

Développement d'un indicateur de potentiel de réemploi : application à des cas d'étude

Ambroise LACHAT¹, Tiffany DESBOIS², Anne-Sophie COLAS³, Adélaïde FERAILLE⁴

¹ BRGM, F-45060, Orléans, France

² Cerema, Direction Ouest, F-22000 Saint-Brieuc, France

³ GERS-RRO, Univ Gustave Eiffel, Univ Lyon, Lyon, France

⁴ Navier, École des Ponts ParisTech, Univ Gustave Eiffel, CNRS, Marne-la-Vallée, France

RESUME Alternative à la démolition et compromis à la réhabilitation, le réemploi est, comme l'indique le code de l'environnement, la stratégie à privilégier lorsque le maintien en place est impossible, que ce soit pour les équipements, les éléments du second œuvre, les éléments du clos couvert ou bien encore le gros œuvre. Dans la lignée du diagnostic « produits, équipements, matériaux et déchets », l'identification des éléments potentiellement réemployables est une étape clef pour la mise à l'échelle du réemploi et le développement de sa complémentarité avec la réhabilitation. En se demandant comment déterminer rapidement et méthodiquement le potentiel de réemploi, nous constatons, dans un premier temps, une grande variabilité dans la littérature concernant sa définition ainsi que l'absence d'indicateur existant pour l'usage et les objectifs souhaités. Cela nous mène à développer un nouvel indicateur basé sur une approche multicritère semi quanti-qualitative. Enfin, dans un dernier temps nous appliquons cet indicateur à plusieurs cas d'étude réels ou fictifs afin d'établir un premier étalonnage du potentiel de réemploi. Les premiers résultats permettent, comme souhaité, de classer les cas d'études entre eux et d'esquisser une échelle du potentiel de réemploi.

Mots-clefs Indicateur, potentiel de réemploi, déconstruction, réhabilitation

I. INTRODUCTION

Dans le domaine de la gestion des déchets, une hiérarchie de leur mode de traitement s'est imposée (European Parliament, 2008) (voir [Figure 1](#)). Ainsi la prévention des déchets est à favoriser face au réemploi qui est lui-même à prioriser face aux autres méthodes de valorisation tel que le recyclage. Si on transpose ce principe au domaine du bâtiment, la réhabilitation doit être privilégiée. Néanmoins, lors d'une réhabilitation lourde, seule la structure reste en place, l'ensemble des éléments du second œuvre ou de l'enveloppe est démonté, valorisé ou éliminé. Par ailleurs, la réhabilitation n'est pas systématiquement possible ou envisagée et l'ensemble du bâtiment est alors démolé. Ainsi, le réemploi a toute sa place. Dans le cas de la réhabilitation lourde, c'est une

manière « d’upgrader » la réhabilitation en valorisant au mieux les éléments déconstruits. Dans le cas où la réhabilitation n’est pas possible, le réemploi structurel est une alternative de compromis entre la démolition pure et simple et le maintien en place.

S’il existe de nombreux exemples de réemploi (Benoit et al., 2018; Deweerdt and Mertens, 2020), il est toutefois nécessaire de passer à son application de manière plus systématique. Or, de nombreux freins persistent de nos jours (ADEME et al., 2016) qu’ils soient juridique, technique, assurantiel ou encore économique. Avec la loi AGEC (loi anti-gaspillage pour une économie circulaire) du 10 février 2020, un diagnostic PEMD (Produit Équipement Matériaux Déchet) est obligatoire pour les réhabilitations ou déconstructions les plus significatives. Ce diagnostic se veut notamment le relais pour l’identification des éléments réemployables. Il n’existe toutefois pas de méthode rapide et intégrée pour aider le diagnostiqueur dans l’identification du potentiel de réemploi des éléments ; ce dernier se base uniquement sur son expérience et ses connaissances.

