



Rapport final du 03.02.2026

Mat-loop

Solutions logistiques pour le réemploi dans la construction



image : Benoît Séraphin, HEPIA

Date: 03.02.2026

Lieu: Berne

Prestataire de subventions:

Office fédéral de l'énergie OFEN
Section Recherche énergétique et cleantech
CH-3003 Berne
www.ofen.admin.ch

Cofinancement:

SIG éco21
Ch. Du Château Bloch 2, CH-1219 Le Lignon
www.sig-ge.ch
FTI
Rte de la Praille 50, 1227 Carouge
www.ftige.ch

Bénéficiaires de la subvention :

HEPIA
R. de la Prairie 4, 1202 Genève
www.hesge.ch/hepia
HEIG VD
Rte de Cheseaux 1, 1401 Yverdon-les-Bains
www.HEIG-vd.ch

Auteur(s):

Lionel Riquet, HEPIA, lionel.riquet@hesge.ch
Benoît Séraphin, HEPIA, benoit.seraphin@hesge.ch
Almir Delfieu, HEPIA, almir.delfieu@hesge.ch
Sébastien Lasvaux, HEIG VD, sebastien.lasvaux@heig-vd.ch
Mija Frossard, HEIG VD, mija.frossard@heig-vd.ch
Gauthier Demonchy, HEIG VD
Ryme Hamidouche, HEIG VD

Suivi du projet à l'OFEN:

Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch
Martin Ménard, menard@lowtechlab.ch

Numéro du contrat de l'OFEN: SI/502517-01

Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions du présent rapport.



Résumé

Les émissions annuelles de gaz à effet de serre du secteur du bâtiment, y compris les émissions « grises » en amont et en aval de l'exploitation, doivent encore diminuer de 27% d'ici 2030 et de 93% d'ici 2050 (par rapport à 2020 dans les deux cas). Développer dans le secteur du bâtiment une économie circulaire et la culture qui l'accompagne devient un impératif et le réemploi, qui fait partie des solutions innovantes valorisant le bâti et ses composants déjà en place et minimisant l'impact écologique sur le cycle de vie de la matière, doit être privilégié.

Le réemploi se heurte cependant à des problématiques logistiques qui représentent de vrais freins à son déploiement à échelle industrielle, en raison de l'asynchronisme spatial et temporel de l'offre et de la demande. Le projet MAT-LOOP mené par HEPIA et la HEIG VD en collaboration avec des partenaires de terrain, principalement dans le canton de Genève, a permis d'explorer les caractéristiques de la logistique du réemploi de matériaux de construction, d'identifier les composants présentant le meilleur potentiel de réemploi selon une analyse multicritère, de comparer les impacts environnementaux respectif des solutions de réemploi et neuves et de proposer des outils et des recommandations pour la mise en œuvre du réemploi et des filières de distribution qui permettront de le développer.

Les principaux résultats du projet MAT-LOOP sont les suivants :

1. Dix-neuf inventaires réalisés sur des immeubles de logement collectifs situés dans le canton de Genève ont permis d'identifier trente-neuf composants récurrents susceptibles d'être réemployés. Une matrice d'analyse multicritère intégrant les aspects de marché, techniques, environnementaux, économique et sociaux-culturels a été appliquée à ces composants pour établir leur « signature réemploi ». Ces signatures ont permis de répartir les composants en trois familles (très favorable au réemploi, favorable au réemploi, moyennement ou peu favorable au réemploi).
2. L'analyse de sept ressourceries romandes a permis d'étudier leurs performances logistiques et les impacts environnementaux du stockage. Il en ressort une grande hétérogénéité des infrastructures et un ratio médiocre entre zones de stockage et de passage (49% - 51%), très éloigné des standards industriels (70% - 30%). La nature des matériaux disponibles a été analysée et plusieurs indicateurs de performance logistique ont été produits (taux de remplissage, efficacité spatiale, intensité spatiale) démontrant à nouveau de très fortes disparités entre les ressourceries étudiées. Les impacts environnementaux (UBP/m³/mois, kWh/m³/mois, kg CO₂-eq./m³/mois) ont été calculés par chaque ressourcerie à partir de l'intensité spatiale, révélant des variations d'un facteur 2 entre les différents lieux, selon les conditions de stockage et d'aménagement et le type de matériaux stockés.
3. Une analyse comparative des impacts GES du réemploi et de solutions neuves fonctionnellement équivalentes a été effectuée pour une série de quatorze composants identifiés sous 1). Elle a permis d'établir des fourchettes de réduction des émissions de GES imputable au réemploi pour les différents composants. Les réductions d'émissions les plus importantes et certaines (-80% à -100%) concernent les matériaux dont la fabrication initiale est très énergivore (éléments métalliques, verre) alors que les bénéfices du réemploi des matériaux bio et géo-sourcés est plus faible, voire négligeable dans certains cas.
4. Des recommandations pour la mise sur pied de filières spécialisées dans la collecte, le reconditionnement et la distribution de quatre composants à potentiel de réemploi élevé et à fort impact environnemental ont été élaborées. Elles concernent le béton armé (structure), les tôles de bardage et couverture métallique (enveloppe), les faux planchers techniques (aménagement intérieurs) et les panneaux solaires thermiques (installations techniques).
5. Une maquette d'outil d'aide à la décision à destination permettant aux maître d'ouvrage et à leurs mandataires d'établir une évaluation préalable du potentiel de réemploi que ce soit d'un chantier source ou d'un chantier cible en amont d'un projet a été produite. Cette maquette a été développée à partir d'un arbre de décision réalisé en s'appuyant sur les critères d'analyse évoqués sous 1). Elle a été testée par divers acteurs de terrain et pourrait faire prochainement

l'objet d'un développement en vue d'une mise sur le marché.

Le projet MAT-LOOP a permis d'établir que le réemploi induit systématiquement des réductions des émissions de GES qui peuvent être massives par rapport à des solutions neuves et que c'est là son intérêt majeur et que les incertitudes liées aux impacts environnementaux ne sont pas plus élevées pour le réemploi que pour le neuf, dont la variabilité des impacts n'est pas à négliger selon les solutions choisies. Il révèle également les limites de la règle forfaitaire attribuant au réemploi 20% de l'impact du neuf.

Le projet a cependant confirmé que le réemploi fait face de plusieurs obstacles notamment logistiques, ayant trait à la complexité de sa mise en œuvre (faute de filière solidement établie et en raison de l'inadéquation des processus usuels de planification dans les bureaux d'architectes et d'ingénieur), à ses limites physiques, aux coûts induits par le démontage sélectif de la majorité des composants et aux risques contractuels (absence de garantie). MAT-LOOP propose des pistes pour lever ces barrières, au travers d'éléments de connaissance et d'outils pratiques incitant au réemploi, à l'amélioration de la performance des ressourceries et à la mise sur pied de filières spécialisées et permettant de répondre à l'évolution réglementaire qui profile le réemploi comme un des passages obligés vers la décarbonation de l'industrie de la construction.



Zusammenfassung

Die jährlichen Treibhausgasemissionen des Bausektors in der Schweiz, einschließlich der «grauen» Emissionen vor und nach der Betriebsphase, müssen bis 2030 um weitere 27 % und bis 2050 um 93 % sinken (in beiden Fällen im Vergleich zu 2020). Die Entwicklung einer Kreislaufwirtschaft und der damit einhergehenden Kultur im Bausektor wird zu einer Notwendigkeit, und die Wiederverwendung, die Teil innovativer Lösungen ist, die bereits vorhandene Gebäude und deren Komponenten aufwerten und die ökologischen Auswirkungen auf den Lebenszyklus der Materialien minimieren, muss Vorrang haben.

Die Wiederverwendung stößt jedoch auf logistische Probleme, die aufgrund der räumlichen und zeitlichen Asynchronität von Angebot und Nachfrage echte Hindernisse für ihren Einsatz im industriellen Maßstab darstellen. Das Projekt MAT-LOOP, das von der HEPIA und der HEIG VD in Zusammenarbeit mit Partnern aus der Praxis hauptsächlich im Kanton Genf, ermöglichte es, die Merkmale der Logistik der Wiederverwendung von Baumaterialien zu untersuchen, die Komponenten mit dem besten Wiederverwendungspotenzial anhand einer multikriteriellen Analyse zu identifizieren, die jeweiligen Umweltauswirkungen von Wiederverwendungs- und Neubaulösungen zu vergleichen und Instrumente und Empfehlungen für die Umsetzung der Wiederverwendung und der Vertriebswege vorzuschlagen, die deren Weiterentwicklung ermöglichen.

Die wichtigsten Ergebnisse des MAT-LOOP-Projekts sind folgende:

1. Anhand von 19 Bestandsaufnahmen von Mehrfamilienhäusern im Kanton Genf konnten 39 wiederverwendbare Bauteile identifiziert werden. Eine multikriterielle Analysematrix, die marktbezogene, technische, ökologische, wirtschaftliche und soziokulturelle Aspekte berücksichtigt, wurde auf diese Bauteile angewendet, um ihre „Wiederverwendungssignatur“ zu ermitteln. Anhand dieser Signaturen konnten die Bauteile in drei Gruppen eingeteilt werden (sehr gut für die Wiederverwendung geeignet, gut für die Wiederverwendung geeignet, mäßig oder wenig für die Wiederverwendung geeignet).
2. Die Analyse von sieben Recyclingzentren in der Romandie ermöglichte es, deren logistische Leistungsfähigkeit und die Umweltauswirkungen der Lagerung zu untersuchen. Dabei zeigte sich eine große Heterogenität der Infrastrukturen und ein ungünstiges Verhältnis zwischen Lager- und Durchgangsf lächen (49 % zu 51 %), das weit von den Industriestandards (70 % zu 30 %) entfernt ist. Die Art der verfügbaren Materialien wurde analysiert und mehrere Indikatoren für die logistische Leistungsfähigkeit wurden erstellt (Füllgrad, Raumeffizienz, Raumintensität), die erneut sehr große Unterschiede zwischen den untersuchten Recyclingzentren aufzeigen. Die Umweltauswirkungen (UBP/m³/Monat, kWh/m³/Monat, kg CO₂-Äquivalent/m³/Monat) wurden von jedem Recyclingzentrum anhand der Raumintensität berechnet und zeigten je nach Lager- und Raumausstattung sowie Art der gelagerten Materialien Unterschiede um den Faktor 2 zwischen den verschiedenen Standorten.
3. Für eine Reihe von vierzehn unter 1. genannten Bauteilen wurde eine vergleichende Analyse der Treibhausgasemissionen von Wiederverwendung und funktional gleichwertigen Neubaulösungen durchgeführt. Auf dieser Grundlage konnten für die verschiedenen Bauteile Bandbreiten für die durch Wiederverwendung erzielbaren Treibhausgasemissionsminderungen ermittelt werden. Die größten Emissionsreduktionen (-80% bis -100%) betreffen Materialien, deren Herstellung sehr energieintensiv ist (Metallelemente, Glas), während die Vorteile der Wiederverwendung von biogenen und mineralischen Materialien geringer und in einigen Fällen sogar vernachlässigbar sind.
4. Es wurden Empfehlungen für die Einrichtung spezialisierter Kreisläufe für die Sammlung, Aufbereitung und Verteilung von vier Bauteilen mit hohem Wiederverwendungspotenzial und starken Auswirkungen auf die Umwelt ausgearbeitet. Diese betreffen Stahlbeton (Tragwerk), Blechverkleidungen und Metaldächer (Außenhülle), technische Doppelböden (Innenausbau) und thermische Solarkollektoren (technische Anlagen).
5. Es wurde ein Modell für ein Entscheidungshilfetooll erstellt, mit dem Bauherren und ihre Beauftragten vor Beginn eines Projekts eine vorläufige Bewertung des Wiederverwendungspotenzials sowohl der Herkunfts- als auch der Zielbaustelle vornehmen können. Dieses Modell wurde auf der Grundlage eines Entscheidungsbaums entwickelt, der

sich auf die unter 1. genannten Analyse Kriterien stützt. Es wurde von verschiedenen Akteuren vor Ort getestet und könnte in Kürze im Hinblick auf eine Markteinführung weiterentwickelt werden.

Das Projekt MAT-LOOP hat gezeigt, dass die Wiederverwendung systematisch zu einer Reduzierung der Treibhausgasemissionen führt, die im Vergleich zu neuen Lösungen massiv sein kann, und dass dies ihr Hauptvorteil ist. Außerdem sind die Unsicherheiten hinsichtlich der Umweltauswirkungen bei der Wiederverwendung nicht höher als bei neuen Produkten, deren Auswirkungen je nach den gewählten Lösungen nicht zu vernachlässigen sind. Es zeigt auch die Grenzen der Pauschalregel auf, wonach der Wiederverwendung 20 % der Auswirkungen von Neuprodukten zugeschrieben werden.

Das Projekt hat jedoch bestätigt, dass die Wiederverwendung mit mehreren Hindernissen konfrontiert ist, insbesondere logistischer Art, die mit der Komplexität ihrer Umsetzung (aufgrund des Fehlens einer etablierten Industrie und der Unzulänglichkeit der Standardplanungsprozesse in Architektur- und Ingenieurbüros), ihren physischen Grenzen, den Kosten für die selektive Demontage der meisten Komponenten und den vertraglichen Risiken (fehlende Garantie) zusammenhängen. MAT-LOOP schlägt Wege zur Überwindung dieser Hindernisse vor, indem es Wissen und praktische Instrumente bereitstellt, die zur Wiederverwendung anregen, die Leistung von Recyclingzentren verbessern und die Einrichtung spezialisierter Kreisläufe ermöglichen. Damit wird den regulatorischen Entwicklungen Rechnung getragen, die die Wiederverwendung als einen der notwendigen Schritte zur Dekarbonisierung der Bauindustrie betrachten.



Summary

Annual greenhouse gas emissions from the building sector in Switzerland, including upstream and downstream “gray” emissions, must be reduced by 27% by 2030 and 93% by 2050 (compared to 2020 in both cases). Developing a circular economy and the culture that goes with it in the building sector is becoming essential, and reuse, which is one of the innovative solutions that makes the most of existing buildings and components and minimizes the ecological impact on the life cycle of materials, must be prioritized.

However, reuse faces logistical challenges that represent real obstacles to its deployment on an industrial scale, due to the spatial and temporal asynchrony of supply and demand. The MAT-LOOP project, led by HEPIA and HEIG VD in collaboration with partners in the field, mainly in the canton of Geneva, has explored the logistical characteristics of reusing construction materials, identified the components with the greatest potential for reuse based on a multi-criteria analysis, compared the respective environmental impacts of reuse and new solutions, proposed tools and recommendations for implementing reuse and distribution channels that will enable its development.

The main results of the MAT-LOOP project are as follows:

1. Nineteen inventories carried out on multi-unit residential buildings located in the canton of Geneva identified thirty-nine recurring components that could be reused. A multi-criteria analysis matrix incorporating market, technical, environmental, economic, and socio-cultural aspects was applied to these components to establish their “reuse signature.” These signatures made it possible to divide the components into three categories (very favorable for reuse, favorable for reuse, moderately or not very favorable for reuse).
2. An analysis of seven resource centers in French-speaking Switzerland examined their logistical performance and the environmental impact of storage. The results revealed considerable heterogeneity in infrastructure and a poor ratio between storage and transit areas (49%–51%), which is far from industry standards (70%–30%). The nature of the materials available was analyzed and several logistics performance indicators were produced (fill rate, spatial efficiency, spatial intensity), again demonstrating very significant disparities between the resource centers studied. The environmental impacts (UBP/m³/month, kWh/m³/month, kg CO₂-eq./m³/month) were calculated by each resource center based on spatial intensity, revealing variations of a factor of 2 between the different sites, depending on storage and layout conditions and the type of materials stored.
3. A comparative analysis of the GHG impacts of reuse and functionally equivalent new solutions was carried out for a series of fourteen components identified in 1). This made it possible to establish ranges of GHG emission reductions attributable to reuse for the various components. The most significant emission reductions (-80% to -100%) concern materials whose initial manufacture is very energy-intensive (metal elements, glass), while the benefits of reusing bio-based and geo-sourced materials are lower, even negligible in some cases.
4. Recommendations have been drawn up for the establishment of specialized channels for the collection, reconditioning, and distribution of four components with high reuse potential and significant environmental impact. These components are reinforced concrete (structure), metal cladding and roofing sheets (building envelope), raised access floors (interior fittings), and solar thermal panels (technical installations).
5. A model decision-making tool has been developed to enable project owners and their representatives to carry out a preliminary assessment of the reuse potential of both the source and target sites prior to a project. This model was developed from a decision tree based on the analysis criteria mentioned in 1). It has been tested by various stakeholders in the field and could soon be developed for commercial release.

The MAT-LOOP project has established that reuse systematically leads to reductions in GHG emissions that can be massive compared to new solutions, and that this is its major advantage. It also shows that the uncertainties associated with environmental impacts are no greater for reuse than for new products, whose variable impacts should not be overlooked depending on the solutions chosen. It also reveals the limitations of the flat-rate rule attributing 20% of the impact of new products to reuse.

However, the project confirmed that reuse faces several obstacles, particularly logistical ones, relating to the complexity of its implementation (due to the lack of a well-established sector and the inadequacy of standard planning processes in architectural and engineering firms), its physical limitations, the costs involved in the selective dismantling of most components, and contractual risks (lack of guarantees). MAT-LOOP proposes ways to overcome these barriers through knowledge and practical tools that encourage reuse, improve the performance of resource centers, and establish specialized channels, thereby responding to regulatory changes that identify reuse as one of the necessary steps toward decarbonization in the construction industry.



Messages clés

- Certains composants de construction, analysés sous un prisme multicritère se prêtent mieux que d'autres au réemploi. MAT-LOOP propose une méthodologie d'analyse plurifactorielle qui permet de mettre en évidence les avantages et faiblesses des composants les plus souvent disponibles sur les chantiers de déconstruction et d'orienter les praticiens vers les solutions proposant les meilleures chances de succès.
- La méthode proposée d'analyse comparative de l'impact environnemental (en émissions de GES) du réemploi et des solutions neuves permet une comparaison objective de des impacts respectifs à équivalence fonctionnelle, tenant compte de la pluralité des solutions tant de réemploi que neuves. L'analyse montre des bénéfices environnementaux très importants pour les matériaux à haute teneur en énergie grise, mais moins évidents pour les matériaux géo et bio-sourcés.
- Le projet démontre les bénéfices environnementaux (variables mais réels et souvent massifs) du réemploi par rapport au neuf. Les entretiens menés avec les praticiens indiquent cependant que les barrières, notamment logistiques, demeurent élevées. L'exploitation du potentiel de réduction des émissions de GES du réemploi passe par la mise sur pied de filières spécialisées (par composants ou familles de composant) pour dépasser le stade expérimental et artisanal actuel. Le projet propose des recommandations dans ce sens pour quatre composants représentatifs.

Wichtige Erkenntnisse

- Bestimmte Bauteile, die unter Berücksichtigung mehrerer Kriterien analysiert werden, eignen sich besser für die Wiederverwendung als andere. MAT-LOOP bietet eine Methode zur Analyse mehrerer Faktoren, mit der die Vor- und Nachteile der Bauteile, die am häufigsten auf Abbruchbaustellen verfügbar sind, aufgezeigt werden können, um Fachleuten Lösungen mit den besten Erfolgsaussichten aufzuzeigen.
- Die vorgeschlagene Methode zur vergleichenden Analyse der Umweltauswirkungen (in Form von Treibhausgasemissionen) von Wiederverwendung und neuen Lösungen ermöglicht einen objektiven Vergleich der jeweiligen Kriterien bei gleicher Funktionalität unter Berücksichtigung der Vielzahl sowohl von Wiederverwendungs- als auch von Neubaulösungen. Die Analyse zeigt sehr große Umweltvorteile für Materialien mit hohem Grauenergiegehalt, die jedoch für mineralische und biobasierte Materialien weniger offensichtlich sind.
- Das Projekt zeigt die ökologischen Vorteile (die zwar unterschiedlich, aber real und oft sehr gross sind) der Wiederverwendung gegenüber der Anschaffung neuer Produkte auf. Die Gespräche mit Fachleuten zeigen jedoch, dass die Hindernisse, insbesondere logistischer Art, nach wie vor gross sind. Um das Potenzial der Wiederverwendung zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen auszuschöpfen, müssen spezialisierte Industrien (nach Komponenten oder Komponentenfamilien) aufgebaut werden, um über das derzeitige experimentelle und handwerkliche Stadium hinauszukommen. Das Projekt enthält diesbezügliche Empfehlungen für vier repräsentative Komponenten.

Take-Home Message

- Certain building components, analyzed using a multi-criteria approach, are more suitable for reuse than others. MAT-LOOP offers a multi-factor analysis methodology that highlights the advantages and weaknesses of the components most commonly available on demolition sites and guides practitioners towards the solutions offering the best chances of success.
- The proposed method for comparative analysis of the environmental impact (in terms of GHG emissions) of reuse and new solutions allows for an objective comparison of the respective impacts at functional equivalence, taking into account the plurality of both reuse and new solutions. The analysis shows very significant environmental benefits for materials with high embodied energy, but less obvious benefits for geo- and bio-based materials.
- The project demonstrates the environmental benefits (variable but real and often substantial) of reuse compared to new products. However, interviews with practitioners indicate that barriers, particularly logistical ones, remain high. Harnessing the potential of reuse to reduce GHG emissions requires the establishment of specialized channels (by component or component family) to move beyond the current experimental and artisanal stage. The project offers recommendations in this regard for four representative components.



Table des matières

Résumé	3
Zusammenfassung	5
Summary	7
Messages clés	9
Wichtige Erkenntnisse	9
Take-Home Message	10
Table des matières	11
Liste des figures	14
Liste des tableaux	15
Liste des abréviations	15
1 Introduction	16
1.1 Contexte et arrière-plan	16
1.2 Justification du projet	18
1.3 Objectifs du projet	18
2 Procédure et méthode	20
2.1 Organisation et coordination du projet	20
2.2 Structure du projet et approche méthodologique	22
2.2.1 Structure du projet.....	22
2.2.2 Méthodologie.....	23
3 Récolte d'information	24
3.1 Entretiens	24
3.2 Inventaires.....	24
3.3 Ressourceries	26
3.3.1 Définition et rôle dans la chaîne du réemploi	26
3.3.2 Échantillon étudié.....	27
3.4 Projets pilote	29
3.4.1 École de Meyrin Village, Meyrin (GE)	30
3.4.2 Route de Meyrin 49, Genève	33
4 Développements méthodologiques	34
4.1 Protocole d'analyse quantitative des 7 ressourceries	34
4.1.1 Structuration des données : approche multi-échelles	34
4.1.2 Définition des indicateurs de performance spatiale	36
4.1.2.1. Efficacité spatiale du stockage (<i>Espatiale</i>).....	36
4.1.2.2. Taux de remplissage volumique (<i>Tremplissage</i>).....	36

4.1.2.3. Intensité spatiale spécifique (<i>I_{spec}</i>).....	36
4.1.2.4. Intensité spatiale totale du stockage (<i>I_{spatiale}</i>).....	37
4.1.3 Définition des indicateurs environnementaux du stockage.....	37
4.1.3.1. Données d'inventaire génériques (<i>Background data</i>).....	37
4.1.3.2. Calcul de données spécifiques (<i>Foreground data</i>).....	38
4.2 Écobilan de produits de construction neufs et issus du réemploi.....	39
4.2.1 Approches adoptées dans le calcul d'écobilan du réemploi.....	40
4.2.2 Sources de données.....	41
4.2.3 Méthodologie pour le calcul de variabilité et d'incertitude.....	41
4.3 Évaluation multicritère des composants.....	42
4.3.1 Critères d'analyse et notation.....	42
4.3.2 Notation.....	44
5 Résultats.....	46
5.1 Analyse des signatures-composant.....	46
5.2 Résultat des analyses des ressourceries.....	49
5.2.1 Caractéristiques et potentiel des infrastructures.....	49
5.2.2 Allocation des surfaces et usages réels.....	50
5.2.3 Analyse de la composition des stocks.....	52
5.2.4 Performance logistique : densité et remplissage.....	54
5.2.5 Intensité spatiale spécifique par catégorie de produit.....	55
5.2.6 Impacts environnementaux du stockage.....	56
5.3 Analyse comparative, de sensibilité et d'incertitude des impacts en GES du réemploi et du neuf.....	61
5.3.1 Filières de réemploi vs variantes neuves.....	61
5.3.2 Application au projet pilote Ecole de Meyrin : analyse de robustesse.....	65
5.3.2.1. Évaluation de l'incertitude dans la phase courante du projet.....	65
5.3.2.2. Cas d'étude : résultats des briques de terre cuite réemployées.....	68
5.4 Recommandations pour la mise en œuvre du réemploi.....	72
5.4.1 Béton armé (lot structure).....	72
5.4.2 Tôles métalliques de couverture et de bardage (lot enveloppe).....	72
5.4.3 Faux planchers techniques (lot aménagements intérieurs).....	73
5.4.4 Panneaux solaires thermiques (lot installations techniques).....	73
5.5 Outil d'aide à la décision.....	73
6 Discussion.....	75
6.1 Aspects environnementaux du réemploi.....	75
6.1.1 Le poids de la logistique dans le bilan environnemental du réemploi.....	75
6.1.2 Robustesse du réemploi face aux incertitudes.....	75
6.1.3 Positionnement vis-à-vis de la norme SIA 390/1.....	75
6.2 Obstacles au réemploi.....	75
6.2.1 Complexité.....	76
6.2.2 Limites physiques.....	77



6.2.3	Coût.....	77
6.2.4	Risques contractuels.....	78
7	Limites.....	79
7.1	Échantillon et représentativité des ressourceries.....	79
7.2	Variabilité des impacts du réemploi et des produits neufs.....	79
7.3	Biais de l'unité volumique.....	80
7.4	Données primaires et temporalité des projets pilotes.....	80
7.5	Périmètre des impacts environnementaux.....	80
7.6	Périmètre des inventaires.....	80
8	Conclusion.....	81
9	Suite et perspectives.....	82
10	Références.....	83
11	Annexes.....	84
11.1	Liste des inventaires utilisés pour identifier les composants de réemploi.....	84
11.2	Tableau de notation multicritère des composants de réemploi.....	86
11.3	Signatures-composant.....	88
11.4	Données d'émission de GES utilisées pour l'analyse de variabilité des produits réemployés et neufs.....	95
11.5	Recommandations composants.....	102

Liste des figures

Figure 1 : Analyse en cycle de vie de 1229 bâtiments résidentiels construits en France entre 2017 et 2022.....	16
Figure 2 : Déchets générés en Suisse.....	17
Figure 3 : Organigramme du projet MAT-LOOP.....	20
Figure 4 : Structure originelle du projet MAT-LOOP.....	22
Figure 5 : Structure mise à jour du projet MAT-LOOP.....	23
Figure 13 : Représentation schématique des cinq lots (Reuse-LCA).....	25
Figure 6 : Carte des ressourceries étudiées dans le cadre de MAT-LOOP.....	28
Figure 7 : Photos des sept ressourceries étudiées quantitativement.....	29
Figure 8 : Vues de l'état existant de l'école de Meyrin Village.....	30
Figure 9 : illustration de la structure du pavillon de l'École de Meyrin, en vert les éléments réemployés © atba.....	32
Figure 10 : Photographie de l'état existant du bâtiment de l'Avenue de Meyrin 49, Genève. Image : FdMP architectes.....	34
Figure 11 : Classification des espaces de stockage d'une ressourcerie.....	35
Figure 12 : Représentation des niveaux de structuration des données.....	36
Figure 14 : Cartographie des activités logistiques du réemploi générant des impacts environnementaux.....	42
Figure 15 : Exemple de signature composant.....	46
Figure 16 : Limites définies pour la classification des composants.....	47
Figure 17 : Signatures composants et limites pour les quatre composants sélectionnés.....	49
Figure 18 : Caractéristiques dimensionnelles des lieux. (a) Surface au sol totale exploitée pour le Stockage, le passage, les ateliers et l'administratif, (b) Hauteur sous plafond moyenne, et (c) Capacité de stockage par m ² dédié.....	50
Figure 19 : Allocation spatiale. (a) Répartition des surfaces au sol entre stockage, passage et administration. (b) Taux d'utilisation du volume théorique du bâtiment. (c) Utilisation des espaces dédiés au stockage en % de volume.....	51
Figure 20 : Caractérisation des stocks de matériaux de construction. (a) Volumes nets stockés par ressourcerie, distinguant les matériaux de construction (bleu foncé) des autres produits. (b) Étendue de l'offre : nombre de catégories Mat-Loop couvertes par site.....	52
Figure 21 : Répartition des stocks par lots de construction (a) Ensemble des produits sur toutes les ressourceries étudiées (b) Composition des stocks par ressourcerie.....	53
Figure 22 : Répartition des stocks par catégorie de produit et par ressourcerie.....	53
Figure 23 : Indicateurs de performance logistique. (a) Taux de remplissage effectif des ressourceries en % de volume stockable. (b) Efficacité du stockage. (c) Intensité spatiale du stockage.....	54
Figure 24 : Intensité spatiale de stockage spécifique par catégorie de produit au sein des ressourceries.....	55
Figure 25 : Impacts environnementaux moyens du stockage par ressourcerie. (a) Unité de charge écologique en UBP/m ³ /mois. (b) Energie grise en kWh/m ³ /mois. (c) Emission de GES en kg CO ₂ -eq./m ³ /mois.....	56
Figure 26 : Émissions de GES du stockage par catégorie de produit selon les statistiques d'intensité spatiale des ressourceries et pour un bâtiment de stockage générique.....	58
Figure 27 : Comparaison des émissions de GES. (a) faux-plancher technique, (b) tôle de bardage métallique, (c) panneau photovoltaïque, (d) installation photovoltaïque, (e) éléments en bois, (f) panneaux en bois.....	63
Figure 28 : Comparaison des émissions de GES. (a) parquet, (b) cuisine, (c) briques de terre cuite (sans mortier), (d) caillebotis en acier, (e) carrelage (hors joint), (f) fenêtre (double et triple vitrage).....	64
Figure 29 : Comparaison des émissions de GES. (a) isolation thermique de valeur R = 5, (b) pavés et dalles, (c) Revêtement de sol extérieur en béton réemployé, béton neuf ou en asphalte neuf.....	65
Figure 30 : Relation entre l'épaisseur, la masse volumique et les émissions de GES pour des briques de terre cuite neuves.....	70
Figure 31 : Distribution de probabilité des émissions de GES totales des briques réemployées (Ecole de Meyrin) avec un échantillon de 384 valeurs potentielles.....	71
Figure 32 : Comparaison des émissions de GES (A1-A3 + Élimination) pour 1 m ² de brique de terre cuite.....	71



Liste des tableaux

Tableau 1 : Composants eCCC-Bât identifiés dans les inventaires	26
Tableau 2 : études réalisées auprès des onze ressourceries dans le projet Mat-Loop.....	29
Tableau 3 : Récapitulatif des données générales des bâtiments constituant l'école de Meyrin.....	31
Tableau 4 : École de Meyrin, caractéristiques des matériaux réemployés.....	33
Tableau 5 : Données d'inventaire générique issue de la base de données d'arrière-plan d'écobilan UVEK 2021	38
Tableau 6 : Détail de la classification des éléments en bois	39
Tableau 8 : Niveaux et critères d'évaluation des composants.....	43
Tableau 9 : Notation multicritère des composants au niveau méso	45
Tableau 10 : Données génériques d'impacts environnementaux du stockage par type de lieu.....	57
Tableau 11 : Impacts environnementaux du stockage de matériaux de construction en intérieur pendant 1 mois. Hypothèses : hangar acier amorti sur 50 ans ; espace de stockage [min, moyenne pondérée et max] en m ² par m ³ net de produit selon les ressourceries analysées ; répartition des surfaces : 49 % stockage/51 % passage ; Exclues du calcul : surface d'atelier/admin, étagères et palettes.	59
Tableau 12 : Niveaux d'information disponibles dans le projet pilote et lien avec l'écobilan.....	68
Tableau 13 : Paramètres incertains et variables pour l'écobilan des briques de terre cuite réemployées et neuves	69

Liste des abréviations

GES : Gaz à effet de serre

KBOB : Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren

LCA : Life cycle assessment (analyse en cycle de vie)

OFEN : Office fédéral de l'énergie

OFEV : Office fédéral de l'environnement

SIA : Société suisse des ingénieurs et architectes

SRE : surface de référence énergétique

UBP : Umweltbelastungspunkte (points de charge environnementale)

UVEK : Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation_

1 Introduction

1.1 Contexte et arrière-plan

La thématique de l'impact environnement du bâtiment a longtemps été limitée à la réduction de la consommation d'énergie pour la production de chaleur pendant l'exploitation des bâtiments. Au fil des années, elle s'est élargie à mesure que les consommations d'énergie en exploitation ont été diminuées et une vision élargie au cycle de vie complet du bâtiment s'est imposée peu à peu. Les bilans prennent désormais également en compte l'énergie grise ou les émissions de GES associées à la construction, rénovation, déconstruction et élimination des composants des bâtiments dans les principaux cahiers techniques, normes et labels utilisés en Suisse (SIA 2031, SIA 2032, SIA 2040, SIA 390/1, MINERGIE-ECO, SNBS etc.). Ces émissions de GES embarquées du parc immobilier suisse représentent en moyenne 600 à 700 kg CO₂-eq/m² de surface de référence énergétique (SRE) principalement pour l'activité de construction, mais aussi pour leur rénovation et démolition selon le modèle de parc de bâtiments (projet OFEN GEPAMOD) [1]. Une comparaison des émissions d'exploitation par rapport aux émissions embarquées dans la Figure 1 ci-dessous permet de noter que les émissions d'exploitation peuvent être maîtrisées et réduites à une fraction des émissions embarquées, mais que ces dernières sont beaucoup plus constantes. La prise de conscience de l'impact prédominant des émissions embarquées sur des immeubles bien isolés et dont la production de chaleur est décarbonée est relativement récente.

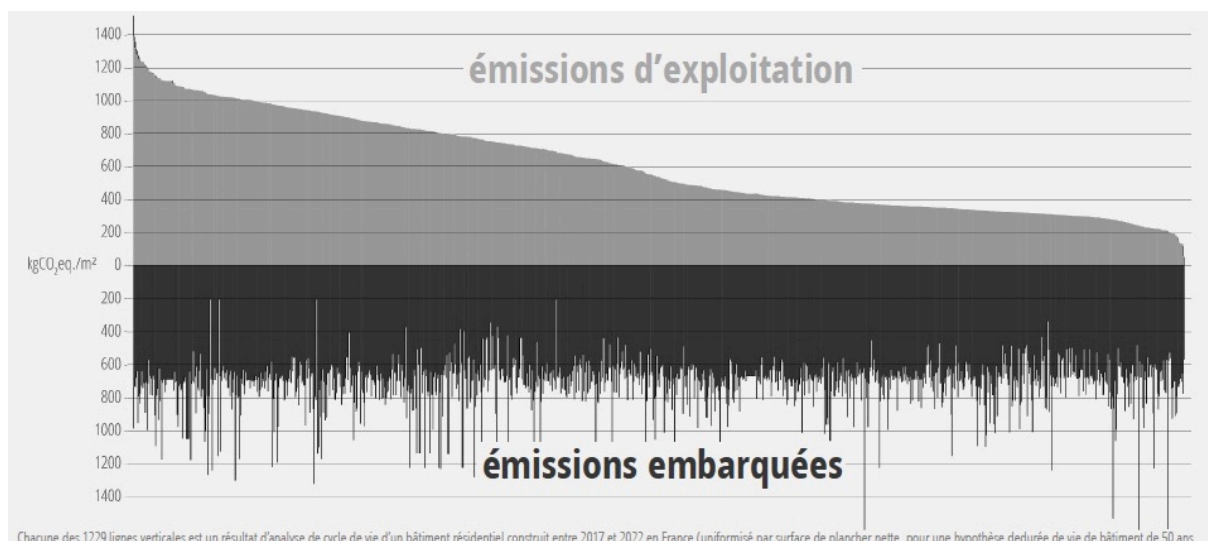


Figure 1 : Analyse en cycle de vie de 1229 bâtiments résidentiels construits en France entre 2017 et 2022

Source : E+C-database from ADEME, tiré de la présentation du prof. C.Fivet, EPFL, le 12.11.2024 au Forum des professionnels de la construction du CCDC (Ventre de compétence en durabilité dans la construction du canton de Vaud)

Les bâtiments existants constituent un gisement très important de ressources (« urban mining » en anglais). L'intensité matière (ou « material intensity » en anglais) des bâtiments suisses est, par exemple, d'environ 2 tonnes par m² de SRE selon les travaux de N. Heeren de l'ETH Zürich [2] et de S. Lasvaux et al [4]. Ce stock de matériaux devrait, qui plus est, augmenter d'ici 2050 d'environ 30% d'après les projections de cette même étude [2]. Or, le besoin croissant de matériaux et la démolition-



reconstruction de nombreux bâtiments obsolètes au niveau des besoins programmatiques mais loin de la ruine, conduit à l'exploitation excessive et, par conséquent, à l'épuisement des ressources matérielles et énergétiques, ainsi qu'à une production accrue de déchets : plus de 88 millions de tonnes de déchets sont produits annuellement en Suisse par le secteur de la construction, dont 17 millions pour les matériaux de démolition. Sur ces 17 millions de tonnes, 12 millions sont recyclés et 5 millions sont incinérés ou mis en décharge [5]. Le réemploi serait probablement une alternative à une partie du recyclage (moins noble que le réemploi en termes environnementaux) et à la mise en décharge, permettant ainsi de réduire la pression environnementale qui épuise les ressources naturelles, engorge les décharges existantes et représente indirectement une surconsommation d'énergie grise et de GES pour fabriquer de nouveaux matériaux.

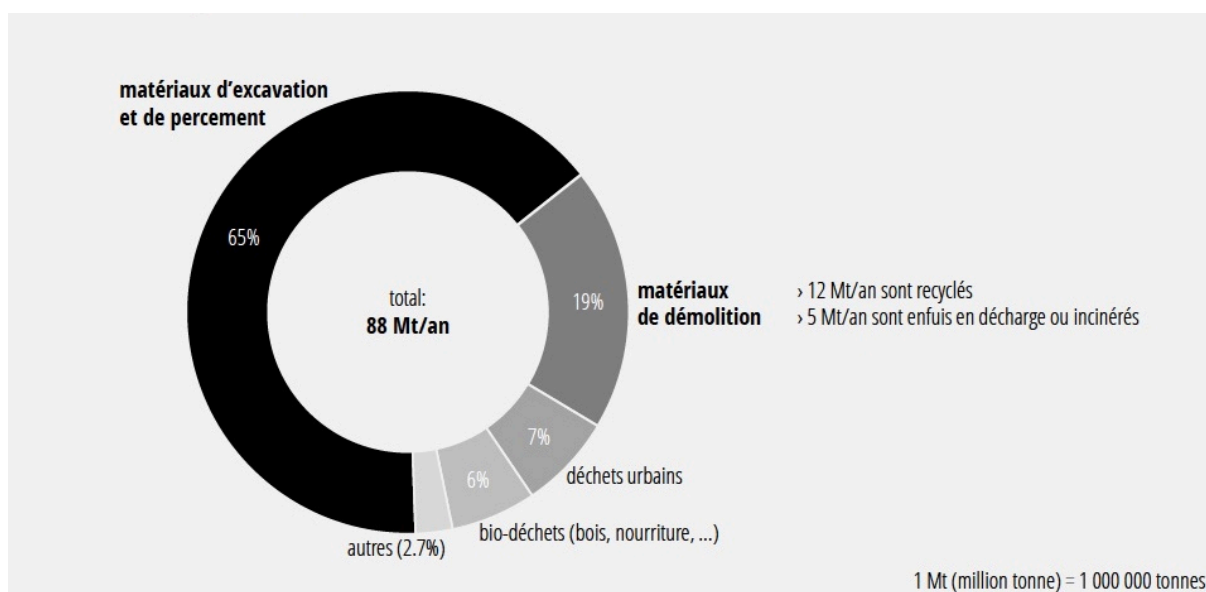


Figure 2 : Déchets générés en Suisse

Source OFEV, 2022, Déchets et matières premières en bref (données de 2017), tiré de la présentation du prof. C.Fivet, EPFL, le 12.11.2024 au Forum des professionnels de la construction du CCDC

Il convient néanmoins de nuancer ces propos. Le réemploi apparaît comme une solution parmi d'autres pour réduire l'empreinte carbone du secteur de la construction et éviter le gaspillage de ressources, mais il ne permettra pas à lui seul de décarboner le secteur de la construction. Pour illustrer ce propos il suffit de constater que le volume de béton déconstruit chaque année en Suisse représente environ 17% du béton coulé à neuf [3]. Le taux de démolition par rapport au construction neuve à Genève confirme cette réalité, en 2022 513 logements ont été démolis et 3291 logements ont été construits dans le canton (source : OCSTAT Genève), soit un rapport de 1 à 6, correspondant bien au 17% évoqués plus haut.

Dans les conditions actuelles de croissance économique et démographique, même si les mines urbaines étaient exploitées au maximum, les matériaux de réemploi ne pourraient se substituer au neuf. Il convient également de veiller à ce que le réemploi ne devienne pas une justification à la démolition de bâtiment qui pourraient encore être utilisés, afin de servir de source d'approvisionnement bas carbone. Ce serait aller à l'encontre des buts qui sont visés.

Il n'en demeure pas moins que l'évolution des besoins programmatiques et la densification des espaces urbanisés vont produire leur lot de démolitions-reconstructions et que lorsque les circonstances font qu'une démolition est inévitable, le réemploi doit être mis en œuvre pour en limiter l'impact et pour fournir des matériaux à bas contenu carbone lors de la reconstruction ou sur d'autres chantiers.

1.2 Justification du projet

Les émissions annuelles de gaz à effet de serre du secteur du bâtiment, y compris les émissions « grises » en amont et en aval de l'exploitation, doivent encore diminuer de 27% d'ici 2030 et de 93% d'ici 2050 (par rapport à 2020 dans les deux cas) [5a]. Selon les travaux de Y. Priore, Th Jusselme et G. Habert [5b], le budget carbone alloué à la Suisse pour atteindre les objectifs fixés par les accords de Paris de 2015 et ratifiés par la confédération en 2017 est de 447 millions de tonnes d'équivalents CO₂ à partir de 2020. L'ensemble du secteur de la construction représente 173 Mt CO₂-eq dont 88 Mt CO₂-eq pour l'exploitation des bâtiments et 65 Mt CO₂-eq pour les émissions embarquées i.e. liées à la construction de bâtiments (25 Mt CO₂-eq d'émissions en Suisse et 60 Mt CO₂-eq d'émissions importées).

Développer dans le secteur du bâtiment une économie circulaire et la culture qui l'accompagne devient un impératif et le réemploi, qui fait partie des solutions innovantes valorisant le bâti et ses composants déjà en place et minimisant l'impact écologique sur le cycle de vie de la matière, doit être privilégié.

Cela passe entre autres par des mesures effectives d'augmentation du réemploi des éléments de construction pour valoriser au maximum le gisement existant dans les bâtiments voués à la démolition, qui est de l'ordre de 2 tonnes de matériaux par m² de SRE [2].

Selon les entretiens menés dans le cadre des projets MAT-LOOP et REMCO [6] Les acteurs de la construction identifient plusieurs freins au réemploi d'éléments de construction : inexpérience et manque de références, contraintes de planning, coûts du travail manuel qu'exige le réemploi, problématique de la logistique (distribution et stockage intermédiaire), mise en relation de l'offre et de la demande, garanties, normes, « perfectionnisme suisse ».

Plusieurs projets de recherche ont été lancés ces dernières années : « Construire le réemploi » [7], Analyse du projet K118 sur mandat de la Ville de Zürich [8], OFEN Reuse-LCA s'intéressant au calcul des impacts environnementaux de quelques projets pilotes où le réemploi est mis en œuvre mais principalement dans les régions de Bâle et Zürich [4], et REMCO [6]. En parallèle, le programme national de recherche (PNR73) du Fond National Suisse a soutenu plusieurs projets, sur l'empreinte écologique dans le secteur du logement (EPFL - ETHZ, 2017 - 2021) ou sur le développement d'une méthodologie couplant Analyse de Flux de Matières et Ecobilan (« MFA-LCA methodology » en anglais) [9].

