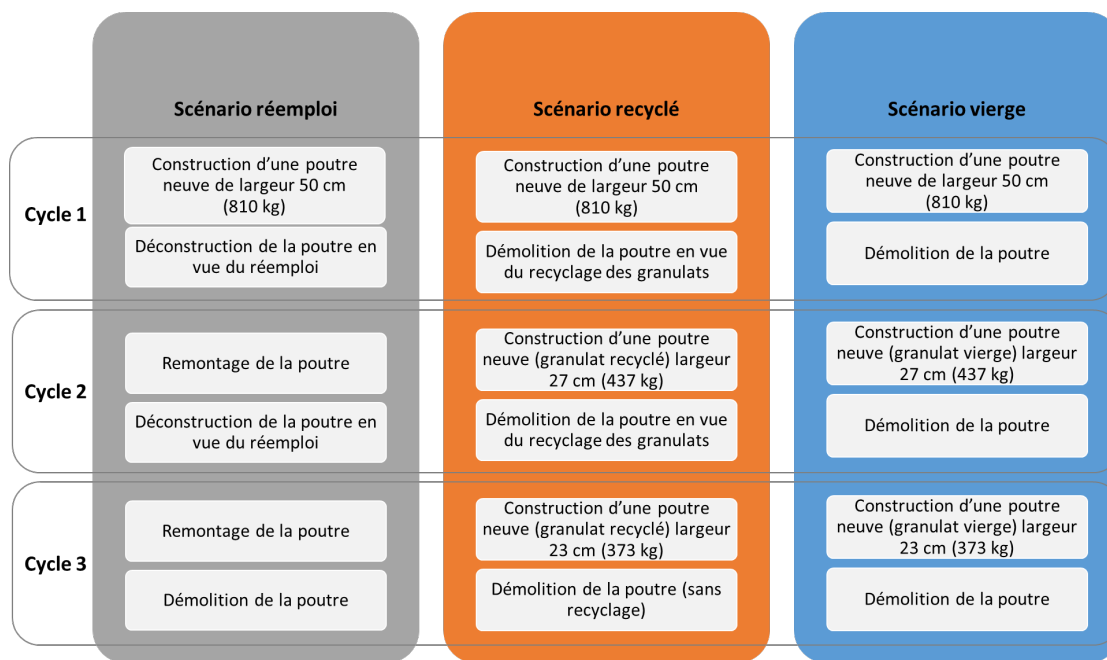


FIGURE 4. Système d'étude de l'ACV pour les trois scénarios de poutres : réemploi, granulats recyclés et granulats vierges

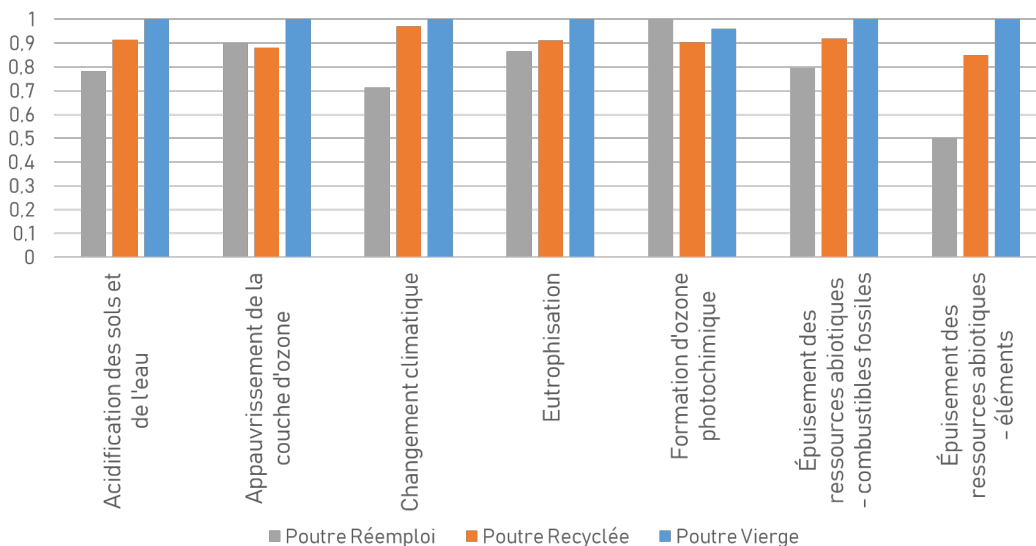


FIGURE 5. Impact relatif pour les indicateurs d'impact de la NF 15804 +A1 retenus pour les trois scénarios de poutres : réemploi, granulats recyclés et granulats vierges