L’objet de ce travail est donc de développer un indicateur traduisant le potentiel de réemploi, qui doit permettre à un décideur (Maitre d’ouvrage (MOA), Entreprise, Maitre d’œuvre (MOE)) de **déterminer rapidement et simplement la faisabilité du réemploi d’un élément** (notamment de structure d’un bâtiment) **avant dépose**.

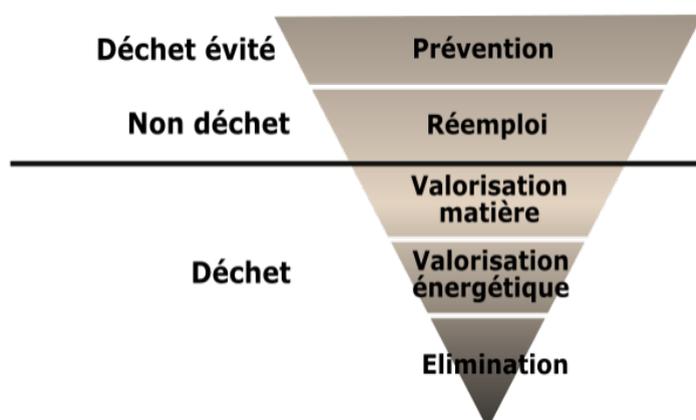


Figure 1 : Hiérarchie des déchets (source : SMEVOM¹)

II. REVUE DE LITTÉRATURE

Le **Tableau 1** présente les principales ressources bibliographiques relatives au potentiel de réemploi. On observe ainsi principalement des différences au niveau de l’objet d’étude (bâtiment complet, élément ou matériau) et des indicateurs/paramètres utilisés (âge, méthode d’assemblage, statistique). Cette forte variabilité est liée tout simplement à une définition variable du potentiel de réemploi, et par suite, aux objectifs des études très différents d’une étude à l’autre.

¹ <https://www.smevom.fr/la-prevention>

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des définitions existantes dans la littérature pour l'indicateur de potentiel de réemploi (Lachat, 2022)

Références	Définition du potentiel de réemploi	Principales caractéristiques	Echelle d'étude
(Durmisevic, 2006 ; Durmisevic et al., 2017)	Caractérise la facilité de démontage en vue d'une réutilisation	L'accent est mis sur la conception réversible et la connexion des éléments entre eux (dépendance et échange).	Assemblage / connexion
(Langston et al., 2008)	Fonctionnalité résiduelle d'un bâtiment	Tient compte de l'obsolescence et de l'espérance de vie	Bâtiment / construction
(Park and Chertow, 2014)	Capacité de récupération des matériaux (par réutilisation ou recyclage) compte tenu des capacités techniques actuelles	Se concentre sur les sous-produits de l'industrie ; prend en compte les techniques de traitement rentables	Matières premières
(Colas, 2017)	Capacité de l'élément à conserver ses caractéristiques techniques et sa fonctionnalité	Focus sur les capacités techniques et la transformation des éléments au cours du processus de réutilisation	Élément de construction
(Akanbi et al., 2018)	Performance résiduelle de l'élément lors de la déconstruction	En fonction de l'âge des éléments	Élément de construction ou ensemble d'éléments
(Bertin, 2020)	Capacité à être déconstruit et à fournir des avantages sociaux	Regroupement de plusieurs indicateurs de l'économie circulaire, adaptés aux éléments de conception pour la réutilisation	Élément de construction ou structure
(Rakhshan et al., 2021)	Avantages économiques potentiels de la réutilisation	Axé sur les caractéristiques économiques ; méthode prédictive et probabiliste	Élément de construction ou ensemble d'éléments

Sur la base de cette analyse bibliographique nous pouvons préciser les choix de définition du potentiel de réemploi en accord avec les objectifs de l'étude mentionnée précédemment.