Parmi ces différents projets, « Construire le réemploi » [7]., a démontré que les solutions techniques nécessaires à la mise en œuvre du réemploi existent et sont éprouvées et des plateformes digitales destinées aux professionnels pour mettre en relation l'offre et la demande ont vu le jour (salza.ch ou materium.ch, p.ex.). Mais le passage de la circularité dans la construction à une échelle supérieure, c'est-à-dire à la mise en œuvre massive de solutions rationnelles, reproductibles et durables, se heurte aux freins évoqués plus haut, et en particulier à un asynchronisme spatial et temporel entre offre et demande, au manque d'outils permettant d'évaluer le potentiel de réemploi sur un projet et à l'absence de filières pour la collecte, le reconditionnement et la redistribution des matériaux susceptibles d'être réemployés. Il est dès lors indispensable de trouver des réponses à ces questions de flux d'information et de flux physiques pour permettre un décollage de la circularité dans le domaine.

Le projet MAT-LOOP a été l'occasion de mieux comprendre les tenants et aboutissants du réemploi et de ses flux logistiques et de développer des analyses et des outils permettant de répondre (au moins partiellement) à ces problématiques, en s'appuyant sur des retours de terrain dans le contexte genevois et plus généralement suisse romand.

1.3 Objectifs du projet

L'expérience et des entretiens préliminaires avec plusieurs acteurs de cette filière menés dans le cadre des projets MAT-LOOP et REMCO [6] montrent qu'en l'absence de solutions logistiques éprouvées, le réemploi est complexe à mettre en œuvre, débouche sur des solutions « au cas par cas » et impacte le planning et le bon déroulement des chantiers. La massification du réemploi dans la construction passe



donc pas la résolution des problématiques logistiques qui y sont inhérentes.

L'objectif principal du projet MAT-LOOP est donc d'appliquer une approche interdisciplinaire en partenariat avec des acteurs de terrain et des projets pilotes pour étudier des solutions logistiques aptes favoriser le réemploi et la circularité des éléments de construction dans l'aire urbaine du Bassin Lémanique puis de les caractériser d'un point de vue technico-économique, énergétique et écologique (bilan en énergie grise et émissions de GES).

Le territoire genevois se prête particulièrement bien à un cas d'expérimentation à relativement grande échelle (géographique) sur le réemploi, non limité à un seul bâtiment comme cela a pu être fait précédemment (p.ex. avec le projet K118 à Winterthur [8]). En effet le territoire genevois, par sa situation géographique, par son exigüité et l'urgence liée à l'engorgement de ses décharges, par l'évolution de sa législation, notamment les articles 117 et 118 de la loi sur les constructions et installations diverses (LCI) [10], par la taille de son parc immobilier et par la présence d'acteurs de terrain engagés depuis plusieurs années dans la transition environnementale et la circularité (SIG-éco21, Materium, Fondation des Terrains Industriels de Genève (FTI), etc.), présente un « terrain d'expérimentation » idéal pour développer des solutions de réemploi dans la construction.

L'énoncé initial du projet proposait (peut-être un peu naïvement) de développer des solutions logistiques pour le réemploi. La première année de travail (printemps 2023-printemps 2024) a permis de récolter beaucoup d'informations sur les projets de réemploi à Genève et plus généralement en Suisse romande, notamment au fil des entretiens menés avec plus de 80 acteurs de projets ayant expérimenté le réemploi ou tentant de le promouvoir. Ce travail a démontré qu'il était impossible de parler de solutions génériques, chaque famille de composants ayant ses spécificités, et chaque schéma logistique induisant des contraintes particulières.

En cours de projet et à la lumière des enseignements obtenus jusqu'à l'été 2024, l'équipe de recherche a donc décidé de concentrer ses travaux sur 4 axes de travail :

1. Définir une méthodologie d'analyse multicritère permettant d'évaluer le potentiel de réemploi de différents composants, basées sur des critères de marché, de mise en œuvre, environnementaux, de coûts et aspects contractuels et socio-culturels ;
2. Développer un outil de calcul des économies carbone du réemploi par rapport aux alternatives « à neuf », axé notamment sur l'analyse des flux logistiques par catégorie de composants ;
3. Proposer des recommandations pour la mise en œuvre du réemploi pour 4 à 6 composants identifiés comme ayant un fort potentiel ;
4. Établir des retours d'expériences et analyse des ressourceries romandes et des projets pilotes.

2 Procédure et méthode

2.1 Organisation et coordination du projet

Le projet est structuré autour de l'équipe de recherche composée d'HEPIA et de la HEIG VD, qui collabore avec les partenaires de terrain, consulte les interlocuteurs externes et échange avec le groupe de suivi.

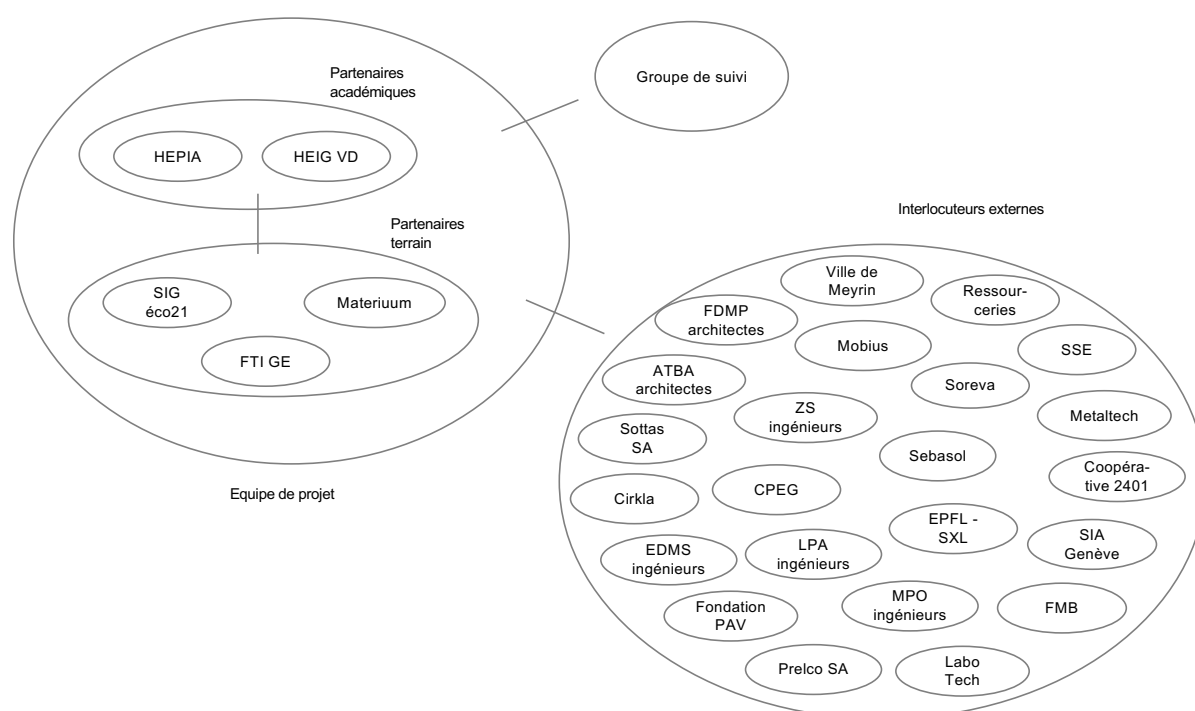


Figure 3 : Organigramme du projet MAT-LOOP

Partenaires Académiques

Le projet est dirigé par HEPIA, sous la supervision de Lionel Riquet, prof. associé de l'institut inPACT. Le groupe de compétence du Laboratoire Environnement, Climat, Energie et architecture (LECEA) amène au projet ses compétences en matière d'architecture, de construction et de gestion des projets de construction.

La HEIG-VD, sous la supervision du Dr Sébastien Lasvaux, adjoint scientifique de l'institut des Énergies, apporte les compétences nécessaires sur les questions environnementales et durabilité.

Partenaires de terrain

Le rôle des partenaires externes est d'alimenter la recherche à partir de leur expérience du terrain, des données qu'ils récoltent et de leur connaissance des acteurs de la construction et du réemploi sur le territoire genevois. Ils contribuent à la recherche de projets pilotes en servant de relais entre les responsables des potentiels projets et l'équipe de recherche. Ces acteurs sont consultés régulièrement en lien avec les solutions logistiques discutées sur les projets pilotes :



- SIG éco21 : propose depuis fin 2021 une solution d'assistance aux mandataires et maîtres d'ouvrage (Solution C-bat) visant à les aider à la mise en œuvre de solutions circulaires sur leurs projets de construction. C-bat, en partenariat notamment avec l'association Materiium, est active sur les projets de la coopérative de la Bistoquette (Ch. des Sciers, 1228 Plan-les-Ouates) ATBA architectes, de la coopérative Archipel, BCR architectes, (Rue Edouard-Rod, 1203 Genève) et de la requalification de l'ancien site Firmenich, (Pointe nord du PAV, Genève), architectes Baud & Früh.
- Materiium : fondée en 2014, l'association Materiium est active dans le conseil et l'expertise en matière de diagnostics, inventaires, et intégration du réemploi dans les projets de construction. Elle organise des formations en lien avec l'économie circulaire et le réemploi dans la construction et participe régulièrement à des projets de recherche en lien avec cette thématique. Elle gère également une ressourcerie à Genève et à Lausanne.
- FTI : La fondation pour les terrains industriels de Genève a pour mission de gérer les terrains industriels propriété de l'état de Genève, soit la quasi-totalité des périmètres industriels du canton. Elle accompagne les entreprises en recherche de terrains ou de locaux et pilote la transition des zones industrielles en éco-parcs. Elle est confrontée dans ce cadre à des demandes de surfaces en lien avec les activités logistiques du réemploi et avec la mise sur le marché de matériaux issus de la déconstruction de certaines structures industrielles.

Groupe de suivi

Le rôle du groupe de suivi est de fournir une expertise externe et des conseils stratégiques au consortium de recherche. Il représente aussi une passerelle pour le projet vers la Suisse alémanique et vers d'autres régions européennes (France notamment).

- Guillaume Habert, professeur, chair of sustainable construction, EPFZ
- Kerstin Müller, Architecte, directrice de Zirkular GmbH, BS
- Noé Basch, architecte, fondateur de lab ingénierie, co-fondateur de Mobius réemploi, Paris
- Maléna Bastien-Masse, ingénieure génie civil, post-doctorante, EPFL-SXL (responsable de la filière Génie Civil d'HEPIA depuis 2025)
- Camille Orthlieb, ing. EPF en environnement, directrice Ingénierie et Durabilité, Direction Générale des Immeuble et du Patrimoine, Etat de Vaud.
-

Interlocuteurs externes

De nombreux interlocuteurs externes à l'équipe de projet (principalement issus de l'écosystème de la construction à Genève) ont été consultés au cours du projet et ont contribué de manière importante à sa réussite par leurs partages d'expériences et de compétences, notamment pour l'établissement des inventaires, l'étude du réseau de ressourceries, les projets pilotes et les recommandations. Les interlocuteurs externes principaux sont les suivants :

Association Cirkla
Association Soreva
ATBA architectes
Coopérative 2401
CPEG (Caisse de
prévoyance de l'État de
Genève)
EDMS SA

EPFL – SXL
FDMP architectes
Fondation PAV
LaboTech sàrl
LPA ingénieurs sàrl
Mobius Réemploi
MPO ingénieurs sàrl
Prelco SA

Réseau romand de
ressourceries
Association Sébasol
Sottas SA
Ville de Meyrin
ZS ingénieurs civils SA

2.2 Structure du projet et approche méthodologique

2.2.1 Structure du projet

Le projet était à l'origine divisé en 5 Work Packages (WP) présentés sur la figure ci-dessous.

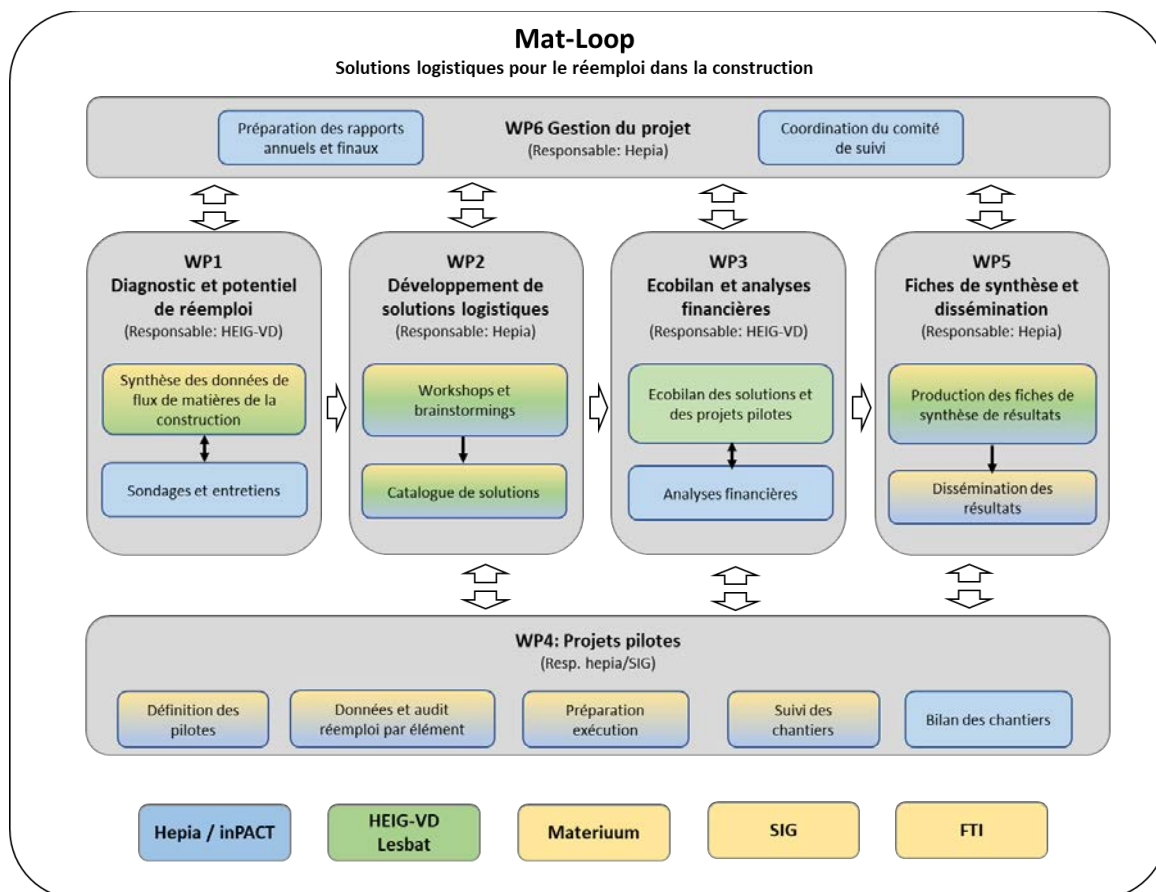


Figure 4 : Structure originelle du projet MAT-LOOP

Les travaux effectués en 2023-2024 ont mené à une redéfinition de l'organisation du travail à partir de la fin du printemps 2024. Les projets pilotes ont tout à tour subi des phases d'arrêt, ce qui a nécessité de recourir à des sources additionnelles d'information.

Par ailleurs, la multiplicité des problématiques en fonction du type de matériaux et de leurs caractéristiques a obligé à mener une phase d'analyse détaillée sur plusieurs critères, afin de dégager quels composants sont les plus prometteurs en termes de réemploi pour circonscrire le champ de recherche. Ce travail d'analyse a dû être fait en amont des recommandations sur la mise en œuvre du réemploi.

Cette situation a aussi impliqué que les écobilans initialement prévus sur plusieurs cas pilotes ont aussi dû être reprogrammés en amont du développement des recommandations, afin d'inclure les aspects écobilan (CO₂ etc.) dans l'analyse préalable. La HEIG.VD, responsable du WP3 a donc divisé son travail en deux : développer un calculateur d'écobilan pour évaluer l'impact des différents composants en réemploi et à neuf (en lien avec la mise en place d'un tableau de bord multicritère par l'HEPIA), et une analyse du cas pilote de l'École de Meyrin, pour lequel différentes données nécessaires ont été



collectées. Le retard pris par ce projet d'école oblige à repousser la mise à disposition des résultats à début 2026.

Finalement, le travail effectué pour l'identification des composants les plus prometteurs a débouché sur le développement d'une maquette d'outil et à la décision lors des phases SIA 1 et 2 (fixation des objectifs et études de faisabilité), destinés aux mandataires et maîtres d'ouvrage, leur permettant d'évaluer le potentiel de leur chantiers (sources ou cibles) en termes de réemploi, de fixer des priorités pour sa mise en œuvre, de préciser les gains environnementaux de différentes variantes en réemploi et à neuf et d'adapter le processus de travail des mandataires (architectes en particulier) en vue d'intégrer les contraintes du réemploi dans la planification des projets.

2.2.2 Méthodologie

La méthode de travail correspond au schéma suivant :

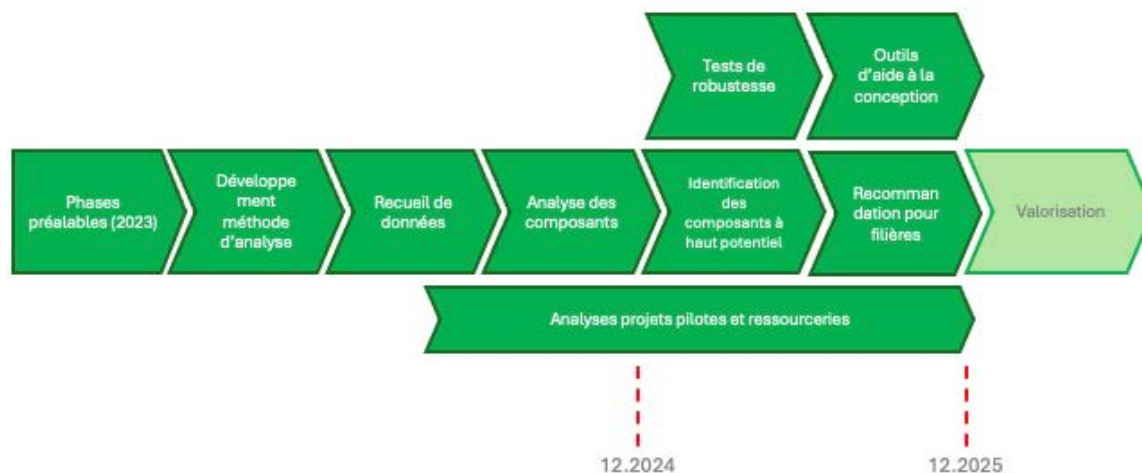


Figure 5 : Structure mise à jour du projet MAT-LOOP

Le recueil de données a été notamment effectué au travers d'inventaires de chantiers sources fournis par les partenaires de terrain et externe et d'inventaires réalisés par HEPIA. Ces inventaires ainsi que les informations recueillies dans le cadre du projet REMCO [6] ont permis d'identifier une quarantaine de composants susceptibles d'être réemployés.

L'étape suivante a consisté à établir la signature composant de chacun des éléments au travers d'une matrice d'analyse multicritères (voir chapitre résultats), sur la base des retours d'expérience qualitatifs obtenus dans le cadre du projet REMCO et par les partenaires de terrain et interlocuteurs externes. La notation des critères environnementaux a fait l'objet d'un test de robustesse quantitatif mené par la HEIG VD. Cette étape a été l'occasion de développer le premier outil d'aide à la conception visant à comparer les impacts environnementaux (émissions de GES) de solutions de réemploi et de solutions avec des composants neufs.

La matrice multicritère a servi de base pour le développement du second outil d'aide à la décision destiné à évaluer en phase d'étude de faisabilité le potentiel de réemploi des composants présents dans la matrice sur des chantiers cibles comme des chantiers sources.

Les recommandations pour la mise en œuvre du réemploi pour quatre matériaux à haut potentiel de réemploi identifiés sur la base de leur signature sont basées sur les nombreuses discussions menées avec les praticiens et experts consultés.

3 Récolte d'information

Les informations et données utiles pour le projet de recherche ont été collectées auprès de quatre sources différentes :

1. Entretiens avec des praticiens
2. Inventaires de réemploi
3. Étude du fonctionnement des plusieurs ressourceries
4. Projets pilotes

3.1 Entretiens

Une centaine d'entretiens ont été menés dans le cadre de ce projet et du projet REMCO [6] avec des praticiens ayant une expérience ou des informations à partager en lien avec le réemploi de matériaux de construction. Les personnes consultées sont en grande partie issues de l'écosystème de la construction à Genève et représentent l'ensemble des acteurs concernés par le réemploi (Maîtres d'ouvrages, mandataires, entreprises, associations, ressourceries, administrations, acteurs académiques).

Ces entretiens ont permis de récolter de très nombreux retours d'expérience et ont contribué de manière décisive à la base de connaissance utilisée pour le développement des travaux et aux résultats obtenus.

3.2 Inventaires

Une série de 19 inventaires de chantiers sources genevois datant de 2021 à 2024 ont été fournis par Matériuum, le bureau d'architectes ATBA, l'association Soreva. 15 autres inventaires ont été directement réalisés par HEPIA en 2024 dans le canton de Genève, notamment sur des immeubles propriété de la CPEG (Caisse de Prévoyance de l'Etat de Genève). Ils ont permis de recueillir des informations de première main concernant les composants disponibles sur des cas réels. La liste complète est fournie en annexe.

Les données d'inventaire et retour d'expérience issus des projets pilotes, des travaux des partenaires de terrain à Genève ainsi que plusieurs inventaires réalisés directement par HEPIA sur le terrain genevois ont permis d'identifier 39 composants récurrents dans les inventaires sur des immeubles voués à la déconstruction ou couramment réemployés dans les chantiers recensés, notamment dans le cadre du projet REMCO [6].

Ces composants ont été catalogués selon leur code eCCC-bât [11] développé par le Centre suisse d'études pour la rationalisation de la construction (CRB) et communément utilisés en Suisse, et répartis en cinq lots, selon la nomenclature établie dans le cadre du règlement d'application de la LCI 117-118 [10], précisée dans le guide d'application de du règlement [12], à savoir :

1. Fondations et construction souterraines (aucun composant répertorié)
2. Structure horizontale et verticale
3. Enveloppe
4. Aménagements intérieurs
5. Installations techniques

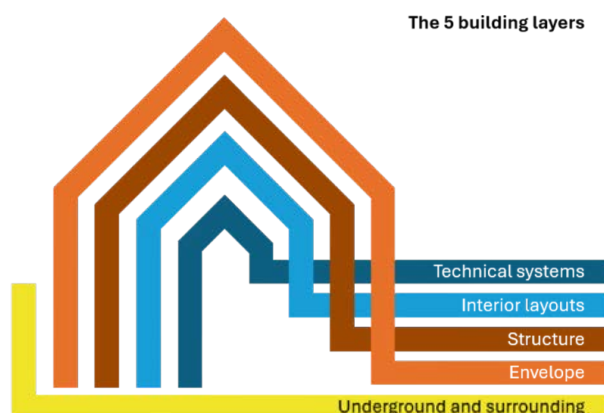


Figure 6 : Représentation schématique des cinq lots (Reuse-LCA)

C Gros œuvre : Structures horizontales et verticales	Composant	Unité fonctionnelle
1 C02.01/02 Paroi porteuses	Mur béton armé	m ²
2 C02.01/02 Paroi porteuses	Maçonnerie TC ou ciment	m ²
3 C03.02 Piliers intérieurs	Poteaux béton armé	
4 C04.01 Planchers	Dalle Béton armé	m ²
5 C04.01 Planchers	Planchers bois / solivages	m ²
6 C04.02 Escaliers intérieurs	Escaliers en béton préfa	m de hauteur
7 C04.02 Escaliers intérieurs	Escaliers en bois / métal	m de hauteur
8 C04.04 Structures porteuses de toitures plates	Dalle Béton armé	m ²
9 C04.04 Structures porteuses de toitures inclinées	Charpente bois	m ² de toiture
10 C04.04 Structures porteuses de toitures inclinées	Charpente métallique	m ² de toiture
E Revêtements de façade / F Toitures : Enveloppe du bâtiment		
11 E02.02 Systèmes d'isolation thermique extérieure	Isolants synthétique et minéraux	m ² à conductivité connue
12 E02.03 Bardages	Bardage bois	m ²
13 E02.03 Bardages	Bardage métallique	m ²
14 E02.03 Bardages	Parements béton préfa	m ²
15 E02.03 Bardages	Briques de parement	m ² à épaisseur connue
16 E02.04 Façades légères	Façade rideau métallique	m ²
17 E02.06 Dispositif antichute	Garde-corps métalliques	m de longueur à hauteur connue
18 E03.01 Fenêtres	Fenêtres bois / PVC / métal	m ² à valeur U connue

19	E03.04 Protection contre le soleil / intempéries	Volets bois / alu	m ²
20	F01.02 Couverture toitures plates	Gravier lestage toits plats	m ³
21	F01.03 Couverture toitures inclinées	Tuiles TC	m ²
		Grilles caillebotis	m ²
G Aménagements intérieurs :			
Aménagements intérieurs fixes			
22	G01.01 Cloisons	Cloisons brique TC	m ²
23	G01.01 Cloisons	Cloisons bois	m ²
24	G01.01 Cloisons	Cloisons verre	m ²
25	G01.05 Portes intérieures pour personnes	Portes	m ²
26	G02.02 Revêtements de sol	Parquet	m ²
27	G02.02 Revêtements de sol	Carrelage / Terrazzo	m ²
28	G02.02 Revêtements de sol	Faux-planchers techniques	m ²
29	G04.02 Faux plafonds	Faux-plafonds	m ²
30	G05.01 Placards, étagères, tablettes	Placards, étagères	unités
31	G05.02 Agencements de cuisines	Agencement cuisines	unités
D Installations : Installation techniques			
32	D01.01 Équipements de production de courant fort	Panneaux PV/PH	kWc
33	D01.04 Installations à courant fort	Chemins de câbles, racks...	m de longueur
34	D01.05 Récepteurs courant fort	Luminaires	unités
35	D05.05 Émission de chaleur	Radiateurs	unités à puissance connue
36	D07.04 Distribution d'air	Gaines ventilation	m de longueur
37	D08.05 Eau : robinetterie, appareils	Appareils sanitaires	unités
38	D12.01 Ascenseurs	Ascenseur	unité à hauteur et capacité connues
I Aménagements extérieurs			
39	I04.02 Garnitures et bordures pour surfaces en dur	Pavés, dalettes, bordures, cunettes	kg

Tableau 1 : Composants eCCC-Bât identifiés dans les inventaires

3.3 Ressources

3.3.1 Définition et rôle dans la chaîne du réemploi

Les ressourceries constituent des acteurs territoriaux essentiels pour opérationnaliser les stratégies de réemploi. Elles agissent comme un chaînon manquant permettant de refermer la boucle de la circularité en connectant l'offre (gisements de matériaux issus de la déconstruction) et la demande (besoins en matériaux pour les projets de construction ou de rénovation).

Structurellement, les ressourceries sont des lieux physiques dédiés au stockage, à la valorisation et à la vente de matériaux. Au-delà de la simple fonction logistique, elles proposent une gamme de services permettant de lever les freins techniques et assurantiels du réemploi. Dans le contexte du projet MAT-LOOP, le rôle de ces structures est analysé selon les services suivants :

- **Diagnostic ressources (inventaire avant démolition)** : Identification en amont des gisements réemployables dans un chantier de déconstruction. Cette étape est cruciale pour détourner les éléments du flux de déchets et leur attribuer une valeur d'usage.



- **Appui à la collecte sélective (Dépose)** : Accompagnement des entreprises de déconstruction ou intervention directe (via salariés ou bénévoles) pour assurer une dépose soignée, préservant l'intégrité physique des composants.
- **Stockage tampon (Logistique)** : Capacité à stocker les matériaux entre le moment de leur dépose et leur réintégration. Ce service permet de pallier la non-simultanéité fréquente entre les chantiers donateurs et receveurs.
- **Reconditionnement et Préparation (Logistique)** : Remise en état des composants (nettoyage, test, petites réparations, voire détournement d'usage). Cette étape garantit que le matériau répond aux exigences fonctionnelles et esthétiques de la nouvelle mise en œuvre.
- **Sourcing et Mise en relation (projet de construction)** : Rôle d'intermédiaire commercial et technique pour faciliter l'intégration des matériaux dans les nouveaux projets (AMO Réemploi).

L'analyse du fonctionnement de ces structures est indispensable pour quantifier les impacts environnementaux « cachés » du réemploi, notamment ceux liés à l'occupation des sols et à l'énergie grise des infrastructures de stockage.

3.3.2 Échantillon étudié

L'étude porte sur 11 ressourceries situées dans l'arc lémanique (Genève, Vaud) et les régions limitrophes (France voisine, Valais, Fribourg, Neuchâtel). Cet échantillon couvre une diversité de modèles : structures associatives, entreprises privées, spécialistes du bois ou généralistes.

La collecte de données s'est déroulée en deux phases selon une méthodologie mixte :

- **Entretiens qualitatifs (11 ressourceries)** : Compréhension du modèle d'affaires, des services offerts et des contraintes opérationnelles.
- **Relevés métriques in-situ (7 ressourceries)** : Mesures physiques des zones de stockage, inventaires par échantillonnage et analyse de l'organisation spatiale.
-

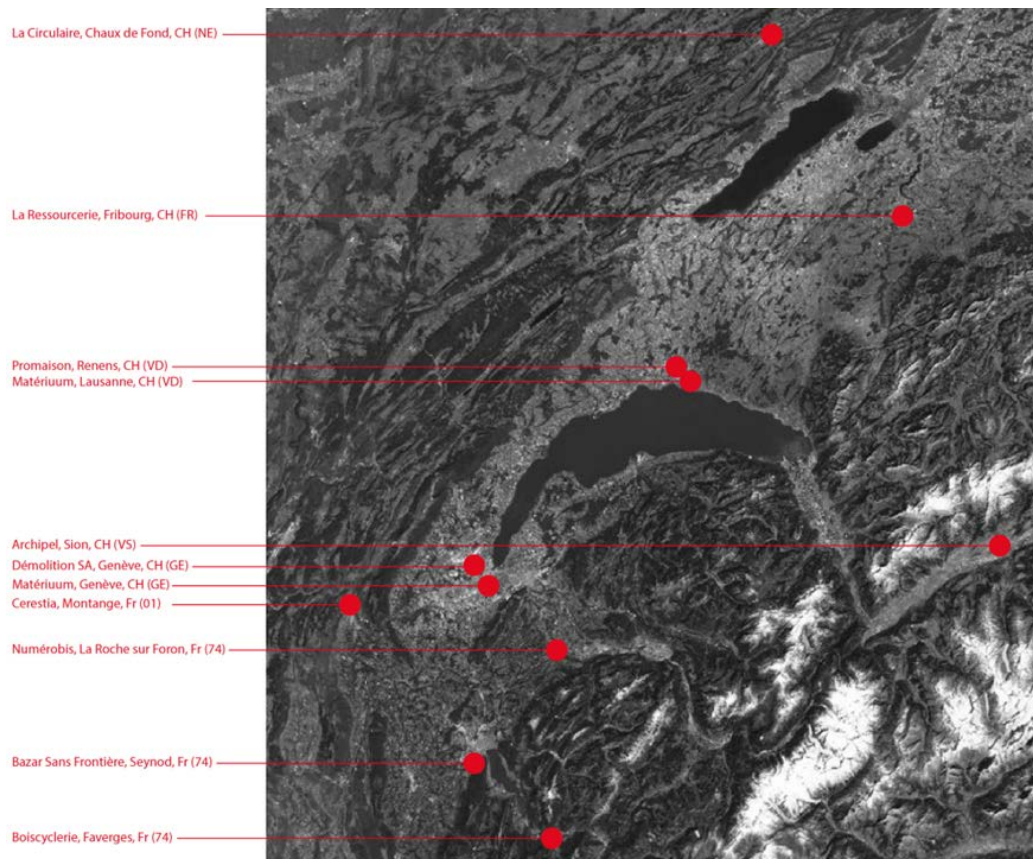


Figure 7 : Carte des ressourceries étudiées dans le cadre de MAT-LOOP



Nom	Localisation	Entretien qualitatif	Étude quantitative
La Circulaire	La Chaux-de-Fond, CH (NE)	✓	
La Ressourcerie	Fribourg, CH (FR)	✓	✓
Promaison	Renens, CH (VD)	✓	✓
Matériuum Lausanne	Lausanne, CH (VD)	✓	✓
L'Archipel	Sion, CH (VS)	✓	✓
Démolition SA	Genève, CH (GE)	✓	
Matériuum Genève	Genève, CH (GE)	✓	✓
Cerestia	Montange, FR (01)	✓	
Numérobis	La Roche-sur-Foron, FR (74)	✓	
Bazar sans Frontières	Seynod, FR (74)	✓	✓
Boiscyclerie	Faverge, FR (74)	✓	✓

Tableau 2 : études réalisées auprès des onze ressourceries dans le projet Mat-Loop



Figure 8 : Photos des sept ressourceries étudiées quantitativement

3.4 Projets pilote

Deux projets pilotes genevois expérimentant le réemploi ont été suivis dans le cadre de MAT-LOOP : La rénovation et extension de l'école de Meyrin et la requalification en logement d'un immeuble administratif à Genève, Route de Meyrin 49.

3.4.1 École de Meyrin Village, Meyrin (GE)



Canton	GE
Maître d'ouvrage	Ville de Meyrin
Type de projet	Rénovation globale, surélévation et construction neuve Scolaire (école enfantine et primaire)
Type de bâtiment	
Surface de référence énergétique (SRE)	7 189 m ² (existant + neuf)
Niveaux et sous-sol	Bâtiments de 1 à 2 niveaux, avec sous-sol chauffé (Aula)
Stratégie de réemploi	Réemploi in-situ et ex-situ, recyclage des matériaux Stratégie matériaux pour l'ensemble du projet (Gros-œuvre, Second-œuvre, Vrac)
Périmètre de l'analyse	
Phase du projet	SIA 33 - Demande d'autorisation de construire (Début des travaux prévu initialement en juin 2024, retardé sans indication de date)

Figure 9 : Vues de l'état existant de l'école de Meyrin Village

Le projet de rénovation et d'agrandissement de l'école de Meyrin Village illustre l'engagement fort de la Ville de Meyrin en faveur d'une construction durable et exemplaire. L'ensemble scolaire, construit entre 1969 et 1970, se compose de cinq bâtiments distincts avec la salle de gymnastique, les deux bâtiments enfantins et le bâtiment primaire et l'ancienne école. Ils sont caractérisés par une architecture fonctionnelle en béton armé, des volumes bas d'un à deux niveaux et des toitures plates. Les pignons en double mur de briques de terre cuite constituent un élément identitaire fort de cet ensemble aujourd'hui vieillissant et énergivore.

La Municipalité a confié au consortium d'architectes ATBA/Atelier d'ici la conception d'une transformation ambitieuse qui dépasse la simple rénovation énergétique. Le projet prévoit la réfection complète de l'enveloppe thermique des bâtiments existants grâce à une isolation par l'extérieur, au remplacement des menuiseries et à la végétalisation des toitures, ainsi qu'une remise à niveau des réseaux techniques. Une production d'énergie renouvelable sera intégrée, notamment via l'installation



de panneaux photovoltaïques, afin de viser les standards genevois les plus exigeants en matière de performance énergétique – THPE (très haute performance énergétique) et HPE (haute performance énergétique) Rénovation pour les bâtiments existants, et THPE 2000W / CECB A-A pour les nouvelles constructions. L'ensemble respectera par ailleurs les principes du cahier technique SIA 2040 « La voie vers l'efficacité énergétique » sur tout son cycle de vie.

En parallèle, le projet répond aux besoins pédagogiques contemporains en augmentant les capacités d'accueil et en repensant la distribution des espaces. Le bâtiment Enfantine 1 sera surélevé de deux niveaux et un nouveau pavillon viendra compléter le site, portant la surface de référence énergétique de 5 735 m² à 7 115 m². Les aménagements intérieurs et extérieurs seront intégralement repensés pour offrir des espaces adaptés aux méthodes d'enseignement actuelles. Le bâtiment de l'ancienne école n'étant pas rénové, il ne sera pas inclus dans l'étude.

	SRE (avant travaux) en m ²	SRE (après travaux) m ²	Travaux structurels	Travaux rénovation	Pris en compte dans l'étude
Primaire + aula	1892	1892	/	Enveloppe : - Isolation toiture -Isolation dalles de sol -Isolation façade -Remplacement menuiseries	OUI
Enfantine 1	479	1437	Surélévation de 2 niveaux		OUI
Enfantine 2	915	915	/		OUI
Gym	1999	2055	Extension du réfectoire		OUI
Pavillon	Inexistant	367	Construction du bâtiment	Aucun (Neuf)	OUI
Ancienne école	1156	1156	/	Aucun	NON

Tableau 3 : Récapitulatif des données générales des bâtiments constituant l'école de Meyrin

Dans une logique de construction circulaire, la maîtrise d'ouvrage souhaite intégrer du réemploi et des matériaux recyclés. L'objectif (somme toute modeste) est que 1% des fournitures proviennent du réemploi et que des matériaux tels que les bétons et les terres d'excavation soient valorisés. Ce choix témoigne de la volonté de réduire l'empreinte environnementale du chantier et de faire de l'école de Meyrin Village un projet pilote en matière de durabilité.

La stratégie de réemploi est articulée autour de plusieurs axes majeurs :

- Réemploi in-situ des briques de façade : Les briques de terre cuite caractéristiques des pignons existants seront intégralement démontées, reconditionnées (nettoyage du mortier) et réutilisées comme parement ventilé sur la nouvelle enveloppe isolée. Le volume disponible sur site (env. 420 m²) sera complété par des briques neuves de même format pour couvrir les surfaces plus importantes dues à la surélévation.
- Réemploi ex-situ de structures : La structure de la surélévation (Enfantine 1) et du nouveau bâtiment (Pavillon) sera partiellement réalisée avec des éléments de structure métallique

(poutres IPE) et en béton armé (sommiers, poteaux) issus de déconstructions genevoises identifiées (ex: Chantiers Lyon 106, Emma Kammacher 10, Bergère 10).

- Valorisation des terres excavées : Les déblais issus des excavations (env. 890 m³) seront testés (en collaboration avec HEPIA et l'entreprise Terrabloc) pour être transformés en Briques de Terre Compressée (BTC) et réemployés en cloisons intérieures.
- Réemploi du second-œuvre : Une grande partie des équipements existants seront réemployés : radiateurs (démontage, curage, remise en peinture), appareils sanitaires, et une partie des lames de bois des faux plafonds (425 m² réemployés sur 1530 m² déposés)
- Recyclage des gravats et graviers : Les gravats de briques concassées seront réutilisés comme granulats recyclés dans les bétons maigres. Les graviers de toiture existants seront réutilisés dans les nouveaux substrats de toitures végétalisées.

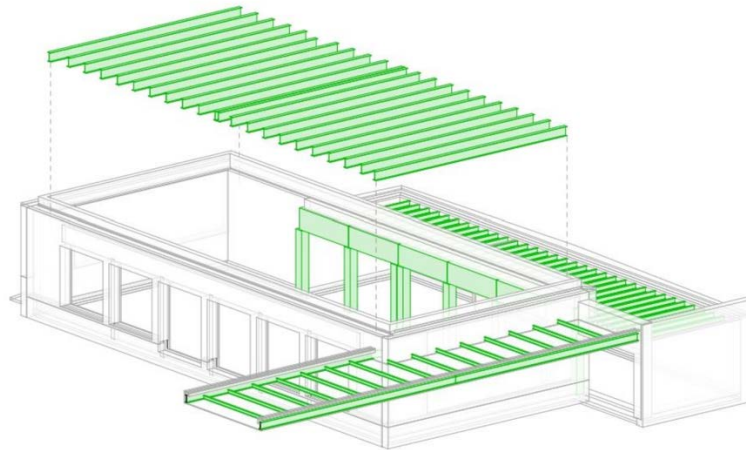


Figure 10 : illustration de la structure du pavillon de l'École de Meyrin, en vert les éléments réemployés © atba

Le tableau ci-dessous indique les caractéristiques de chaque matériau réemployé

n°	Composant	Distance en km de: <i>Total (vers stockage / vers atelier / vers chantier)</i>	Mass e	Utilisation	Description de la chaîne logisitique
1	Brique de terre cuite	0 (0 / 0 / 0) In-situ	45.3 t.	Parement de façade ventilée	Déconstruit, nettoyage du mortier résiduel et stockage sur place
2	Profilé métallique	10 (3 / 0 / 4) Ex-situ	24t.	Poteaux, poutres de dalle et solives	Acheminé vers le stockage depuis le chantier de déconstruction puis directement sur site



n°	Composant	Distance en km de: <i>Total (vers stockage / vers atelier / vers chantier)</i>	Mass e	Utilisation	Description de la chaîne logisitique
3	Béton scié	10 (4 / 0 / 4) Ex-situ	14,6t	Poteaux, sommiers	Acheminé vers le stockage depuis le chantier de déconstruction puis directement sur site
4	Granulat recyclé à 90%	0 (0 / 0 / 0) In-situ		Béton maigre : béton de remplissage, béton de propreté, enrobage de canalisation	
5	Granulat recyclé à 25%	0 (0 / 0 / 0) In-situ		Bétons armés structurels : renforts sismiques, surélévation	
6	Granulat recyclé à 40%	0 (0 / 0 / 0) In-situ		Bétons armés : radier et murs	
7	Brique de terre compressée	0 (0 / 0 / 0) In-situ	117t	Mur intérieur	Terre d'excavation sur site transformé en brique par compression.
8	Lame de bois	0 (0 / 0 / 0) In-situ	12t	Faux plafond	Déconstruction des faux plafonds existants, nettoyage et réemploi pour l'Aula et les préaux couverts
9	Sanitaire	0 (0 / 0 / 0) In-situ		Cuvettes, éviers, lavabo, mitigeurs	
10	Radiateur	0 (0 / 0 / 0) In-situ		Radiateur	Démontés, curés, peints et remis en fonctionnement

Tableau 4 : École de Meyrin, caractéristiques des matériaux réemployés

3.4.2 Route de Meyrin 49, Genève

Le projet de la Route de Meyrin 49 ayant été mis en attente durant une grande partie du projet MAT-LOOP, les informations et retours d'expérience qui ont pu en être tirés sont très limités. Le projet est donc présenté ici pour mémoire, sans rentrer le détail.

Le bâtiment administratif de la Rte de Meyrin 49 à Genève a été construit au milieu des années 1980 par les architectes genevois Arthur et Jacques Bugna. Il a abrité des locaux de la Poste et de Swisscom jusqu'à leur départ en 2019 puis a été acquis par l'entreprise Swiss Prime Site (SPS) qui propose de le reconverter en immeuble de logements. C'est le bureau d'architectes genevois FdMP qui est mandaté pour mener à bien ce projet.

Après une phase d'études préliminaires, le maître de l'ouvrage a écarté l'option démolition reconstruction et validé une variante de rénovation et reconversion des locaux commerciaux existants en logements incluant du réemploi ainsi qu'une surélévation, permettant d'offrir près de 19'500m² de surface utile.

Une phase préliminaire d'inventaire mené par Matériuum a permis de répertorier les matériaux réemployables in-situ et de valider l'intérêt du réemploi selon un croisement de critères économiques et environnementaux. Le réemploi in situ va notamment concerner des contrecœurs en béton armé, des gaines de ventilation, ou encore le granite de façade, et d'autres composants externe ex-situ (cuisines, parquets, etc.).

Le plan localisé de quartier (PLQ) applicable sur la parcelle impliquant une affectation commerciale des démarches relativement complexes ont dû être entreprises pour obtenir une révision du PLQ et avec la possibilité d'y inclure du logement. Ces démarches ont pris plus de temps que prévu et le projet a été mis en attente en phase d'avant-projet et retardé. De ce fait, le projet n'a pas pu fournir de données exploitables. Des enseignements et retours d'expérience récoltés auprès de FdMP architectes ont cependant pu être intégrés par l'équipe académique dans le projet MAT-LOOP.



Figure 11 : Photographie de l'état existant du bâtiment de l'Avenue de Meyrin 49, Genève. Image : FdMP architectes

4 Développements méthodologiques

Ce chapitre résume les développements effectués à partir des informations et données récoltées et décrites dans le chapitre précédent et les méthodologies appliquées.