III. RÉEMPLOI ET ÉCONOMIE CIRCULAIRE

Dans un contexte de crise environnementale, de finitude des ressources et de grande production de déchets, le concept d'économie circulaire (EC) fait désormais partie du discours politique, professionnel et académique (Kirchherr et al., 2017). Si l'économie circulaire admet de nombreuses définitions (Appendino et al., 2018), dans notre étude, nous sélectionnons la

définition du code de l’environnement, L.110-1-1, qui la décrit comme « un modèle économique dont l’objectif est de produire des biens et des services de manière durable, en limitant la consommation et les gaspillages de ressources ainsi que la production de déchet ». Nous nous intéressons donc principalement au gain en termes de matière, qui n’est pas mis en évidence par les indicateurs de l’ACV notamment pour les matériaux du béton (ciment, sable). En effet, l’indicateur épuisement des ressources abiotiques est évalué dans un contexte global sans prendre en compte les spécificités locales (granulats alluvionnaires moins accessibles par exemple). Des indicateurs de circularité ont ainsi été développés dans la littérature pour pallier ce manque. (Lachat et al., 2021) appliquent certains de ces indicateurs au cas d’étude d’une structure nexorade en bois pour comprendre leur comportement et montrent que les principaux indicateurs existants ne prennent pas en compte la différenciation de valorisation (perte de qualité intrinsèque et perte de valeur d’usage). De plus, ils se focalisent sur un unique cycle de vie et perdent donc l’information du cycle de la matière (les autres cycles), principe premier de l’économie circulaire. Nous avons donc décidé d’adapter un indicateur existant pour prendre en compte ces limites.

A. Principe de l’indicateur de circularité

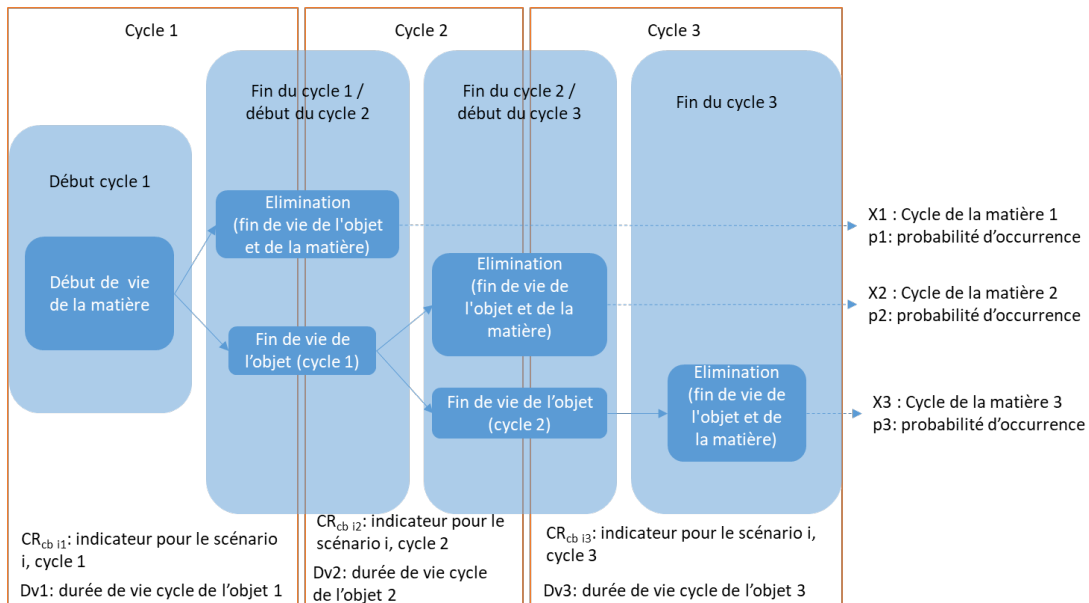


FIGURE 6. Principe de l’amélioration de la méthode de calcul de (Zhang et al., 2021) pour prendre en compte l’intégralité du cycle de la matière