Ainsi nous nous concentrons sur l'ensemble des aspects à l'échelle d'un élément ou d'un ensemble d'éléments ; nous nous rapprochons donc de la définition proposée par (Colas, 2017) et (Akanbi et al., 2018). La méthode est en revanche fortement inspirée du travail de (Bertin, 2020).

Notre définition du potentiel de réemploi est la suivante : **capacité d'un ou plusieurs éléments à conserver ses caractéristiques techniques et sa fonctionnalité après dépose en vue de sa réutilisation ou de son réemploi** ; cela comprend l'adéquation avec les contraintes économiques, environnementales et logistiques. L'indicateur qui en découle devra porter une vision intégrée du

réemploi, il comprendra ainsi l'ensemble des enjeux clés : aspects techniques, économiques, juridiques et environnementaux (ADEME et al., 2016; Glias, 2013).

III. METHODOLOGIE

L'indicateur développé (P_R) se voulant multicritère et relativement simple d'utilisation, est construit à partir de deux indices (Équation 1) ($I_{P_{rés}}$) et ($I_{C_{ext}}$) traduisant respectivement la performance résiduelle de l'élément (d'un point de vue technique) et les critères « externes » à l'élément, c'est-à-dire l'ensemble du contexte dans lequel cet élément se situe (contraintes logistiques, économiques...).

Chaque indice est calculé à l'aide d'une matrice de critères avec plusieurs niveaux (au maximum 5). L'indicateur global (P_R) évolue ainsi entre 0 (non réemployable) et 1 (parfaitement réemployable).

Équation 1 : Calcul de l'indicateur de potentiel de réemploi

$$P_R = I_{P_{rés}} \times (1 - I_{C_{ext}})$$

P_R : Indicateur de potentiel de réemploi
 $I_{P_{rés}}$: Indice de performance résiduelle de l'élément
 $I_{C_{ext}}$: Indice pour les critères externes à l'élément

Tableau 2 : Thématiques et critères évalués pour le calcul du potentiel de réemploi (adapté de (Lachat, 2022))

Thématique	Critères
$I_{P_{rés}}$ Indice de performance résiduelle de l'élément	
Technique	Type et caractéristiques géométriques
	État de l'élément avant le retrait
	Performances mécaniques et techniques ; pertes liées au processus
$I_{C_{ext}}$ Indice sur les critères externes à l'élément	
Technique	Difficulté technique de la déconstruction
	Accès facile à l'élément (avant et pendant la déconstruction)
	Manipulation (poids, volume, outils spécifiques)
	Risque de dommages
	Accessibilité du site (construction, stockage, nouvelle construction)
	Quantité
	Connexions/assemblage avec les structures adjacentes
	Utilisation future (avenir certain ou incertain)

Juridique	Statut juridique (déchets)
	Assurance et garantie
Économique	Maturité du marché (équilibre entre l'offre et la demande)
	Prix (par rapport à un produit équivalent ou alternatif)
Environnement et santé	Impact environnemental par rapport au produit équivalent
	Santé (substances dangereuses, qualité de l'air...)
	Sécurité (des travailleurs et des résidents)
Social et parties prenantes	Sensibilisation des parties prenantes (entreprises, compagnons, architectes...)
	Authenticité, valeur et caractère obsolète ou dépassé

L'ensemble des critères évalués est présenté dans le **Tableau 2**. Ces critères sont évalués de manière semi quali-quantitative à l'aide de paramètres tels que le poids, le nombre d'actions à réaliser, les distances... La **Figure 2** illustre la construction des matrices pour le calcul des indices : pour chaque critère l'utilisateur doit trouver le niveau correspondant à l'élément étudié. Pour cela il calcule le ou les paramètres de chaque niveau ; celui qui est vérifié (i.e. qui valide tous les paramètres) permet d'obtenir le score associé. L'ensemble des scores permet de faire une moyenne pondérée entre les critères qui donne la valeur de l'indice.