4.1 Protocole d'analyse quantitative des 7 ressourceries

La démarche analytique s'est faite en trois temps : la collecte de données, la numérisation des données dans un tableur, puis le calcul d'indicateurs.

4.1.1 Structuration des données : approche multi-échelles

Des relevés métriques des espaces des ressourceries ont été réalisés. Surface, hauteur et volume ont été mesurés en classifiant les espaces comme illustré en Fig.11. Cette classification permet de distinguer, au sein d'un même lieu, les espaces de passage (circulations, zones de manutention) des espaces de stockage disponible (surfaces réellement dédiées aux matériaux). Cette distinction est importante pour calculer la véritable densité de stockage et ne pas pénaliser les structures nécessitant de larges aires de manœuvre pour les engins, ou au contraire rendre compte d'un usage sous-optimale de l'espace pour du stockage.

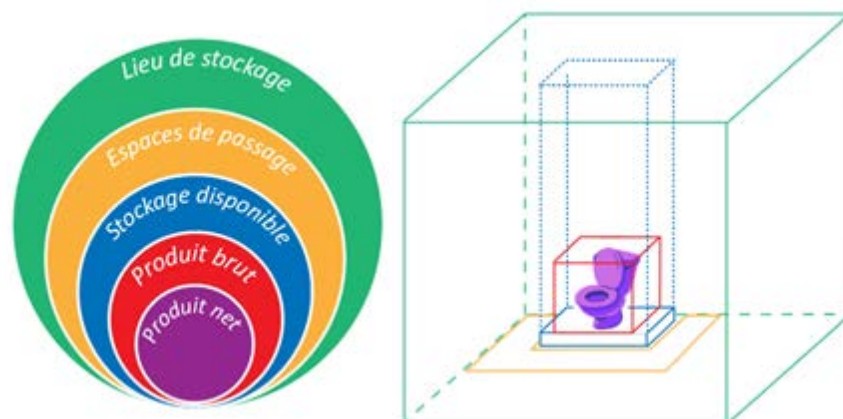


Figure 12 : Classification des espaces de stockage d'une ressourcerie

Pour normaliser l'analyse et permettre la comparaison entre des structures de tailles très hétérogènes, les données ont été structurées selon trois niveaux hiérarchiques (voir 11) :

- Le Composant (Unité fine) : Il s'agit du matériau de construction lui-même (ex: un lavabo, une porte, une palette de briques). Pour chaque composant, les données collectées incluent les dimensions, le volume net, la quantité, et la catégorie Mat-Loop associée (ex: Gros-œuvre, Sanitaire).
- La Structure de stockage (Contenant) : Il s'agit du support physique logistique (Racks à palettes, cantilevers, étagères, zones au sol). L'analyse de ce niveau permet d'évaluer la densité de stockage et l'optimisation verticale.
- Le Lieu (Environnement) : Il s'agit de l'espace global (Halle intérieure, hangar couvert, cour extérieure). Ce niveau permet d'attribuer les impacts environnementaux liés à l'infrastructure (construction du bâtiment, occupation du sol) au prorata de l'espace occupé par les matériaux.

Dans un premier temps, les données ont été collectées sur le terrain de manière systématique, à travers des relevés photographiques, des comptages manuels et des mesures métriques. Pour chaque unité observée, trois informations de base ont été consignées : le type de composant, le type de structure utilisée, et le lieu d'entreposage. À la suite de cela, un relevé des métriques associées aux trois niveaux de structuration a été effectué pour permettre de produire des analyses comparatives.

Par la suite, ces données ont été répertoriées dans un tableur numérique. Cette numérisation permet de trier, filtrer et agréger les données pour les analyses statistiques plus poussées. Cette étape comprend aussi la normalisation des unités. Les surfaces ou volumes occupés par les structures ont été mesurés ou estimés à partir de formats standards (par exemple, $1,20 \times 0,80 \times 0,14 \text{ m}^3$ pour une palette EUR) quand cela était possible. Les quantités ont été homogénéisées en **volume** (m^3), afin de rendre les données **comparables entre sites**, et entre types de matériaux. Cela permet également de calculer des densités (nombre d'éléments par m^2 ou m^3) et d'identifier les structures utilisées de manière non optimale.

Une fois les données saisies et normalisées, des **métriques spécifiques** sont calculées pour trois niveaux d'analyse : **composant, structure, et lieu**.



Figure 13 : Représentation des niveaux de structuration des données

4.1.2 Définition des indicateurs de performance spatiale

L'efficacité d'une ressourcerie se mesure à sa capacité à stocker un volume maximal de matière utile sur une surface donnée. Les métriques suivantes ont été calculées sur la base de la segmentation présentée en Figure 11 :

4.1.2.1. Efficacité spatiale du stockage ($E_{spatiale}$)

Cet indicateur mesure la densité réelle de stockage. Il rapporte le volume net de matière stockée à la surface au sol totale du lieu (incluant, par définition, les espaces de passage).

$$E_{spatiale} = \frac{V_{net_composants}}{S_{totale_lieu}} \quad [m^3nets/m^2]$$

Où :

- $V_{net_composants}$: Somme des volumes stricts (nets) des matériaux.
- S_{totale_lieu} : Surface au sol totale du lieu (Passage + Stockage).

4.1.2.2. Taux de remplissage volumique ($T_{remplissage}$)

Cet indicateur évalue l'optimisation des structures de stockage (ex: un rack est-il plein ou vide ?).

$$T_{remplissage} = \frac{V_{net_composants}}{V_{stockage_disponible}} \quad [\%]$$

4.1.2.3. Intensité spatiale spécifique (I_{spec})

Pour des catégories de composants spécifiques, cet indicateur rapporte le nombre de mètre carré dédié au Stockage (hors espaces de passage) par Unité Fonctionnelle (UF) stockée.

$$I_{spec} = \frac{S_{dédiée}}{Nombre_UF} \quad [m^2/UF]$$



4.1.2.4. Intensité spatiale totale du stockage ($I_{spatiale}$)

Cet indicateur rapporte la surface totale mobilisée (stockage, circulation, administration) au volume net de produit. Une valeur élevée traduit une sous-optimisation globale, imputable à l'agencement des lieux, au taux de remplissage ou à la faible compacité des stocks.

$$I_{spatiale} = \frac{S_{totale_lieu}}{V_{net_composants}} \quad [m^2/m^3 \text{ net}]$$

Cet indicateur est calculé globalement pour une ressourcerie, où :

- $V_{net_composants}$: Somme des volumes stricts (nets) des matériaux.
- S_{totale_lieu} : Surface au sol totale du lieu (Passage + Stockage, avec ou sans les zones d'Atelier et Administratives).

4.1.3 Définition des indicateurs environnementaux du stockage

Afin de traduire les performances logistiques (mesurées dans la section précédente) en impacts environnementaux, des données génériques d'inventaire issues de UVEK (la base de données d'arrière-plan de la base de données KBOB) avec les données spécifiques relevées sur le terrain.

L'objectif est d'attribuer une fraction de l'impact environnemental de l'infrastructure de stockage (bâtiment et aménagement, ici des palettes) à chaque unité de produit de construction, proportionnellement à l'espace qu'il occupe et à la durée de son séjour.

4.1.3.1. Données d'inventaire génériques (*Background data*)

Les impacts liés à la construction et la fin de vie du bâtiment de stockage, et aux palettes en bois sont tirés de la base de données UVEK (complémentaire à la KBOB). La consommation d'énergie en exploitation n'est pas incluse (par exemple le chauffage des locaux). Deux archétypes ont été retenus :

- Halle industrielle (pour le stockage intérieur).
- Aménagement de surface extérieure (pour le stockage en extérieur).

Dans les deux cas, les produits sont considérés entreposés sur palette, la surface de palette étant égale à la surface de stockage utile.

Un flux élémentaire en analyse de cycle de vie correspondant à l'occupation de terre industrielle (exprimé en $m^2 \cdot an$) a été ajouté. Ce flux induit des impacts d'usage des sols selon l'indicateur UBP mais n'influence pas les résultats des indicateurs d'énergie grise et de potentiel de réchauffement climatique.

Ces données fournissent un impact de référence par m^2 de bâtiment ou d'extérieur et par an (ex: $kgCO_2 \text{ eq}/m^2 \cdot an$) appelé $I_{infra_m^2}$.

Nom de la donnée dans UVEK	Informations	unité	Emission de GES (kg CO ₂ eq./unité)	Unité de charge écologique (UBP/unité)	Energie grise (kWh/unité)
UVEK : Building, hall/CH/I U	Durée de service du bâtiment de 50 ans ; fabrication (A1-A5) et déconstruction (C1-C4) du bâtiment sans remplacement ; 70 % structure acier, 30 % structure bois	m ² .an	5,94	1302	19,98
UVEK : Wood pallet	Fabrication et élimination. Une durée de service moyenne de 10 ans est considérée d'après Deviatkin et al. 2019 (https://doi.org/10.3390/su11205750)	m ² .an	0,17	338	0,81
UVEK : Occupation, industrial area	Flux élémentaire d'occupation industrielle du sol pour une surface et une durée.	m ² .an	0	630	0

Tableau 5 : Données d'inventaire générique issue de la base de données d'arrière-plan d'écobilan UVEK 2021

4.1.3.2. Calcul de données spécifiques (*Foreground data*)

Les données génériques sont pondérées par l'efficacité spatiale réelle moyenne observés sur l'échantillon des sept ressourceries étudiées. Cette méthode permet donc d'intégrer les "pertes" d'espace réelles (zones de circulation et vide dans les racks) mesurées lors des visites. Cette approche est analogue aux règles d'établissement des écobilans pour les produits de construction neufs (par exemple pour les EPD selon la norme EN 15804+A2 ou pour la base KBOB) où les infrastructures et bâtiments de production sont inclus au prorata de la production annuelle. Il est à noter que les espaces administratifs sont exclus en concordance avec les écobilans de produits neufs.

À l'échelle d'une ou d'un ensemble de ressourceries, tous produits confondus, l'indicateur d'impact du stockage ($I_{stockage}$) est ainsi calculé pour une unité de volume (1m³) sur une durée donnée, selon la formule suivante :

$$I_{stockage} = \frac{I_{infra,m^2}}{E_{spatiale}} \times D_{stockage} \quad [kgCO_2eq/m^3]$$

Où :

- I_{infra,m^2} : Impact annuel d'un m² d'infrastructure (Source : UVEK).
- $E_{spatiale}$: Efficacité spatiale réelle de la ressourceria en m³/m² (calculé avec la section précédente).
- $D_{stockage}$: Durée de stockage du composant (en années).

Cette approche permet de générer des impacts spécifiques à la typologie "Ressourceria de construction". Il est possible de distinguer les impacts des ressourceries ayant des structures denses



(racks en hauteur, forte efficacité) ou au contraire des structures extensives (stockage au sol, faible efficacité).

À l'échelle d'une catégorie de produit donnée, toutes ressourceries et modes de stockage confondus, l'indicateur d'impact du stockage ($I_{stockage}$) est ainsi calculé pour une unité fonctionnelle de produit (UF) sur une durée donnée, selon la formule suivante :

$$I_{stockage} = I_{infra_m^2} \times D_{spec} \times D_{stockage} \quad [kgCO_2eq/UF]$$

Où :

- $I_{infra_m^2}$: Impact annuel d'un m² d'infrastructure (Source : UVEK).
- D_{spec} : La densité spatiale spécifique d'une catégorie de produits (en m²/UF).
- $D_{stockage}$: Durée de stockage du composant (en années).

Cette approche permet de générer des impacts spécifiques à des catégories de produits, pour estimer avec un faible niveau d'information disponible, les impacts potentiels du stockage de catégories de produits construction ayant des dimensions et des densités différentes.

Les composants en bois recensés dans les ressourceries sont réparties de façon plus détaillé que ce qui a été montré plus haut sous 3.2.

Catégorie	Usage	Inclut
Planchers bois/solivages (C04.01)	Structure horizontale	Poutre, tasseau, carrelet
Charpente bois (C04.04)	Structure toiture	Poutres
Cloisons bois (G01.01)	Cloisons intérieures	Panneau massif 3/5 plis, panneaux 3 plis
Parquet (G02.02)	Revêtement de sol	Parquet
Bardage bois (E02.03)	Façade	Planches
Panneaux structuraux bois	Divers	Panneaux de particules, panneaux massifs bruts, panneaux divers en bois

Tableau 6 : Détail de la classification des éléments en bois

4.2 Écobilan de produits de construction neufs et issus du réemploi

L'objectif de cette partie du projet MAT-LOOP est de :

- Quantifier la variabilité des émissions de GES induites par le réemploi pour des filières et catégories de produit de construction spécifiques
- Comparer ces émissions de GES avec celles de matériaux neufs équivalents

Le périmètre de comparaison couvre la mise à disposition du matériau sur le chantier cible et la fin de vie du produit :

- Pour le neuf : Production (A1-A3) + Transport standard (A4) + Élimination finale (C1-C4)
- Pour le réemploi : Collecte + Logistique + Reconditionnement (assimilé A1-A3) + Transport final (A4 spécifique) + Élimination finale (C1-C4).

En Suisse, la norme SIA 390/1 utilise des valeurs forfaitaires pour le réemploi en phase avant-projet selon la règle « 20 % du neuf » : l'impact d'un produit de réemploi, production et élimination finale (A1-A3 + C1-C4), est égal à l'impact du produit neuf équivalent. L'équivalence est basée sur les

matériaux et non la fonction. Ainsi, on considérera que des volets réemployés auront des impacts différents s'ils sont en aluminium ou en bois, même si les activités de réemploi sont très similaires et indépendantes du matériau.

Cette étude contribue à évaluer le potentiel d'impact des composants identifiés lors du recensement en termes de réemploi, le positionnement de ces impacts par rapport à ceux des produits neufs équivalents en termes de fonction avec des matériaux divers, et les conséquences de la règle « 20 % du neuf » de la SIA 390/1 au regards de ces variabilités.

4.2.1 Approches adoptées dans le calcul d'écobilan du réemploi

Cette section détaille l'approche adoptée pour évaluer les impacts environnementaux des matériaux de construction réemployés, en se basant sur la logistique de réemploi et en intégrant les données spécifiques aux ressourceries.

A la différence des produits neufs, le réemploi permet d'éviter les émissions provenant de l'extraction et de la production des matériaux de construction. Mais il implique des émissions spécifiques à sa chaîne logistique qui doivent être quantifiés. Cette chaîne logistique comprend plusieurs étapes :

- Démantèlement sélectif : Opérations de déconstruction pour récupérer les éléments réemployables.
- Transport : Acheminement des composants du site de déconstruction vers les lieux de stockage/reconditionnement.
- Reconditionnement et modification : Nettoyage, réparation, adaptation (peinture, découpe, traitement de surface) pour préparer le composant à sa nouvelle utilisation.
- Stockage : Entreposage des composants entre deux cycles d'utilisation, souvent dans des ressourceries.

Chaque étape peut comporter des activités ayant des impacts environnementaux. Ces activités sont recensées sur la Figure 14.

Pour l'évaluation des impacts des éléments réemployés, les approches en vigueur dans le cadre normatif suisse de la SIA 2032, SIA 390/1 et des règles d'établissement des écobilans de la base UVEK/KBOB, deux approches sont adoptées :

- Le système de modélisation « cut-off » qui suit le principe pollueur-payeur : les flux et impacts des activités jusqu'au statut de fin de déchet sont alloués à l'utilisateur initiale du produit qui sera recyclé ou réemployé. Par ce principe, l'élimination finale d'un produit réemployé est allouée au dernier utilisateur.
- L'approche des dites des "dépenses additionnelles" ou des "activités réelles" pour les activités de réemploi selon laquelle tous les processus depuis le statut de "fin de déchet" jusqu'au réemploi sont évalués et alloués au nouveau cycle de vie du produit réemployé : démontage, transports (vers le stockage/atelier), stockage, reconditionnement et modifications.

Ces deux approches combinées sont en opposition à un principe « comptable » qui peut être rencontré dans certaines communications environnementales où l'on cherche à répartir les impacts d'un produit (production initiale et élimination finale) entre les différents cycles d'utilisation, parfois au prorata de la durée d'utilisation. Cette approche bien que mathématiquement et théoriquement attrayante ne fonctionne que *a posteriori* car elle suppose que l'on ait la vue d'ensemble des cycles de vies passés pour réaliser une répartition équitable. Le principe de réalité des émissions et des prises de décisions impose que les émissions du passé restent dans le passé, et que les émissions futures ne soient pas associées à un acteur passé qui n'a pas de responsabilité sur le devenir d'un produit qui ne lui appartient plus.

Les hypothèses pour l'analyse de la variabilité des émissions de GES des filières de réemploi sont les suivantes :



- Équivalence fonctionnelle vs matérielle : L'approche principale est l'équivalence matérielle, le nouveau produit substitué ayant la même composition que le produit réemployé. Des ajustements fonctionnels sont appliqués pour des composants clés (ex : faux plancher, panneaux photovoltaïques, fenêtres) pour garantir une comparaison précise des performances.
- Durée de vie : Les produits réemployés se voient attribuer la même durée de vie que leurs équivalents neufs, conformément aux valeurs SIA 2032.
- Impacts de la chaîne logistique : Les émissions de GES liées aux activités de réemploi (démantèlement, transport, stockage, reconditionnement) sont quantifiées (les données ont été issues du travail effectué dans le projet Reuse-LCA [4]).
 - Transport : Les distances réelles de transport et les modes de transport sont utilisés. En l'absence de données, des hypothèses par défaut de la base de données du Protocol UVEK 2022 sont appliquées (ex : 50 km de distance de transport, camion diesel 16-32 t).
 - Activités de reconditionnement : Les activités telles que le nettoyage, la peinture, la découpe ou le traitement de surface sont modélisées individuellement en fonction de la nature des matériaux et des besoins spécifiques.

Les données collectées dans les ressourceries (voir 5.1) permettent de modéliser les impacts environnementaux du stockage (émissions de GES).

4.2.2 Sources de données

Les données et hypothèses sont formulées en s'appuyant sur les pratiques des projets OFEN Reuse-LCA [4] et HES-SO REMCO [6] pour l'évaluation des chaînes logistiques de réemploi. L'apport de l'étude Mat-Loop est d'estimer les variabilités d'émissions de GES du réemploi en fonction des variabilités logistiques observées tels que la distance de transport, la durée de stockage, ou encore l'intensité énergétique et matérielle des activités de reconditionnement.

Les sources de données pour l'analyse de la variabilité des émissions de GES des filières de réemploi sont les suivantes :

- Les données d'ACV des matériaux de construction et des systèmes techniques neufs proviennent principalement des bases de données suisses KBOB 2009/1:2022.
- Pour les données non disponibles dans KBOB, la base de données française INIES (FDES) est utilisée.
- Des données spécifiques aux projets, obtenues directement des partenaires (architectes, entreprises de construction), sont priorisées pour les chaînes logistiques de réemploi.

Les calculs sont effectués en utilisant des tableurs numériques (Excel) pour structurer, normaliser et agréger les données. Certaines analyses statistiques sont réalisées à l'aide de bibliothèques Python comme Numpy.

4.2.3 Méthodologie pour le calcul de variabilité et d'incertitude

Notre étude réunit les résultats d'écobilan des composants et processus spécifiques de réemploi issues des calculs détaillés des projets HES-SO REMCO [6] et OFEN Reuse-LCA [4]. L'évaluation d'échantillon de données d'impacts potentiels permet de prendre en compte la variabilité contextuelle des chaînes logistiques du réemploi. Pour chaque catégorie de produits, il existe également une variabilité de produits neufs possibles avec des matériaux, des dimensions ou densités différentes pour une même fonction remplie. Une plage de valeurs d'impacts est déterminée dans la mesure du possible à partir des valeurs de la KBOB et de fiches EPD identifiées.

Les calculs de variabilité des émissions de GES ont été réalisés comme suit :

$$I_{réduction\ potentielle}^{Max} = I_{équivalent\ neuf}^{Max} - I_{Réemploi}^{Min}$$

$$I_{réduction\ potentielle}^{Min} = I_{équivalent\ neuf}^{Min} - I_{Réemploi}^{Max}$$

Avec $I_{réduction\ potentielle}^{Max}$ et $I_{réduction\ potentielle}^{Min}$: la réduction d'impact potentiel maximale, respectivement minimale, en comparant le réemploi par rapport au neuf. Une valeur négative signifie que le réemploi a un impact plus élevé que le neuf dans la comparaison.

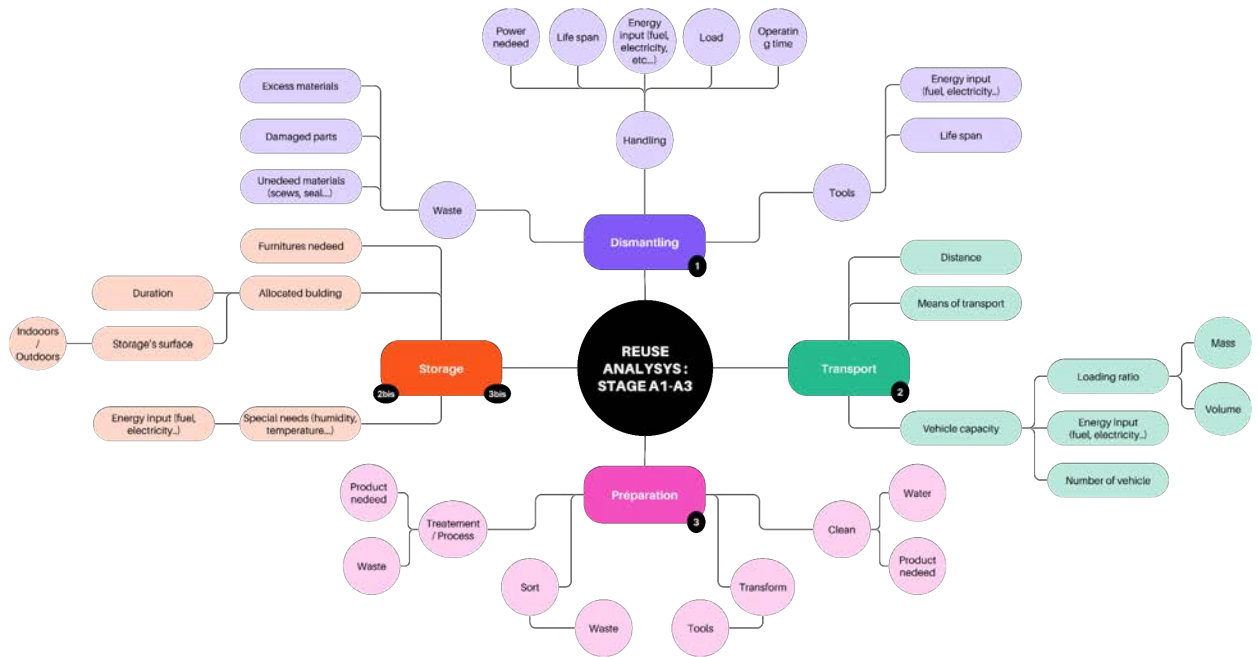


Figure 14 : Cartographie des activités logistiques du réemploi générant des impacts environnementaux

4.3 Évaluation multicritère des composants

Les 39 composants recensés dans les inventaires de chantiers ou dans les ressourceries ont été évalués selon une matrice d'analyse multicritères. Cette analyse permet d'évaluer le potentiel des composants et de dégager ceux qui présentent la meilleure aptitude au réemploi

4.3.1 Critères d'analyse et notation

La recherche sur le réemploi s'est en général focalisée directement sur un aspect ou un critère de sélection unique (en général les opportunités et méthodes de remise en œuvre), sans aborder la question sous un prisme multicritère, mêlant les aspects techniques, logistiques, environnementaux, etc. Cette approche unilatérale est certes utile mais ne permet pas une pesée objective des intérêts par rapport au réemploi d'un composant ou d'un autre. Ce n'est pas parce qu'un composant présente des facilités de remise en œuvre ou un potentiel de réduction de l'empreinte environnementale élevé qu'il est forcément le meilleur candidat pour du réemploi. Il suffit par exemple que le gisement ou le débouché soient trop limités pour que cela devienne une fausse bonne idée.

Le projet MAT-LOOP propose donc une approche holistique, tenant compte de nombreux critères d'évaluation qui se traduisent par 3 niveaux d'analyse. Dans l'approche bottom-up qui a été retenue pour l'analyse c'est-à-dire de la base vers le sommet, le niveau « micro » comprend 28 critères d'analyse pour chaque composant. Ils se consolident en 10 méso-critères, que se regroupent à leur tour à un niveau macro en 5 critères, comme illustré sur le tableau ci-dessous.



Niveau Micro	Niveau Meso	Niveau Macro
Taille du gisement	Gisement	Marché
Accessibilité du gisement		
Taille des lots		
Taille du débouché	Débouché	
Obsolescence du composant		
Filières existante/concurrentes		
Standardisation	Caractéristiques physiques	Mise en oeuvre
Adaptabilité		
Détournement		
Fiabilité (tests)		
Usure / fatigue		
Pollution		
Démontage sélectif	Logistique	
Manutention et transport		
Nettoyage		
Stockage		
Remontage		
Poids CO2 vs neuf	CO2 absolu	
Poids CO2 vs total chantier	CO2 relatif	
Coût vs neuf	Coûts et garanties	Économie
Garanties		
Impact phase étude	Études et planning	
Impact planning chantier source		
Impact planning chantier cible		
Acceptabilité	Attrait	Socio-culturel
Esthétique		
Sous-utilisation	Exemplarité	
Image de marque		

Article II.

Tableau 7 : Niveaux et critères d'évaluation des composants

4.3.2 Notation

Un système de notation simple de -2 à +2 a été choisi pour qualifier chaque entrée de la matrice au niveau « micro » des critères d'évaluation. Chacune des 5 possibilités de notation fait l'objet d'une explication pour chaque micro-critère (voir annexe). La note est attribuée en fonction de l'expérience des partenaires, des retours de terrain, des inventaires et des comparaisons effectuées entre impacts environnementaux des composants en réemploi et à neuf (voir chapitre résultats).

Une note éliminatoire (ou de -20) peut aussi être attribuée si un composant présente une caractéristique qui exclut pratiquement son réemploi, malgré sa présence récurrente dans les inventaires. Cette caractéristique éliminatoire qui aura été repérée au cours de l'analyse. Dans un second temps chaque partenaire du projet a effectué le travail de notation de son côté et les notes ont été confrontées et les écarts répertoriés puis discuté pour atteindre un consensus. La matrice complète est disponible sous format Excel en annexe de ce rapport

La méthode permet d'obtenir pour chaque composant une notation consolidée au niveau des méso et macro-critères, ce qui permet d'établir une « signature réemploi » pour chaque composant qui met en évidence les enjeux qui lui sont propres. Cet aperçu est également disponible sous forme de graphique.

La décision a été prise de ne pas appliquer de pondérations aux différents critères, ce qui aurait engendré plus de complexité dans une matrice déjà très dense et multiplié le risque d'arbitraire, le but n'étant pas d'obtenir un système « automatisé » mais d'aider à définir des orientations pour identifier les filières à développer. Des tests de plausibilité ont été menés en introduisant des pondérations qui ont par ailleurs montré qu'elles avaient tendance à lisser les résultats et par conséquent à ne pas permettre de démarquer certains composants par rapport aux autres.

La matrice de notation des composants au niveau méso (résultant des notes attribuées au niveau des 28 critères du niveau micro disponible en annexe) est exposée ci-dessous :



Critères niveau macro		MARCHE		MISE EN ŒUVRE		ENVIRONNEMENT		ECONOMIE		SOCIO-CULTUREL			
Critères niveau méso		Gisements	Débouchés	Caractéristiques physiques	Logistique	CO2 Absolu	CO2 Relatif	Coûts et garanties	Etudes & planning	Esthétique/acceptabilité	Exemplarité		
Lot	e-CCC-Bat												
2	C Gros œuvre	Structures horizontales et verticales		0,4	0,7	0,4	-0,5	1,8	1,1	-0,8	-0,1	0,9	0,5
	C02.01/02 Paroi porteuses	Mur béton armé	0,7	1,0	0,0	-0,6	2,0	2,0	-1,0	-1,0	1,0	0,5	
	C02.01/02 Paroi porteuses	Maçonnerie brique TC ou ciment	1,3	0,0	1,2	-3,8	2,0	2,0	-1,0	0,7	0,5	0,5	
	C03.02 Piliers intérieurs	Poteaux béton armé	0,3	0,3	0,3	-0,6	2,0	0,0	-1,0	-0,7	0,5	0,5	
	C04.01 Planchers	Dalle plancher béton armé	0,7	1,0	0,2	-0,8	2,0	2,0	-1,0	-1,0	1,0	0,5	
	C04.01 Planchers	Planchers bois / solivages	0,7	1,7	0,8	0,6	1,0	0,0	-0,5	0,7	0,5	0,0	
	C04.02 Escaliers intérieurs	Escaliers en béton préfabriqué	-0,3	0,0	-0,2	-0,4	2,0	1,0	-1,0	-0,7	1,0	0,5	
	C04.02 Escaliers intérieurs	Escaliers en bois / métal	-1,3	0,3	0,0	0,6	2,0	0,0	0,0	0,3	1,0	0,5	
	C04.04 Structures porteuses de toitures plates	Dalle toiture Béton armé	0,3	1,0	-0,2	-1,2	2,0	2,0	-1,0	-1,0	1,0	0,5	
	C04.04 Structures porteuses de toitures inclinées	Charpente bois	1,0	1,3	1,0	0,8	1,0	0,0	-0,5	1,0	1,0	0,5	
	C04.04 Structures porteuses de toitures inclinées	Charpente métallique	0,7	0,3	1,0	0,8	2,0	2,0	-0,5	1,0	1,0	1,0	
3	E Revêtements de façade / F Toitures	Enveloppe du bâtiment		1,0	-0,1	0,5	0,4	1,8	0,3	0,1	0,7	0,4	0,6
	E02.02 Systèmes d'isolation thermique extérieure	Isolants synthétique et minéraux	1,7	0,7	0,5	-4,2	2,0	1,0	-1,0	0,7	0,0	0,0	
	E02.03 Bardages	Bardage bois	0,3	1,0	1,0	0,8	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,5	
	E02.03 Bardages	Bardage métallique	1,3	1,0	1,0	1,0	2,0	1,0	-0,5	0,7	0,0	1,0	
	E02.03 Bardages	Parements béton préfa	0,3	0,0	-1,0	-0,8	2,0	2,0	-2,0	-1,3	0,0	1,0	
	E02.03 Bardages	Briques de parement	1,0	1,0	1,7	0,2	2,0	-1,0	-0,5	0,7	1,0	1,0	
	E02.04 Façades légères	Façade rideau métallique	1,3	-7,3	-0,8	0,6	2,0	2,0	-1,0	-0,7	-0,5	1,0	
	E02.06 Dispositif anti chute	Garde-corps métalliques	0,7	0,3	0,5	0,8	2,0	0,0	1,5	1,3	1,0	0,5	
	E03.01 Fenêtres	Fenêtres bois / PVC / métal	2,0	0,0	-0,3	0,4	2,0	2,0	-1,0	-0,7	0,0	0,5	
	E03.04 Protection contre le soleil / intempéries	Volets bois / alu	1,7	0,0	-0,2	1,2	2,0	-1,0	1,0	1,7	1,0	1,0	
	F01.02 Couverture toitures plates	Gravier lestage toits plats	1,3	1,0	2,0	1,8	1,0	-1,0	2,0	2,0	1,0	0,0	
	F01.03 Couverture toitures inclinées	Tuiles TC	1,3	0,3	1,2	1,4	2,0	0,0	1,5	1,3	1,0	1,0	
		0 Grilles caillebotis	-0,7	0,3	0,3	1,6	2,0	-1,0	1,0	1,3	0,5	0,0	
4	G Aménagements intérieurs	Aménagements intérieurs fixes		1,0	0,6	0,6	0,3	1,6	-0,2	0,5	1,1	0,6	0,5
	G01.01 Cloisons	Cloisons brique TC	0,7	0,7	1,3	-3,6	2,0	1,0	-0,5	0,3	0,5	0,0	
	G01.01 Cloisons	Cloisons bois	-0,7	-0,3	0,7	0,4	1,0	-1,0	0,5	0,7	1,0	0,5	
	G01.01 Cloisons	Cloisons verre	0,7	0,7	0,3	1,0	2,0	0,0	1,0	1,0	0,5	0,5	
	G01.05 Portes intérieures pour personnes	Portes (hors portes palières)	2,0	-0,3	0,3	1,2	1,0	-1,0	1,0	1,7	0,5	0,5	
	G02.02 Revêtements de sol	Parquet	0,7	1,3	0,8	1,2	1,0	0,0	0,5	1,7	1,5	1,0	
	G02.02 Revêtements de sol	Carrelage / Terrazzo	1,3	1,7	0,3	0,2	2,0	0,0	-0,5	0,7	1,0	1,0	
	G02.02 Revêtements de sol	Faux-planchers techniques	0,3	1,7	1,3	1,4	2,0	1,0	2,0	2,0	1,0	0,5	
	G04.02 Faux plafonds	Faux-plafonds (métal, bois)	2,0	0,7	1,0	0,6	2,0	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	
	G05.01 Placards, étagères, tablettes	Placards, étagères	1,7	0,0	-0,2	0,6	1,0	-2,0	0,0	1,0	0,0	0,0	
	G05.02 Agencements de cuisines	Agencement cuisines	1,7	0,3	0,3	0,4	2,0	-1,0	0,0	1,0	-1,0	0,5	
5	D Installations	Installation techniques		1,1	0,2	0,5	1,0	2,0	0,1	-0,1	1,4	0,1	0,5
	D01.01 Production de courant fort et de chaleur	Panneaux solaires (PV + Th)	0,3	1,0	0,5	1,4	2,0	1,0	-1,0	2,0	0,5	1,0	
	D01.04 Installations à courant fort	Chemins de câbles, racks...	1,3	0,3	1,0	1,2	2,0	0,0	0,5	1,3	0,5	0,0	
	D01.05 Récepteurs courant fort	Luminaires	2,0	0,7	0,2	0,8	2,0	-1,0	1,0	1,7	0,0	1,0	
	D05.05 Emission de chaleur	Radiateurs	2,0	-1,0	0,8	1,2	2,0	0,0	0,0	2,0	-0,5	0,5	
	D07.04 Distribution d'air	Gaines ventilation	1,0	0,0	0,7	0,2	2,0	1,0	0,0	-0,3	0,5	0,5	
	D08.05 Eau: robinetterie, appareils	Appareils sanitaires	1,7	0,7	0,8	1,0	2,0	0,0	0,5	1,7	-0,5	0,5	
	DT2.01 Ascenseurs	Ascenseur	-0,3	0,0	-0,7	1,2	2,0	0,0	-1,5	1,3	0,0	0,0	
	I Aménagements extérieurs	Aménagements extérieurs											
	I04.02 Garnitures et bordures pour surfaces en dur	Pavés, dalettes, bordures, cunettes	1,7	1,7	1,5	1,6	2,0	0,0	1,5	1,7	1,0	1,0	

Tableau 8 : Notation multicritère des composants au niveau méso

5 Résultats

Ce chapitre résume les résultats finaux issus des développements effectués et décrits dans le chapitre précédent. Il est divisé en cinq parties :

1. Signatures-composant
2. Scores environnementaux des composants en réemploi vs neuf
3. Résultats des analyses des ressourceries
4. Recommandations pour la logistique du réemploi de composants sélectionnés et pour l'adaptation des processus de planification
5. Outil d'aide à la décision

5.1 Analyse des signatures-composant

Les notes attribuées à chaque composant permettent de dresser sa « signature réemploi », qui peut être représentée sous la forme de graphiques synthétique. Le niveau de représentation le plus adéquat est au niveau méso. Cette méthode à l'avantage de ne pas réduire l'analyse à une note moyenne, qui ne permettrait pas de distinguer les composants présentant de forts écarts de notation entre différent méso-critères et ceux dont les notes se situent systématiquement au niveau de la moyenne.

Cette analyse multidimensionnelle des composants permet par exemple d'identifier ceux qui présentent un fort potentiel de réduction des GES en cas de réemploi et d'une demande soutenue à Genève (en particulier pour construire des dallages d'aménagements extérieurs) mais qui souffrent en parallèle de certains handicaps logistiques et de gisements limités relativement à d'autres composants, à l'instar des éléments structurels en béton armé. Inversement les appareils sanitaires bénéficient de gisements importants, d'une mise en œuvre et d'une logistique simple, mais souffrent d'une acceptabilité limitée et d'un impact limité sur la réduction des émissions de CO₂ de leur lot technique (installations) pris dans sa globalité.

La traduction graphique de cette signature-composant prend la forme ci-dessous.

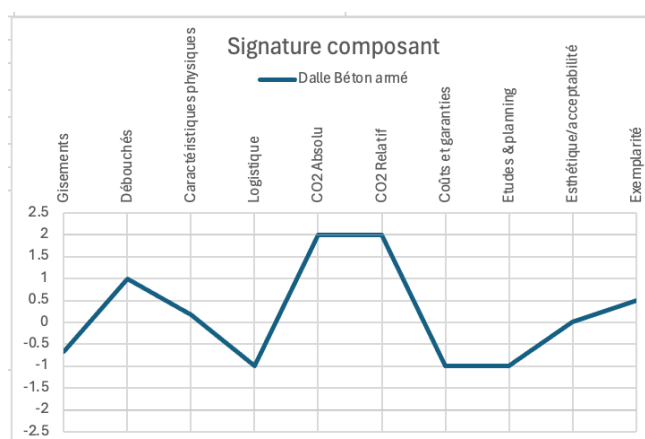


Figure 15 : Exemple de signature composant

L'identification des composants présentant le meilleur potentiel de réemploi a été effectuée en confrontant les signatures des composants avec des limites définies pour chacun des méso-critère.

Les limites ont été définies de manière restrictive lorsque des recommandations n'auraient que peu ou pas d'impact (critères de marché et d'impact environnemental du composant) et de façon plus large lorsque les recommandations sont susceptibles de faire évoluer la situation et influencer sur la notation du



composant (critères mise en œuvre, coût, perceptions socio-culturelle). Ces critères sont en effet ceux sur lesquels les recommandations offrent un volant de manœuvre.

Plus simplement, un composant pour lequel le marché est très défavorable ne saurait être un candidat pour construire une filière, même si son impact CO₂ est élevé et si sa mise en œuvre est simple. A contrario, un composant disponible et demandé, mais qui présente une logistique complexe et/ou des coûts élevés est un candidat dans le sens où les recommandations ont justement pour objectif de trouver des réponses permettant de réduire les coûts de mise en œuvre. La signature du composant confrontée aux limites permet d'évaluer son potentiel et de déterminer les composants à haut potentiel.

Les limites définies pour la classification des composants et l'identification de ceux présentant le plus haut potentiel sont indiquées sur la Figure 16.

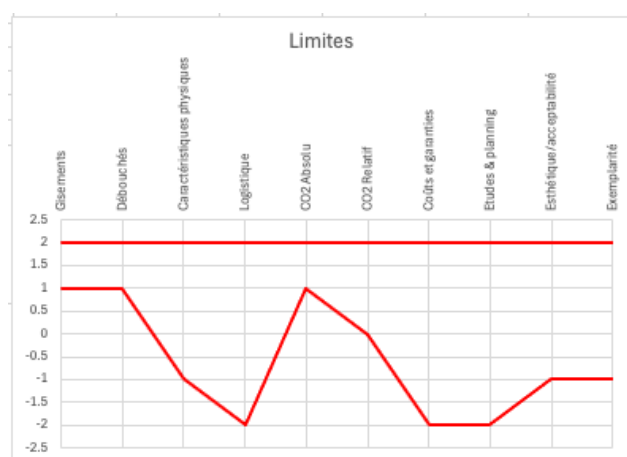


Figure 16 : Limites définies pour la classification des composants

Figure 7 : limites définies pour chaque critère

L'analyse des signatures (disponibles en annexe) a permis de répartir les composants en trois familles représentatives de leur potentiel de réemploi :

Catégorie A : composants très favorables au réemploi (100% dans les limites)

Charpente bois	Carrelage
Bardage métallique	Appareils sanitaires

Catégorie B : composants favorables au réemploi (dérogant dans une faible mesure à un critère)

Mur béton armé	Garde-corps métallique	Faux plafond
Pilier béton armé	Fenêtre Bois-PVC-métal	Panneaux solaires PV-TH
Dalle plancher béton armé	Gravier lestage	Chemin de câbles – rack
Plancher – solivage bois	Tuiles terre cuite	Luminaires
Dalle toiture béton armé	Cloison verre	Gaines ventilation
Charpente métallique	Parquet	
Bardage bois	Faux plancher technique	

Catégorie C : composants moyennement ou peu favorables au réemploi (dérogant fortement à un critère ou dérogant à plusieurs critères)

Maçonnerie brique TC
Escalier béton préfabriqué
Escalier bois – métal
Isolants synthétiques et minéraux
Parements béton préfabriqué

Briques de parement
Façade rideau métallique
Volets bois – alu
Grille caillebotis
Cloisons brique terre cuite
Cloison bois
Portes

Placards – étagères
Agencement cuisine
Radiateurs
Ascenseurs



Les composants de la catégorie C, ainsi que certains composants pour lesquels des filières existent déjà ou sont déjà documentées, comme les éléments de charpente bois ou métallique ou les appareils sanitaires pour le lot structure par exemple, ont été écartés en vue de l'établissement de recommandations.

Il a ensuite été décidé de sélectionner parmi les composants restants un élément par lot LCI et de développer des recommandations pour la mise en œuvre de son réemploi (voir annexes). Il s'agit de :

- Béton armé à usage structurel pour le lot « structure horizontale et verticale » - catégorie B
- Bardage et tôle de couverture métalliques pour le lot « enveloppe » - catégorie A
- Éléments de faux plancher technique pour le lot « aménagements intérieurs » - catégorie B
- Panneaux solaires thermiques pour le lot « éléments techniques » - catégorie B

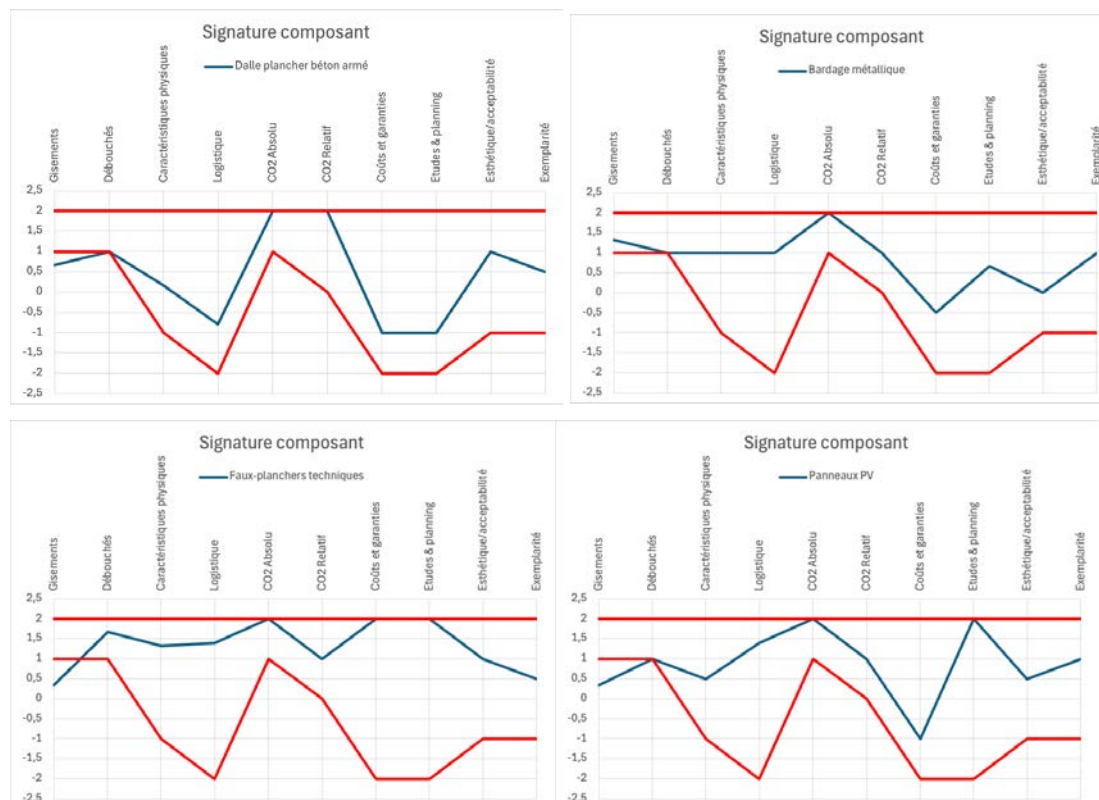


Figure 17 : Signatures composants et limites pour les quatre composants sélectionnés

5.2 Résultat des analyses des ressourceries

5.2.1 Caractéristiques et potentiel des infrastructures

L'analyse des locaux des ressourceries (Fig. 18 a et b) révèle une grande hétérogénéité des infrastructures, allant de petits espaces contraints (à partir de 100 m²) à de vastes halles industrielles (> 800 m²). Le facteur le plus déterminant pour la capacité de stockage s'avère être la hauteur sous plafond. On observe une corrélation directe entre la hauteur disponible et l'équipement logistique (Fig. 18 b et c). Les sites disposant de hauteurs supérieures à 4.0 m (par ex: La Ressourcerie, Matériuum, Bazar Sans Frontières) ont pu installer des racks à palettes sur plusieurs niveaux, maximisant ainsi leur volume utile par m² dédié au stockage. Ainsi, La Ressourcerie (Fribourg) surperforme avec 3.5 m³ stockables par m² au sol, grâce à une forte rationalisation verticale. À l'inverse, les sites contraints par des hauteurs ≤ 3.0 m, sont limités à un stockage au sol ou sur étagères basses, ce qui plafonne leur densité théorique. Les modes de stockage peuvent également être contraints par les types de produits stockés qui ne peuvent pas être amenés sur étagères comme les cuisines dans le cas de ProMaison (voir les sections suivantes).