Nous partons de l’indicateur développé par (Zhang et al., 2021) qui implémente une méthode pour intégrer la diversité des valorisations (recyclage, réutilisation, réemploi). Pour prendre en compte le cycle de la matière, nous commençons par énumérer les futurs possibles de l’extraction de la matière à l’élimination (tel que visible FIGURE 6). Pour chaque cycle de vie et chaque scénario nous calculons l’indicateur CR_{cb} de Zhang et al. Ensuite, à chaque cycle de la matière X_i possible, nous associons une probabilité d’occurrence selon la politique de développement du traitement des déchets. Le résultat final consiste en une moyenne pondérée de chaque cycle en fonction de cette probabilité d’occurrence.

B. Application au cas d'une poutre en béton armé

Pour mieux comprendre, nous appliquons ce principe sur une poutre en béton armé potentiellement réemployable. On dénombre 5 cycles de la matière possibles (FIGURE 7). Nous envisageons trois scénarios : Sc1 : politique favorisant le recyclage ; Sc2 : politique favorisant le réemploi ; Sc3 : politique favorisant l’allongement de l’usage de la matière quel que soit le type de valorisation, (FIGURE 8). Nous pouvons voir que la circularité reste faible (inférieure à 50 %) (0 : non circulaire ; 1 : circulaire) mais qu’elle varie fortement selon la politique choisie (i.e. le devenir réel des éléments).

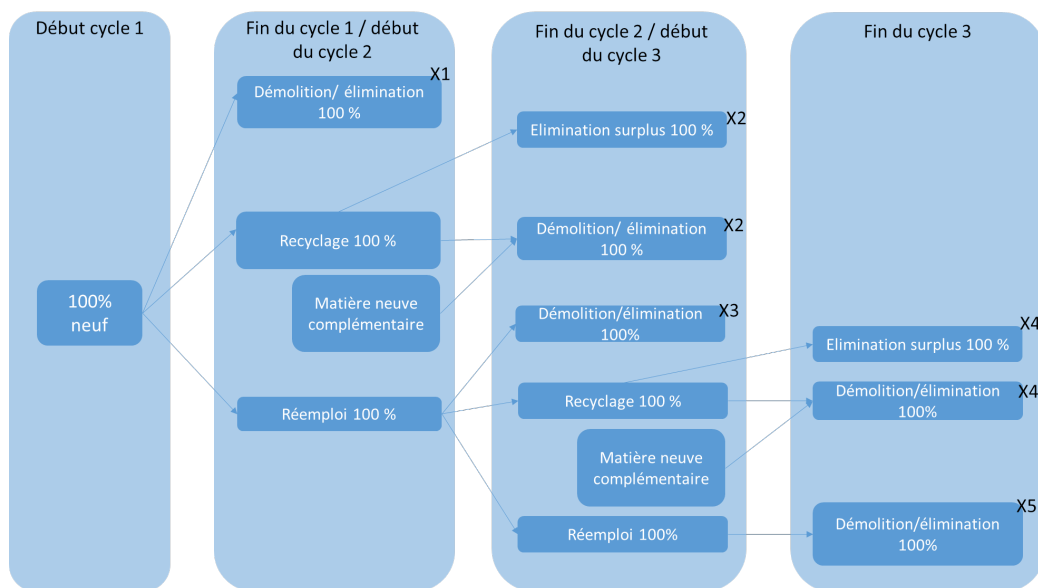


FIGURE 7. Les cycle de la matière pour une poutre en béton armé

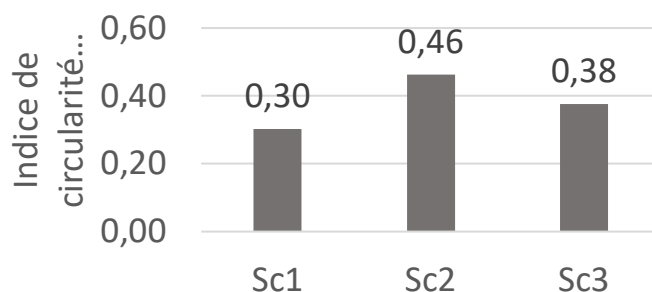


FIGURE 8. Résultats de l’indicateur de circularité modifié pour trois scénarios de politique de développement du traitement des déchets (0 : non circulaire ; 1 : circulaire)