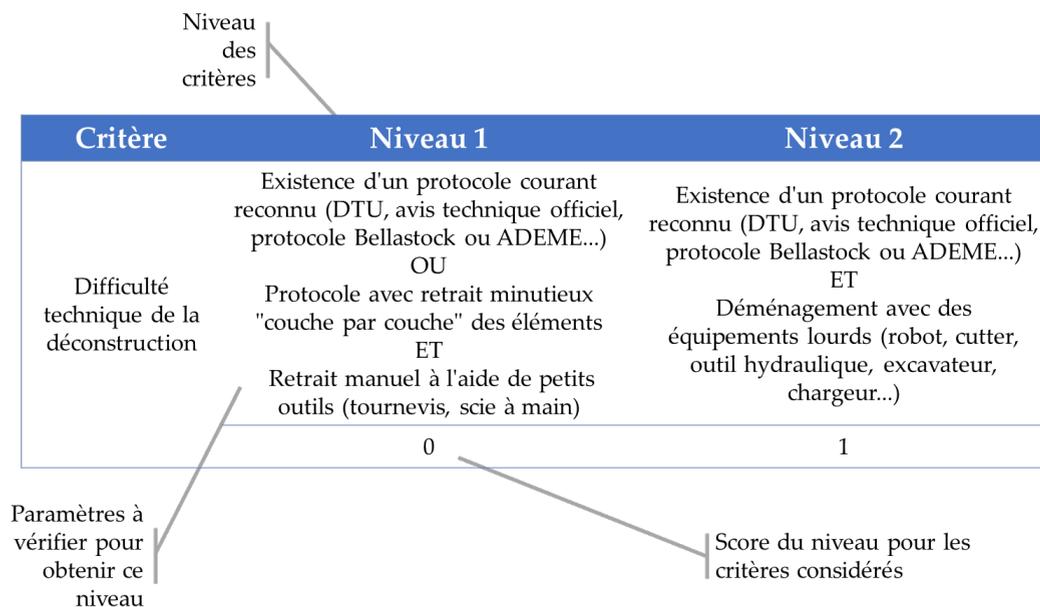


Figure 2 : Extrait de la matrice pour calculer l'indice sur les critères externes

IV. RESULTATS

Après une première calibration des scores de chaque critère (Lachat, 2022), la méthode est appliquée à plusieurs cas d'étude :

Cas porte : réemploi fictif de l'ouvrant d'une porte non coupe-feu dans un bureau sur la région parisienne (voir Figure 3 (a)).

Cas poutrelle bois académique et **Cas poutrelle bois industrielle** : réemploi fictif d'une poutrelle en bois issue d'une nexorade (Mesnil et al., 2018). Nous nous basons dans le contexte présenté dans (Kuzmenko et al., 2020; Lachat et al., 2021). Le cas « académique » est un cas théorique où l'usage est peu contraignant et où l'ensemble du processus est réalisé sur place i.e. au laboratoire. Une variante est réalisée dans un cas « industriel », c'est-à-dire où il est considéré le marché réel et les méthodes du secteur du bâtiment (voir Figure 3 (b)).

Cas voile béton : réutilisation réelle d'un voile en béton armé pour la construction d'un pavillon vélo. Cette application est basée sur les résultats (environnementaux, économiques et guide technique) de l'expérimentation de Bellastock dans le cadre de la Fabrique du Clos à Stains (93). On considère le contexte exact (lieu, acteurs...) présenté dans les documents de (Benoit et al., 2018) (voir Figure 3 (c)).

Cas poutre béton réemployable : réemploi fictif d'une poutre en béton armé conçue pour être réemployée, basé sur le travail de (Bertin, 2020 ; Bertin et al., 2022). Nous considérons la première déconstruction/reconstruction sur un chantier théorique d'un IGH (Immeuble de Grande Hauteur) situé à Paris (voir Figure 3 (d)).