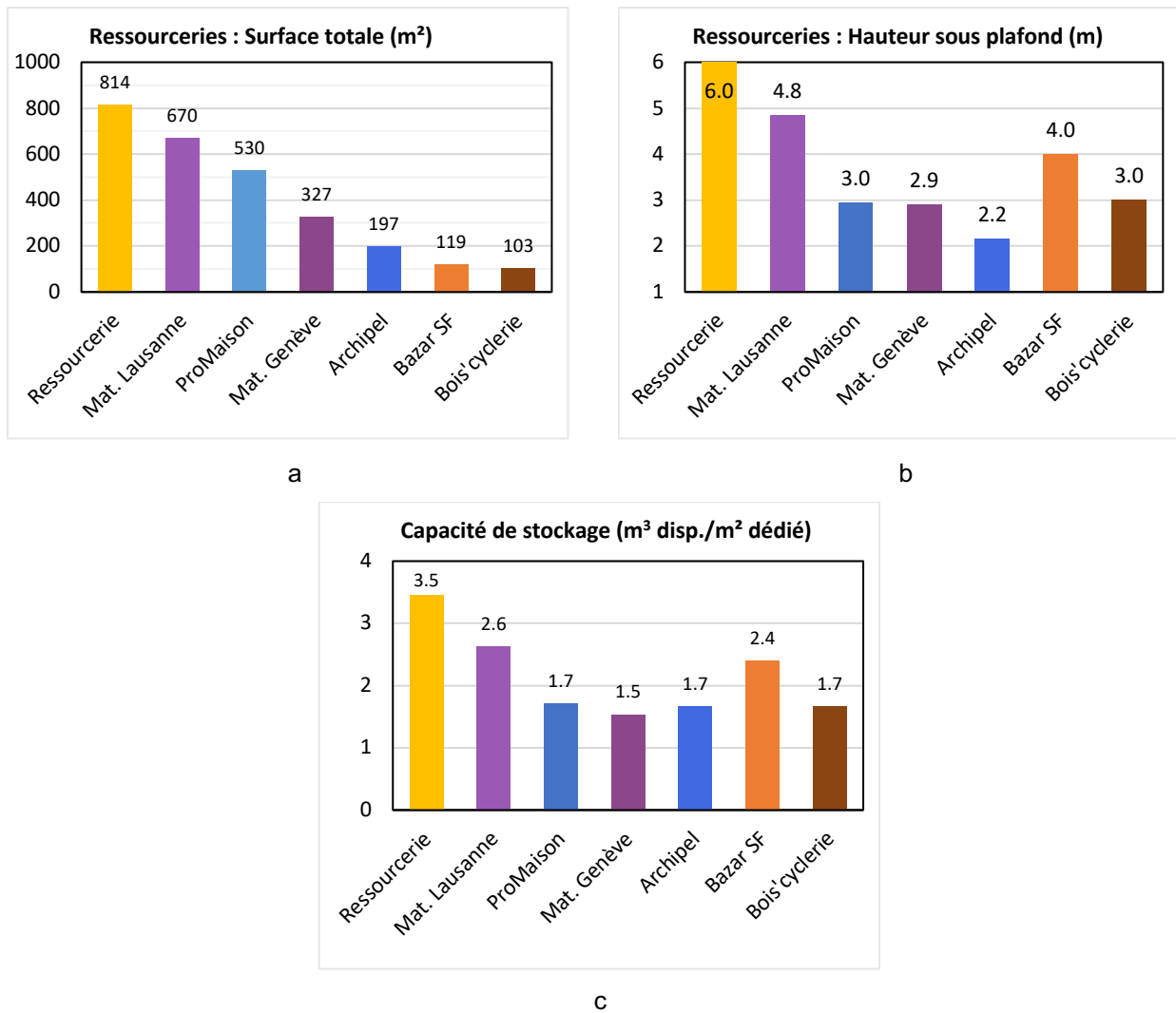
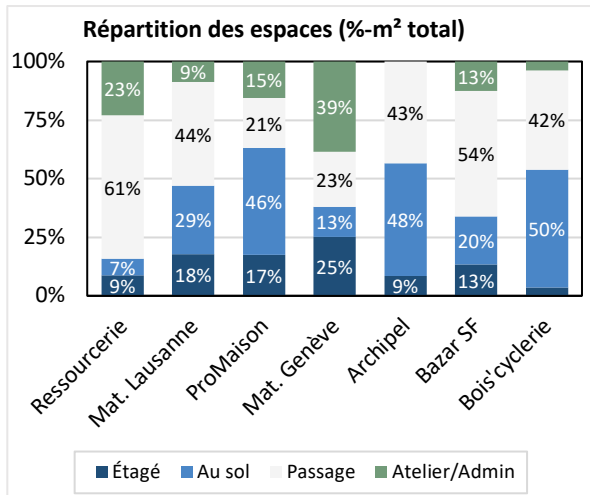


Figure 18 : Caractéristiques dimensionnelles des lieux. (a) Surface au sol totale exploitée pour le Stockage, le passage, les ateliers et l'administratif, (b) Hauteur sous plafond moyenne, et (c) Capacité de stockage par m² dédié.

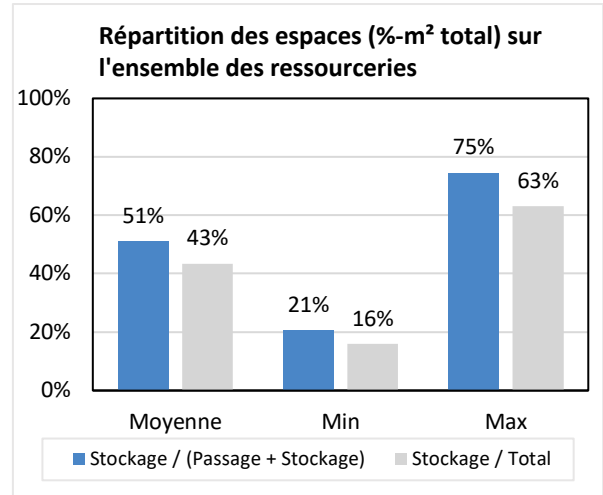
5.2.2 Allocation des surfaces et usages réels

L'efficacité d'une ressource dépend de l'arbitrage entre l'espace consommé pour le stockage et l'espace nécessaire à la logistique (passages, manutention). Les espaces d'ateliers et d'administratifs sont également considérés à titre indicatif, bien qu'exclus de l'évaluation environnementale. L'analyse de la répartition des espaces (Figure 19 a et b) révèle une répartition moyenne de 49 % pour le stockage contre 51% pour les zones de passage. Ce ratio 1:1 s'écarte des standards logistiques optimaux recommandés par le guide "Entreposage et gestion des stocks physiques" de Cluster Logistique qui est un taux optimal de 70 % de surface de stockage et 30 % de surface de passage. Ces différences pourraient s'expliquer par une forte hétérogénéité des matériaux de construction, l'usage de locaux souvent inadaptés aux flux logistiques standardisés, ou simplement des flux de matériaux qui ne sont pas suffisamment intenses pour nécessiter une optimisation des espaces.

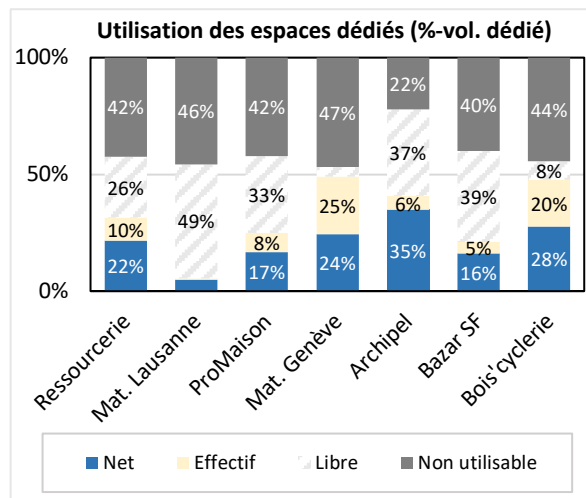
Cependant, l'analyse des volumes associés aux surfaces de stockage (Fig. 19 c) nuance ce constat : certaines structures affichent une part importante de "volume non utilisable" (autour de 45 %) dans les espaces dédiés au stockage. Cela indique un potentiel gisement d'optimisation spatiale sans changement de bâti.



a



b



c

Figure 19 : Allocation spatiale. (a) Répartition des surfaces au sol entre stockage, passage et administration. (b) Taux d'utilisation du volume théorique du bâtiment. (c) Utilisation des espaces dédiés au stockage en % de volume.

5.2.3 Analyse de la composition des stocks

Au-delà des capacités de stockage, la nature des matériaux disponibles a été quantifiée pour identifier les gisements effectifs du réemploi.

L'analyse croisée des volumes nets (Fig. 20 a) et de l'étendue de l'offre de catégories de produits (Figure 20b) montre une forte disparité entre les acteurs. On distingue deux typologies :

- Les spécialistes : Comme ProMaison (Sanitaire) ou Bois'Cyclerie (Bois), qui concentrent de leurs volumes sur une famille de matériaux spécifique.
- Les généralistes : Comme La Ressourcerie, Matériuum Genève ou l'Archipel, qui proposent un catalogue diversifié couvrant de 10 à 15 catégories de produits de construction.

Il est à noter que pour certaines structures généralistes, une part significative du stock (jusqu'à 50%) est constituée de biens hors-construction (mobilier, électroménager, textile), ce qui influence leur logistique mais n'est pas comptabilisé dans les gisements de matériaux de construction de cette étude.

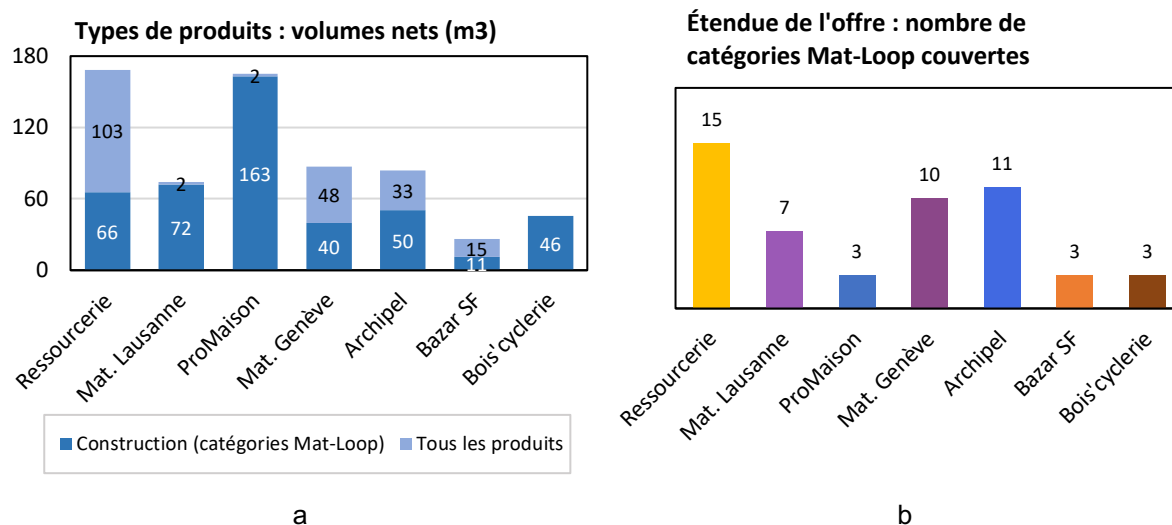


Figure 20 : Caractérisation des stocks de matériaux de construction. (a) Volumes nets stockés par ressourcerie, distinguant les matériaux de construction (bleu foncé) des autres produits. (b) Étendue de l'offre : nombre de catégories Mat-Loop couvertes par site.

La ventilation du stock global par lots architecturaux (Fig. 21) révèle une prédominance des éléments de Second-œuvre et d'Enveloppe (49% du volume cumulé) et du Gros-œuvre (24%).

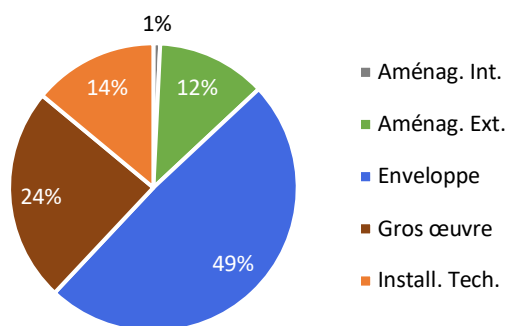
Les lots techniques sont moins représentés en volume, à l'exception notable des appareils sanitaires. Cette répartition s'explique par la facilité de démontage et de stockage des éléments de second-œuvre (portes, planchers) comparée à la complexité logistique des éléments techniques ou structurels lourds.

L'analyse fine par catégorie de composant (Figure 22) met davantage en évidence les spécialisations, les opportunités ou la diversité des stocks. On distingue aussi les éléments les plus récurrents. Les éléments en bois (planchers, solivages, panneaux, parquet) constituent des parts importantes des stocks de plusieurs ressourceries (La Ressourcerie, l'Archipel, Matériuum Genève, Bazar SF et Bois'Cyclerie). Les profilés métalliques sont présents en quantités importantes à Matériuum Genève et à La Ressourcerie. Matériuum Lausanne se caractérise par des quantités importantes de menuiseries (portes et fenêtres). Enfin, ProMaison se distingue par les stocks les plus importants et une spécialisation exclusive sur les cuisines et les appareils sanitaires.



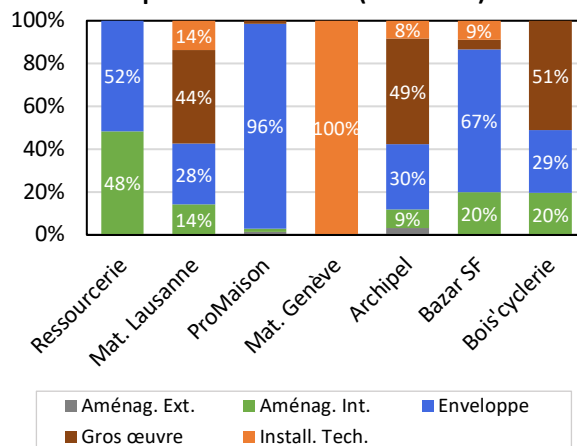
Un biais existe dans cette classification par volume de produit puisque tous les éléments d'un bâtiment ont leur importance avec des densités, des tailles et des masses différentes. Un bâtiment a toujours besoin d'un WC et d'une cuisine mais ces éléments ont des volumes unitaires très différents. La quantification en volumes peut donc favoriser les éléments de grandes tailles, mais c'est une unité qui semble adaptée pour évaluer des notions de stockage et d'espaces dans le cadre des ressourceries. Cette question des unités utilisées de leur biais pour quantifier les flux de réemploi a aussi été soulevée par Gobbo et al. 2024 [13] dans leur étude européenne.

Ensemble des produits de construction (%-vol. net stocké)



a

Composition des stocks (%-vol. net)



b

Figure 21 : Répartition des stocks par lots de construction (a) Ensemble des produits sur toutes les ressourceries étudiées (b) Composition des stocks par ressourcerie.

Répartition par catégorie de produit de construction (m³ net)

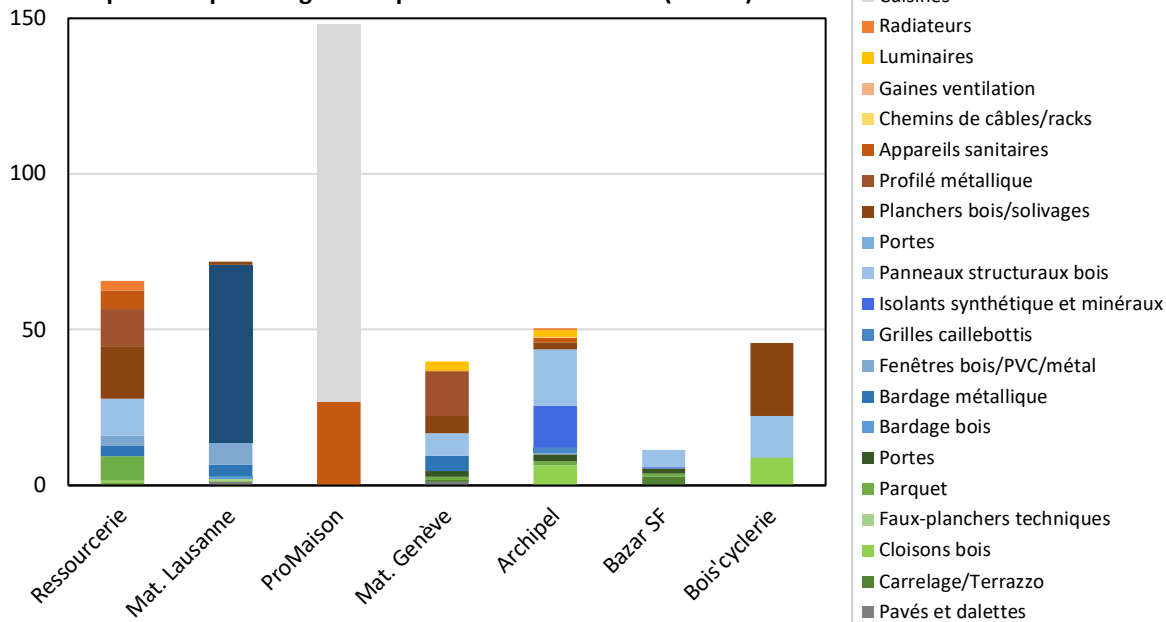


Figure 22 : Répartition des stocks par catégorie de produit et par ressourcerie.

5.2.4 Performance logistique : densité et remplissage

Les indicateurs de performance définis plus haut permettent de comparer l'efficacité réelle des sites :

- Taux de remplissage effectif ($T_{remplissage}$) : Il est intéressant de noter que ce taux varie considérablement (de 17% à 93%). Un taux faible (ex: Matériuum Lausanne) peut indiquer une phase de démarrage ou une rotation rapide des stocks, tandis qu'un taux saturé (ex: Matériuum Genève) signale un besoin important d'expansion ou de demande de leurs produits.
- Efficacité spatiale ($E_{spatiale}$ en m^3 net / m^3 effectif) : Cet indicateur traduit la "compacité" du rangement. Des valeurs élevées ($> 0,8$) montrent une bonne adéquation entre la forme du produit et son support de stockage avec peu de perte d'espace au sein d'une étagère ou sur une palette par exemple.
- Intensité spatiale du stockage ($I_{spatiale}$) : Cet indicateur peut varier du « simple au double » entre les ressourceries, de 0.8 à 2.0 m^2/m^3 net en considérant les espaces de stockage et de passage, et du « simple au triple » (de 0.9 à 3.4 m^2/m^3 net) avec la totalité des espaces. Les raisons de ces variations combinent les facteurs observés : taux de remplissage, compacité, aménagement des lieux, etc.

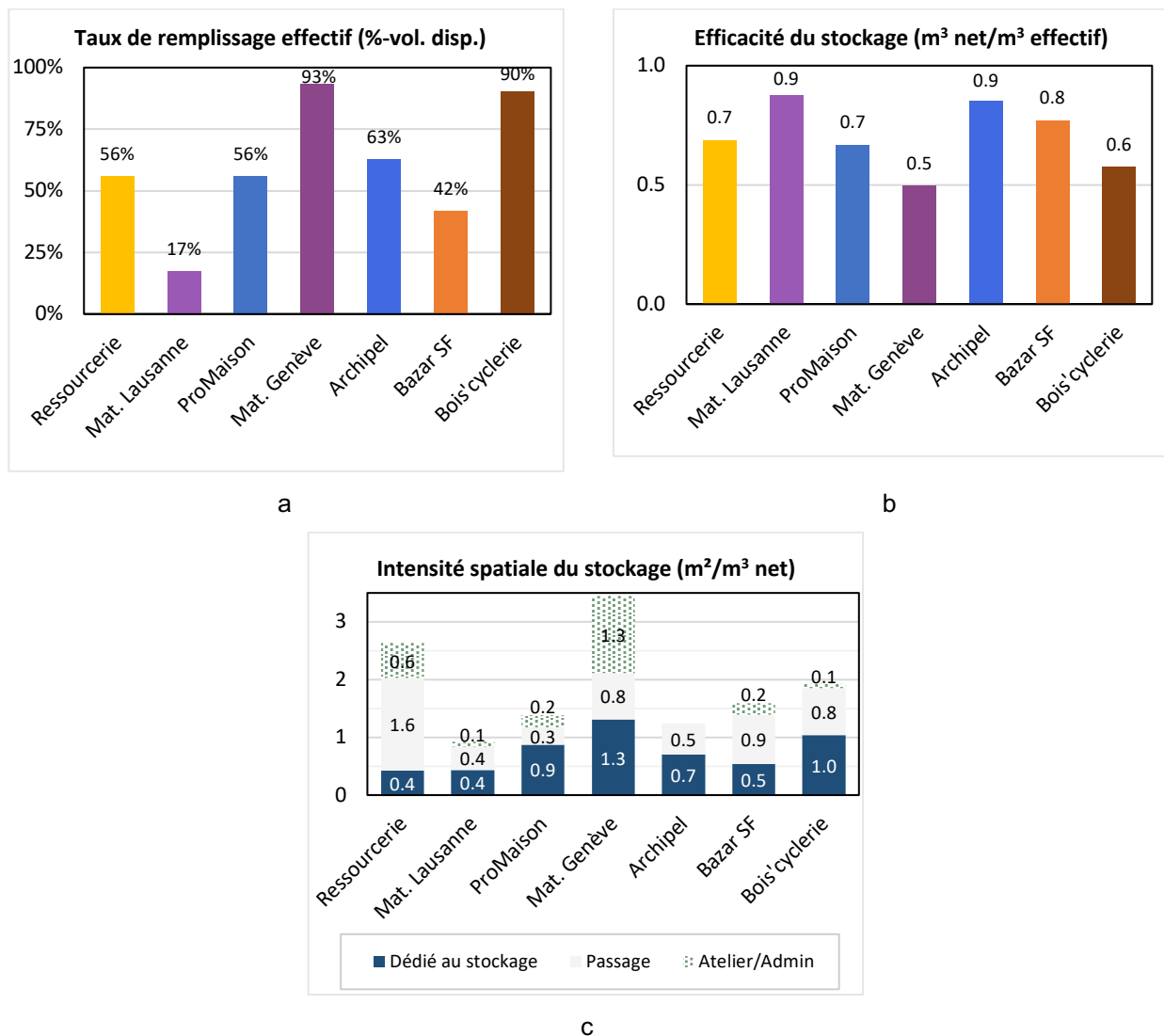


Figure 23 : Indicateurs de performance logistique. (a) Taux de remplissage effectif des ressourceries en % de volume stockable. (b) Efficacité du stockage. (c) Intensité spatiale du stockage.



5.2.5 Intensité spatiale spécifique par catégorie de produit

L'intensité spatiale spécifique à chaque catégorie de produit (I_{spec}) a été déterminée pour les ressourceries où la catégorie de produit étaient présente. Cet indicateur rapporte le nombre de mètre carré dédié au Stockage (hors espaces de passage) par Unité Fonctionnelle (UF) de produit stocké. La Figure 24 présente en trait bleu l'intensité spatiale moyenne pour chaque catégorie de produit et son UF propre. La barre foncée représente l'intensité spatiale minimale observée dans l'échantillon, et la barre claire l'intensité spatiale maximale. Cette classification montre une variabilité de l'espace de stockage utilisé par catégorie de produit qui s'explique par la variabilité des modes de stockage (au sol ou sur étagère), des agencements de lieu, des taux de remplissage et de la compacité.

**Espace dédié au stockage des matériaux de construction
Plages d'impact (min-max) et valeurs moyennes**

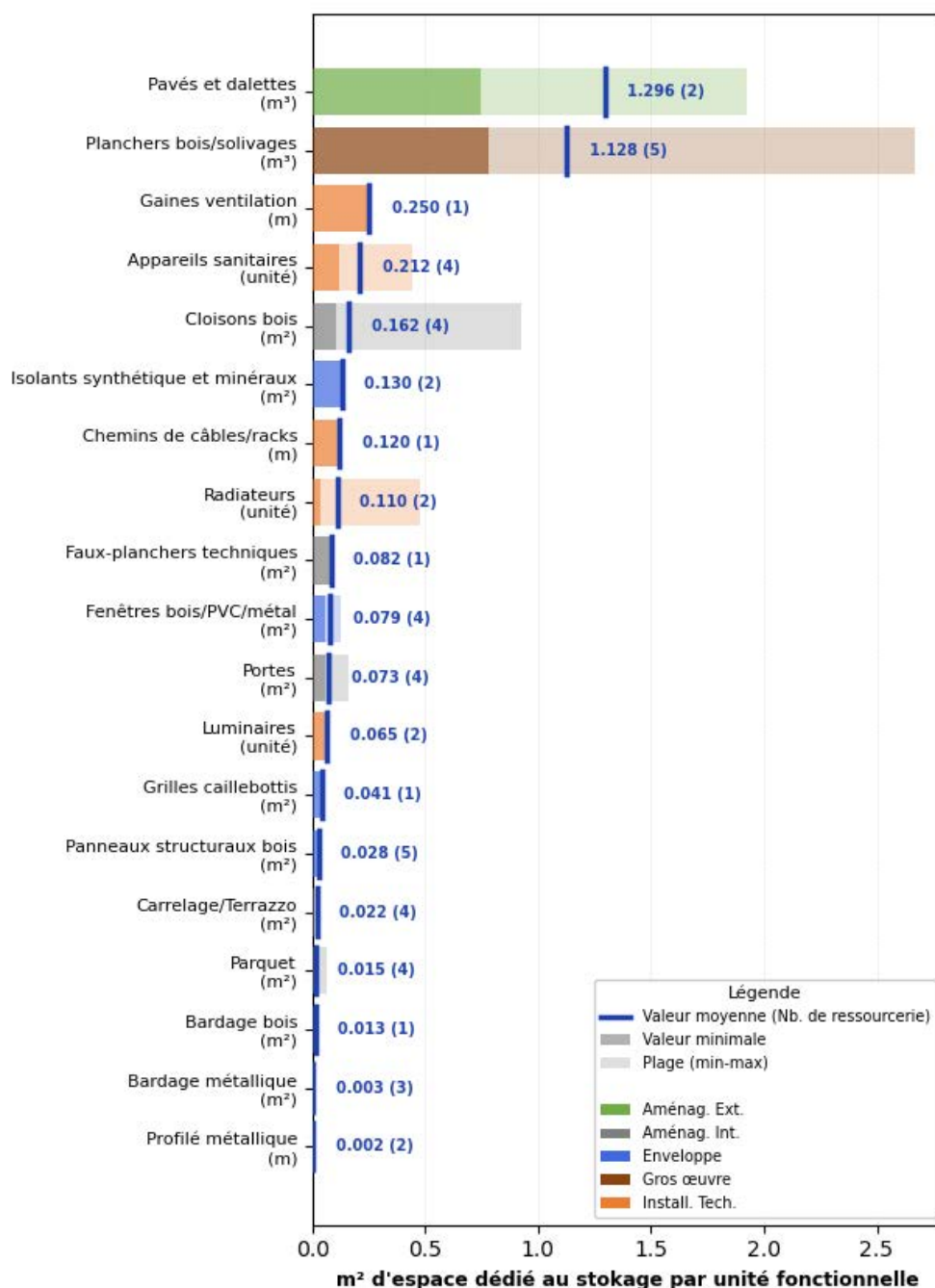


Figure 24 : Intensité spatiale de stockage spécifique par catégorie de produit au sein des ressourceries

5.2.6 Impacts environnementaux du stockage

Par ressourcerie et par m³ net de produit

Les impacts environnementaux sont calculés pour chaque ressourcerie à partir de leur intensité spatiale moyenne $I_{spatiale}$ en comptant les surfaces de stockage et de passage (ateliers et administratifs exclus). Ces espaces sont associés à la donnée d'écobilan générique d'un espace de hangar ou d'un espace extérieur selon la répartition au sein de la ressourcerie. Les impacts sont exprimés par m³ net stocké pendant un mois et présentés dans la Figure 25. On peut observer que les impacts varient d'un facteur 2 à 6 selon le type d'indicateur. En ce qui concerne les émissions de GES, l'impact du stockage varie d'un facteur 2 (de 0.6 à 1.1 kg CO₂-eq./m³/mois). Outre les aspects soulevés précédemment concernant les conditions de stockage et d'aménagement, le type de lieu et la quantité de matériaux associés à une forte influence sur les résultats, qu'il s'agisse d'un bâtiment complet, d'un auvent léger ou d'un stockage sur palette directement à l'extérieur. Ainsi, Matériuum Lausanne montre les émissions de GES les plus faibles en partie car le bâtiment de stockage est un auvent de structure en bois, sans parois lourdes, tandis que les autres ressourceries sont dans des bâtiments ou hangars plus lourds en matériaux.

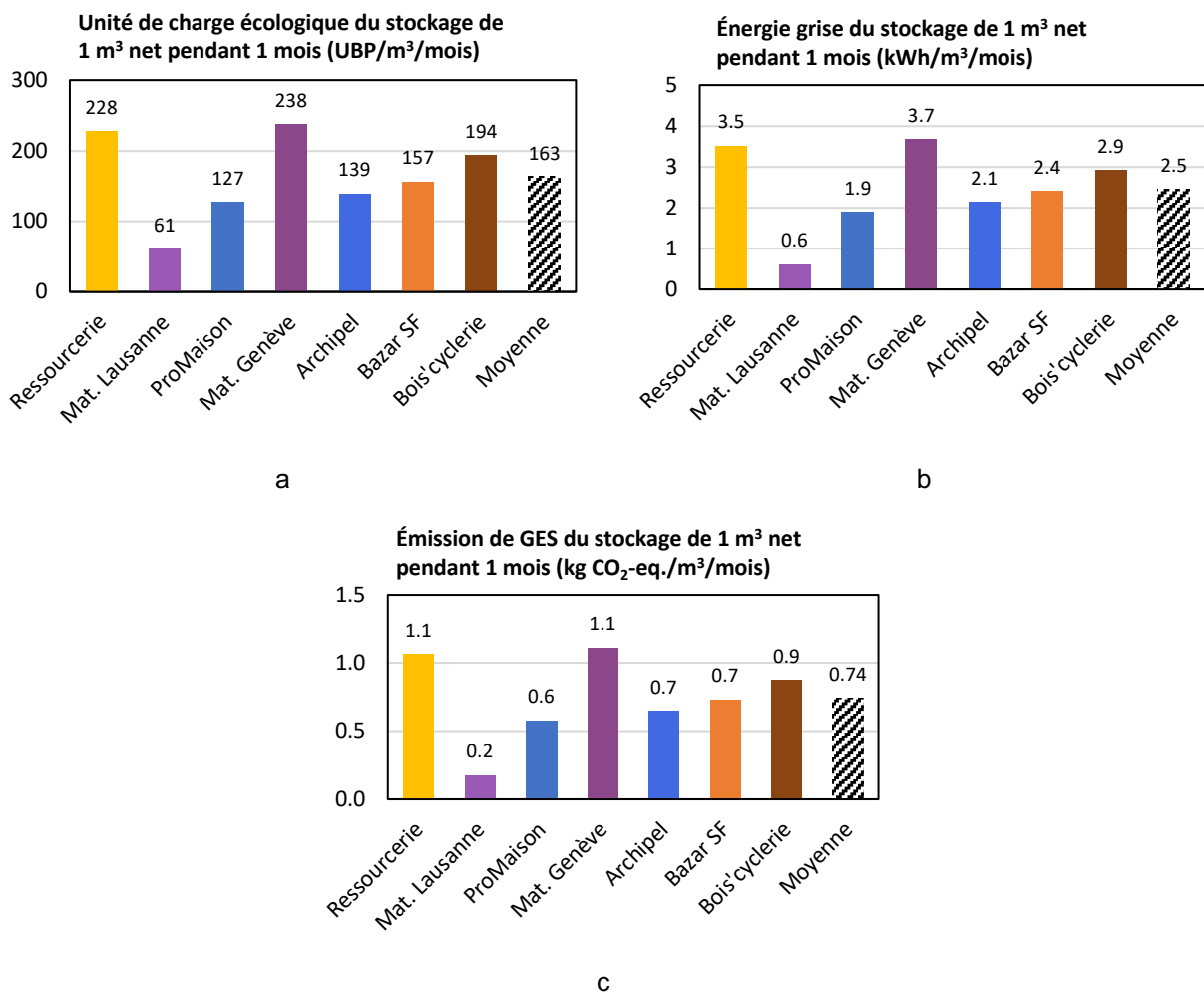


Figure 25 : Impacts environnementaux moyens du stockage par ressourcerie. (a) Unité de charge écologique en UBP/m³/mois. (b) Energie grise en kWh/m³/mois. (c) Emission de GES en kg CO₂-eq./m³/mois.

Création de données génériques

L'étude de ces ressourceries a permis de rassembler suffisamment de données pour élaborer des hypothèses de calcul quant aux impacts du stockage. Les observations suivantes ont été faites :



- 49 % d'espace de stockage pour 51 % d'espace de passage en moyenne, soit 2.04 m² de bâtiment par m² de stock net. Cette hypothèse peut être utilisée lorsque l'on connaît l'espace pris par des produits stockés en m² mais pas les caractéristiques du lieu de stockage.
- 1,6 m² d'espace utilisé par m³ net stocké. Cette hypothèse peut être utilisée lorsque l'on connaît le volume pris par des produits stockés en m³ mais pas les caractéristiques du lieu de stockage.

Des données génériques de stockage sont élaborées à partir des données d'écobilan disponibles dans la base UVEK accessible au moyen du logiciel d'ACV SimaPro. On distingue le stockage dans un bâtiment et le stockage en extérieur. Dans tous les cas, un flux environnemental correspondant à l'occupation de sols industriels est pris en compte dans les bilans pour l'indicateur d'unité de charge écologique (UBP). Cet ajout est réalisé en raison de l'importance de la question des espaces et de l'usage des sols en lien avec les activités de stockage. Les données génériques issues UVEK sont présentées dans le tableau et les données génériques créées sont présentées dans le tableau. Elles sont compatibles avec la base de données KBOB et utilisable par quiconque souhaite estimer approximativement l'impact du stockage. Les résultats obtenus peuvent ensuite être comparé à l'échelle du produit avec les statistiques d'impact par unité fonctionnelle présentées dans la section précédente.

Type de stockage	Hypothèse	unité	Emission de GES (kg CO ₂ eq./unité)	Unité de charge écologique (UBP/unité)	Energie grise (kWh/unité)
Stockage dans un bâtiment (m ² .an)	49% stockage, 51% passage ;UVEK : building hall + occupation de terres industrielles (UBP) + palette (amortissement 10 ans)	m ² d'espace de stockage par an	12,3	4281	42
Stockage dans un bâtiment (m ³ .an)	1.6 m ² de hangar par m ³ stocké ; UVEK : building hall + occupation de terres industrielles (UBP) + palette (amortissement 10 ans)	m ³ d'espace de stockage par an	9,6	3356	33
Stockage en extérieur	49% stockage, 51% passage ; occupation de terres industrielles (UBP) + palette en bois	m ² stockage par an	0,17	1624	0,81

Tableau 9 : Données génériques d'impacts environnementaux du stockage par type de lieu

Par catégorie de produit et leur unité fonctionnelle

Les impacts environnementaux par catégorie de produit ont été déterminés à partir des valeurs moyennes, minimales et maximales d'intensité spatiale sur l'ensemble des ressourceries, associés aux impacts environnementaux génériques pour un bâtiment, présentés précédemment. Les valeurs moyennes et la variabilité min-max des émissions de GES du stockage sont présentés dans la Figure 26. Les valeurs d'impacts pour les trois indicateurs UBP, NRE et GES sont présentés dans le Tableau 10.

**Émissions GES du stockage des matériaux de construction pendant 1 mois
Plages d'impact (min-max) et valeurs moyennes**

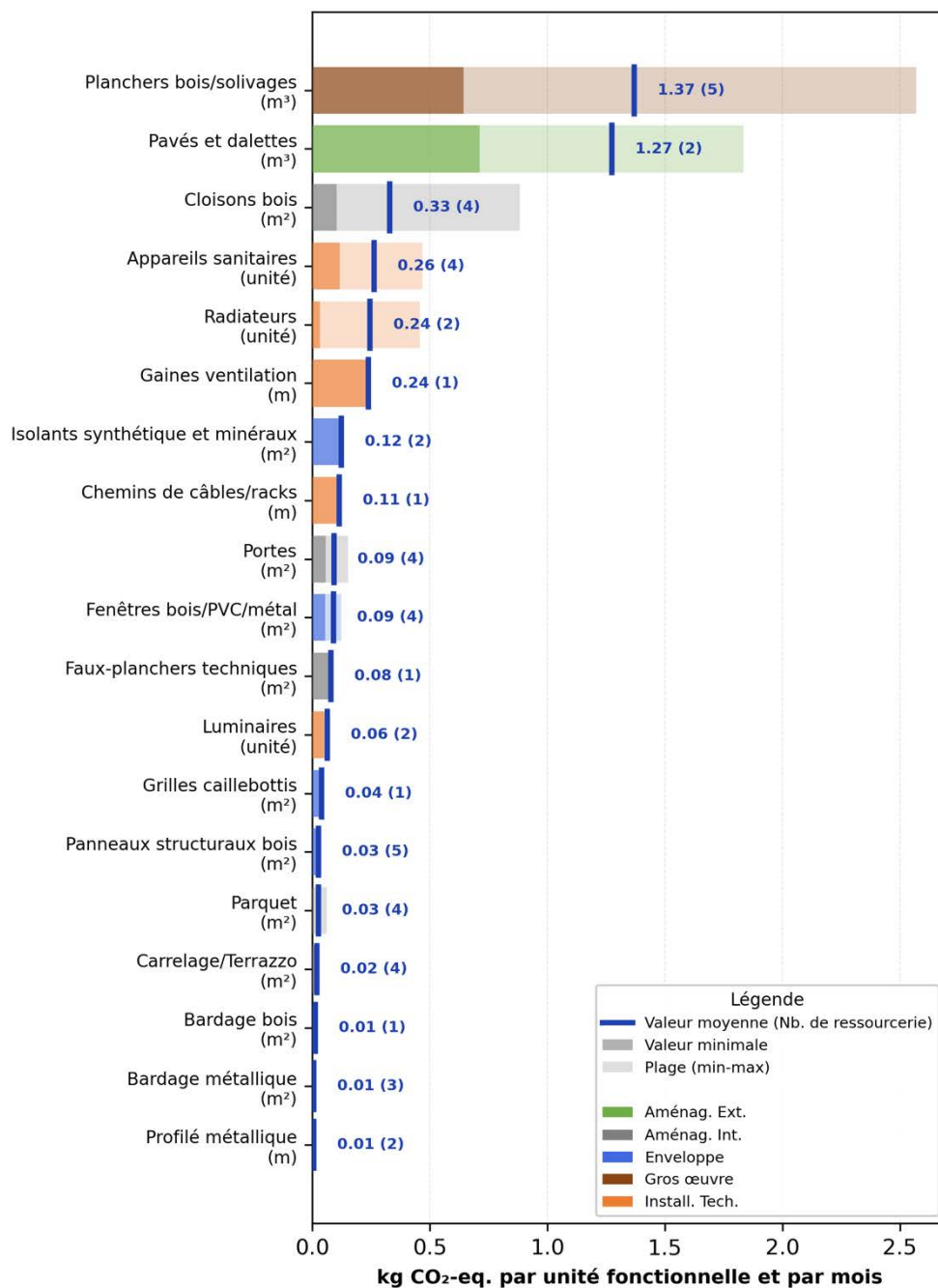


Figure 26 : Émissions de GES du stockage par catégorie de produit selon les statistiques d'intensité spatiale des ressource et pour un bâtiment de stockage générique



Tableau 10 : Impacts environnementaux du stockage de matériaux de construction en intérieur pendant 1 mois. Hypothèses : hangar acier amorti sur 50 ans ; espace de stockage [min, moyenne pondérée et max] en m² par m³ net de produit selon les ressourceries analysées ; répartition des surfaces : 49 % stockage/51 % passage ; Exclues du calcul : surface d'atelier/admin, étagères et palettes.

Catégorie de produit	Unité	m ³ par Unité	Hypothèse	Unité de charge écologique (UBP/UF/mois)			Émission de GES (kg CO ₂ -eq./UF/mois)			Énergie grise (kWh/UF/mois)		
				Min	Moy P.	Max	Min	Moy P.	Max	Min	Moy P.	Max
Pavés et dalettes	m ³	1,00	Densité béton: ~2300 kg/m ³	160	278	412	0,713	1,236	1,834	2,37	4,10	6,09
Cloisons bois (massif, 3/5 plis)	m ²	0,10	Épaisseurs standard: 60 mm à 175 mm	23	35	198	0,103	0,154	0,883	0,34	0,51	2,93
Parquet	m ²	0,02	Épaisseur: 10-20 mm	1	3	14	0,005	0,014	0,060	0,02	0,05	0,20
Portes	m ²	0,13	Épaisseur totale avec huisserie: 100-150 mm	13	16	34	0,057	0,070	0,152	0,19	0,23	0,50
Carrelage/Terrazzo	m ²	0,01	Épaisseur: 10-15 mm	2	5	5	0,009	0,021	0,024	0,03	0,07	0,08
Faux-planchers techniques	m ²	0,23	Hauteur totale: 150-300 mm	17	17	17	0,078	0,078	0,078	0,26	0,26	0,26
Grilles caillebotis	m ²	0,04	Épaisseur : 40mm	9	9	9	0,039	0,039	0,039	0,13	0,13	0,13
Fenêtres bois/PVC/métal	m ²	0,10	Épaisseur totale avec dormant: 80-120 mm	12	17	28	0,053	0,075	0,123	0,18	0,25	0,41
Panneaux structuraux bois	m ²	0,02	Épaisseur: 15-25 mm (OSB, contreplaqué)	4	6	8	0,019	0,026	0,034	0,06	0,09	0,11
Bardage métallique (tôles)	m ²	0,002	Épaisseur: 1-2 mm	0	1	1	0,001	0,003	0,005	0,00	0,01	0,02
Bardage bois (planches)	m ²	0,02	Épaisseur: 20 mm	3	3	3	0,013	0,013	0,013	0,04	0,04	0,04
Isolants	m ²	0,15	Épaisseur: 100-200 mm selon performance	27	28	28	0,119	0,124	0,124	0,40	0,41	0,41
Profilé métallique	m	0,005	Section moyenne: 100×50 mm (type IPN/UPN)	0	1	1	0,002	0,002	0,003	0,01	0,01	0,01
Planchers bois/solivages	m ³	1,00	Poutre, tasseau, carrelot	167	242	571	0,742	1,076	2,542	2,46	3,57	8,44

Gaines ventilation	m	0,05	200-300 mm de diamètre	54	54	54	0,238	0,238	0,238	0,79	0,79	0,79
Chemins de câbles/racks	m	0,01	Section moyenne: 200×60 mm	26	26	26	0,114	0,114	0,114	0,38	0,38	0,38
Luminaire	unité	0,04	600x600x100 mm	12	14	17	0,051	0,062	0,076	0,17	0,21	0,25
Appareils sanitaires	unité	0,13	Volume (lavabo/WC/douche): 0,5×0,5×0,5 m	26	46	95	0,116	0,203	0,424	0,38	0,67	1,41
Radiateurs	unité	0,06	Dimensions moyennes: 1000×600×100 mm	7	24	103	0,032	0,105	0,458	0,11	0,35	1,52

5.3 Analyse comparative, de sensibilité et d'incertitude des impacts en GES du réemploi et du neuf

5.3.1 Filières de réemploi vs variantes neuves

L'approche n'est pas de fournir une valeur unique et figée, mais d'analyser la variabilité des impacts. En effet, contrairement à un produit neuf standardisé, une filière de réemploi présente une forte hétérogénéité (distances de transport, intensité du reconditionnement, rendement de pose). L'objectif est double :

- Comparer les ordres de grandeur d'impacts entre filières de réemploi et variantes neuves.
- Appliquer ces plages de variabilité au cas concret de l'école de Meyrin pour tester la robustesse de la décision de réemploi face aux incertitudes de chantier.