IV. Conclusion

Cette étude permet de mettre en avant la méthodologie pour évaluer l’intérêt de déconstruire des structures en béton armé en vue de les réemployer. Des tests sur des éléments de structure issus de la déconstruction montrent que la résistance résiduelle est significative tandis que l’ACV

confirme un intérêt environnemental pour la plupart des indicateurs, avec 30 % de gain pour le changement climatique. Toutefois, du point de vue de l'économie circulaire, si cette solution présente un allongement de l'usage de la matière, la circularité est loin d'être parfaite. Une réflexion approfondie doit donc être menée avant toute déconstruction de bâtiment afin d'évaluer la pertinence d'une réhabilitation. Si la déconstruction est absolument nécessaire, il s'agira de privilégier le réemploi. Ce travail apporte une première vision globale de la question du réemploi appliquée à une structure en béton armé : technicité, environnement, circularité. Axé sur le développement d'une méthodologie, ce travail demande à être testé sur d'autres cas d'études pour en généraliser les conclusions.

V. REFERENCES

- Appendino, F., Roux, C., Peuportier, B., 2018. *Projet Pulse Paris, livrable 1 : état de l'art et revue des choix méthodologiques*, Expertise. ADEME.
- IPCC, 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Full report)*. Cambridge University Press.
- Jolliet, O., Saadé, M., Crettaz, P., 2010. *Analyse du cycle de vie: comprendre et réaliser un écobilan*. PPUR Presses polytechniques.
- Kirchherr, J., Reike, D., Hekkert, M., 2017. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling* 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Küpfer, C., Fivet, C., 2021. *Déconstruction sélective - Construction Réversible: recueil pour diminuer les déchets et favoriser le réemploi dans la construction.*, EPFL. ed. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4314325>
- Lachat, A., Kuzmenko, K., Colas, A.-S., Feraille, A., 2021. *Evaluating Circular-Economy Indicators: A Case Study*. MTECT, 2020a. *Déchets du bâtiment [WWW Document]*. Ministères Écologie Énergie Territoires. URL <https://www.ecologie.gouv.fr/dechets-du-batiment> (accessed 6.28.22).
- MTECT, 2020b. *Construction et performance environnementale du bâtiment [WWW Document]*. Ministères Écologie Énergie Territoires. URL <https://www.ecologie.gouv.fr/construction-et-performance-environnementale-du-batiment> (accessed 6.28.22).
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F.S., Lambin, E.F., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H.J., Nykvist, B., de Wit, C.A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P., Foley, J.A., 2009. A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472–475. <https://doi.org/10.1038/461472a>
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S.E., Fetzer, I., Bennett, E.M., Biggs, R., Carpenter, S.R., Vries, W. de, Wit, C.A. de, Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G.M., Persson, L.M., Ramanathan, V., Reyers, B., Sörlin, S., 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- UNEP, 2022. *Sand and sustainability: 10 strategic recommendations to avert a crisis*. GRID-Geneva, United Nations Environment Programme, Geneva, Switzerland.
- UNEP, 2019. *Sand and Sustainability: Finding New Solutions for Environmental Governance of Global Sand Resources*.
- Wang-Erlandsson, L., Tobian, A., van der Ent, R.J., Fetzer, I., te Wierik, S., Porkka, M., Staal, A., Jaramillo, F., Dahlmann, H., Singh, C., Greve, P., Gerten, D., Keys, P.W., Gleeson, T., Cornell, S.E., Steffen, W., Bai, X., Rockström, J., 2022. A planetary boundary for green water. *Nat Rev Earth Environ* 3, 380–392. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00287-8>
- Zhang, N., Han, Q., de Vries, B., 2021. Building Circularity Assessment in the Architecture, Engineering, and Construction Industry: A New Framework. *Sustainability* 13, 12466. <https://doi.org/10.3390/su132212466>