Cas béton : réemploi fictif d'une poutre en béton armé issue de la déconstruction d'un bâtiment basé sur le travail de (Lachat et al., 2023; Lachat, 2023, 2022). Nous utilisons un contexte « industriel », c'est-à-dire où tous les éléments similaires du chantier sont récupérés dans le but d'être utilisés pour un autre bâtiment (voir Figure 3 (e)).

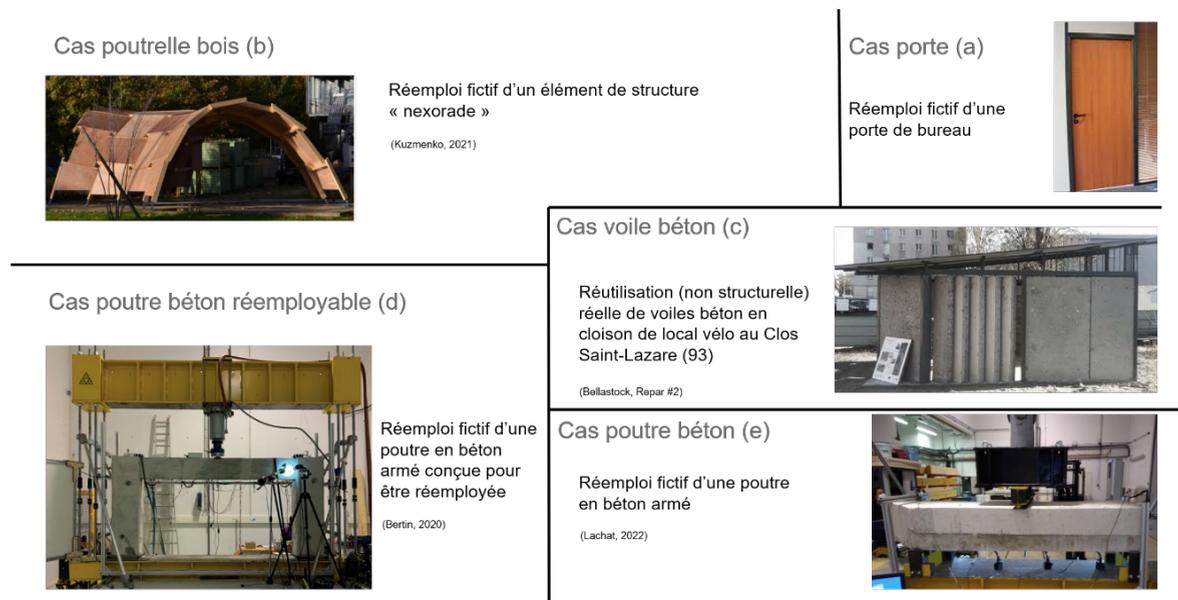


Figure 3 : Illustration des cas d'études

On ne présente dans cet article que les résultats obtenus pour l'indice $I_{C_{ext}}$ portant sur les critères externes ; plus d'informations sur l'indice $I_{P_{rés}}$ peuvent être trouvées dans (Lachat, 2022). L'application aux six cas d'études envisagés nous permet ainsi de calibrer et tester cet indice, et d'avoir une première vision d'une échelle de potentiel de réemploi (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