Mais il existe aussi une variabilité des impacts au sein des produits neufs d'une catégorie donnée : pour une même fonction remplie, des produits de différentes composition matérielle, dimension et densité peuvent être choisis. Sur la base de ce principe il est alors difficile de justifier la généralité qu'un produit réemployé est simplement le même produit en neuf avec x % d'impact en moins.

La comparaison des émissions de GES (kg CO₂-eq/unité fonctionnelle) est montrée dans les figures suivantes pour plusieurs catégories de produit. La lecture de ces graphes se fait ainsi :

- Barre de Gauche : Variabilité des impacts du réemploi (incluant activités du réemploi et élimination en fin de vie).
- Barre du Milieu : Variabilité des impacts des solutions neuves équivalentes (basée sur les produits de la KBOB et divers EPD).
- Barre de Droite : Potentiel de réduction d'impact offert par le réemploi (comparaison des moyennes ou des pires/meilleurs cas).
- Losange jaune sur chaque barre : valeur moyenne d'impact
- Score : varie de -2 à +2 pour indiquer facilement la propension du réemploi à être moins impactant que le neuf en termes d'émissions de GES. Il est calculé comme un rapport entre la partie supérieure à 0 et la partie inférieure à 0 de la barre de potentiel de réduction.

Les réductions d'émissions les plus importantes et certaines (de l'ordre de 80% à près de 100%) concernent les matériaux dont la fabrication initiale est très énergivore :

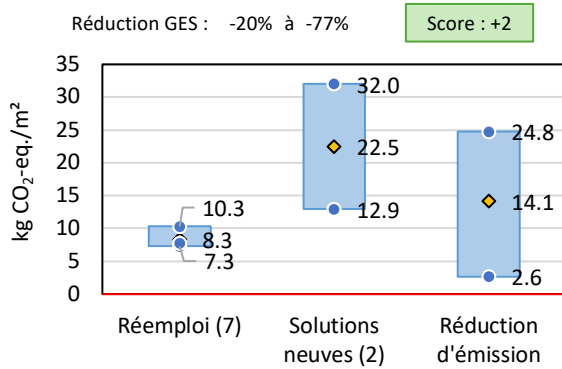
- Faux-planchers techniques : Le réemploi des dalles permet d'éviter la production d'acier et de panneaux de particules. L'impact logistique du réemploi est ici négligeable par rapport au gain initial.
- Bardages et tôles métalliques : L'essentiel de l'impact du neuf provenant de l'extraction minière et de la métallurgie, le réemploi permet d'éviter la quasi-totalité de ces émissions.
- Panneaux photovoltaïques : Le réemploi offre un gain massif, car l'impact de fabrication des cellules en silicium est très élevé par rapport au simple test et nettoyage nécessaire à leur seconde vie.

Pour les matériaux ayant un impact de production initial plus faible (principalement biosourcés mais aussi géo-sourcés), la performance relative du réemploi est plus sensible à la logistique. Certains scénarios montrent que le réemploi peut aboutir à des impacts proches de certaines variantes neuves optimisées. C'est le cas par exemple d'un panneau neuf en bois massif local (épicéa/sapin) comparé à un réemploi nécessitant un stockage long en bâtiment et un transport important. Cela souligne la

nécessité, pour ces filières spécifiques, d'optimiser la chaîne logistique (stockage dense, circuits courts) pour garantir le bénéfice environnemental.

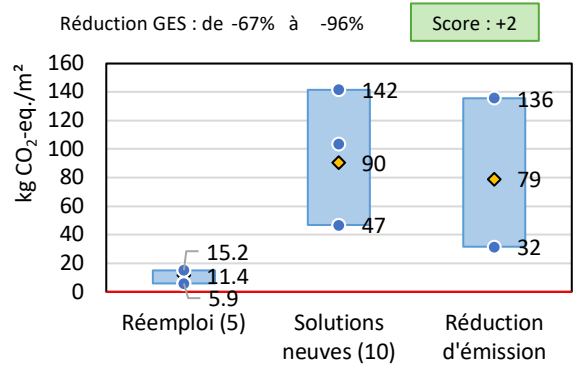
La majorité des catégories de produit étudiées ont un score de « +2 », ce qui, dans le cadre de notre étude, indique que l'on peut réemployer les éléments avec un niveau élevé de confiance dans la réduction des émissions de GES malgré la forte incertitude qui peut exister en phase amont de projet concernant la chaîne logistique du réemploi et ses impacts. Toutes les données utilisées pour les figures sont indiquées dans l'annexe 11.4.

Émission GES de fabrication
1 m² de Faux-plancher technique (dont structure neuve)



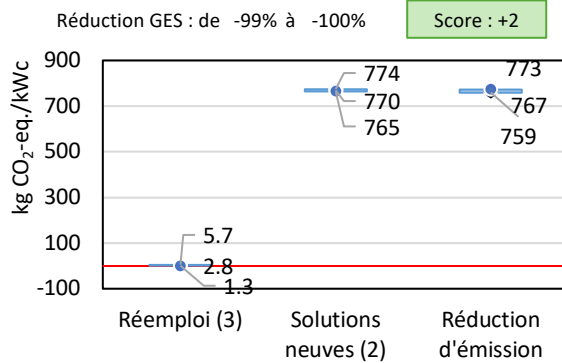
a

Émission GES de fabrication + élimination
1 m² de Tôle de bardage métallique



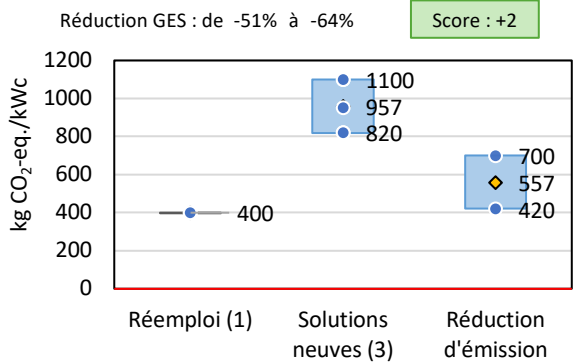
b

Émission GES de fabrication
1 kWc de panneau photovoltaïque

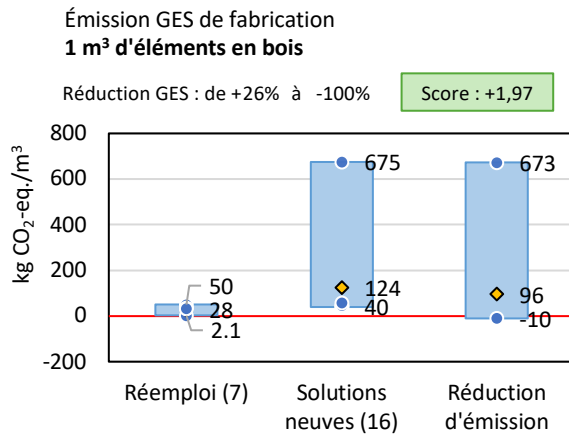


c

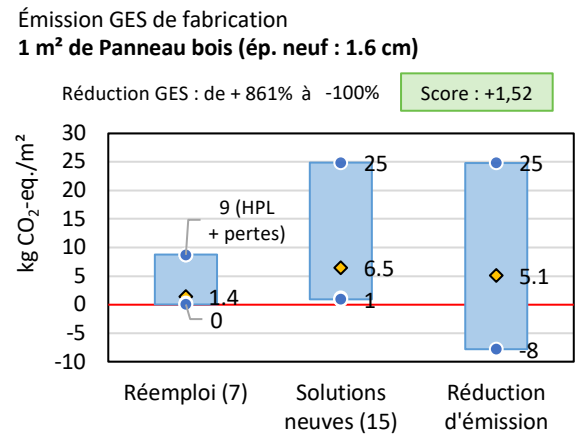
Émission GES de cycle de vie (A-B-C) sur 30 ans
1 kWc d'installation photovoltaïque complète



d

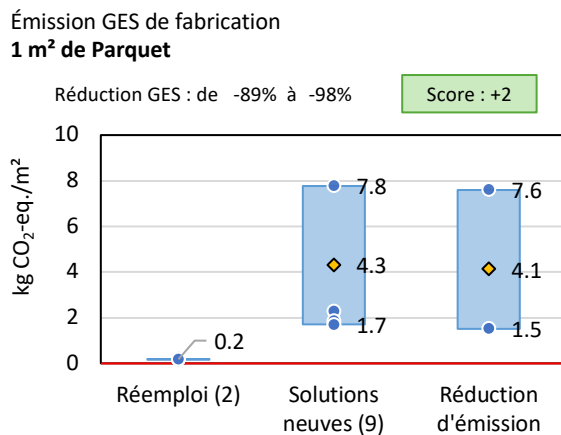


e

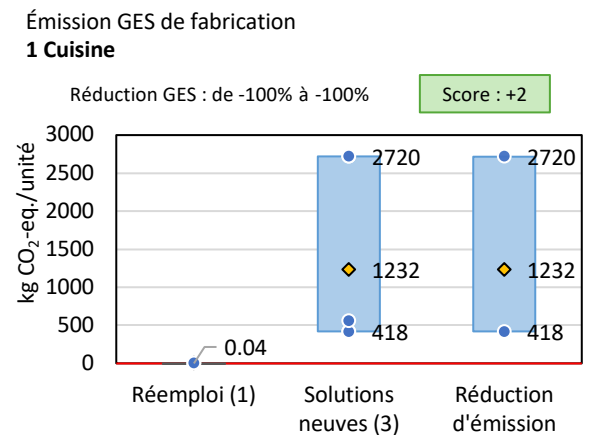


f

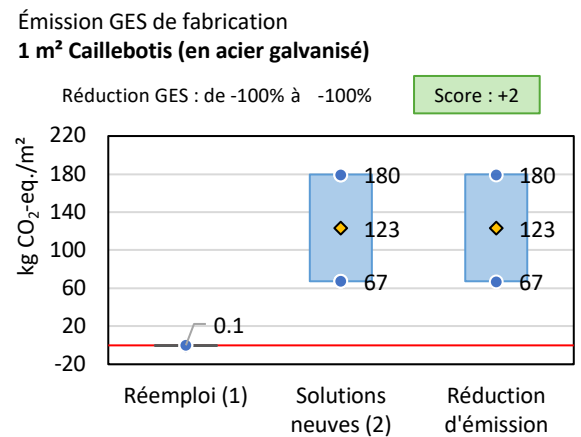
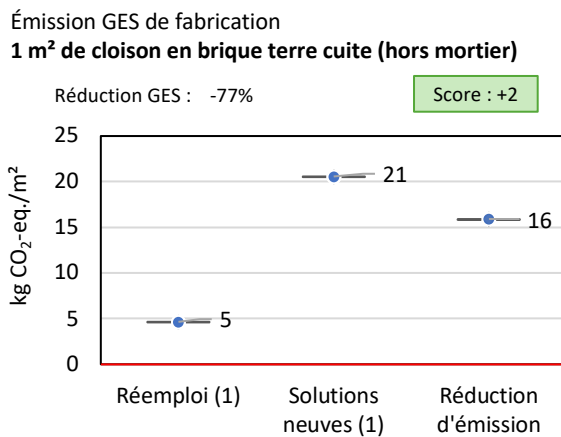
Figure 27 : Comparaison des émissions de GES. (a) faux-plancher technique, (b) tôle de bardage métallique, (c) panneau photovoltaïque, (d) installation photovoltaïque, (e) éléments en bois, (f) panneaux en bois.



a



b



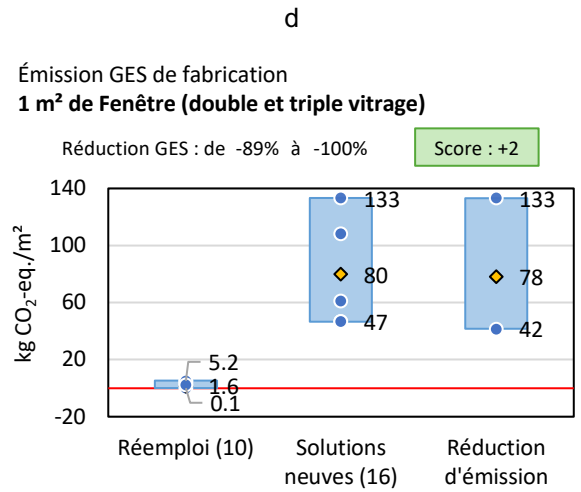
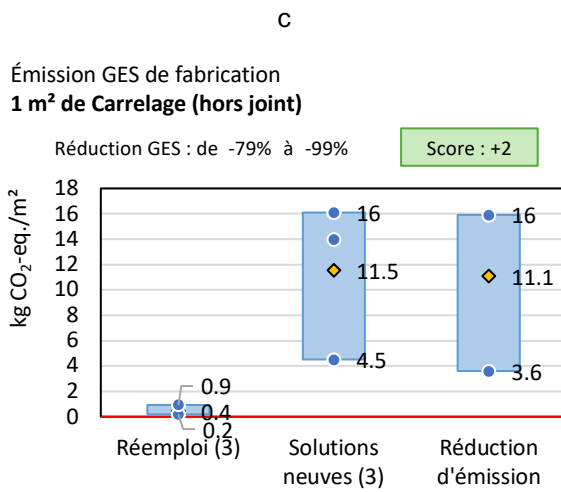
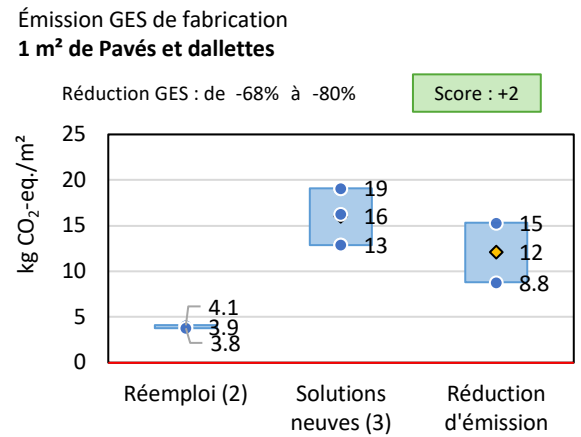
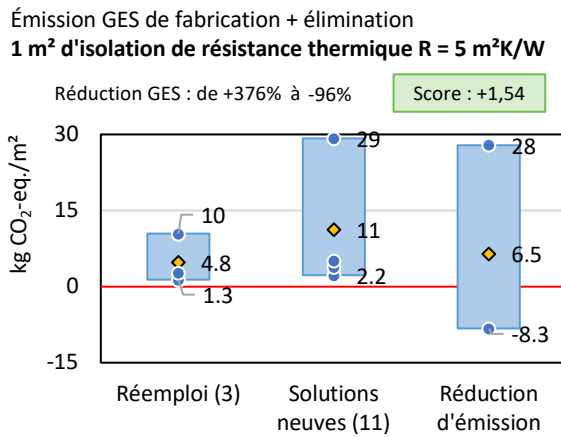
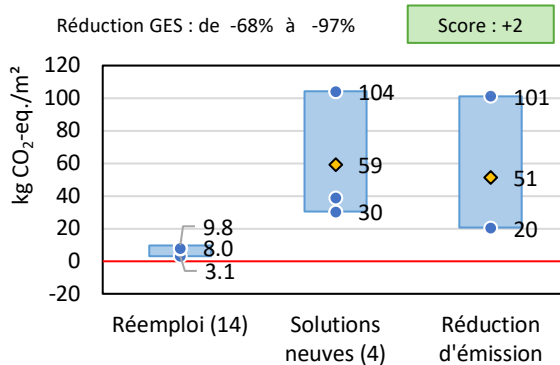


Figure 28 : Comparaison des émissions de GES. (a) parquet, (b) cuisine, (c) briques de terre cuite (sans mortier), (d) caillebotis en acier, (e) carrelage (hors joint), (f) fenêtre (double et triple vitrage).



Émission GES de fabrication + mise en oeuvre + élimination
1 m² de Béton réemployé, béton neuf ou asphalte neuf



c

Figure 29 : Comparaison des émissions de GES. (a) isolation thermique de valeur R = 5, (b) pavés et dalles, (c) Revêtement de sol extérieur en béton réemployé, béton neuf ou en asphalte neuf

5.3.2 Application au projet pilote Ecole de Meyrin : analyse de robustesse

5.3.2.1. Évaluation de l'incertitude dans la phase courante du projet

Les produits réemployés dans le projet de rénovation de l'école de Meyrin servent de cas d'étude pour éprouver la méthode d'écobilan en conditions réelles. Un projet pilote est par nature soumis à des aléas : quantités exactes de matériaux récupérables, localisation finale du stockage, ou ajustements techniques de mise en œuvre. Au moment de cette étude, la liste des produits réemployés in-situ et ex-situ du projet de l'école de Meyrin étaient connus ainsi que leurs quantités mais des incertitudes subsistaient à propos d'informations techniques et logistiques, à la fois en raison du contexte temporel du projet, et car les informations disponibles n'étaient pas suffisantes pour calcul d'écobilan détaillé du réemploi.

Plutôt que de figer des hypothèses arbitraires, l'étude Mat-Loop a adopté une approche probabiliste pour analyser la sensibilité du classement entre solution neuve et solution de réemploi en conditions réelles. L'objectif est de répondre à la question suivante : malgré les incertitudes logistiques et techniques du chantier, le gain environnemental du réemploi est-il garanti ?

Informations connues :

- Produits réemployés in-situ et ex-situ
- Quantités des produits

Informations parfois manquantes ou incertaines :

- Densité volumique et dimensions des produits
- Condition de stockage des produits (quantité par palette et par m² de sol) et durée de stockage
- Processus de déconstruction (énergie consommée)
- Distance de transport (site vers lieu de stockage, source ex-situ vers site, etc.), type de véhicule et taux de chargement du véhicule

Concernant les produits neufs potentiels, pour une même fonction remplie il peut y avoir une diversité de matériaux, dimensions, épaisseur et masse volumique qui entraînent une variabilité des bilans de matières. Le

Tableau 11 recense les informations disponibles pour chaque aspect de l'écobilan.

Catégorie	Aspect technique	Niveau de connaissance	Prise en compte dans l'écobilan avec incertitudes
Caractérisation des produits	Liste des produits réemployés	Connu La liste des produits réemployés in-situ et ex-situ est déterminée.	
	Quantité, masse volumique, dimensions	Connu partiellement Cela dépend de l'unité utilisée pour l'inventaire, de la connaissance de la masse volumique et des dimensions nécessaires pour la conversion	Identification des masses volumique, surfacique ou linéique possibles pour le type de produit
Logistique du réemploi	Déconstruction	Connu partiellement La façon dont la déconstruction est réalisée est globalement renseignée, mais il manque parfois des informations permettant de quantifier la quantité d'énergie consommée (puissance et durée d'utilisation d'équipements) et son type (électricité du réseau, diesel ou électricité d'un groupe électrogène).	Les hypothèses sont complétées par des données issues des projets Reuse-LCA et REMCO par catégorie de produit comme la puissance et la durée d'utilisation. Des variabilités sont considérées pour les types d'énergie et les facteurs de charge.
	Stockage	Connue partiellement Nous savons que les produits voués à être stockés dans des containers, en extérieur sur un site proche. Il manque d'information sur la disposition du stockage et la durée de stockage par type de produit.	L'étude sur les ressourceries permet d'évaluer l'impact pour une quantité de stockage (m ² .an). Des variabilités sur la surface nécessaire par produit sont calculés en considérant un stockage sur palette avec des empilements allant de 1,2 à 1,8 m de haut. Une variabilité sur la durée de stockage de 6 à 12 mois est considérée.

	Transport	<p>Connu partiellement</p> <p>Le site de stockage est proche du site de l'école de Meyrin. Il n'existe pas d'information sur le type de camion et le taux de chargement, ni globalement ni par type de produit.</p>	<p>Une variabilité sur la distance de transport est considérée de 1 à 5 km sachant que la logistique est locale. Une variabilité sur le type de camion est considérée : soit un camion 16-32 t., soit un camion 32-40 t. selon les données de la KBOB.</p>
	Reconditionnement (préparation, nettoyage)	<p>Connu partiellement</p> <p>Les opérations sont recensées mais les consommations d'énergie et de matière associées ou estimées ne sont pas connues.</p>	

Tableau 11 : Niveaux d'information disponibles dans le projet pilote et lien avec l'écobilan

5.3.2.2. Cas d'étude : résultats des briques de terre cuite réemployées

Le projet prévoit le réemploi in-situ et ex-situ de briques de parement (environ 420 m²). Les paramètres incertains utilisés pour le calcul sont détaillés dans le Tableau 12 (masse volumique, épaisseurs, distances, moyens de transport).

Incertitude	Niveau de connaissance	Unité	Projet	Min	Max
Réemploi					
Quantité réemployée		m ²	420	-	-
Masse volumique	Inconnue Données de marché pour briques creuses	kg/m ³	?	867	1158
Epaisseur	Connue	cm	12	-	-
Impact du neuf					
	Données d'impact KBOB ID 02.001				
Masse volumique	Inconnu Données de marché pour briques creuses et pleines	kg/m ³	?	867	1736
Epaisseur	Connue pour le réemploi et incertaine pour le neuf	cm	?	7,5	12,5
Déconstruction					
	Connu : sans étayage avec un marteau piqueur				
Energie utile	Inconnu	Wh/m ²	?	104	499
Puissance machine	Inconnu, données de marché, Reuse-LCA (Denens)	W	?	1000	2000
Durée d'utilisation	Inconnu, hypothèse issue de Reuse-LCA (Denens)	heures/m ²	0,52		
Facteur de charge	Inconnu, <u>Statistiques BAFU</u>	-	?	0,2	0,48
Energie finale	Inconnu	Wh/m ²	?		
Type énergie	Inconnu, soit électricité du réseau (KBOB ID 45.020), soit moteur diesel ou groupe électrogène (KBOB ID 61.001)	-	?	Mix élec. CH	Diesel
Rendement moteur diesel	Inconnu, <u>Statistiques BAFU</u>	E_{finale}/E_{utile}	?	2,6	3,6
Préparation					
	Connu : Nettoyage manuel du mortier (simplification = pas d'impact)				
Stockage					
Espace	Inconnue, estimation en considérant un stockage sur palette sur 1,2 à 1,8 m de haut	m ²	?	28	42
Durée	Inconnue, estimation à partir de la durée du projet	mois	?	6	12
Infrastructure et lieu	Connu : extérieur en container	-	Ext. en container	-	-
Transport					
Masse totale	Inconnue car la masse volumique réelle inconnue	t	?	44	58
Distance	Inconnu	km	?	1	5
Type de véhicule	Inconnu, hypothèse avec données KBOB	-	?	Camion 16-32 t.	Camion 32-40 t.

Tableau 12 : Paramètres incertains et variables pour l'écobilan des briques de terre cuite réemployées et neuves

La variabilité de la variante neuve a été étudiée de manière simplifiée *via* l'analyse d'une dizaine de référence du marché identifiées sur des sites web marchands. La Figure 30 montre que le choix d'une brique neuve n'est pas neutre : selon qu'elle soit pleine ou creuse, et selon sa densité, ses émissions de fabrication varient considérablement. C'est un facteur d'incertitude qui peut être sous-estimé lors de la conception. L'analyse montre une forte corrélation ($R^2 \approx 0.99$ pour les briques pleines) entre la masse de matière mise en œuvre et l'impact carbone, soulignant l'importance de bien définir le matériau de substitution "neuf", l'impact étant défini par kilogramme de matière dans la KBOB.

En ce qui concerne le réemploi, en faisant varier tous les paramètres logistiques (transport, énergie de déconstruction, stockage), nous obtenons une courbe de distribution des impacts probables du réemploi visible en Figure 31. Sur 384 scénarios simulés, la médiane des impacts se situe à 2.6 kg CO₂-eq/m². Même dans les scénarios les plus pessimistes (queue de distribution à droite), l'impact reste inférieur à 4 kg CO₂-eq/m².

La Figure 32 synthétise cette analyse de robustesse en comparant trois éléments :

- Neuf (barre bleue) : Une variabilité forte des impacts (30 à 50 kgCO₂eq/m²).
- Règle SIA 390/1 [14] pour le réemploi en phase amont (barre orange) : Une estimation forfaitaire (20% du neuf) situant l'impact entre 6 et 10 kgCO₂eq/m².
- Réemploi avec analyse d'incertitude (barre verte) : Les résultats détaillés potentiels (2 à 4 kg CO₂-eq/m²).

Le réemploi présenterait donc entre 87 % à 96 % d'émission de GES en moins que le neuf en se basant sur une analyse d'incertitude détaillée. La plage de variation d'impact du réemploi est robuste car son intervalle d'incertitude est faible relativement au grand nombre de valeurs calculées.

À l'inverse, pour la solution neuve, avec seulement une dizaine de cas ayant des masses volumiques et des épaisseurs différentes, l'émission de GES varie de manière bien plus conséquente que pour le réemploi. Cette incertitude importante se répercute directement sur l'estimation de l'impact du réemploi si on applique le calcul simplifié 20 % de la SIA 390/1, qui en plus surestime l'impact du réemploi par un facteur 2.

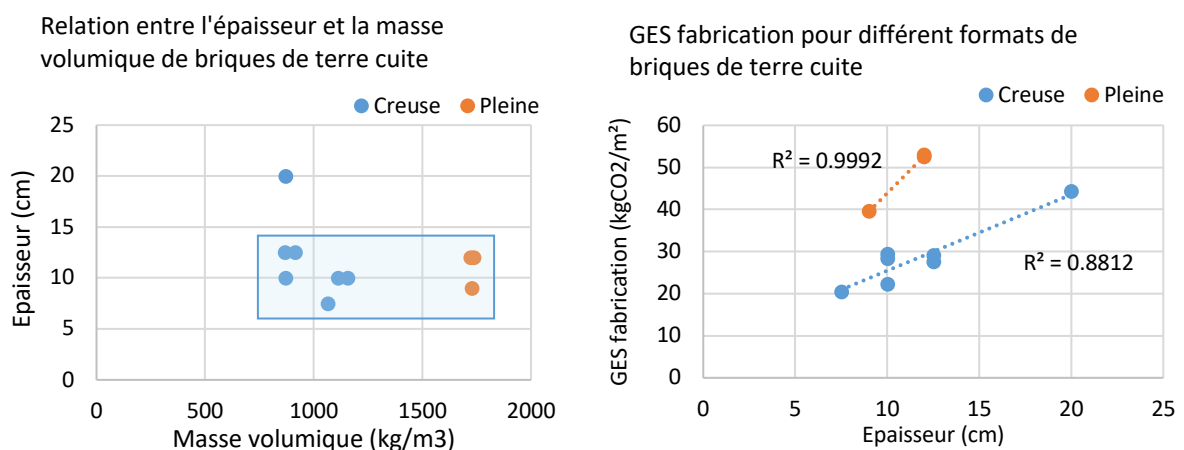


Figure 30 : Relation entre l'épaisseur, la masse volumique et les émissions de GES pour des briques de terre cuite neuves.

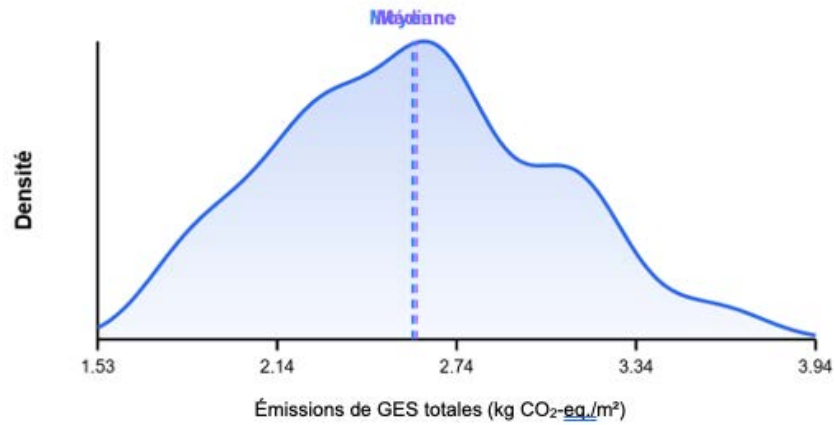


Figure 31 : Distribution de probabilité des émissions de GES totales des briques réemployées (Ecole de Meyrin) avec un échantillon de 384 valeurs potentielles.

Emission de GES Fabrication + élimination pour 1 m² de brique de terre cuite
Réemploi selon les hypothèses et incertitudes du cas d'étude

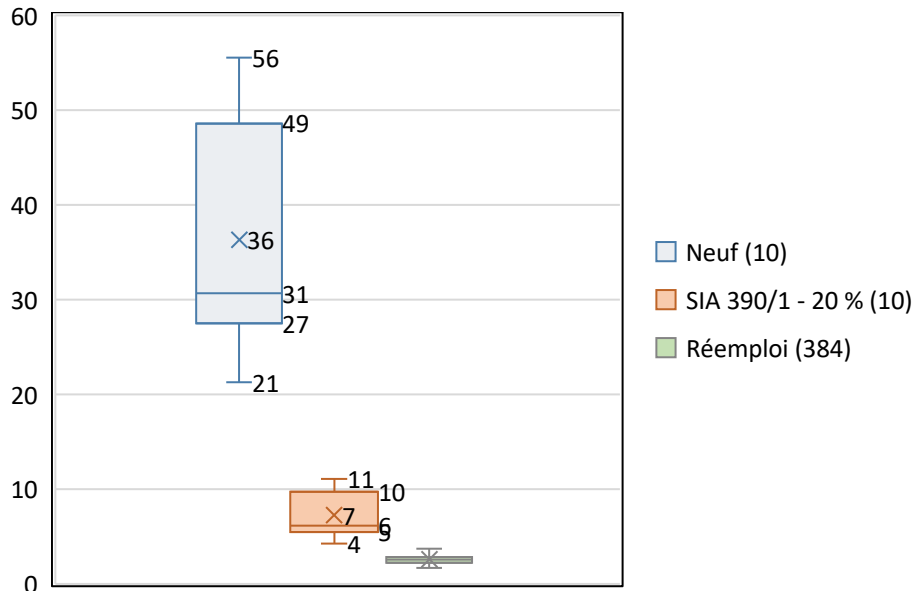


Figure 32 : Comparaison des émissions de GES (A1-A3 + Élimination) pour 1 m² de brique de terre cuite.

5.4 Recommandations pour la mise en œuvre du réemploi

Le projet MAT-LOOP a permis d'élaborer des recommandations pour la mise en œuvre du réemploi et de filières de collecte, reconditionnement et distribution pour quatre composants, sélectionnés parmi les signatures composant des catégories A et B, représentatifs des différents lots.

Les recommandations complètes sont disponibles en annexe, les sous-chapitres qui suivent en donnent un résumé.

5.4.1 Béton armé (lot structure)

Le béton armé est le matériau le plus employé dans la construction en Suisse (source : EMPA, 2021). Selon KBOB, les impacts environnementaux pour sa production sont très élevés et il est présent dans quasiment tous les bâtiments construits depuis cent ans, représentant de facto un gisement gigantesque pour le réemploi.

Le réemploi de béton armé, est attesté dans quelques rares projets en Suisse, mais avec une sous-utilisation des capacités structurelles embarquées du matériau (hormis certains projets de recherche encore expérimentaux). Cette situation est imputable à la non-standardisation du matériau disponible dans le gisement (le béton coulé sur place et par nature « sur mesure »), au déficit de connaissances des praticiens, au niveau de risque que représente le réemploi structurel, à la complexité logistique du réemploi d'éléments lourds, de grandes dimensions et à l'absence de filière organisée.

Par ailleurs, la prise en compte des spécificités du réemploi pour des composants structurels doit être effective dès les phases préliminaires de l'avant-projet. En dehors de certains cas spécifiques, il apparaît illusoire de pouvoir coordonner des chantiers de démolition sur des chantiers sources avec les études sur les chantiers cibles qui sont exécutées bien souvent des années avant l'exécution.

Il en ressort que le modèle d'affaire le plus apte à répondre au besoin du marché est la mise sur pied de filières de réemploi ex-situ, externes et déphasées, basées sur une standardisation des modules de béton armé proposés, offrant aux concepteurs une base de travail stable et une connaissance préalable des caractéristiques physiques du matériaux pour planifier le réemploi, aux entreprises de déconstruction une garantie de débouché et aux intermédiaires une rotation de stock permettant d'atteindre le seuil de rentabilité.

Les recommandations développent également les différentes étapes du processus de projet avec les modes d'analyses et tests à effectuer, ainsi que les étapes logistiques du réemploi : la déconstruction, la manutention/transport, le stockage, le reconditionnement et la remise en œuvre.

5.4.2 Tôles métalliques de couverture et de bardage (lot enveloppe)

La production d'acier et d'aluminium, employés à de nombreux usages dans la construction, génère d'importants impacts environnementaux et émissions de gaz à effet de serre (source : KBOB). Le réemploi de matériaux à base métallique constitue un levier intéressant pour réduire l'empreinte carbone de la construction métallique. Les recommandations s'appliquent plus particulièrement aux tôles de bardage et de couverture en acier ou aluminium.

Les tôles de bardage et de couverture nécessitant des espaces de stockage à couvert, la clé de la réussite pour la mise sur pied d'une filière de récupération et de redistribution se situe au niveau de la rotation du stock. Il conviendra dès lors de se concentrer sur la récupération de lots homogènes (dimension et traitement de surface) et de la plus grande taille possible.

Les analyses préalables au réemploi doivent se concentrer sur les propriétés physiques du matériel, en particulier sur l'état et le type de traitement de surface. La déconstruction ne pose en général pas de problème particulier, les tôles étant la plupart du temps fixées par biais de fixations mécaniques à leurs supports, qui peuvent aussi être récupérés.

Le transport des tôles se fait sur palettes en bois de taille adaptée et le stockage du matériel doit être

effectué à l'abri de l'humidité, en veillant à séparer les tôles pour éviter tout risque de corrosion. Dans la mesure du possible on évitera de redécouper les tôles lors du reconditionnement et le nettoyage se fera en prenant garde. Ne pas endommager le traitement de surface existant. La remise en oeuvre se fait selon les règles de l'art applicables au matériel neuf.

5.4.3 Faux planchers techniques (lot aménagements intérieurs)

Les dalles de faux plancher technique intègrent une quantité importante d'acier. Le réemploi de ces éléments induit donc de très importants bénéfices sur le plan environnemental par rapport au neuf (voir Fig.27), ne présente pas de difficultés techniques et concerne un produit hautement standardisé ce qui garantit l'existence de gisements et de débouchés locaux.

Une filière de récupération, reconditionnement centralisé et redistribution des composants de planchers techniques a été mise sur pied en France par Mobius Réemploi. Les présentes recommandations s'en inspirent très largement.

Le démontage soigné implique peu voire aucune opération supplémentaire par rapport à une démolition classique. Le conditionnement peut se faire sur des euro palettes standard. La manutention et le transport n'impliquent pas de moyen de levage ou de type de camion particuliers. Le stockage doit être effectué à couvert, à température ambiante (15-25°) et dans des conditions hygrométriques contrôlées. Le reconditionnement manuel est relativement chronophage mais ne requiert pas de qualifications spécifiques. La remise en oeuvre est identique au neuf. Le haut degré de standardisation du produit et l'identification relativement aisée des défauts peut permettre à l'intermédiaire de fournir une garantie sur le produit.

5.4.4 Panneaux solaires thermiques (lot installations techniques)

Les panneaux (ou capteurs) solaires thermiques présentent un double bénéfice environnemental. Ils produisent de la chaleur directement à partir de l'énergie solaire contribuant à diminuer l'impact environnemental du bâtiment en phase d'exploitation. Standardisés, produits industriellement, technologiquement assez simples, les capteurs solaires thermiques ne présentent pas de difficultés techniques particulières en vue du réemploi qui permet de réduire l'impact environnemental du chantier cible grâce au carbone embarqué non négligeable qu'ils contiennent. Ils peuvent en outre être intelligemment combinés avec des panneaux photovoltaïques pour maximiser les gains solaires.

Le démontage soigné implique peu voire aucune opération supplémentaire par rapport à une démolition classique. Le conditionnement peut se faire sur des palettes standard. La manutention et le transport n'impliquent pas de moyen de levage ou de type de camion particuliers. Le stockage doit être effectué à couvert. Le reconditionnement est une opération manuelle qui requiert un certain savoir-faire, sans nécessiter cependant d'installations complexes ou onéreuses. La remise en oeuvre est identique au neuf. Le haut degré de standardisation du produit et l'identification relativement aisée des défauts peut permettre à l'intermédiaire de fournir une garantie sur le produit.

Une filière de récupération, de reconditionnement centralisé et de redistribution des capteurs solaires thermiques a été mise sur pied en Suisse romande par l'association Sebasol. Les présentes recommandations s'en inspirent très largement.

5.5 Outil d'aide à la décision

Au cours du projet il est apparu que les concepteurs et maîtres d'ouvrage ne disposent pas d'outils permettant d'établir une évaluation préalable du potentiel de réemploi de leurs chantiers sources et cibles. L'évaluation du potentiel de réemploi des composants, l'analyse des ressourceries, les comparatifs entre impacts environnementaux du réemploi et des variantes neuves développés dans le cadre de MAT-LOOP offrent les bases nécessaires au développement d'un outil d'aide à la décision.

Cet outil intègre trois cas de figure :

- Déconstruction d'un chantier source, où le maître d'ouvrage ou ses mandataires souhaiteraient évaluer le potentiel du gisement de matériaux en leur possession en termes de débouchés
- Planification d'un chantier cible où le maître d'ouvrage ou ses mandataires souhaiteraient cerner les opportunités de mise en œuvre de matériel de réemploi
- Ressourceries voulant déterminer l'intérêt de stocker un matériau dans leur locaux et les possibilités de revente.

Les premiers utilisateurs ciblés sont les maître d'ouvrage. Le travail d'inventaire des matériaux menés dans le cadre de MAT-LOOP et les entretiens avec les acteurs du réemploi ont montré l'intérêt pour ces acteurs 1) de quantifier les matériaux à leur disposition, 2) de déterminer les potentialités et les débouchés de ces ressources.

Les suivants sont les mandataires (architectes en premier lieu). En effet, les entretiens ont montré la difficulté de sourcer des matériaux de réemploi tout au long du projet avec des solutions parfois trouvées à la dernière minute. Il s'agira de leur fournir un outil permettant de cibler les matériaux qui présentent les meilleures opportunités de réemploi selon chaque lot de matériaux et d'anticiper les actions nécessaires sur le projet cible pour l'approvisionnement des composants en temps voulu.

Les derniers sont les ressourceries. En effet, ces structures, en général à but non lucratif, cherchent à optimiser leur mode de fonctionnement et déterminer les matériaux à forts potentiels. Cela passe par l'analyse du rapport entre le volume de matériaux accumulé et le temps durant lequel ces matériaux sont stockés. Plus le taux de rotation d'un matériau est élevé, plus il est intéressant. Un travail d'analyse a été réalisé par la HEIG-VD, il s'agira alors de compiler ces différentes données et les mettre en lien avec la demande.

L'outil d'aide à la décision intervient durant différentes phases du protocole selon les utilisateurs identifiés. Pour la maîtrise d'ouvrage, il s'agit principalement des phases SIA 1 (définition des objectifs) et 2 (études de faisabilité) dans le cadre d'un projet de déconstruction ou de transformation d'un immeuble. Nous l'appellerons « Outil Source ».

Pour les mandataires, il s'agit des phases SIA 2 et 3 (études de projet), dans le cadre d'un projet de construction ou de transformation, lorsqu'il s'agit de définir quels sont les matériaux qui doivent être sourcés au travers d'une filière de réemploi. Nous l'appellerons « Outil Cible ».

Pour les ressourceries, il s'agirait d'une phase intermédiaire, indirectement corrélée aux phases de déconstruction d'un projet et d'exécution d'un autre.

L'outil d'aide à la décision propose de qualifier les matériaux en fonction de leur potentiel de réemploi afin d'éclairer les choix des maîtres d'ouvrage et mandataires à partir d'un angle de vue aussi large que possible. Cet outil a été développé à partir d'un arbre de décision réalisé en s'appuyant sur les macro-critères de la matrice d'analyse : marché, mise en œuvre, environnement, économie, social et culturel et des notations attribuées aux composants dans la matrice d'analyse de MAT-LOOP.

L'outil a été développé sur une feuille de calcul Excel, se basant sur l'arborescence ayant permis d'explorer l'ensemble des différentes options et sur la notation des composants fournissant une échelle de valeurs. Cela a permis de formaliser le processus d'aide à la décision. Retours d'expérience des différents acteurs

Différents acteurs du terrain ont été testé l'outil d'aide à la décision, afin d'avoir des retours d'expériences suffisamment variées et complémentaires. Ces tests par des personnes pour partie externes à l'équipe de projet ont permis d'améliorer les fonctionnalités.

Le fichier Excel de l'outil d'aide à la décision est disponible sur demande auprès des auteurs. Il pourrait faire l'objet prochainement d'un développement permettant d'offrir une meilleure interface plus efficace aux utilisateurs.

6 Discussion

6.1 Aspects environnementaux du réemploi

Les travaux menés dans le cadre des projet MAT-LOOP et Reuse LCA [4] ainsi que les études de cas du projet et REMCO [6] démontrent que le réemploi induit systématiquement des réductions des émissions de GES qui peuvent être massives par rapport à des solutions neuves et que c'est là son intérêt majeur.

6.1.1 Le poids de la logistique dans le bilan environnemental du réemploi

L'un des apports majeurs de cette étude est la quantification de certains impacts "cachés" du réemploi. L'études des ressourcerie a permis de mettre la lumière sur les impacts potentiels du stockage en termes d'occupation d'espaces de bâtiment et de sols. Les analyses menées sur la variabilité des émissions de GES du réemploi et sa comparaison avec les variantes ont montré que la logistique n'est pas neutre, mais que son influence est relative :

- Pour les matériaux à forte énergie grise initiale (métaux, techniques), l'impact de la logistique de réemploi, même sous-optimisée, reste anecdotique face au gain d'évitement de la production neuve.
- Pour les matériaux à faible impact de production (en particulier le bois), la performance logistique devient un critère déterminant. Un stockage prolongé dans un bâtiment ou à faible densité peut diminuer le bénéfice environnemental, voire engendrer des impacts supérieurs à une variante. Cela valide l'importance de typologies de stockage sobres (par ex: les auvents légers observés à Matériuum Lausanne) et d'une gestion des flux en "flux tendu" pour limiter le temps de séjour.

6.1.2 Robustesse du réemploi face aux incertitudes

L'analyse générique de variabilité des impacts par filière, et l'application aux briques du cas pilote de l'école de Meyrin ont permis de tester la méthode d'ACV probabiliste. Les résultats mettent en évidence que l'incertitude n'est pas une barrière à la décision. Au contraire, la variabilité des impacts du neuf (liée aux caractéristiques matérielles des produits) est supérieure à la variabilité des impacts logistiques du réemploi pour plusieurs catégories de produits étudiées. Pour une majorité de composants, le réemploi apparaît donc comme une stratégie robuste : même dans les scénarios logistiques les plus défavorables (transport moyen, stockage long), il conserve un avantage carbone significatif (Score +2).

6.1.3 Positionnement vis-à-vis de la norme SIA 390/1

L'analyse critique de la norme SIA 390/1 [14] révèle les limites de la règle forfaitaire attribuant au réemploi 20 % de l'impact du neuf. Bien que séduisante par sa simplicité en phase amont et valable « en moyenne » sur un panel de produits issus du réemploi préalablement étudiés, cette règle s'avère souvent pessimiste, voire inadaptée. Pour une même fonction, la diversité des produits neufs (matériaux, densités) entraîne une telle amplitude d'impacts qu'elle rend erronée toute corrélation directe avec le réemploi, en associant artificiellement une diversité de processus de fabrication à des activités logistiques qui sont, en réalité, totalement décorrélés.

6.2 Obstacles au réemploi

L'approche menée dans le projet montre également que réemploi fait face à un certain nombre d'obstacles :

- Complexité
- Limites physiques
- Coûts
- Risques contractuels

Une partie de ces freins peuvent être levés moyennant l'amélioration des chaînes logistiques et la montée en puissance des filières de récupération, reconditionnement et redistribution du matériel issu de chantiers de déconstruction.

6.2.1 Complexité

La complexité du réemploi est liée à deux facteurs principaux : l'absence de filières suffisamment organisées pour la récupération, le reconditionnement et la redistribution en masse des composants de réemploi et l'inadéquation des processus usuels de planification dans les bureaux d'architectes et d'ingénieur.

L'absence de filières organisées pour le réemploi de masse et les solutions pour créer de telles filières sont au cœur du projet MAT-LOOP. Les travaux menés ont montré que les spécificités de chaque famille de matériaux combinées aux spécificités des différentes typologies de réemploi mises en lumière dans REMCO [6] démultiplient les possibilités au niveau de l'organisation de filières en termes de logistique et de modèles d'affaire. Cette complexité explique les difficultés rencontrées par les ressourceries, qui misent toutes sur une approche généraliste à l'échelle locale, et qui ne peuvent répondre à l'ensemble des paramètres imposés par les différents types de matériaux et de réemploi, ni en termes de logistique, que de quantité ou de qualité pour répondre à une demande correspondant à celle de chantiers de taille moyenne ou importante. A l'instar de ce qui existe pour l'approvisionnement en matériaux neufs, il semble inéluctable que la mise sur pied de filières logistiques efficaces et compétitives en matière de prix (en particulier pour le réemploi externe et déphasé) passera par la spécialisation d'entités dédiées à la récupération, le reconditionnement et la redistribution d'un type de composant, ou d'une famille de composants spécifiques. Ce mouvement est d'ailleurs lancé en Suisse romande avec l'apparition en 2024 de la filière Reluux créée par Materium spécifiquement dédiée aux luminaires. Ce n'est pas par hasard que cette première initiative concerne un type de composants relativement simple à récupérer, stocker et reconditionner. L'avenir dira si le marché répond à l'offre proposée par Reluux et si des filières consacrées à des matériaux plus complexes à traiter verront le jour, poussées par une montée en puissance de la demande, stimulée notamment par l'évolution réglementaires (LCI 117-118 à Genève par exemple).

La spécialisation et la concentration sont des conditions au déploiement de filières efficaces et économiquement viables à même de développer la pratique du réemploi.

Au niveau des processus de planification, la complexité découle de l'inadéquation entre les modalités usuelles de développement du projet et les contraintes du réemploi.

L'absence de langage commun et codifié pour décrire les composants est un handicap clair pour le réemploi, que ce soit au stade des inventaires qu'à celui des appels d'offres. Le niveau de détail, les termes utilisés, etc. sont susceptibles d'être très différents d'une source à l'autre ce qui rend très complexe le travail des planificateurs, en particulier lorsque des lots issus de plusieurs sources doivent être combinés.

La séquence des phases du règlement SIA 102 [15], totalement entrée dans les mœurs de l'ensemble des acteurs, est adaptée à la construction neuve, beaucoup moins aux temporalités du réemploi. Cette séquence implique que le matériel est fourni par des entreprises lors de la phase d'exécution, découlant de la phase d'appel d'offres elle-même issue de la phase de projet. Le matériel est fourni en fonction des besoins du projet, lui-même développé sur la base de l'assurance que le matériel intégré à la construction sera disponible en temps, quantités et qualité voulus. La matière et les circuits de production et de distribution de matériel neuf sont connus par les planificateurs en phase de projet et d'appel d'offres et maîtrisés par les entreprises en phase d'exécution. Il n'en va pas de même pour le

réemploi où le processus de planification peut prendre deux visages : i-développement du projet sans intégration des contraintes du réemploi (Reuse to Plan), ii-développement du projet en fonction des caractéristiques de composants déjà identifiés et dont la source est connue (Plan to Reuse). Dans le premier cas, pour ne pas générer trop d'incertitudes, les architectes et maîtres d'ouvrage vont soit devoir accepter un risque (ne pas disposer de la bonne matière au bon moment) et accepter de revoir leurs plans dans l'urgence le cas échéant, soit restreindre le réemploi à des composants standardisés ou interchangeables et/ou limiter la quantité d'éléments réemployés pour réduire le risque. Le réemploi sera dans ce cas souvent cantonné à des éléments d'aménagements intérieur, dont on sait qu'ils seront disponibles ou modifiables en cours de chantier, sans mettre en difficulté ce dernier et sans risquer de devoir négocier des compléments d'autorisation de construire. Dans le second cas, faute de filière assurant la disponibilité du matériel à long terme, les planificateurs devront adapter le projet aux caractéristiques de composants inventoriés sur des bâtiments dont la déconstruction est planifiée ou déjà exécutée. Cela induit des contraintes dans le développement du projet en soi, mais aussi dans la coordination des plannings chantiers source et cible ou le stockage à relativement long terme de la matière issue de déconstruction. Au stade du projet (phase SIA 3) les incertitudes sur les délais, notamment d'obtention de l'autorisation de construire, et l'horizon temps qui peut être de plusieurs années d'ici la phase d'exécution (phase SIA 5) imposent des contraintes élevées (nécessité d'acquiescer et de stocker la matière potentiellement plusieurs années sans garantie de pouvoir l'utiliser ou risque d'asynchronisme entre chantiers source et cible).

L'existence de filières structurées en nombre suffisant offrirait une meilleure visibilité aux concepteurs quant à la disponibilité future de la matière (que ce soit dans le mode « Reuse to Plan » ou dans celui du « Plan to Reuse ») ce qui leur permettrait d'intégrer plus facilement le réemploi dans leurs projets.

Finalement il convient de relever que cette complexité n'est pour l'heure en règle générale pas intégrée dans les méthodes de calcul des honoraires des architectes, ce qui laisse le surplus de travail induite par le réemploi durant l'ensemble des phase SIA à leur charge.

6.2.2 Limites physiques

Le réemploi est évidemment sujet à des limitations qui le rendent impossible dans certains cas.

Certaines matières ne sont simplement pas démontables (il est par exemple impossible de récupérer de la peinture ou du papier peint pour les réemployer) donc de facto impossibles à réemployer, ou leur démontage soigné ou l'adaptation de matériel de déconstruction implique un tel effort et une telle intensité de main d'œuvre (particulièrement chère en Suisse) que le coût du réemploi devient disproportionné par rapport à des alternatives « à neuf » ou d'autres variantes constructives (par exemple les circuits de circulation des panneaux thermique dans le cas de Sebasol – voir recommandations en annexe, ou les tentatives de récupérations de briques de parement maçonnées au mortier de ciment pour le projet de l'École de Meyrin Village menées par ATBA).

Dans d'autres cas c'est la difficulté quand ce n'est pas l'impossibilité d'assainir des composants pollués qui rendent leur réemploi impossible (par exemple le réemploi de plaques de couverture en fibrociment amiantées). L'obsolescence technique ou réglementaire de certains éléments empêche leur réemploi (par exemple : les systèmes de chauffage électrique, qui peuvent s'avérer encore parfaitement fonctionnels, ne sont plus autorisés – MOPEC 2025 et législations cantonales dans plusieurs cantons, dont Vaud, Neuchâtel, Berne). La vétusté peut rendre impossible le réemploi de composants lorsqu'elle est élevée (des volets en bois vermoulus ne seront pas récupérables par exemple).

Le réemploi, même avec les meilleures intentions du monde peut donc s'avérer impossible, limitant de facto son application à certains composants en raison des limites physiques de la matière.

6.2.3 Coût

L'argument du surcoût du réemploi par rapport aux alternatives neuves est régulièrement mentionné par les praticiens pour expliquer le manque d'intérêt de sa pratique. Les résultats du projet REMCO [6] montrent que le réemploi n'implique pas forcément de surcoût. L'économie peut même s'avérer très intéressante dans certain cas (70% d'économie sur la fourniture des appareils sanitaires du projet et

des coût similaires au neuf pour la pose dans un des cas d'étude).

Dans les cas étudiés, la compétitivité économique du réemploi est cependant limitée aux éléments dont le démontage soigné et le reconditionnement ne nécessitent pas d'opérations particulièrement complexes, dont la manutention, le transport et le stockage sont aisés, dont la remise en œuvre est équivalente au neuf, souvent en raison du haut degré de standardisation des composants (par exemple les appareils sanitaires, cuvettes de WC, lavabo, etc.) et qui ne sont pas ou peu réglementé par des normes contraignantes (éléments libres selon la terminologie de R. Bach [16]). Ces éléments sont, pour des raisons évidentes, ceux qui ont été choisis en priorité par les ressourceries pour mettre sur pied les premières filières organisées, à l'instar de Promaison qui fournit des appareils sanitaires de réemploi.

La situation est différente dès que le démontage soigné du composant est rendu plus chronophage (donc onéreux) que la démolition (comme pour des dalles de béton armé, qui nécessitent un étayage et du sciage requérant une quantité importante de main d'œuvre avant de pouvoir être réemployées, alors que la démolition traditionnelle par croquage est plus rapide et mieux maîtrisée par les entreprises de démolition). Dans ces cas, il s'agit d'instaurer un cercle vertueux, qui nécessite à un moment ou un autre une prise de risque entrepreneurial par un entrepreneur désireux d'investir dans de nouvelles méthodes ou l'acceptation de surcoûts initiaux par certains maîtres d'ouvrage, motivés par des considérations internes (économie, écologie, patrimoine, sentimentalisme, symbolique [16]) et externe (obligations légales). Dans le cas où l'initiative est à mettre au crédit de l'offre, une montée en compétence volontariste d'entreprises de déconstruction induira l'adoption de méthodes plus efficaces et des gains de productivité, ce qui provoquera une réduction du coût du démontage soigné qui stimulera la demande. Dans le cas où c'est la demande qui est déterminante, c'est l'acceptation de surcoûts (dans un premier temps) par les maîtres d'ouvrage qui pourrait initier ce cercle vertueux et amener in fine à une réduction des coûts par stimulation de l'offre. Dans les deux cas de figure, le cercle vertueux a plus de chance de se concrétiser rapidement si des entreprises se spécialisent dans la déconstruction soignée de composants spécifiques ou familles de composants qu'au travers de filières généralistes.

La montée en compétence et en puissance des filières de réemploi et l'amélioration des chaînes logistiques entraînera des gains de productivités qui rendront vraisemblablement le réemploi plus compétitif face aux solutions neuves.

6.2.4 Risques contractuels

Du point de vue des maîtres de l'ouvrage l'émergence de filières dédiées au réemploi doit être l'occasion d'une réduction du niveau de risque perçu. Actuellement, faute de garantie sur la matière réemployée, ce sont soit les maîtres d'ouvrage qui assument le risque, soit les ingénieurs civils, si ces derniers valident le réemploi d'éléments structurels ou strictement normés. A notre connaissance des tests poussés permettant de vérifier la compatibilité normative des éléments contraints (par exemple de résistance au feu) ne sont que très rarement voire jamais entrepris, selon nos sources pour des raisons de coût et de délai. Il est cependant intéressant de noter que le réemploi interne (où la matière ne change pas de main) suscite moins de crainte chez nos interlocuteurs. Ceci traduit simplement une plus grande confiance dans ce que l'on connaît puisqu'on en est déjà propriétaire, qu'en du matériel de seconde main, alors que le niveau de risque a de bonne chance d'être objectivement identique.

Le réemploi externe (avec transfert de propriété du matériel) implique la plupart du temps l'absence complète de garantie au fil de l'ensemble de la chaîne de valeur, que ce soit de la part du propriétaire du chantier source, de l'entreprise de démolition, de la ressourcerie ou de l'entreprise qui remet en œuvre. Dans certains rares cas, l'entité qui se charge du reconditionnement (Mobius pour les dalles de faux plancher technique et Reluux pour les luminaires) ou qui supervise le processus de réemploi (Sebasol pour les panneaux solaires thermiques) offre une forme de garantie, mais limitée. Cette situation constitue un frein pour le réemploi qui pourrait (une fois de plus) être résolue par l'apparition de filières mise sur pied par des entreprises dont le modèle d'affaire se concentre sur un type ou une famille de composants, qui, avec l'expérience et la mise en œuvre de méthode d'inspection et de reconditionnement robustes, pourraient en arriver à offrir un niveau de garantie proche du neuf.

Il est également envisageable qu'à l'avenir, les compagnies proposent des polices d'assurance bâtiment

demandent des justificatifs de tests pour les matériaux réemployés, ce à quoi s'attèlent déjà les ingénieurs civils et certaines structures. Pour être plus efficient dans les démarches de réemploi, il conviendrait donc de déterminer les tests minimums nécessaires au réemploi et ceux supplémentaires/optionnels selon les usages propres à chaque matériau afin de limiter des surcoûts.

La réduction du risque perçu par les maître d'ouvrage, liée aux formes de garantie plus poussées que pourraient donner des filières mieux organisées et pérennisées sera aussi un élément central pour le développement futur du réemploi.

Afin que les projets de construction puissent pleinement bénéficier des avantages environnementaux du réemploi, ces barrières doivent être levées. Ceci passe donc par la mise sur pied de filières structurées et spécialisées. Cette évolution semble faire son chemin mais elle doit subir une accélération si l'on veut espérer que le réemploi apporte une contribution notable à la décarbonation de nos modes de bâtir. La création de ces filières sera favorisée par la mise sur en marche d'un cercle vertueux dans lequel l'offre et la demande se stimuleront mutuellement. Cependant les seules conditions du marché ne suffisant pas pour lancer ce mouvement.

Cette mise en marche nécessite une intervention réglementaire. Le cas Genevois (LCI 117-118) que nous avons pu étudier de près dans le cadre de MAT-LOOP démontre que l'intérêt du côté des maître de l'ouvrage naît de directives contraignantes. La révision de la LPE (art. 35J, entré en vigueur le 1^{er} janvier 2025) pourrait donner sonner le départ au niveau fédéral, pour autant que la volonté politique existe.

Reste à savoir comment l'offre suivra. La question de la taille critique des entités proposant des composants de réemploi se posera forcément sur un territoire de petite taille comme la Suisse romande (ou plus largement de la Suisse). L'expérience de la filière de réemploi créée par Mobius en France pour les dalles de faux plancher technique démonte que l'atteinte du seuil de rentabilité et du niveau de prix permettant de concurrencer la distribution de matériel neuf (et les filières du recyclage) nécessite des volumes importants et une concentration des forces et des compétences et une vision sur le long terme de l'ensemble des acteurs du secteur.

7 Limites

7.1 Échantillon et représentativité des ressourceries

L'analyse quantitative sur sept ressourceries actives en Suisse romande et France voisine est représentative de l'offre actuelle, constituée majoritairement de structures de taille artisanale ou semi-industrielle. Les densités de stockage et les ratios d'efficacité observés pourraient différer significativement pour de futures plateformes logistiques industrielles de grande échelle, potentiellement plus optimisées.

7.2 Variabilité des impacts du réemploi et des produits neufs

Il est complexe d'évaluer de manière exhaustive les variabilités possibles des impacts pour une catégorie de produits donnée. L'étude générique sur la base des résultats d'écobilan du réemploi déjà disponibles a permis d'évaluer 15 des 39 catégories établies initialement. L'étude paramétrée plus précise mais aussi plus complexe a été réalisée sur une seule catégorie (les briques de terre de cuite) et dans les conditions données du projet de l'école de Meyrin.

7.3 Biais de l'unité volumique

Pour comparer des stocks hétérogènes, nous avons utilisé le volume (m³) comme unité principale. Cette approche, bien qu'indispensable pour l'analyse spatiale, tend à surreprésenter les matériaux encombrants par rapport aux matériaux denses et lourds (carrelage, quincaillerie) ou à forte valeur ajoutée technique. Les indicateurs d'efficacité spatiale doivent donc être interprétés avec cette nuance selon la typologie de produits stockés.

7.4 Données primaires et temporalité des projets pilotes

L'analyse du projet de l'école de Meyrin a été réalisée en phase d'avant-projet et de projet, intégrant des hypothèses de *sourcing* qui étaient encore en cours de validation. Une analyse a posteriori, une fois le chantier livré, serait nécessaire pour valider les écarts entre les scénarios logistiques simulés et la réalité du chantier.

7.5 Périmètre des impacts environnementaux

L'étude s'est concentrée sur les indicateurs de Réchauffement Climatique (GWP), d'Energie Grise (NRE) et de Charge Écologique (UBP). D'autres indicateurs pertinents pour le réemploi, tels que l'épuisement des ressources abiotiques (ADP), les ressources en eau ou l'usage des sols (sensible au stockage, à l'urbanisation, aux ressources biogéniques) n'ont pas été approfondis et mériteraient des investigations spécifiques.

7.6 Périmètre des inventaires

L'identification des composants en vue de l'analyse de leur potentiel de réemploi est basée sur des inventaires effectués sur immeubles et des parc immobiliers très principalement affecté au logement collectif. Bien que le logement collectif représente à Genève selon Khoury [17] environ 50% de la SRE totale du canton, on ne peut pas en déduire que les inventaires effectués sur d'autres types d'affectations (notamment les immeubles commerciaux, administratifs et les bâtiments artisanaux et industriels) donneraient les mêmes résultats et d'autres composants seraient peut-être susceptibles d'émerger. Une campagne d'inventaires effectués sur ces autres catégories permettrait de s'en assurer.

8 Conclusion

Le projet MAT-LOOP inscrit tout entier dans une approche « bottom – up » a permis d'étudier en détail la logistique des ressourceries, de saisir les complexités et caractéristiques du réemploi (en particulier de sa logistique) qui impactent le travail des praticiens au travers de deux projets pilotes et de nombreux entretiens, d'identifier les composants disponibles pour le réemploi sur des chantiers sources à partir d'inventaires réels, d'analyser le potentiel de ces composants en termes de réemploi selon une matrice d'analyse multicritère, de comparer leur impact environnemental par comparaison avec des solutions neuves et de produire des recommandations pour la mise sur pied de filières spécifiques à quatre types de composants et pour la mise en œuvre de leur réemploi.

Les conclusions issues du couplage d'observation de terrain des ressourceries avec la rigueur méthodologique en écobilan aboutissent à trois conclusions majeures :

- Le gain environnemental est confirmé et quantifiable. Pour les composants identifiés à haut potentiel (Structure béton, Bardages métalliques, Faux-planchers, Techniques), le réemploi permet une réduction drastique des émissions de GES (souvent supérieure à 85%), que la logistique ne vient pas remettre en cause.
- La logistique est un levier de performance. L'étude des ressourceries révèle des marges de progression importantes. Avec une occupation moyenne des sols de 50% pour le stockage et des hauteurs sous plafond parfois sous-exploitées, la professionnalisation des infrastructures permettra de densifier les stocks et de réduire encore l'impact unitaire du réemploi.
- L'incertitude ne doit pas bloquer l'action. L'outil d'aide à la décision et les analyses de sensibilité prouvent qu'il est possible de piloter des projets de réemploi malgré les inconnues de départ. La méthode proposée permet de sécuriser les choix des maîtres d'ouvrage en identifiant les filières "sans regret" où le bénéfice écologique est garanti.

La matrice d'analyse multicritère a non seulement été utile pour prioriser les composants communément inventoriés sur les chantiers de déconstruction au travers de leurs « signatures » mais a aussi été l'occasion de développer une maquette d'outil d'aide à la décision qui pourrait faire l'objet d'un développement ultérieur à l'issue du projet.

Finalement la production de recommandations pour la mise en œuvre du réemploi de quatre composants, représentatifs des quatre catégories identifiées dans le règlement d'application de la LCI genevoise, a aussi permis de réfléchir sur les conditions de mise sur pied de filières de récupération, stockage, reconditionnement et redistribution spécifiques à ces composants.

Les travaux décrits ci-dessus, ancrés dans la pratique, ont pour but de fournir aux praticiens des éléments de connaissance et des outils pratiques pour inciter tant les planificateurs que les maîtres d'ouvrage ou les entreprises à intégrer plus de circularité dans leurs pratiques et ainsi contribuer à la réduction de l'impact carbone du secteur de la construction.

9 Suite et perspectives

Suite à cette étude le développement de la maquette d'outil d'aide à la décision va être poursuivi, potentiellement avec le concours de la société EPIQR qui développe actuellement un outil quantitatif de prédiction d'inventaires de réemploi (EPIQR+CO2) qui pourrait être complémentaire de l'approche qualitative adoptée dans l'outil d'aide à la décision MAT-LOOP. Les modalités d'une telle collaboration doivent être discutées.

Les recommandations produites vont être diffusées dans le cadre des actions liées à la mise en application des articles LCI 117 et 118 dans le canton de Genève, avec le soutien de SIG éco-21, en charge de la solution réemploi destinée à assister les praticiens dans leur montée en compétence en la matière

L'approche paramétrique et probabiliste développée pour comparer les impacts GES des variantes de réemploi et neuves pourrait être généralisée et étendue à la fois d'autres catégories et dans des conditions plus larges. Par exemple des distances de transport couvrant la Suisse ou l'Europe. Par ailleurs, des aspects logistiques influents dans les impacts du réemploi sont encore trop simplifiés comme le taux de chargement des camions utilisés pour le transport, qui est fixe dans les hypothèses d'arrière-plan des données d'écobilan de la KBOB et qui reflète une moyenne de la flotte européenne. Concernant les impacts du neufs utilisés en comparaison avec le réemploi, une approche plus cohérente avec les pratiques du marché Suisse serait pertinente, à l'image de ce qui a été réalisé en France dans le Label Bas Carbone « METHODE RENOVATION - Produits réemployés et autres produits » où une valeur médiane est établie pour chaque catégorie de produit sur la base des FDES disponibles.

10 Références

- [1] M. Jakob *et al.* « GEPAMOD – Erweiterung des Gebäudeparkmodells gemäss SIA Effizienzpfad », 2016.
- [2] N. Herren et S. Hellweg, « Tracking Construction Material over Space and Time : Prospective and Geo-referenced Modelling of Building Stocks and Construction Material flows », *J.Ind.Ecol.*, vol. 23, n°1, p.253-267, févr. 2019, doi : 10.1111/JIEC.12739.
- [3] M. Gauch, C. Matasci, I. Hincapié, R. Hörler, et H. Böni, « Projekt MatCH - Bau: Material- und Energieressourcen sowie Umweltauswirkungen der baulichen Infrastruktur der Schweiz », EMPA-OFEV, 2016.
- [4] S. Lasvaux *et al.* « Reuse LCA : Identification of the reduction potential of the environmental impacts of Swiss buildings, through the material reuse », 2025.
- [5] OFEV, « Déchets et matières premières en bref (données de 2017) », 2022
- [5a] OFEN, « Le bâtiment zéro net, qu'est-ce que c'est ? », Benedikt Vogel, sur mandat de l'OFEN, septembre 2025
- [5b] Y. Priore, Th. Jusselme, G. Habert, « Energy and Buildings, Exploring the gap between carbon-budget-compatible buildings and existing solutions – A Swiss case study », 2023
- [6] L. Riquet, S. Citherlet, B. Séraphin, M. Frossard, A. Delfieu, « REMCO – État des lieux sur le réemploi de matériaux de construction », 2025
- [7] Salza et Materium, « Construire le réemploi - état des lieux et perspectives : une feuille de route », Zürich et Genève, 2020.
- [8] Stadt Zürich Amt für Hochbauten, Fachstelle Nachhaltiges Bauen
- [9] R. Meglin, « Economic and Environmental Assessment of a Regional Construction and Building Materials Industry in Switzerland - An Applied Combination of Material-Flow Analysis, Life-Cycle Assessment and Input-Output Analysis, 2022
- [10] Loi sur les constructions et installations diverses (LCI), art. 117 et 118, Canton de Genève, 2021.
- [11] CRB, « eCCC-Bât SN 506 511 - Code des coûts de construction par éléments, Bâtiment », 2020
- [12] OCEN, « Constructions et rénovations bas-carbone, Guidede mise en œuvre des articles 117 et 118 LCI et de leur règlement d'application (empreinte carbone matériaux de construction), 2025.
- [13] E. Gobbo, E. Maghsoudi Nia, A. Straub, A. Stephan, « Exploring the effective reuse rate of materials and elements in the construction sector », 2024
- [14] SIA, norme 390/1 « La voie du climat - Bilan des gaz à effet de serre sur le cycle de vie des bâtiments », 2025
- [15] SIA, règlement 102 (2020) « Règlement concernant les prestations et honoraires des architectes*, 2020
- [16] R. Bach, « Le réemploi, simple comme construire. Vers une architecture durable », Éditions Charles Léopold Mayer, Lausanne, 2025
- [17] J. Khoury, « Rénovation énergétique des bâtiments résidentiels collectifs : état des lieux, retours d'expérience et potentiels du parc genevois », UNIGE, 2014

11 Annexes

11.1 Liste des inventaires utilisés pour identifier les composants de réemploi

Inventaires menés par HEPIA sur des immeubles à rénover du parc de la CPEG (2024)

Rue des Charmilles 18, 1203 les Avanchets
Rue Grange-Lévrier 1 , 1220 les Avanchets
Rue Grange-Lévrier 2 à 7, 1220 les Avanchets
Route de Suisse 95, 95b , 97 1290 Versoix
Route de Saint-Julien 285, 1258 Perly-Certoux
Rue Antoine-Carteret 17, 1202 Genève
Rue Dancet 12-20 , 1205 Genève
Rue des Bossons 23, 1213 Onex
Avenue des Gros-Chênes 14, 1213 Onex
Chemin de L'Ancien-Tir 2, 1252 Meinier
Route de Mon-Ideé 51, 1226 Thônex

Autres inventaires menés par HEPIA (2024)

Route Suisse 93 , 1290 Versoix
Chemin César-Courvoisier 6, 1290 Versoix
Route de Saint-Julien 76, 1235 Lancy
Chemin de l'Ancien-Tir , 1252 Meinier

Inventaires menés par Matériuum (2021-23)

Rte des Jeunes 1, 1227 Genève
Rue de Lyon 108, 1203 Genève,
Route des Acacias 66 et 66B, 1227 Carouge
Chemin du Chêne 5, 1020 Renens
Quai de l'Ile 17, 1204 Genève,
Rue Edouard-Rod 16, 1203 Genève
Rue du Rhône 12, 1204 Genève
Chemin du Champ-d'Anier, 15-5, 1209 Genève
Rue Micheli-du-Crest 17, 1205 Genève
Chemin du Plantin 14, 1217 Meyrin
Route de Meyrin 49, 1203 Genève
Rue Dizenrens 26, 1205 Genève
Chemin de Colladon, 28, 1209 Genève
Chemin de Colladon, 12, 1209 Genève

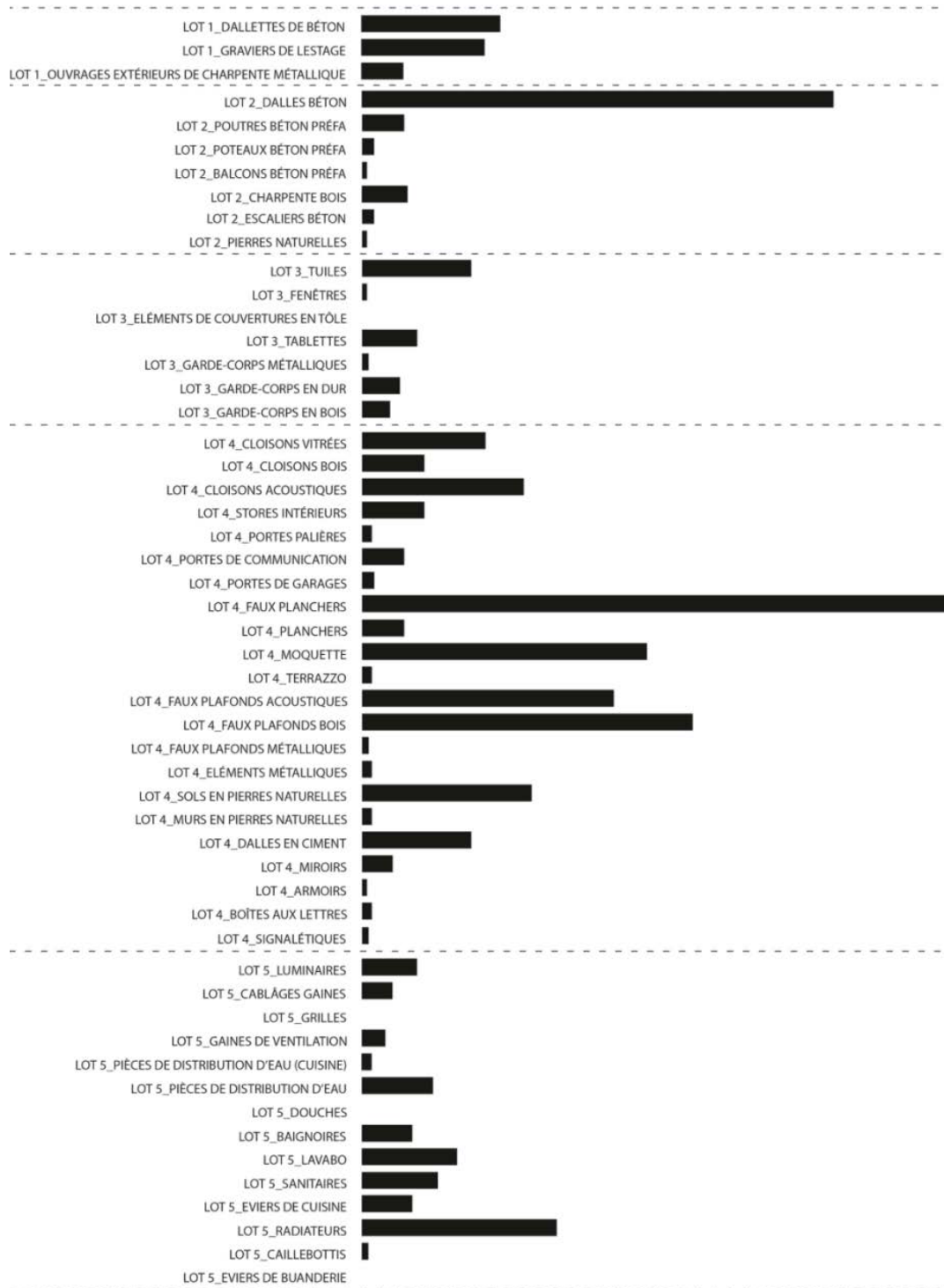
Inventaires menés par ATBA Architectes

Rue de Lyon 106, 1203 Genève
Rue de la Bergère 10, 1217 Meyrin
Devant Rue Soubeyran 7, 1203 Genève
Chemin du Grand-Puits 28 1217 Meyrin

Inventaire mené par l'association Soreva

Green Village, Chemin du Pommier, 1218 Le Grand-Saconnex,

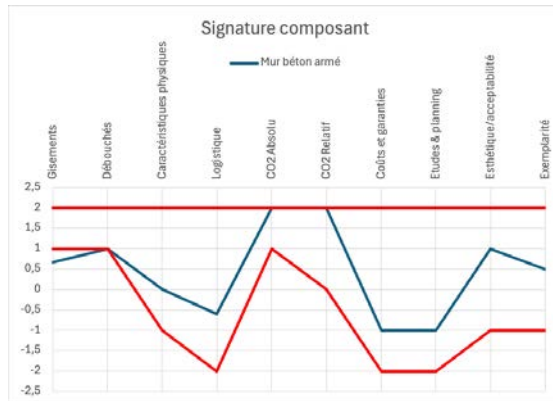
Occurrences des composants dans les inventaires (sans échelle)



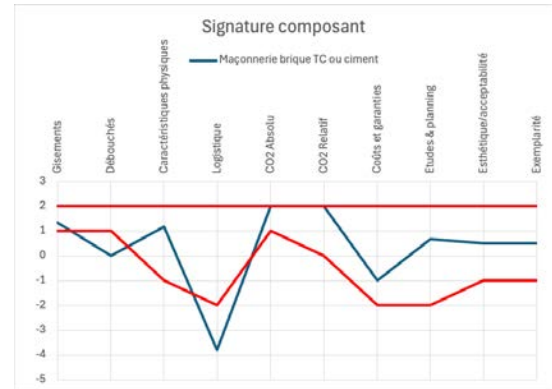
Notes					
	-2	-1	0	1	2
Gisement très limité	Gisement limité	Gisement moyen	Gisement importants	Gisement quantitativement très important	
La disponibilité est très faible (démontage très rare par rapport au gisement) Le composant se trouve en nombre très peu élevé ou en exemplaire unique sur les bâtiments déconstruits	La disponibilité est plutôt faible (démontage rare par rapport au gisement) Le composant se trouve en nombre peu élevé sur les bâtiments déconstruits	La disponibilité est moyenne (démontage épisodique) Le composant se trouve en nombre moyen sur les bâtiments déconstruits	La disponibilité est bonne (démontages fréquents) Le composant se trouve en nombre relativement élevé sur les bâtiments déconstruits	La disponibilité actuelle du composant est bonne (démontages fréquents) Le composant se trouve en nombre relativement élevé sur les bâtiments déconstruits	La disponibilité est très élevée (démontages très fréquents) Le composant se trouve en très grand nombre sur les bâtiments déconstruits
Débouché très limité	Débouché limité	Débouché neutre	Débouché importants	Débouché quantitativement très important	
Les performances fonctionnelles du composant réemployé sont inacceptables par rapport au neuf Filières concurrentes très actives et compétitives (filière réemploi établie et profitable) Composant 100% sur mesure	Les performances fonctionnelles du composant réemployé sont difficilement acceptables Filières concurrentes actives (recyclage lucratif p. ex) Composant plutôt sur mesure	Les performances fonctionnelles du composant réemployé sont acceptables Filières concurrentes (recyclage) en voie de développement et/ou peu rentable Composant standardisé mais avec adaptation sur mesure	Les performances fonctionnelles du composant réemployé sont quasi équivalentes au neuf Filières (concurrentes) rares et/ou peu actives et/ou peu efficaces (val. Te*hermique p.ex) Composant standardisé	Les performances fonctionnelles du composant réemployé sont équivalentes au neuf Aucune filière (concurrente), seule alternative = mise en décharge Composant très standardisé	
Le composant devrait être adapté mais il est impossible à adapter Le composant ne peut pas servir à d'autres usages que celui de base Chaque composant doit subir une batterie de tests complexes	Le composant doit être adapté et il est difficilement adaptable Le composant peut dans des cas particuliers être utilisé pour un autre usage avec adaptations Chaque composant doit subir des tests nécessitant du temps et une procédure déterminée	Le composant doit être adapté mais sans difficulté majeure Le composant peut être utilisé pour d'autre(s) usage(s) moyennant transformation Le composant peut être utilisé moyennant des tests individuels simples Le composant a subi une usure mais peut être réemployé sous conditions Le composant comporte un risque de pollution élevé mais gérable Le démontage est complexe et nécessite des moyens importants	Si besoin le composant peut être adapté facilement pour être réemployé Composant est utilisable pour d'autres usages moyennant adaptations simples Le composant peut être utilisé moyennant test simple d'un composant témoin Le composant a subi une usure superficielle, principalement esthétique Le composant comporte un faible risque de pollution facilement décelable et gérable Le démontage est simple et avec un peu de travail supplémentaire par rapport à une démolition Manutention avec outillage adapté et transport lourd Nettoyage avec remise en état relatif, nécessitant un outillage/produit spécialisé Stockage à l'intérieur, climat contrôlé (au chaud et au sec)	Le composant n'a besoin d'aucune adaptation (utilisé tel quel) Composant facilement réutilisé pour de nombreux autres usages avec peu ou pas d'adaptations Le composant peut être utilisé moyennant inspection visuelle Le composant a subi aucune usure avant son démontage (comme neuf) Le composant ne comporte aucun risque de pollution Le démontage est simple et sans travail supplémentaire par rapport à une démolition standard Manutention simple, à la main sans outillage particulier Aucun nettoyage requis (comme neuf) Stockage à l'air libre sans protection particulière Le remontage est simple identique par rapport au neuf Impact unitaire très positif par rapport au neuf Impact global sur l'ensemble d'un projet très positif	
Le composant subit une usure telle qu'il ne peut que rarement ou pas être réemployé Le composant comporte un risque de pollution élevé et complexe ou impossible à gérer Le démontage très complexe et nécessite des moyens lourds et beaucoup de travail Manutention très complexe avec moyens de levage lourd et transport lourd Nettoyage et remise en état complexes, avec outillage/produit spécifique Stockage en environnement très contrôlé et sécurisé Le remontage est très complexe, nécessite des techniques spécifiques et des moyens Impact unitaire très négatif par rapport au neuf Impact global sur l'ensemble d'un projet insignifiant Coût beaucoup plus élevé par rapport au neuf	Le composant subit une usure qui implique la mise à l'écart de nombreux éléments Le composant comporte un risque de pollution élevé mais gérable Le démontage est complexe et nécessite des moyens importants Manutention complexe et transport lourd nécessitant des moyens relativement importants Nettoyage avec remise en état important, nécessitant un outillage/produit spécialisé Stockage à l'intérieur, climat contrôlé (au chaud et au sec) Le remontage est complexe, nécessite des techniques et outils spécifiques Impact unitaire légèrement négatif par rapport au neuf Impact global sur l'ensemble d'un projet limité Coût plus élevé par rapport au neuf	Le composant subit une usure mais peut être réemployé sous conditions Le composant comporte un risque de pollution gérable Le démontage est possible mais nécessite un travail conséquent par rapport à la démolition Manutention avec outillage adapté et transport lourd Nettoyage avec remise en état relatif, nécessitant un outillage/produit adapté Stockage sous couvert, abrité de l'humidité Le remontage nécessite du travail supplémentaire par rapport au neuf et des outils spécifiques Impact unitaire neutre par rapport au neuf Impact global sur l'ensemble d'un projet neutre Coût similaire par rapport au neuf	Le composant subit une usure superficielle, principalement esthétique Le composant comporte un faible risque de pollution facilement décelable et gérable Le démontage est simple et avec un peu de travail supplémentaire par rapport à une démolition Manutention simple, avec outillage limité, transport léger Nettoyage sommaire, sans outillage particulier Stockage sous bache Le remontage est simple et avec un peu de travail supplémentaire par rapport au neuf, avec le même impact unitaire positif par rapport au neuf Impact global sur l'ensemble d'un projet positif Coût inférieur par rapport au neuf	Le composant subit une usure avant son démontage (comme neuf) Le composant ne comporte aucun risque de pollution Le démontage est simple et sans travail supplémentaire par rapport à une démolition standard Manutention simple, à la main sans outillage particulier Aucun nettoyage requis (comme neuf) Stockage à l'air libre sans protection particulière Le remontage est simple identique par rapport au neuf Impact unitaire très positif par rapport au neuf Impact global sur l'ensemble d'un projet très positif Coût très inférieur par rapport au neuf	
Garanties impossibles	Garantie limitée possible moyennant remise en état et tests complexes	Garantie possible moyennant remise en état et/ou tests simples	Possibilité d'obtenir une garantie relativement facilement	Pas de garanties spécifiques requises	
Le réemploi impacte lourdement la planification et le projet doit être adapté en fonction Le démontage sélectif du composant a un impact très lourd sur le planning du chantier Le réemploi a un impact très lourd sur le planning du chantier Le réemploi du composant est rejeté par les utilisateurs Le réemploi du composant génère systématiquement une moins value esthétique Le réemploi amène systématiquement à une sous-utilisation des capacités Le réemploi du composant donne une très mauvaise image au projet	Le réemploi nécessite un processus de planification adapté, avec possible impact sur le planning du chantier Le démontage sélectif du composant a un impact important sur le planning du chantier Le réemploi a un impact important sur le planning du chantier Le réemploi du composant est difficilement accepté par les utilisateurs Le réemploi du composant peut générer un moins value esthétique Le réemploi peut amener à une sous-utilisation des capacités du composant Le réemploi du composant donne plutôt une mauvaise image au projet	Le réemploi impacte le processus de planification dans une mesure acceptable Le démontage sélectif a un impact limité sur le chantier, moyennant outillage et moyens Le réemploi du composant a un impact indéniable mais limité sur le planning du chantier Le réemploi du composant peut poser problème à certains utilisateurs Le réemploi du composant ne génère ni plus value ni moins value esthétique Le réemploi permet d'utiliser les capacités du composant neutre au niveau de l'image du projet	Le réemploi a un impact limité sur le processus de planification Le démontage sélectif a un impact limité sur le chantier par rapport à la démolition Le réemploi du composant peut avoir un léger impact sur le planning du chantier (gérable) Le réemploi du composant ne pose pas de problème aux utilisateurs Le réemploi du composant peut générer une plus value esthétique pour le projet Le réemploi peut être l'occasion d'une meilleure utilisation des capacités du composant Le réemploi du composant permet de communiquer une image de marque au projet	Le réemploi n'impacte pas le processus de planification Le démontage sélectif du composant est sans impact sur le planning du chantier (idem sans impact sur le planning du chantier) Le réemploi du composant peut être prisé par les utilisateurs Le réemploi du composant génère en général une plus-value esthétique pour le projet Le réemploi est l'occasion de mieux utiliser les capacités du composant Le réemploi du composant permet de communiquer une très bonne image de marque au projet	

11.3 Signatures-composant

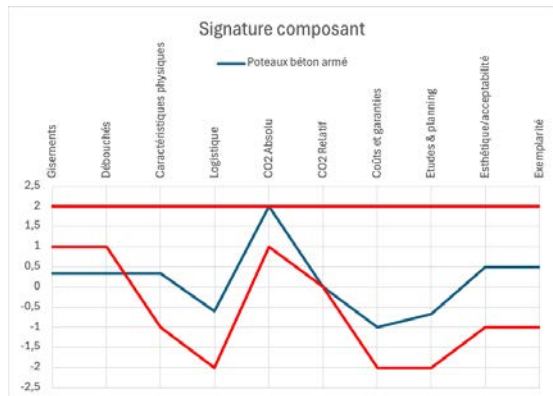
eCCC-Bât C - Gros œuvre – structures horizontales et verticales