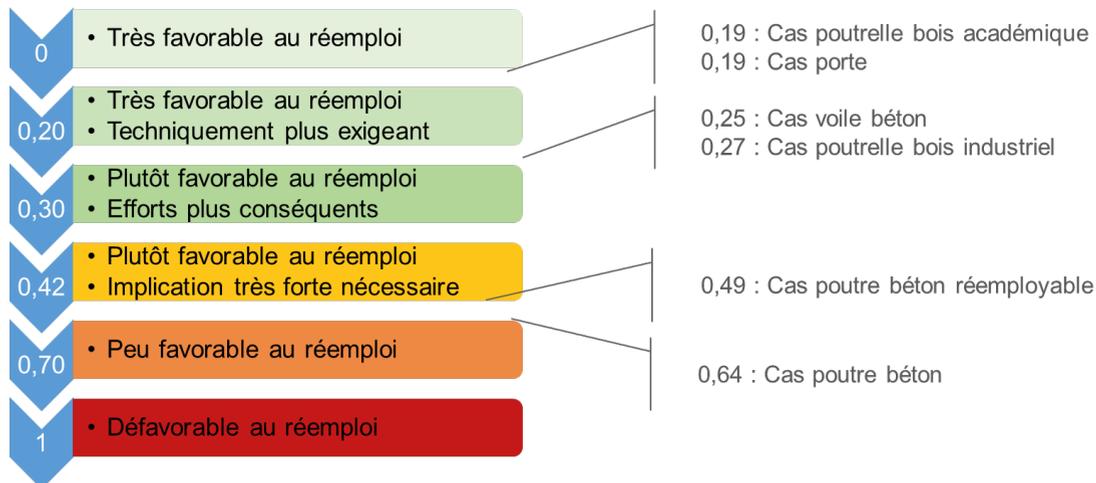


Figure 4 : (Pré)-positionnement de l'indice sur les critères externes $I_{c_{ext}}$ des différents cas d'études sur une échelle globale de potentiel de réemploi

L'indice permet d'observer une bonne dispersion entre les cas d'étude. Ainsi, il permet de distinguer les cas facilement réemployables tels que la porte, des cas plus contraignants tels que la réutilisation du voile béton. Il distingue également clairement les cas très contraignants où le rôle structurel est maintenu (cas poutre béton). Par ailleurs, l'intérêt de concevoir dans un but de réemployabilité est mis en évidence par l'indicateur (cas poutre béton réemployable face au cas poutre béton). En effet, même si cela ne permet pas d'atteindre le niveau le plus favorable au réemploi, car il reste des contraintes fortes liées au rôle structurel et au marché non développé, cela permet d'atteindre un niveau plus favorable au réemploi.

V. CONCLUSION

Suite à une analyse rapide de la littérature, nous avons mis en avant la variabilité des champs d'application et des objectifs des définitions et indicateurs du potentiel de réemploi. Aucun indicateur ne nous permet de répondre à notre problématique : disposer d'un indicateur à destination des maîtres d'ouvrage, facile à utiliser et complet.

Un indicateur multicritère et quanti-qualitatif a été développé sur la base de deux indices facilement mesurables grâce à une matrice qui regroupe 20 critères, 2 à 5 niveaux par critère et les scores associés. L'indicateur de potentiel de réemploi est ainsi complet en prenant en compte à la fois les aspects économiques, techniques et environnementaux.

Les premières applications sur six études de cas issues de la littérature sont positives : on observe une nette distinction entre les éléments ayant un potentiel de réutilisation faible, intermédiaire et élevé. Une première échelle de potentiel de réemploi a été proposée. Les prochaines étapes consisteront en la calibration de l'indice sur les performances résiduelles $I_{P_{rés}}$, d'abord sur des éléments de structure en béton avant d'être généralisée à d'autres éléments du secteur du BTP, puis à une consolidation des résultats en réalisant plus d'applications et de confrontations avec des experts dans le domaine de la construction, de la déconstruction et de la réutilisation, et enfin à un transfert à des maîtres d'ouvrage et des assistances à maîtrise d'ouvrage réemploi.