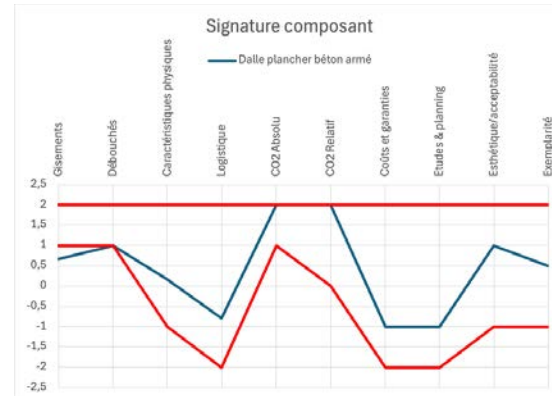
B



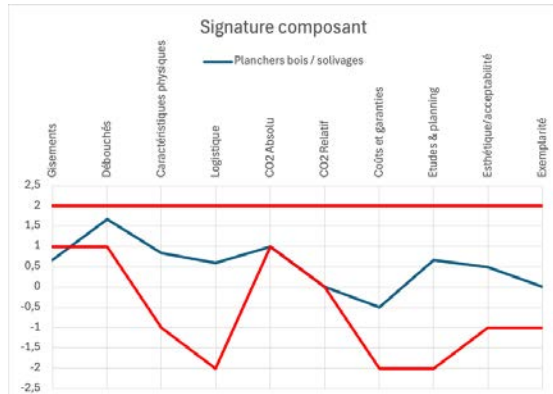
C



B



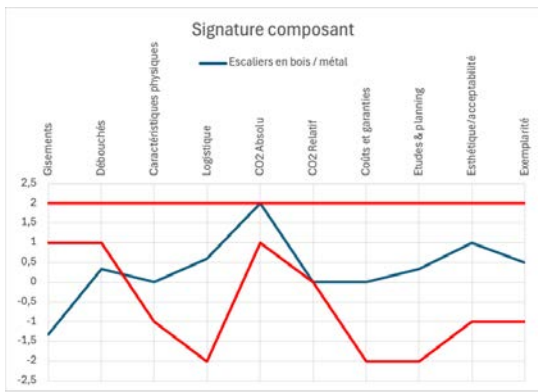
B



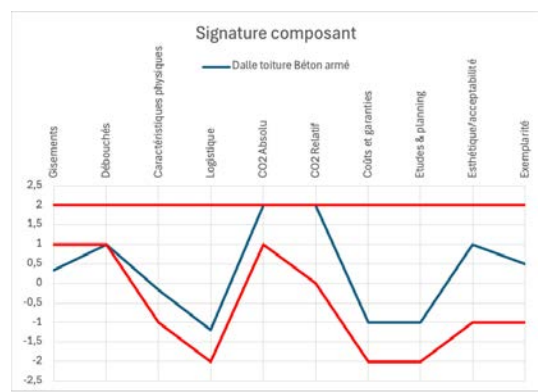
B



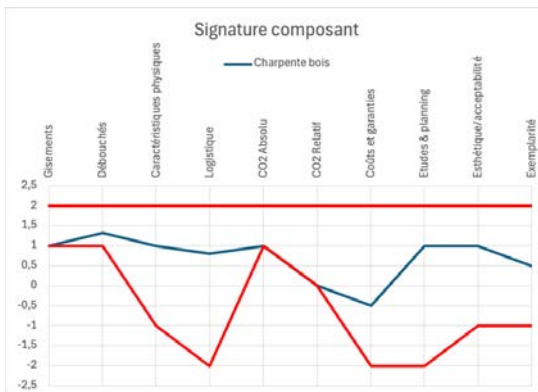
C



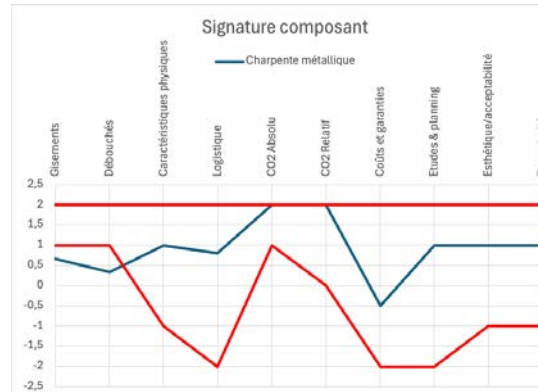
C



B

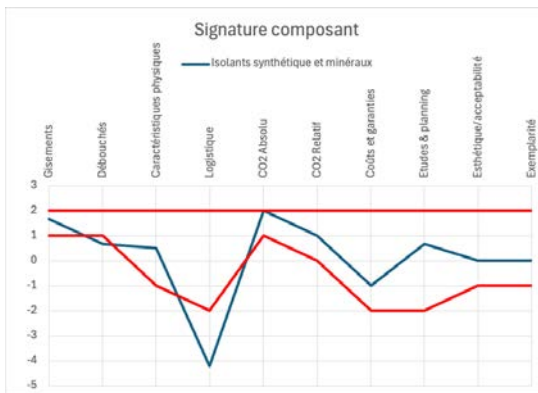


A

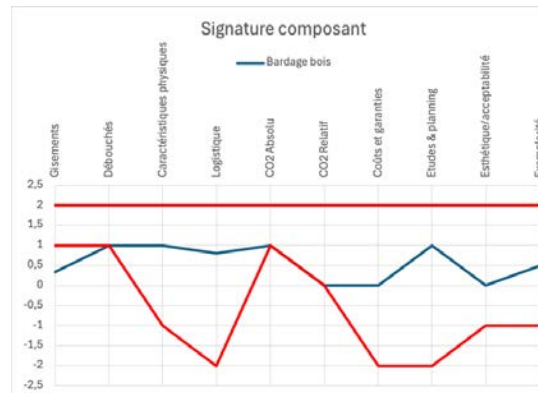


B

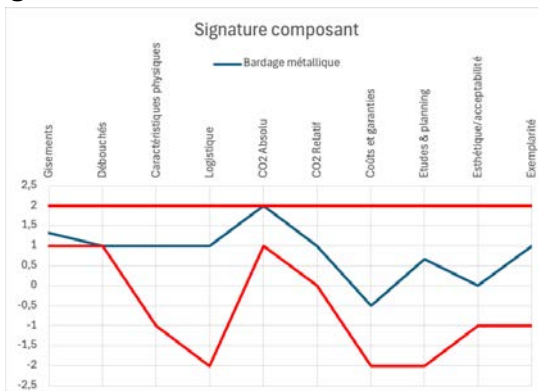
eCCC-Bât E- Revêtement de façade / eCCC-Bât F – Toiture - Enveloppe du bâtiment



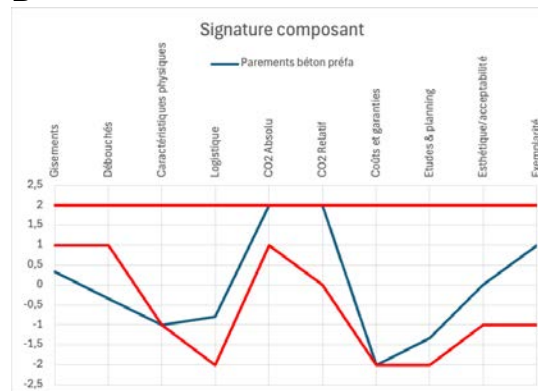
C



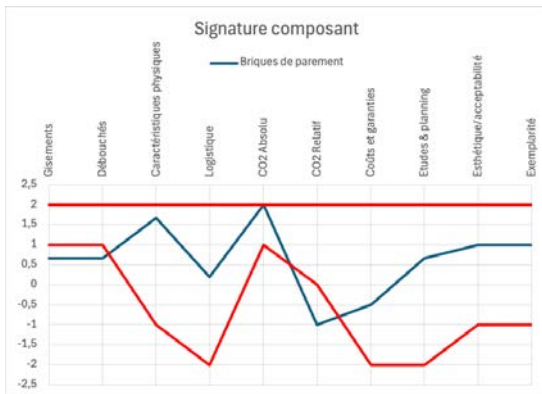
B



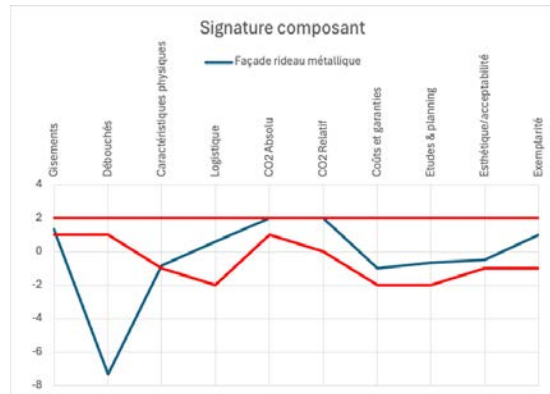
A



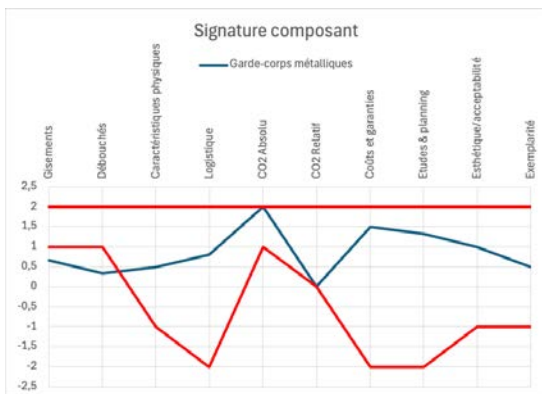
C



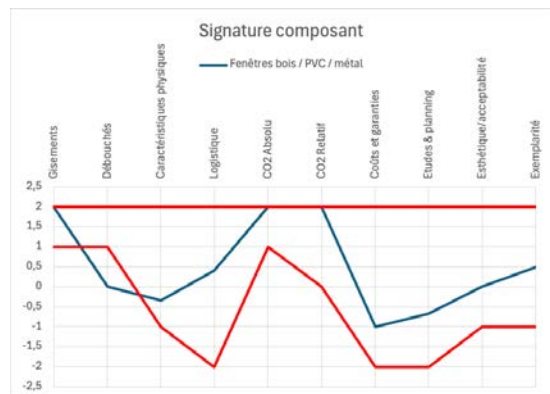
C



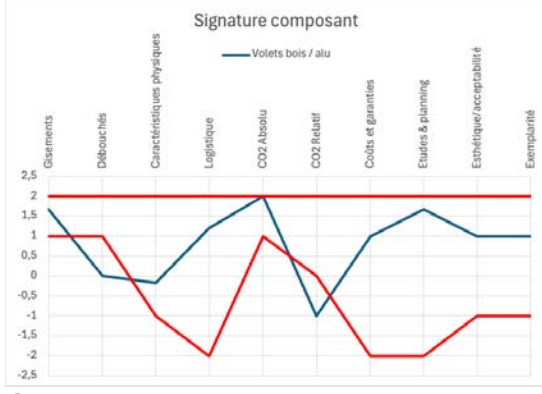
C



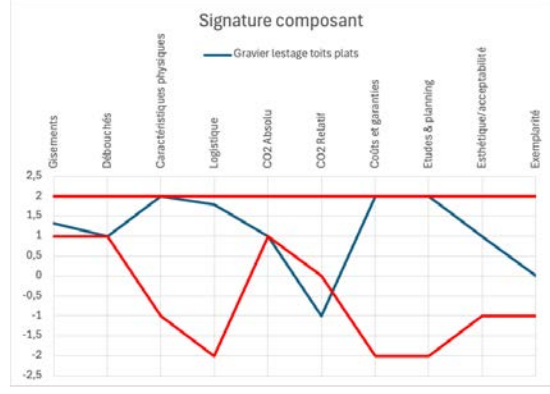
B



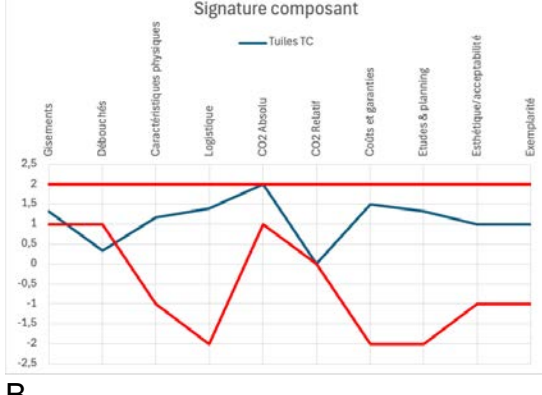
B



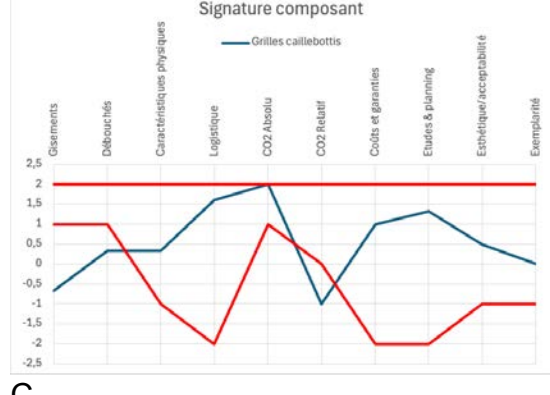
C



B

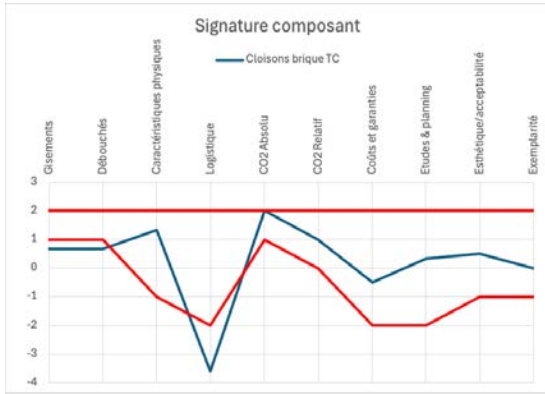


B

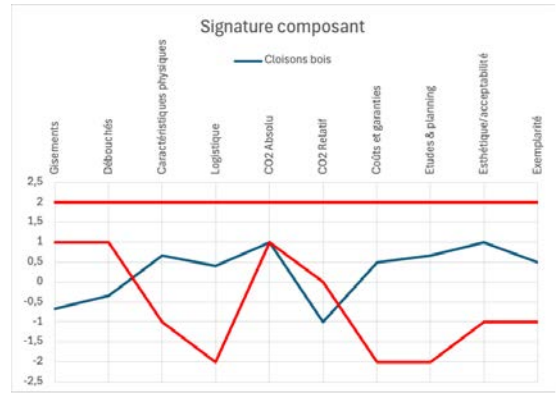


C

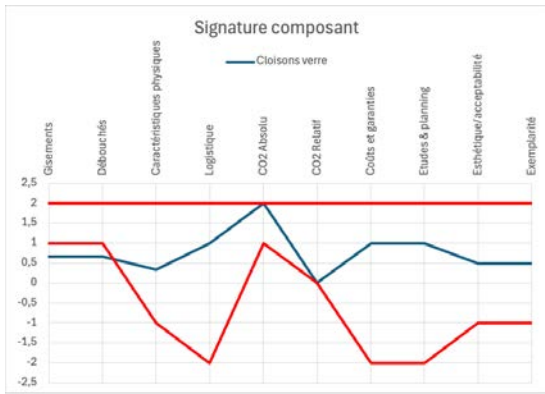
eCCC-Bât G – Aménagements intérieurs – Aménagements intérieurs fixes



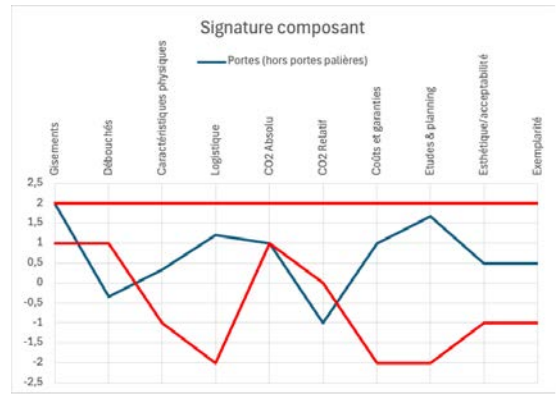
C



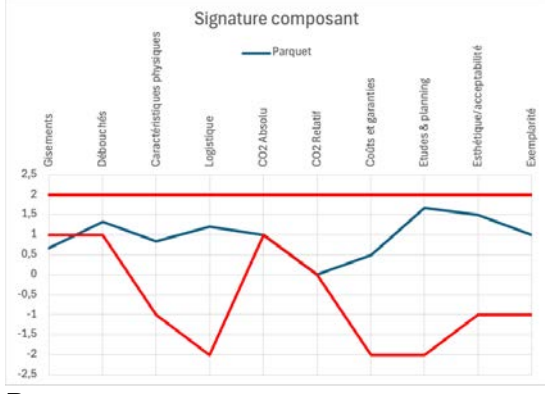
C



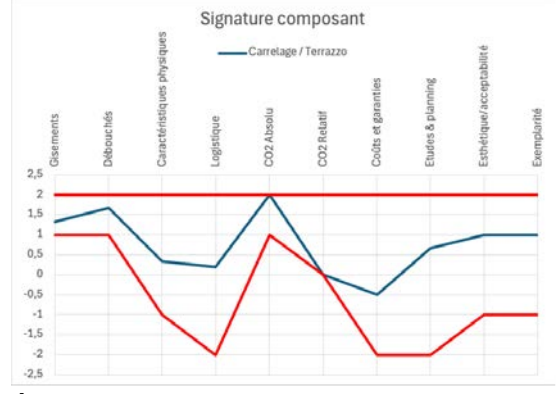
B



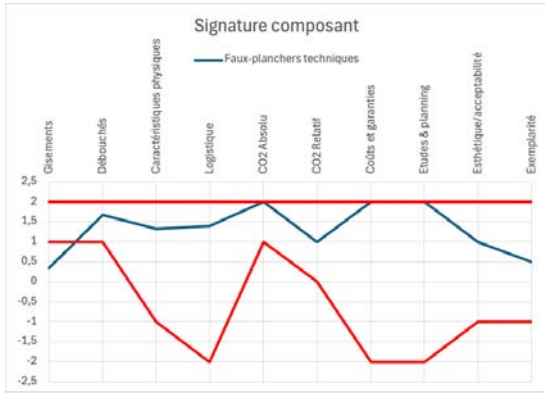
C



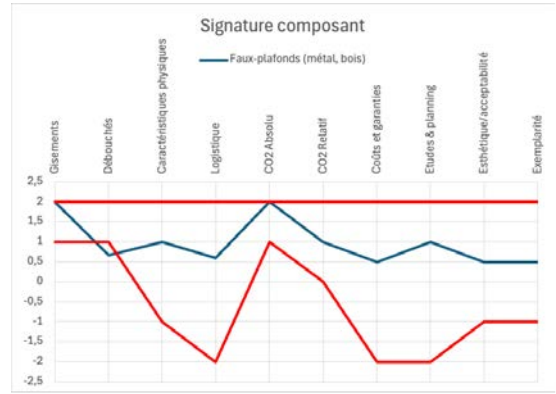
B



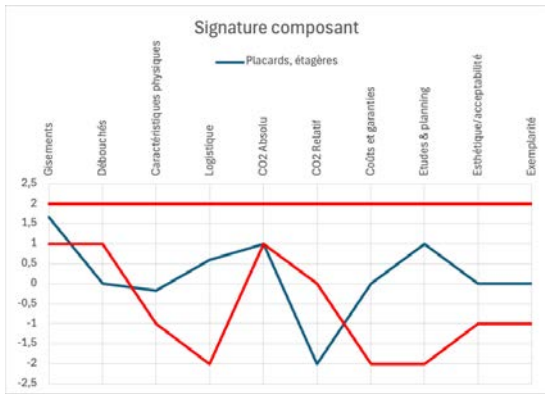
A



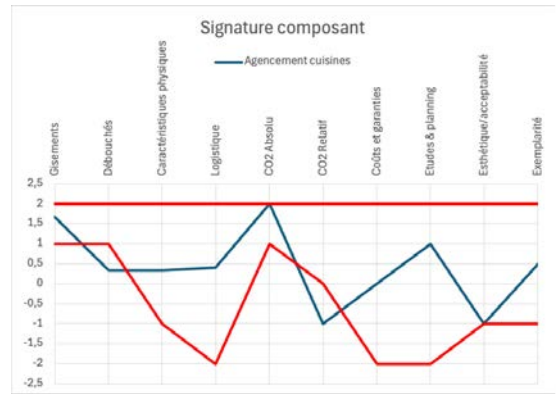
B



B

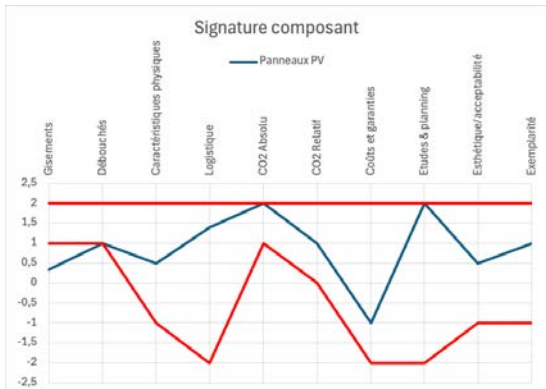


C

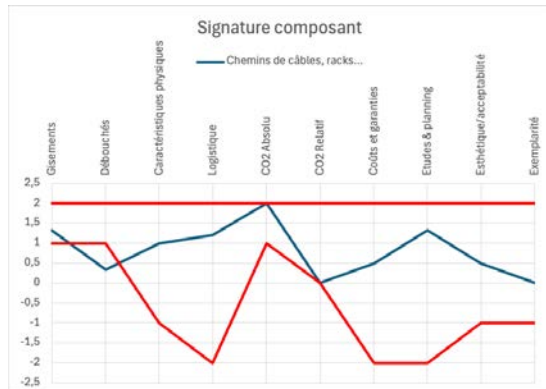


C

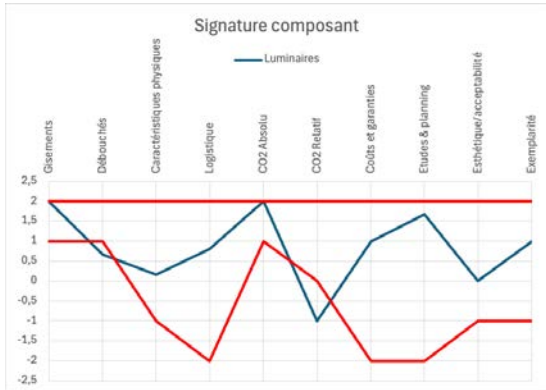
eCCC-Bât D – Installations – Installations techniques



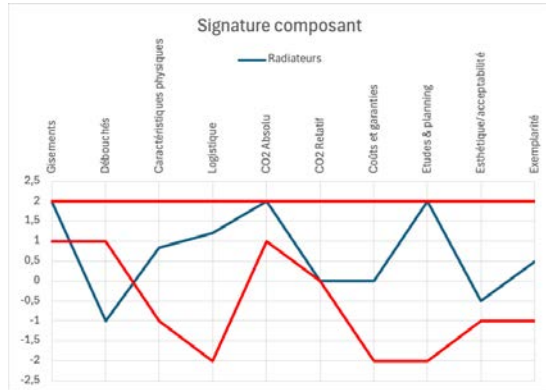
B



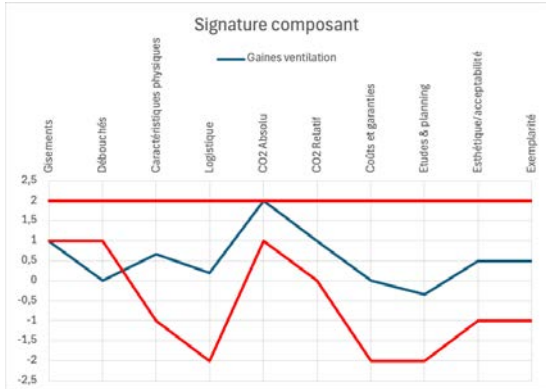
B



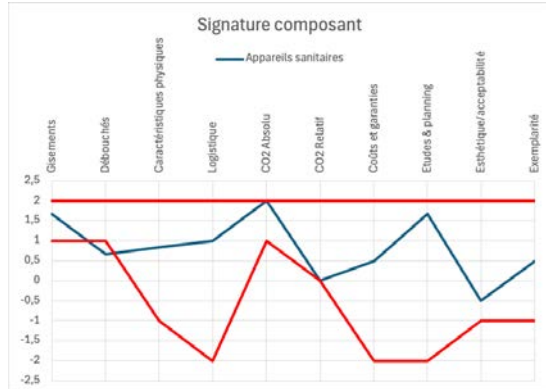
B



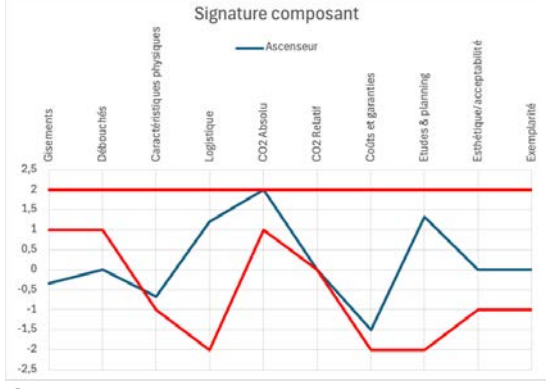
C



B

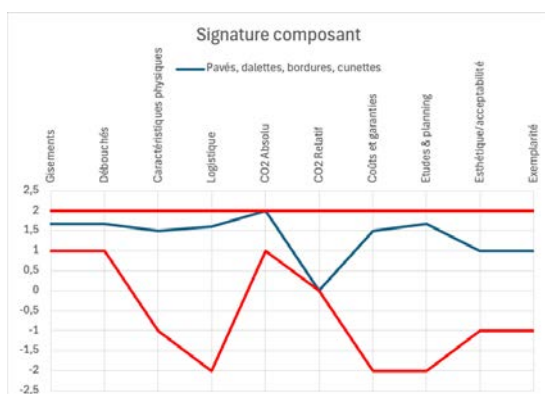


A



C

eCCC-Bât I -Aménagements extérieurs



A

Catégorie A : composants 100% dans les limites

Charpente bois	Carrelage
Bardage métallique	Appareils sanitaires

Catégorie B : composants dérogeant dans une faible mesure à un critère

Mur béton armé	Garde-corps métallique	Faux plafond
Pilier béton armé	Fenêtre Bois-PVC-métal	Panneaux PV
Dalle plancher béton armé	Gravier lestage	Chemin de câbles – rack
Plancher – solivage bois	Tuiles terre cuite	Luminaires
Dalle toiture béton armé	Cloison verre	Gaines ventilation
Charpente métallique	Parquet	
Bardage bois	Faux plancher technique	

Catégorie C : composants dérogeant fortement à un critère ou dérogeant à plusieurs critères

Maçonnerie brique TC
 Escalier béton préfabriqué
 Escalier bois – métal
 Isolants synthétiques et minéraux
 Parements béton préfabriqué
 Briques de parement
 Façade rideau métallique
 Volets bois – alu
 Grille caillebotis
 Cloisons brique terre cuite
 Cloison bois
 Portes
 Placards – étagères
 Agencement cuisine
 Radiateurs
 Ascenseurs

11.4 Données d'émission de GES utilisées pour l'analyse de variabilité des produits réemployés et neufs

Catégorie	Unité	Type	Type Source	Source	Détail	A1-A3	A1-A5	C1-C4	Total
Faux-planchers techniques	m ²	Réemploi	FDES	Mobius	Faux plancher seul	2,73			
Faux-planchers techniques	m ²	Réemploi	FDES	Mobius	Faux plancher + Structure	7,28			
Faux-planchers techniques	m ²	Réemploi	FDES	Mobius	Faux plancher seul	3,18			
Faux-planchers techniques	m ²	Réemploi	FDES	Mobius	Faux plancher + Structure	7,74			
Faux-planchers techniques	m ²	Réemploi	FDES	Mobius	Faux plancher seul	3,18			
Faux-planchers techniques	m ²	Réemploi	FDES	Mobius	Faux plancher + Structure	7,74			
Faux-planchers techniques	m ²	Réemploi	FDES	Mobius	Faux plancher seul	3,18			
Faux-planchers techniques	m ²	Réemploi	FDES	Mobius	Faux plancher + Structure	7,74			
Faux-planchers techniques	m ²	Réemploi	FDES	Mobius	Faux plancher seul	2,73			
Faux-planchers techniques	m ²	Réemploi	FDES	Mobius	Faux plancher + Structure	7,28			
Faux-planchers techniques	m ²	Neuf	FDES	Delabre	Faux plancher seul	8,44			
Faux-planchers techniques	m ²	Neuf	FDES	Delabre	Faux plancher + Structure	12,93			
Faux-planchers techniques	m ²	Neuf	FDES	Gamma Industries	Faux plancher seul	27,97			
Faux-planchers techniques	m ²	Neuf	FDES	Gamma Industries	Faux plancher + Structure	32,04			
Faux-planchers techniques	m ²	Réemploi	FDES	IDEC ICR	Faux plancher seul	3,04			
Faux-planchers techniques	m ²	Réemploi	FDES	IDEC ICR	Faux plancher + Structure	10,29			
Faux-planchers techniques	m ²	Réemploi	FDES	IDEC ICR	Faux plancher seul	3,04			
Faux-planchers techniques	m ²	Réemploi	FDES	IDEC ICR	Faux plancher + Structure	10,29			
Éléments de couverture en tôle	m ²	Réemploi	REUSE LCA	K118	Aluminium ép. 0,12 cm	0,29		5,8	6,08
Éléments de couverture en tôle	m ²	Réemploi	REUSE LCA	Hobelwerk	Aluminium ép. 0,10 cm	0,06		5,8	5,85
Éléments de couverture en tôle	m ²	Réemploi	REUSE LCA	ELYS	Acier ép. 0,80 cm	0,15		14,9	15,06
Éléments de couverture en tôle	m ²	Réemploi	REUSE LCA	K118	Acier ép. 0,07 cm	0,30		14,9	15,21
Éléments de couverture en tôle	m ²	Réemploi	REMCO	Echallens	Acier	0,08		14,9	14,99
Éléments de couverture en tôle	m ²	Neuf	KBOB	Tôle d'aluminium, nue	0,27 cm ép	40,9		5,8	47
Éléments de couverture en tôle	m ²	Neuf	KBOB	Tôle d'acier nickel-chrome 18/8, nue	0,27 cm ép	88,7		14,9	104
Éléments de couverture en tôle	m ²	Neuf	KBOB	Tôle d'acier nickel-chrome étamée 18/8	0,27 cm ép	126,7		14,9	142
Éléments de couverture en tôle	m ²	Neuf	KBOB	Tôle d'acier chromé, nue	0,27 cm ép	57,4		14,5	72

Éléments de couverture en tôle	m ²	Neuf	KBOB	Tôle d'acier chromé, étamée	0,27 cm ép	94,2	14,5	109
Éléments de couverture en tôle	m ²	Neuf	KBOB	Tôle de cuivre, nue	0,27 cm ép	53,5	19,2	73
Éléments de couverture en tôle	m ²	Neuf	KBOB	Tôle de laiton/bronze de construction	0,27 cm ép	61,2	17,9	79
Éléments de couverture en tôle	m ²	Neuf	KBOB	Tôle d'acier nue	0,27 cm ép	59,8	14,8	75
Éléments de couverture en tôle	m ²	Neuf	KBOB	Tôle d'acier, zinguée	0,27 cm ép	96,1	14,8	111
Éléments de couverture en tôle	m ²	Neuf	KBOB	Tôle zinc-titane	0,27 cm ép	79,1	15,5	95
Panneaux photovoltaïques	kWc	Réemploi	REUSE LCA	Kosmos		1,3		
Panneaux photovoltaïques	kWc	Réemploi	REUSE LCA	K118		5,7		
Panneaux photovoltaïques	kWc	Réemploi	REMCO	SIG		1,4		
Panneaux photovoltaïques	kWc	Neuf	KBOB			774,0		
Panneaux photovoltaïques	kWc	Neuf	KBOB			765,0		
Installation photovoltaïque	kWc	Réemploi	Swiss PV Circle	Panneaux réemploi SIG + composants neufs KBOB				400
Installation photovoltaïque	kWc	Neuf	KBOB	Panneaux et composants neufs				1100
Installation photovoltaïque	kWc	Neuf	Mat-Loop	Panneaux avec ajustement 2023 (matière) + composants neufs				950
Installation photovoltaïque	kWc	Neuf	Mat-Loop	Panneaux avec ajustement 2023 (matière et énergie) + composants neufs				820
Éléments en bois	m ³	Réemploi	REUSE LCA	ELYS		34,8		
Éléments en bois	m ³	Réemploi	REUSE LCA	ELYS		33,3		
Éléments en bois	m ³	Réemploi	REUSE LCA	ELYS		33,3		
Éléments en bois	m ³	Réemploi	REUSE LCA	ELYS		37,3		
Éléments en bois	m ³	Réemploi	REUSE LCA	Denens		2,1		
Éléments en bois	m ³	Réemploi	REUSE LCA	K118		50,4		
Éléments en bois	m ³	Réemploi	REMCO	Echallens		6,8		
Éléments en bois	m ³	Neuf	KBOB	Bois massif hêtre / chêne, séché à l'air, brut, production Suisse		41,5		
Éléments en bois	m ³	Neuf	KBOB	Bois massif hêtre, chêne, séché en cellule, brut, production Suisse		47,3		
Éléments en bois	m ³	Neuf	KBOB	Bois massif hêtre / chêne, séché à l'air, brut		57,2		
Éléments en bois	m ³	Neuf	KBOB	Bois massif hêtre / chêne, séché en cellule, raboté, production Suisse		56,2		
Éléments en bois	m ³	Neuf	KBOB	Bois massif épicéa / sapin / mélèze, séché à l'air, brut		43,8		
Éléments en bois	m ³	Neuf	KBOB	Bois massif épicéa / sapin, séché en cellule, holzpur		39,9		
Éléments en bois	m ³	Neuf	KBOB	Bois massif hêtre, chêne, séché en cellule, brut		64,9		
Éléments en bois	m ³	Neuf	KBOB	Bois massif épicéa / sapin / mélèze, séché à l'air, raboté, production Suisse		50,0		

Eléments en bois	m3	Neuf	KBOB	Bois massif hêtre / chêne, séché en cellule, raboté	76,3	
Eléments en bois	m3	Neuf	KBOB	Bois massif épicéa / sapin / mélèze, séché en cellule, raboté, production Suisse	54,4	
Eléments en bois	m3	Neuf	KBOB	Bois massif épicéa / sapin / mélèze, séché à l'air, raboté	56,7	
Eléments en bois	m3	Neuf	KBOB	Bois massif épicéa / sapin / mélèze, séché en cellule, raboté	62,3	
Eléments en bois	m3	Neuf	KBOB	Bois massif de construction	106,4	
Eléments en bois	m3	Neuf	KBOB	Bois lamellé-collé	125,1	
Eléments en bois	m3	Neuf	KBOB	Bois lamellé / multiplex, colle UF, zone sèche	434,0	
Eléments en bois	m3	Neuf	KBOB	Bois lamellé / multiplex, colle PF, zone humide	675,0	
Panneau bois	m ²	Réemploi	REUSE LCA	Kosmos	Wood cladding	0,3
Panneau bois	m ²	Réemploi	REUSE LCA	K118	Wooden panel	0,1
Panneau bois	m ²	Réemploi	REUSE LCA	Kosmos	HPL panels	8,7
Panneau bois	m ²	Réemploi	REUSE LCA	Kosmos	MDF panels	0,2
Panneau bois	m ²	Réemploi	REUSE LCA	Kosmos	MDF panels off-cuts	0,1
Panneau bois	m ²	Réemploi	REUSE LCA	K118	OSB panel	0,0
Panneau bois	m ²	Réemploi	REUSE LCA	Kosmos	OSB panels	0,3
Panneau bois	m ²	Neuf	KBOB	Bois massif hêtre / chêne, séché en cellule, raboté	1,2	
Panneau bois	m ²	Neuf	KBOB	Bois massif épicéa / sapin / mélèze, séché à l'air, raboté	0,9	
Panneau bois	m ²	Neuf	KBOB	Bois massif épicéa / sapin / mélèze, séché en cellule, raboté	1,0	
Panneau bois	m ²	Neuf	KBOB	Contreplaqué de planches	2,2	
Panneau bois	m ²	Neuf	KBOB	Bois massif 3 et 5 plis	3,0	
Panneau bois	m ²	Neuf	KBOB	Panneau de particules, colle PF, zone humide	4,6	
Panneau bois	m ²	Neuf	KBOB	Panneau de particules, colle UF, zone sèche	4,6	
Panneau bois	m ²	Neuf	KBOB	Panneau d'aggloméré type OSB, colle PF, zone humide	4,7	
Panneau bois	m ²	Neuf	KBOB	Panneau de bois léger à paille de bois liée par du ciment	3,2	
Panneau bois	m ²	Neuf	KBOB	Panneau de particules, colle UF, enduit, zone sèche	6,6	
Panneau bois	m ²	Neuf	KBOB	Panneau de particules tubulaire	3,2	
Panneau bois	m ²	Neuf	KBOB	Panneau de fibres à densité moyenne (MDF), colle UF	9,4	
Panneau bois	m ²	Neuf	KBOB	Contreplaqué de placage	12,4	
Panneau bois	m ²	Neuf	KBOB	Panneau de particules dur	15,7	
Panneau bois	m ²	Neuf	KBOB	Panneau de façade, stratifié (HPL), 8,1 mm	24,9	

Parquet	m ²	Réemploi	REUSE LCA	Hobelwerk		0,2
Parquet	m ²	Réemploi	REUSE LCA	K118		0,2
Parquet	m ²	Neuf	KBOB	Bois massif hêtre / chêne, séché en cellule, raboté		2,3
Parquet	m ²	Neuf	KBOB	Bois massif épicéa / sapin / mélèze, séché en cellule, raboté		1,9
Parquet	m ²	Neuf	KBOB	Bois massif épicéa / sapin / mélèze, séché à l'air, raboté		1,7
Parquet	m ²	Neuf	KBOB	Parquet préfabriqué en liège, 10,5 mm		7,8
Parquet	m ²	Neuf	KBOB	Parquet en liège, revêtement PVC, 3,2 mm		4,8
Parquet	m ²	Neuf	KBOB	Parquet en liège, huilé et vitrifié, 5,3 mm		2,0
Parquet	m ²	Neuf	KBOB	Parquet, 2 plis, vitrifié d'usine, 11 mm		7,5
Parquet	m ²	Neuf	KBOB	Parquet, 3 plis, vitrifié d'usine, 15 mm		7,7
Parquet	m ²	Neuf	KBOB	Parquet type mosaïque, vitrifié d'usine, 8 mm		3,4
Cuisine	Unité	Réemploi	REUSE LCA	Kosmos		0,0
Cuisine	Unité	Neuf	KBOB	Cuisine, bois massif, 16 éléments		418,0
Cuisine	Unité	Neuf	KBOB	Cuisine, métal, 16 éléments		2720,0
Cuisine	Unité	Neuf	KBOB	Cuisine, bois reconstitué, 16 éléments		557,0
Cloison brique terre cuite	m ²	Réemploi	REUSE LCA	Denens	Hors mortier	4,7
Cloison brique terre cuite	m ²	Neuf	KBOB	Brique en terre cuite	Hors mortier	20,6
Caillebotis	m ²	Réemploi	REUSE LCA	Hobelwerk		0,1
Caillebotis	m ²	Neuf	KBOB	Tôle d'acier, zinguée	15 kg/m ²	67,4
Caillebotis	m ²	Neuf	KBOB	Tôle d'acier, zinguée	40 kg/m ²	179,6
Carrelage	m ²	Réemploi	REUSE LCA	Hobelwerk		0,2
Carrelage	m ²	Réemploi	REUSE LCA	Hobelwerk		0,2
Carrelage	m ²	Réemploi	REUSE LCA	Kosmos		0,9
Carrelage	m ²	Neuf	KBOB	Dalle en céramique/grès, 9 mm		14,0
Carrelage	m ²	Neuf	KBOB	Dalle en pierre artificielle, liée au ciment, 10 mm		4,5
Carrelage	m ²	Neuf	KBOB	Terrazzo vitrifié, 40 mm		16,1
Fenêtre	m ²	Réemploi	K118	12-panes industrial window with aluminium frames and double glazing 1 K118		2,9
Fenêtre	m ²	Réemploi	K118	Casement window with top light, aluminium frame and triple glazing 1 K118		5,2
Fenêtre	m ²	Réemploi	K118	Double glazing windows, wood frame 1 K118		2,4
Fenêtre	m ²	Réemploi	Hobelwerk	Double glazing wood/metal 1 Hobelwerk		0,4

Fenêtre	m ²	Réemploi	Hobelwerk	Double glazing wood/metal 2 Hobelwerk	0,4	
Fenêtre	m ²	Réemploi	Hobelwerk	Double glazing wood/metal 3 Hobelwerk	0,1	
Fenêtre	m ²	Réemploi	ELYS	Reused triple glazing ELYS	0,2	
Fenêtre	m ²	Réemploi	ELYS	Reused triple glazing ELYS	0,2	
Fenêtre	m ²	Réemploi	ELYS	Reused triple glazing ELYS	0,2	
Fenêtre	m ²	Réemploi	K118	Triple glazing windows, metal frame 1 K118	4,1	
Fenêtre	m ²	Neuf	KBOB	Double vitrage, U<1.1 W/m2K, épaisseur 24 mm + Cadre de fenêtre en aluminium	108,2	
Fenêtre	m ²	Neuf	KBOB	Double vitrage, U<1.1 W/m2K, épaisseur 24 mm + Cadre de fenêtre en bois	46,8	
Fenêtre	m ²	Neuf	KBOB	Double vitrage, U<1.1 W/m2K, épaisseur 24 mm + Cadre de fenêtre bois-métal	61,2	
Fenêtre	m ²	Neuf	KBOB	Double vitrage, U<1.1 W/m2K, épaisseur 24 mm + Cadre en matière synthétique (PVC)	58,4	
Fenêtre	m ²	Neuf	KBOB	Double vitrage, U<1.1 W/m2K, épaisseur 18 mm + Cadre de fenêtre en aluminium	112,1	
Fenêtre	m ²	Neuf	KBOB	Double vitrage, U<1.1 W/m2K, épaisseur 18 mm	50,6	
Fenêtre	m ²	Neuf	KBOB	Double vitrage, U<1.1 W/m2K, épaisseur 18 mm + Cadre de fenêtre bois-métal	65,0	
Fenêtre	m ²	Neuf	KBOB	Double vitrage, U<1.1 W/m2K, épaisseur 18 mm + Cadre en matière synthétique (PVC)	62,3	
Fenêtre	m ²	Neuf	KBOB	Triple vitrage, U<0.5 W/m2K, épaisseur 6 mm + Cadre de fenêtre en aluminium	133,3	
Fenêtre	m ²	Neuf	KBOB	Triple vitrage, U<0.5 W/m2K, épaisseur 6 mm + Cadre de fenêtre en bois	71,9	
Fenêtre	m ²	Neuf	KBOB	Triple vitrage, U<0.5 W/m2K, épaisseur 6 mm + Cadre de fenêtre bois-métal	86,3	
Fenêtre	m ²	Neuf	KBOB	Triple vitrage, U<0.5 W/m2K, épaisseur 6 mm + Cadre en matière synthétique (PVC)	83,5	
Fenêtre	m ²	Neuf	KBOB	Triple vitrage, U<0.6 W/m2K, épaisseur 40 mm + Cadre de fenêtre en aluminium	124,7	
Fenêtre	m ²	Neuf	KBOB	Triple vitrage, U<0.6 W/m2K, épaisseur 40 mm + Cadre de fenêtre en bois	63,3	
Fenêtre	m ²	Neuf	KBOB	Triple vitrage, U<0.6 W/m2K, épaisseur 40 mm + Cadre de fenêtre bois-métal	77,7	
Fenêtre	m ²	Neuf	KBOB	Triple vitrage, U<0.6 W/m2K, épaisseur 40 mm + Cadre en matière synthétique (PVC)	74,9	
Isolation	m ² (R=5)	Réemploi	K118	Insulation panel Sarnatherm K118	1,9	10,5
Isolation	m ² (R=5)	Réemploi	ELYS	Reused rockwool ELYS	0,7	1,3
Isolation	m ² (R=5)	Réemploi	K118	Rockwool K118	1,4	2,7
Isolation	m ² (R=5)	Neuf	KBOB	Fibre de cellulose		2,2
Isolation	m ² (R=5)	Neuf	KBOB	Paille		3,9
Isolation	m ² (R=5)	Neuf	KBOB	Laine de verre		5,1
Isolation	m ² (R=5)	Neuf	KBOB	Laine de mouton		7,4
Isolation	m ² (R=5)	Neuf	KBOB	Fibre de lin		7,5

solation	m ² (R=5)	Neuf	KBOB	Laine de roche				8,6
Isolation	m ² (R=5)	Neuf	KBOB	Fibre de bois				11,5
Isolation	m ² (R=5)	Neuf	KBOB	Laine minérale haute densité				14,6
Isolation	m ² (R=5)	Neuf	KBOB	EPS R100				14,7
Isolation	m ² (R=5)	Neuf	KBOB	EPS				19,4
Isolation	m ² (R=5)	Neuf	KBOB	Polyuréthane				29,2
Sol en pierre	m ²	Réemploi	K118				4,1	
Sol en pierre	m ²	Réemploi	K118				3,8	
Sol en pierre	m ²	Neuf	KBOB	Dalle en pierre naturelle rectifiée, 15 mm				16,3
Sol en pierre	m ²	Neuf	KBOB	Dalle en pierre naturelle coupée, 15 mm				12,9
Sol en pierre	m ²	Neuf	KBOB	Dalle en pierre naturelle polie, 15 mm				19,1
Béton	m ²	Réemploi	REMCO	JA Intérieur direct		1,3	6,1	7,4
Béton	m ²	Réemploi	REMCO	JA Intérieur re-scié		2,6	6,1	8,6
Béton	m ²	Réemploi	REMCO	JA Extérieur direct		1,1	6,7	7,8
Béton	m ²	Réemploi	REMCO	JA Extérieur re-scié		2,5	6,5	9,0
Béton	m ²	Réemploi	REMCO	SA Intérieur direct		1,3	7,0	8,3
Béton	m ²	Réemploi	REMCO	SA Intérieur re-scié		4,8	4,8	9,6
Béton	m ²	Réemploi	REMCO	SA Extérieur direct		1,8	4,8	6,6
Béton	m ²	Réemploi	REMCO	SA Extérieur re-scié		4,3	4,8	9,1
Béton	m ²	Réemploi	REMCO	SA Opus circulaire		6,1	0,0	6,1
Béton	m ²	Réemploi	REMCO	V CAD direct		1,2	7,0	8,2
Béton	m ²	Réemploi	REMCO	V CAD re-scié		2,4	7,0	9,4
Béton	m ²	Réemploi	REMCO	V Tuilerie direct		1,8	7,0	8,8
Béton	m ²	Réemploi	REMCO	V Tuilerie re-scié		2,8	7,0	9,8
Béton	m ²	Réemploi	REMCO	V CC préfa scié		1,2	1,9	3,1
Béton	m ²	Neuf	KBOB	Béton coulé + couche de forme		90,6	13,7	104,3
Béton	m ²	Neuf	UVEK	covering layer, bituminised/kg/CH U 2,75 cm + couche de forme		14,2	16,1	30,3
Béton	m ²	Neuf	KBOB	Asphalte coulé, 27,5 mm + couche de forme		22,9	16,1	39,0
Béton	m ²	Neuf	KBOB	Asphalte coulé, 27,5 mm ajusté à 7 cm + couche de forme		45,6	18,0	63,6

11.5 Recommandations composants

Recommandations pour le développement du réemploi de

BÉTON ARMÉ

Lot 2 Structure horizontale et verticale

Institut : inPACT
Projet : MATLOOP
Date : Décembre 2025
Auteurs : Lionel RINQUET, professeur HES associé
Benôit SERAPHIN, collaborateur scientifique HES
Almir DELFIEU, assistant HES

Table des matières

Résumé.....	3
Summary.....	3
Lexique	4
Enjeux	5
Filière	6
Analyses préalables.....	11
Déconstruction	16
Manutention et transport	19
Stockage	20
Reconditionnement	21
Remise en œuvre	22
Garanties	23
Bibliographie	24
Normes utiles	24

Résumé

Le béton armé représente de loin le matériau le plus employé dans la construction en Suisse. Les impacts environnementaux pour sa production sont très élevés et il est présent dans quasiment tous les bâtiments, représentant de facto un gisement gigantesque pour le réemploi.