VI. REFERENCES

- ADEME, RDC Environment, éco BTP, I Care & Consult, Coppens, M., Jayr, E., Burre-Espagnou, M., Neveu, G., 2016. Identification des freins et des leviers au réemploi de produits et matériaux de construction - synthèse, ADEME. ed.
- Akanbi, L., Oyedele, L., Davila Delgado, J.M., Bilal, M., Akinade, O., Ajayi, A., Mohammed-Yakub, N., 2018. Reusability analytics tool for end-of-life assessment of building materials in a circular economy. *World Journal of Science, Technology and Sustainable Development* 16, 40–55. <https://doi.org/10.1108/WJSTSD-05-2018-0041>
- Benoit, J., Saurel, G., Billet, M., Laurenceau, S., Bougrain, F., 2018. REPAR #2 - le réemploi passerelle entre architecture et industrie, Bellastock, CSTB, ADEME. ed.
- Bertin, I., 2020. Conception des bâtiments assurant leur réversibilité, leur déconstruction et leur réemploi, méthodologie de suivi et évaluation environnementale sur les cycles de vie (These de doctorat). Paris Est.
- Bertin, I., Saadé, M., Le Roy, R., Jaeger, J.-M., Feraille, A., 2022. Environmental impacts of Design for Reuse practices in the building sector. *Journal of Cleaner Production* 349, 131228. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131228>
- Colas, A.-S., 2017. Etude des ouvrages en maçonnerie du génie civil : aptitude au service, sécurité et performances environnementales (Habilitation à diriger des recherches). Université Paris-Est.
- Deweerd, M., Mertens, M., 2020. Un guide pour l'identification du potentiel de réemploi des produits de construction (version préliminaire). Interreg North-West Europe.
- Durmisevic, E., 2006. Transformable building structures: Design for disassembly as a way to introduce sustainable engineering to building design & construction.
- Durmisevic, E., Beurskens, P.R., Adrosevic, R., Westerdijk, R., 2017. Systemic view on reuse potential of building elements, components and systems: comprehensive framework for assessing reuse potential of building elements, in: Hiser International Conference: Advances in Recycling and Management of Construction and Demolition Waste. Presented at the HISER International Conference 2017: Advances in Recycling and Management of Construction and Demolition Waste, pp. 275–280.
- European Parliament, 2008. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives (Text with EEA relevance), OJ L.
- Glias, A., 2013. The Donor Skelet: Designing with reused structural concrete elements (masters). TU Delft.
- Kuzmenko, K., Roux, C., Feraille, A., Baverel, O., 2020. Assessing environmental impact of digital fabrication and reuse of constructive systems. *Structures*. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.05.035>
- Lachat, A., Feraille, A., Desbois, T., Colas, A.S., 2023. Reuse of existing reinforced concrete beams: Exploration of residual mechanical characteristics and measure of environmental impact, in: *Life-Cycle of Structures and Infrastructure Systems*. CRC Press.
- Lachat, A., 2023. Le réemploi appliqué au domaine de la construction : principe, impact environnemental et mesure dans le cadre d'une économie circulaire. *Academic Journal of Civil Engineering* 41, 703–710. <https://doi.org/10.26168/ajce.41.1.73>
- Lachat, A., 2022. Le réemploi appliqué au domaine de la construction : principe, impact environnemental et mesure dans le cadre d'une économie circulaire (These de doctorat). Marne-la-vallée, ENPC.
- Lachat, A., Kuzmenko, K., Colas, A.-S., Feraille, A., 2021. Evaluating Circular-Economy Indicators: A Case Study.
- Langston, C., Wong, F.K.W., Hui, E.C.M., Shen, L.-Y., 2008. Strategic assessment of building adaptive reuse opportunities in Hong Kong. *Building and Environment* 43, 1709–1718. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.10.017>
- Mesnil, R., Douthe, C., Gobin, T., Baverel, O., 2018. Form finding and design of a timber shell-nexorade hybrid, in: *Advances in Architectural Geometry 2018 (AAG 2018)*. Göteborg, Sweden.
- Park, J.Y., Chertow, M.R., 2014. Establishing and testing the “reuse potential” indicator for managing wastes as resources. *Journal of Environmental Management* 137, 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.11.053>
- Rakhshan, K., Morel, J.-C., Daneshkhah, A., 2021. A probabilistic predictive model for assessing the economic reusability of load-bearing building components: Developing a Circular Economy framework. *Sustainable Production and Consumption* 27, 630–642. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.01.031>