Le réemploi de béton armé est attesté dans certains cas en Suisse, c'est, hors certains projets de recherche, toujours avec une sous-utilisation des capacités structurelles embarquées du matériau. Cette situation est due au niveau de risque élevé perçu par les concepteurs et les maîtres d'ouvrage et à l'absence d'acteurs expérimentés en nombre suffisant et de filières organisées pour la récupération et la distribution de béton armé.

La prise en compte des spécificités du réemploi pour des composants structurels doit être effective dès les phases préliminaires de l'avant-projet. En dehors de certains cas spécifiques, il apparaît illusoire de pouvoir coordonner des chantiers de démolition sur des chantiers sources avec les études sur les chantiers cibles qui sont exécutées bien souvent des années avant l'exécution.

Il ressort que le modèle d'affaire le plus apte à répondre au besoin du marché est la mise sur pied de filières de réemploi ex-situ, externes et déphasées, basées sur une standardisation des modules de béton armé proposés, offrant aux concepteurs une base de travail stable pour planifier le réemploi, aux déconstructeurs une garantie de débouché et aux intermédiaires une rotation de stock permettant d'atteindre le seuil de rentabilité.

Ces recommandations développent également les différentes étapes du processus de projet avec les modes d'analyses et tests à effectuer, la déconstruction, la manutention/transport, le stockage, le reconditionnement et la remise en œuvre.

Summary

Reinforced concrete is by far the most widely used material in construction in Switzerland. Its production has a very high environmental impact, and it is present in almost all buildings, representing a huge source of material for reuse.

The reuse of reinforced concrete has been documented in certain cases in Switzerland, but apart from some research projects, the structural capacity of the material is still underutilized. This situation is due to the high level of risk perceived by designers and project owners and the lack of sufficient numbers of experienced operators and organized channels for the recovery and distribution of reinforced concrete.

The specific characteristics of reuse for structural components must be taken into account from the preliminary stages of the preliminary design. Apart from certain specific cases, it seems unrealistic to be able to coordinate demolition work on source sites with studies on target sites, which are often carried out years before execution.

It appears that the business model best suited to meeting market needs is the establishment of ex-situ reuse external and phased channels, based on standardization of the reinforced concrete modules offered, providing designers with a stable working basis for planning reuse, deconstructors with a guaranteed outlet, and intermediaries with stock rotation enabling them to reach the break-even point.

These recommendations also outline the various stages of the project process, including the types of analysis and testing to be carried out, dismantling, handling/transport, storage, reconditioning, and reinstallation.

Lexique

Chantier cible : Chantier où sont remis en œuvre les matériaux de réemploi issus d'une déconstruction.

Chantier source : Chantier d'où proviennent les matériaux réemployés.

Downgrading : Anglicisme qui traduit une sous-utilisation, c'est-à-dire une perte de propriétés entre l'usage initial d'un matériau et son usage présent ou futur. Dans le cas du béton armé, dès que des armatures sont sciées, il y a une sous-utilisation des éléments découpés.

Recyclage : Valorisation de matériaux de construction issus de chantiers de déconstruction ou d'excavation avec transformation lourde de la matière, ramenée à l'état de matière première ou recomposée avec d'autres matières premières pour en faire un nouveau matériau.

Réemploi : Valorisation de matériaux de construction issus de chantiers de déconstruction ou d'excavation avec maintien de la fonction d'origine, sans ou avec peu de transformation.

Réemploi Déphasé : Réemploi avec stockage de la matière pour un certain temps

Réemploi Ex-situ : Réemploi d'éléments en provenance d'un chantier source autre que le chantier cible, avec transfert de la matière d'un site à un autre.

Réemploi Externe : Réemploi d'éléments avec transfert de propriété et de risque entre la source et la cible.

Réemploi Interne : Réemploi d'éléments sans transfert de propriété ni de risque.

Réemploi In-Situ : Réemploi d'éléments sur un chantier à la fois chantier source et chantier cible, sans transfert de la matière d'un site à un autre.

Réemploi simultané : Réemploi sans latence ni stockage intermédiaire entre les chantiers source et cible avec stockage intermédiaire en dehors du chantier

Réutilisation : Valorisation de matériaux de construction issus de chantiers de déconstruction ou d'excavation avec détournement de la fonction d'origine, sans transformation, ou avec un niveau de transformation faible à modéré.

Sourcing : Anglicisme qui désigne ici le travail d'inventaire, de traçabilité et de suivi de matériaux de réemploi en vue d'approvisionner un ou des chantiers cibles.

Enjeux

Le béton armé représente près de la moitié des matériaux utilisés dans la construction en Suisse, soit un peu moins de 40 millions de tonnes par an¹, soit environ 1.7m³ par habitant par an. Il génère d'importantes émissions de Gaz à Effet de Serre (GES), principalement en lien avec la décarbonatation du calcaire et la chaleur nécessaire lors de la fabrication du ciment. Produire puis éliminer 1m³ de béton armé génère environ 230 kg CO₂-eq de GES², avec une augmentation de 20% à 40% en incluant les aciers d'armature.

Le recyclage de béton armé par concassage pour produire des granulats réintégrés dans du béton armé neuf, est plus vertueux que la mise en décharge qui tend à ne plus être une option. Les granulats recyclés se substituent en partie aux granulats naturels, évitant ainsi leur extraction. Cependant, le béton armé composé de granulats recyclés ne permet pas de se passer du ciment et des armatures qui représentent plus grosses sources d'émission de GES liées à la mise en œuvre du béton armé.

Préserver ou adapter les structures existantes, réduire la consommation de béton armé dans les constructions neuves par un usage adapté et efficace de ce matériau, et, lorsque la déconstruction s'impose, favoriser le sciage et le réemploi des structures en béton armé en évitant le *downgrading* (sous-utilisation) sont autant d'impératifs dans la perspective d'une diminution des impacts environnementaux de l'industrie de la construction. Les présentes recommandations sont basées sur divers cas d'études qui constituent un état de l'art non exhaustif des pratiques de réemploi de béton armé et sur les nombreux entretiens menés avec des spécialistes dans le cadre des projets de recherche REMCO et Mat-loop. Ils sont en partie détaillés dans les fiches « Études de cas » du projet REMCO³.

En outre, ces recommandations ont pour but de contribuer à :

1. Mettre sur pied une filière pour la récupération et la distribution d'éléments de béton armé de réemploi
2. Orienter les acteurs du réemploi (maîtres d'ouvrages, concepteurs, entreprises) au fil des différentes étapes du réemploi du béton armé, en particulier de la chaîne logistique.

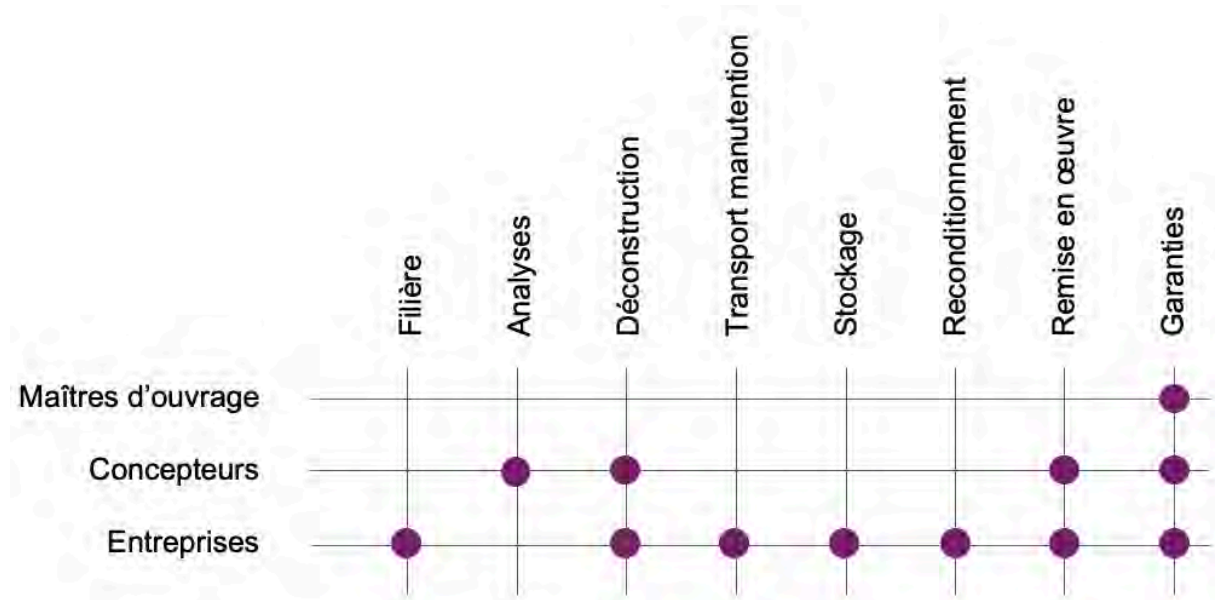


Fig.1 : Chapitres traités par les recommandations et public ciblées

¹ *The Influence of Consumer Behavior on Climate Change : The Case of Switzerland*, Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Technology and Society Laboratory, Cecilia Matasci, Marcel Gauch, Heinz Böni and Patrick Wäger, éd. Sustainability, MDPI (2021)

² Données KBOB : Oekobilanzdaten_ Baubereich_Donne_ecobilans_construction_2009-1-2022_v7.0

³ <https://www.hesge.ch/hepia/recherche-developpement/projets-recherche/remco>

Un guide technique sur le réemploi de béton armé à destination des ingénieurs civils est publié par le collectif 2401 en collaboration avec les Services Industriels de Genève (SIG). Les présentes recommandations permettent quant à elles une vulgarisation de ce sujet, à destination des entreprises mais aussi à des concepteurs et à des maîtres de l'ouvrage, et s'attachent prioritairement aux questions logistiques.

Filière

Le réemploi de béton armé structurel fait l'objet de projets de recherche, notamment par le Structural Exploration Lab (SXL) de l'EPFL, mais dans la pratique est quasiment inexistant. Il est évident que le réemploi de composants structurels et conçus sur mesure pose des défis plus complexes et un niveau de risque plus important que celui des éléments de second œuvre standardisés qui a déjà cours depuis quelques années déjà (appareils sanitaires par exemple). L'omniprésence du béton dans nos constructions en font cependant un candidat majeur au réemploi.

La mise sur pied d'une filière structurée pour la récupération et la distribution d'éléments de béton armé permettrait de donner des réponses à cette complexité et à ces problématiques de risque et de démocratiser la pratique du réemploi de ce matériau. Ce saut d'échelle que représenterait l'existence d'une filière organisée impliquera une industrialisation du processus, une standardisation de l'offre permettant de bénéficier d'effets de série, et l'apparition d'acteurs dédiés maîtrisant la chaîne de valeur de ce modèle d'affaire.

La combinaison des différents types de réemploi implique six modèles qui présentent chacun des caractéristiques différentes :

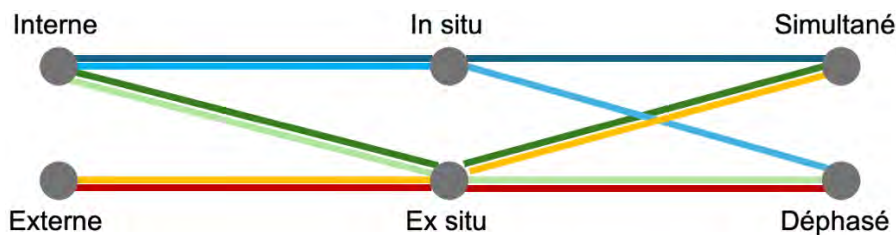


Fig.2 : Types de réemploi envisageables

De ce fait, il ne peut exister un modèle d'affaire unique pour la mise sur pied d'une filière de réemploi pour le béton structurel. Le réemploi qu'il soit interne ou externe peut s'envisager de façon simultanée (sans stockage intermédiaire) ou déphasées (avec un stock intermédiaire).

Le réemploi interne (simultané ou déphasé) implique la mise sur pied d'une organisation propre au maître de l'ouvrage, à priori destinée à ses seuls besoins. On ne peut dès lors pas parler à proprement parler de filière de récupération et de distribution.

Le réemploi externe simultanée en flux tendu (sans stockage intermédiaire) requiert quant à lui un très haut degré de coordination entre les plannings des chantiers source et cible. Ce niveau de coordination est extrêmement difficile à atteindre compte tenu des impondérables propres aux activités de construction, comme l'ont démontré les cas d'étude recensés (voir ci-après). Cette variante n'est donc pas propice à la standardisation et à l'industrialisation recherchées et ne fait pas l'objet des présentes recommandations.

Il apparaît dès lors que le type de réemploi le plus apte à répondre aux objectifs énoncés est celui du réemploi externe, ex-situ (par nature) et déphasé, en rouge dans le schéma ci-dessus, impliquant la mise à disposition de modules standardisés avec stockage intermédiaire.

Cet type de filière peut être maîtrisée par un acteur unique sur l'entier du processus ou intégrer plusieurs intermédiaires peuvent se succéder, de l'entreprise de déconstruction à celle qui remet en œuvre, en passant par celle qui stocke et reconditionne la matière. Dans le premier cas la matière reste sous la responsabilité d'une seule

entité, ce qui simplifie le processus mais requiert de multiples compétences concentrées sur le même acteur et risque de limiter la diffusion de la pratique.

Dans le second cas, la matière doit être réceptionnée à chaque transfert de risque, c'est-à-dire lorsque la matière change de main : à la sortie du chantier et à la sortie du stock intermédiaire. Un cahier des charges sur les pièces à fournir ou récupérer (*sourcing*) doit être établi et les risques sur un décalage de fourniture ou de reprise des pièces doivent être discutés. Les limites de prestations doivent être également être clarifiées en identifiant clairement qui prend en charge les opérations suivantes (organisation et paiement) :

- Sciage, levage, chargement, protections
- Transport du point A au point B et déchargement
- Stockage éventuel (et location du stock)
- Adaptation éventuelle des pièces
- Repose, rhabillage des pièces

La plupart du temps, le béton armé est un matériau coulé sur place. Il s'agit donc, en cas de réemploi, de passer d'un élément sur mesure, à un élément aux dimensions finies, transportable et réemployable sous la forme d'un module sur le chantier cible.

Si les acteurs sont identifiés assez tôt, une convention entre les MO des projets source et cibles et les ingénieurs civils source et cible permet de prendre en compte la gestion de la matière et la responsabilité entre cédant et repreneur. Il est possible pour cela de se baser sur les documents juridiques rédigés par Zirkular, Baubüro in situ et la ZHAW. Il s'agit de la fiche F05 Accord de transfert⁴.

Cette situation est idéale car elle permet de minimiser le risque que faute de débouché la matière ne soit jamais réemployée, générant des coûts liés au stockage et à l'élimination de la matière. Les opportunités de réemploi et les repreneurs sont identifiés en amont de la déconstruction, la découpe et/ou le principe de remise en œuvre peuvent le cas échéant être adaptés aux besoins et les besoins en stockage intermédiaire peuvent être anticipés.

Dans les faits, cette pratique se heurte aux temporalités des projets de construction. Les études en lien avec les projets cibles sont effectuées bien souvent plusieurs années avant l'exécution, ce qui impliquerait de cordonner des chantiers potentiellement distants de plusieurs années ce qui est peu réaliste en raison du nombre d'inconnues et/ou de stocker la matière déconstruite sur de très longues périodes mettant en crise la rentabilité du réemploi.

La massification du réemploi passe donc par une connexion indirecte de l'offre et de la demande, avec la mise sur pied d'une filière proposant des modules standardisés, aux dimensions prédéfinies, disponibles en tout temps, ce qui permet :

- Du côté de la demande, d'offrir aux concepteurs une base de travail stable pour planifier le réemploi déphasé, avec l'assurance de disposer de la matière prévue lorsque le temps du chantier sera venu, sans forcément devoir identifier un gisement spécifique au stade des études d'avant-projet et de projet
- Du côté de l'offre, de s'assurer de l'existence d'un débouché permettant une rotation des stocks rapide et garantissant la viabilité économique du modèle et rationaliser les opérations de sciage par la standardisation des modules.

La conservation des structures existantes est une des voies qui s'ouvre pour minimiser l'impact environnemental de la construction. On peut donc s'attendre à ce que le taux de démolition régresse en Suisse. Il n'en demeure pas moins que le gisement de béton armé y est très conséquent, le béton armé caractérisant la grande majorité des constructions sur notre territoire depuis environ 75 ans.

Ce sont les dalles de plancher qui constituent le gisement le plus conséquent tant quantitativement que qualitativement, de par leur homogénéité, leur qualités structurelles et leurs dimensions. L'observation de la

⁴ F05 Accord de transfert, ANGST Marc, OEFNER Andreas, OTT Cynthia, STREIFF Olivier, ZOLLER-ECKENSTEIN Annette, trad. ACKERMANN Sarah, Zirkular GmbH / baubüro in situ et la Haute école spécialisée de Zurich ZHAW (2024)

pratique montre en outre une offre croissante, illustrée par les chantiers de découpe à grande échelle des dalles du parking de Lysbüchel à Bâle (2024) et du parking de la gare CFF de Lausanne (2026).



Fig. 1 : Parking Lysbüchel, en cours de déconstruction, Bâle (à droite) © Malena Bastien Masse et parking CFF de la gare de Lausanne, voué à la démolition, Lausanne (à gauche) © www.cff.ch

Parmi les différents composants en béton armé, les dalles semblent donc représenter la meilleure opportunité d'exploitation du gisement, permettant un réemploi sous forme de modules pour construire de nouveaux planchers et ainsi bénéficier des capacités structurelles embarquée du matériau.

L'analyse économique démontre que le coût du sciage (calculé au mètre linéaire) est déterminant pour la rentabilité du réemploi et que le stockage d'éléments en multiples dimensions ne fait pas de sens. Il en découle qu'une filière de réemploi devra se concentrer sur des modules de grandes dimensions et standardisés.

Les dimensions de tels modules sont tributaires du transport des éléments sur des plateaux de camions standards et dictées par les capacités structurelles usuelles. Les études menées par le SXL de l'EPFL⁵ ont démontré que les dalles de béton armé coulées en Suisse à partir des années 1960 disposent en général de la résistance voulue pour franchir des portées de 3m à 4m pour un cas de charge standard, applicable par exemple au logement (200kg/m²), sans qu'un renforcement n'ait à être envisagé.

Le module idéal pour le réemploi de dalles se situerait donc dans des dimensions de 2.0 à 4.0m par 2.5m (dimension dictée par la largeur d'un pont de camion), posés sur des porteurs verticaux linéaires ou sur des systèmes de portiques. La cote de 2,5m imposée par la logistique correspondant à une hauteur d'étage, il est également possible d'envisager un réemploi sous forme de mur voile, moyennant vérification structurelle.

⁵ C.Küpfer, N. Bertola, C. Fivet, Reuse of cut concrete slabs in new buildings for circular ultra-low-carbon floor designs, EPFL, 2024 - <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965262401014X>

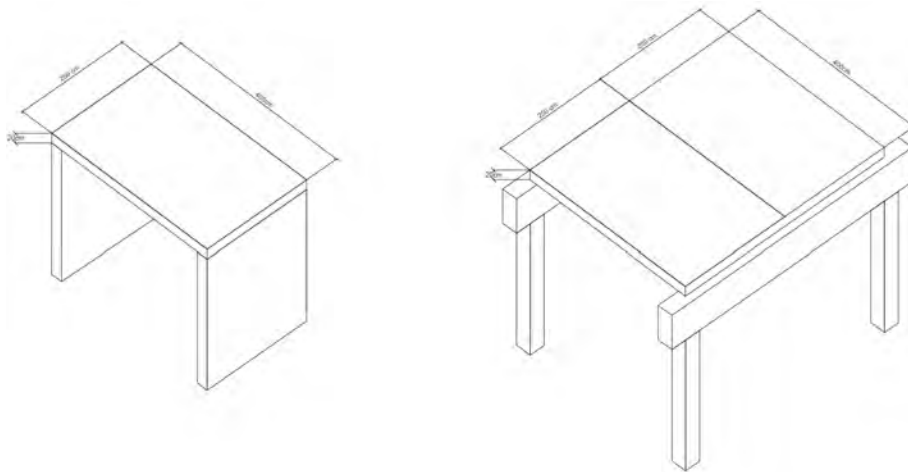


Fig. 4 Croquis des solutions de réemploi sous forme de dalles de plancher

Tout en gardant une largeur de 2.5m, induite par le transport (se référer à la partie « Manutention »), il est possible de définir plus précisément les portées « maximales issue de la vérification de la flexion à mi-travée » en s'appuyant sur les travaux de Julien PATHE, du collectif 2401. Le postulat de départ est le suivant, en s'intéressant à :

- Un béton équivalent à un C25/30, un enrobage de 3 cm et une surcharge de 200 kg/m²
- Deux nuances d'acier où $f_{sd} = 300 \text{ N/mm}^2$ (ancien acier, valeur conservatrice) ou $f_{sd} = 435 \text{ N/mm}^2$ (acier utilisé aujourd'hui)

Il est alors possible de déterminer une portée admissible selon une charge utile en kg/m² choisit si :

- Le diamètre et l'espacement des armatures sont connus
- L'épaisseur de la dalle est connue.

Il est important de rappeler que « le concepteur doit vérifier, tous les états limites de services (ELS) et ultimes (ELU) déterminant pour l'élément issus de murs et réemployé en tant que dalle » et calculer la longueur d'appui nécessaire.

		Acier $f_{sd} = 435 \text{ [N/mm}^2]$													
		Portée maximale [m]													
Diamètre [mm]	Espacement [cm]	30		8		15		30		10		12			
		200	500	200	500	200	500	200	500	200	500	200	500		
Epaisseur [cm]	16	2.59	2.19	3.16	2.66	3.63	3.06	3.22	2.72	3.92	3.31	4.55	3.79	5.33	4.49
	18	2.70	2.30	3.30	2.81	3.80	3.23	3.37	2.86	4.1	3.49	4.71	4.00	5.59	4.75
	20	2.80	2.40	3.42	2.93	3.94	3.37	3.49	2.99	4.25	3.65	4.89	4.19	5.81	4.98
	25	3.00	2.61	3.66	3.19	4.22	3.67	3.74	3.25	4.56	3.97	5.24	4.56	6.24	5.44

Acier $f_{td} = 300$ [N/mm ²]		Portée maximale [m]													
Diamètre (mm)		8						10						12	
Espacement (cm)		30		20		15		30		20		15		15	
Charge utile [kg/m ²]		200	500	200	500	200	500	200	500	200	500	200	500	200	500
Epaisseur (cm)	16	2.16	1.82	2.63	2.22	3.03	2.56	2.69	2.27	3.28	2.76	3.77	3.18	4.48	3.78
	18	2.25	1.91	2.75	2.34	3.17	2.69	2.81	2.39	3.42	2.91	3.94	3.35	4.49	3.99
	20	2.33	2.00	2.85	2.44	3.28	2.81	2.91	2.49	3.55	3.04	4.08	3.50	4.87	4.17
	25	2.49	2.17	3.05	2.65	3.51	3.06	3.11	2.71	3.80	3.31	4.37	3.81	5.22	4.55

Figure 5 : Construction d'une dalle en béton de réemploi (eCCC-BAT C04) © Julien PATHE

Les dimensions des modules standardisés nécessaires à la mise sur pied d'une filière efficace sont ainsi grossièrement définies. La définition précise des modules à proposer dans le cadre d'une filière déphasée pourra se baser sur les informations ci-dessus.

Analyses préalables

Évaluation du potentiel

La procédure pour évaluer le potentiel de réemploi d'une structure en béton a déjà été décrite dans la littérature⁶.

Pour rappel, tel que décrit par Devènes et al. (2024), évaluer le potentiel d'un bâtiment source consiste dans un premier temps à documenter l'ensemble du gisement par un inventaire et un diagnostic préliminaire. Cet inventaire doit permettre de qualifier et quantifier le gisement. Il convient de se poser plusieurs questions afin d'obtenir des informations générales sur le bâtiment source :

- Où ? Localisation du bâtiment, ce que cela implique en termes d'accessibilité etc.
- Qui ? Recherche de sources. Qui a conçu le bâtiment à son origine ? Les archives de l'architectes ou des ingénieurs sont-elles disponibles ?
- Quand ? Datation du bâtiment et des éléments de construction en s'appuyant sur des archives.
- Quoi ? Relevés des éléments non structurels et structurels : parois porteuses, piliers, dalles de plancher ou de toiture, états de surface, géométrie particulière (si la pente est visible à l'œil nu), etc.

Il s'agit ensuite de définir par une série d'analyses plus détaillées quelles parties sont susceptibles d'être déconstruites en vue d'un réemploi et avec quelles destinations (maintien de la fonction d'origine, sous-utilisation) et quelles parties ne le sont pas et serviront de gisement pour la production de granulats destinés à la fabrication de béton armé composé de granulats recyclés.

Si la destination des éléments est connue à ce stade, il est possible de calibrer les analyses en fonction de la future remise en œuvre, des exigences structurelles et géométriques qui y sont liées et des quantités requises. En effet, il est courant de d'abord réaliser une petite série d'essais, qui seront définis par la suite, pour limiter les coûts pour la personne souhaitant écouler la matière. Une fois les projets receveurs identifiés, des essais complémentaires peuvent être planifiées afin de valider les données et de préciser la destination des éléments sur le projet cible.

Si la destination est inconnue ou partiellement inconnue, il s'agira de qualifier les plus précisément possible les caractéristiques essentielles du matériau et de rechercher un effet de série en termes de dimensions lors de la déconstruction, afin de pouvoir proposer des éléments sous format standardisé facilitant leur usage futur et leur manutention, transport et stockage (voir chapitre Filière).

Diagnostic des polluants

Le FCRBE donnent les informations suivantes sur l'importance du curage : « Concernant la finition des éléments en béton issus du réemploi, il faut distinguer l'état des surfaces après la collecte des éléments et les finitions souhaitées lors de la phase de préparation des matériaux en vue de leur réemploi. Les éléments en béton sont généralement collectés après la phase de curage, c'est-à-dire après la dépose des matériaux de second œuvre. Pour simplifier [...], le curage a notamment comme objectif, de retirer tous les matériaux non inertes qui pourraient dégrader la qualité du béton en vue d'une valorisation optimale. Cette étape du chantier peut donc avoir un impact sur l'état des surfaces fini du béton »⁷.

D'autres tests sont nécessaires pour déceler la présence éventuelle de polluants, selon l'époque de construction et les résultats des tests visuels. Il peut s'agir :

⁶ J. Devène, M. Bastien-Masse, C. Fivet, Reusability assessment of reinforced concrete components prior to deconstruction from obsolete buildings, EPFL, 2024 - <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108584>

⁷ Gros-œuvre et enveloppe, Voile en béton, REUSE TOOLKIT, Interreg FCRBE, Bellastock (2021)
Recommandations pour le développement du réemploi du béton armé

- De polluants liés à l'utilisation des locaux et matériaux. La pollution dépend alors de l'historique du bâtiment (par ex. hydrocarbures dans les ateliers/garages, métaux lourds dans l'industrie/artisanat, etc.). Une analyse de la surface (env. 1 cm de profondeur) en contact avec les futurs usagers est pertinente. Comme pour les filières de traitement des déchets, des valeurs limites doivent être fixées par l'OFEV et l'OFSP en vue du réemploi de ces éléments.
- Pour les bâtiments construits avant 1990, des matériaux contenant de l'amiante (flocages, amiante projetée, peintures, crépis, colles/enduits et étanchéités bitumineuses, colles de carrelage, etc.) peuvent être présents. La présence d'amiante implique un assainissement avant tout travaux.
- Pour tous matériaux bitumineux (étanchéité, colles/enduit, etc), la teneur en hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), et en particulier le benzo(a)pyrène, doit être testée. Une teneur accrue en HAP (> 1'000 ppm) est un frein au réemploi – un assainissement est à prévoir.
- De 1955 à 1975, des polychlorobiphényles (PCB) étaient utilisés dans les masses d'étanchéité (par ex. joints de dilatation, joints d'éléments préfabriqués, joints de menuiserie). Entre 1975 et 1990, ces substances ont été remplacées par des paraffines chlorées (PC). Ces substances peuvent en outre migrer dans le béton. Un assainissement est à prévoir lorsque la teneur en PCB dans le matériau (joints et/ou béton) dépasse les 50 ppm.
- En cas de présence de peinture, la présence de plomb ou d'antimoine (utilisation de blanc d'antimoine), doit être mesurée.
- Les polystyrènes produits avant 2016 contiennent du hexabromocyclododécane (HBCD) impliquant, dans certains cantons, des précautions lors de leur retrait. Il est rare cependant qu'ils ne puissent être séparés facilement des éléments en béton.

NB : les diagnostics et les traitements liés aux polluants doivent également être exécutés en cas de démolition. Ils ne représentent donc à priori pas un surcoût lié au réemploi.

Les investigations relatives à la présence de polluants du bâti doivent être réalisées par un expert inscrit sur la liste du Fach. Selon art. 16 OLEd et art. 3 OTConst, une investigation complète du bâtiment est en tous les cas obligatoire avant tout travaux. Il est judicieux de mentionner l'intention de réemploi, le niveau d'investigation et d'analyse pouvant varier selon les filières de traitement ou de réemploi envisagée. Concernant les polluants liés à l'utilisation, il est pertinent de se référer à l'annexe a4 de l'aide à l'exécution de l'OLEd Module Déchets de Chantier⁸. Comme précédemment mentionné, l'historique d'utilisation du bâtiment est alors décisif pour décider des paramètres à analyser (métaux, hydrocarbures aliphatiques, etc).

⁸ <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/dechets/droit/dechets-aides-execution.html>

Analyse visuelle

Cette analyse a pour objectif de vérifier l'état de l'élément et la présence de potentiels défauts ainsi que leur étendue. Ce chapitre s'appuie très largement sur les travaux de Devènes et al. cités plus haut, dont sont issus les tableaux et citations suivants.

Processus de dégradation	Cause	Signes visuels	Traitement des dommages de routine
Corrosion due aux chlorures	Présence simultanée d'oxygène, d'humidité et de chlorures	Taches de corrosion localisées sur la surface du béton; écaillage localisé du couvercle en béton; corrosion localisée des barres d'armature	Couverture en béton suffisante (p. ex. couche de mortier supplémentaire); réalcalisation du béton; étanchéité (p. ex. imprégnations hydrophobes, revêtement, membranes); protection des barres d'armature en acier contre la corrosion (p. ex., inhibiteurs de corrosion, protection cathodique)
Corrosion due à la carbonatation	Présence simultanée d'oxygène, d'humidité et d'acier dépassivé en raison de la carbonatation	Éclaboussures en béton sur une grande surface; corrosion générale des barres d'armature	
Craquant	Charges exceptionnelles, mauvais détails constructifs, déformations limitées ou réaction alcalino-silica	Grand nombre de fissures ou de grandes ouvertures de fissures, plus de 0,3 mm	Pontage de fissure avec revêtement pour créer une protection imperméable; injection de fissure avec de la résine ou du mortier pour empêcher sa propagation.
Réaction alcalino-silica	Présence simultanée d'agrégats réactifs, d'humidité et de concentration alcaline élevée	Maille de fissure à la surface du béton, fissures de couleur légèrement brune	Imperméabilisation (p. ex. imprégnations hydrophobes, revêtement, membranes).
Stries mouillées	Circulation de l'eau à travers le béton	Stries humides; efflorescence; stalactites calcaires	Imperméabilisation (p. ex. pontage de fissures, imprégnations hydrophobes, revêtement, membranes).
Éclaboussure	Impact externe ou gel, corrosion de l'acier	Écrouillement ou écaillage du couvercle en béton sans corrosion des renforts en acier	Réparer l'écaillage ou l'écaillage en appliquant un nouveau mortier

Fig. 6 : Processus de dégradation courants RC avec leur cause, les signes visuels et le traitement de routine © DEVENES Julie, BASTIEN MASSE Maléna, FIVET Corentin

Les classes de dommages du béton armé peuvent être estimées en s'appuyant sur des informations de trois types : « la taille – c'est-à-dire petite ou grande –, l'incidence – c'est-à-dire isolée, fréquente ou généralisée – et la gravité – c'est-à-dire légère, modérée ou lourde ». Voici un tableau qui illustre cette méthode d'analyse :

Damage class	Size / Incidence					Capacity reduction	Consequences
	None	Small / Isolated	Large / Isolated	Small / Frequent	Generalized		
A excellent						-	-
B acceptable						-	Durability
C deviant						< 10%	Serviceability
D bad						> 10 % < 40%	Serviceability and security
E failure						> 40%	Security

Severity ○ Light ● Moderate ● Heavy

Fig.7 : Classification des dommages par inspection visuelle. Les rectangles gris symbolisent les dimensions du composant © DEVENES Julie, BASTIEN MASSE Maléna, FIVET Corentin

Concrètement : « Les composants classés dans la classe A présentent des conditions presque impeccables, tandis que ceux de la classe B présentent des défauts qui ont un impact sur leur durabilité à long terme. Cependant, dans les deux classes, la facilité d'entretien ou la résistance des composants reste inchangée. Les composants de la classe C ont des dommages modérés ou légers, mais la diminution de la résistance est inférieure à 10% de leur pleine capacité. Sur ce seuil de 10 %, les composants ont des dommages lourds ou prolongés et tombent dans la classe D. Leur résistance structurelle devrait cependant rester d'au moins 40% de leur pleine capacité. Dans le cas contraire, les composants appartiennent à la classe E, ce qui indique que la sécurité structurelle est inadéquate et pourrait ne pas être couverte par les facteurs de sécurité partielle ».

Il est important de notifier que dans le cas d'éléments collés, par la suite, un nettoyage propre peut être compliqué et couteux, ce qui rend le réemploi plus difficile. Il est donc recommandé d'évaluer dès la phase d'analyse visuelle le degré de difficulté du nettoyage.

Classes d'exposition

La détermination de la classe d'exposition permet de qualifier la classe de résistance du béton armé aux agressions du milieu. Cette dernière est définie par la norme SIA 262 comme étant la : « Catégorie affectée aux éléments de construction décrivant les actions dues à l'environnement et les risques qui en résultent sur le plan de la durabilité».⁹

Le béton armé est un matériau qui est fortement impacté par l'environnement auquel il est exposé. En effet, la présence d'eau et l'utilisation de sel de déverglacage peuvent altérer le matériau et donc impacter ses propriétés.

⁹ Norme SIA 262 Construction en béton (2013)

Parmi les dégradations possibles, il y a la fissuration du béton armé, la corrosion des armatures lorsque les aciers sont en contact avec l'eau et avec l'air. S'il y a corrosion, alors il y a éclatement du béton.

Un béton armé dit "jeune", c'est-à-dire n'ayant pas atteint la totalité de sa durée de vie pourrait être utilisé dans des conditions similaires ou dans un environnement moins sévère que celui dans lequel il se trouve au moment de son démontage. En effet, un béton armé en extérieur aura des exigences de durabilité plus importantes que celles d'un béton armé en intérieur avec de plus faibles exigences.

Ainsi, après le prélèvement de carottes et des tests à la compression, il est possible de catégoriser un béton selon sa classe d'exposition et d'éviter un mésusage lors du réemploi futur. Le tableau NA.5 Classes de résistance à la compression, d'exposition et de carbonatation selon la norme SIA 262 ou la SN-EN206-NA (2021) qui associe chaque classe d'exposition à un environnement qui est explicité et donne des exemples concrets.

D'une manière plus générale, voici une liste des possibilités de réemploi selon l'usage du béton armé, du plus favorable au plus défavorable :

- Intérieur vers intérieur : aisé
- Extérieur vers extérieur : plutôt aisé (certifier qu'il n'y a pas de risques d'exposition à venir)
- Extérieur vers intérieur ou intérieur vers extérieur : peu aisé et déconseillé (changements d'exposition)

Les éléments béton armés présents dans un parking constituent un cas particulier et ne sont pas considérés comme intérieur (présence de sel de déglacage, d'hydrocarbures etc).

Tests et essais

En cas de transfert de propriété de la matière, il convient de réaliser une série de tests pour déterminer les caractéristiques physiques et mécaniques du béton armé. Les éléments de béton armé déclarés aptes au réemploi lors des analyses préalables et découpés aux dimensions voulues, doivent être caractérisés individuellement avant évacuation du chantier source et transfert du risque (et le cas échéant de propriété) à l'entité en charge du stockage et de la distribution. Ces caractéristiques essentielles comprennent à minima pour chaque élément :

1. La géométrie avec les dimensions (le sens de portée Cx/Cy à noter pour des dalles et mesurer l'épaisseur et tolérances dimensionnelles).
2. La classe d'exposition (mesure de la carbonatation à l'aide d'un marqueur pH).
3. La qualité du béton armé dont résistance mécanique déterminée par des tests au scléromètre (complété ultérieurement par des tests de compression plus précis si besoin).

Sans transfert de propriété de la matière, il est possible de caractériser la résistance mécanique permet de définir l'usage de réemploi le plus approprié pour l'élément. On se réfère notamment aux normes SN-EN 13791 Évaluation de la résistance à la compression sur site des structures et des éléments préfabriqués en béton armé et SIA 269/2 Maintenance des structure porteuses pour mener les tests à bien.

Des carottages permettront de vérifier l'épaisseur du revêtement et des dalles, la densité du béton, la profondeur de carbonatation, etc.

Des sondages dans le béton d'enrobage serviront à connaître l'épaisseur de l'enrobage et de vérifier localement la disposition des armatures. L'épaisseur de l'enrobage joue notamment un rôle sur la résistance au feu des éléments. La vérification du type et de la disposition des armatures et/ou les détails de connexion doivent aussi être effectuées par des sondages dans le béton, par tests aux ultrasons ou par géo-radar.

L'évolution des normes peut impliquer que des éléments parfaitement aux normes lors de leur première mise en service ne le soient plus en vertu de nouvelles prescriptions plus strictes.

Des relevés à l'aide d'un théodolite ou numérisation 3D à l'aide d'un scanner LiDAR ou de la photogrammétrie permettront de vérifier les déformations du béton armé (flèches, etc.) et des prélèvements et essais à la traction, de connaître la limite élastique et l'allongement des aciers.

Déconstruction

La formulation d'un contrat de déconstruction soignée peut s'appuyer sur la fiche F06 Clauses contractuelles de démontage mise à disposition par Zirkular et la ZHAW¹⁰. Il est important de procéder à une réception avant la découpe en documentant les états de surface des faces et sous-faces de dalle. D'une manière générale, les étapes de déconstruction à respecter sont les suivantes :

- Mise en sécurité du site par les entreprises (dispositifs anti-chute, etc) suivant un protocole détaillé
- Dépollution du bâtiment
- Retrait des couches de revêtement non structurel (il est parfois possible de conserver la chape)
- Étayage pendant la déconstruction pour assurer la stabilité de la construction
- Traçage et sciage des éléments destinés au réemploi
- Démolition du solde de la structure enveloppe après l'extraction des éléments de réemploi
- Analyse visuelle de chaque élément utile pour repérer la présence d'incorporés, en particulier dans les dalles, des défauts liés au sciage ou des armatures coupantes, etc. L'inspection visuelle des éléments peut aussi permettre de vérifier la disposition des barres d'armatures, l'épaisseur de l'enrobage et de confronter ces informations à celles obtenues lors de la phase analyse.

En phase de planification, il convient de choisir des méthodes de sciage appropriées, d'établir un plan de découpe en fonction de la structure et de son comportement lors de la déconstruction, en tenant compte de la modularité recherchée et définir les méthodes de levage et des points d'ancrage. Privilégier des formes simples permet de limiter les coûts et la durée du chantier. La mise en sécurité la plus "lourde" concerne les dalles. Il faut les étayer pour qu'elles tiennent après le sciage et mettre des protections anti-chute autour du futur trou.

Pour une dépose soignée, la méthode d'écrêtage, qui consiste à déconstruire le bâtiment depuis les niveaux hauts vers les niveaux bas, est la plus propice. Elle permet la mise en place d'engins et de personnes dans le bâtiment pour préparer l'accès aux éléments à collecter. Des engins de levage complémentaires interviennent pour le levage depuis le sol au droit de l'édifice.

Les tolérances dimensionnelles du sciage doivent également être prises en compte lors de la planification de la déconstruction et de la reconstruction. L'utilisation d'un rail de guidage pour la scie permet de réduire les déviations mais cela augmente le coût de l'opération. Le tableau extrait de la SIA 414/2 : Tolérances dimensionnelles dans le bâtiment (2016) donne des indications sur les écarts limites tolérés.

¹⁰ F06 Clauses contractuelles de démontage ANGST Marc, OEFNER Andreas, OTT Cynthia, STREIFF Olivier, ZOLLER-ECKENSTEIN Annette, trad. ACKERMANN Sarah, Zirkular GmbH / baubüro in situ et la Haute école spécialisée de Zurich ZHAW (2024)

Colonne	1	Écartes limites en mm pour des cotes nominales en m						
		2	3	4	5	6	7	8
Ligne	Objets	≤ 0,4	> 0,4 ≤ 1,0	> 1,0 ≤ 2,0	> 2,0 ≤ 4,0	> 4,0 ≤ 10,0	> 10,0 ≤ 20,0	> 20,0
		1	Dimensions en plan, par ex. longueurs, largeurs, entraxes, maille de trames	± 10	± 10	± 10	± 12	± 16
2	Dimensions en élévation, par ex. hauteurs d'étages, hauteurs de paliers, distances entre surfaces d'appui et consoles	± 10	± 10	± 12	± 14	± 20	± 30	± 40
3	Espaces libres en plan, par ex. distances entre piliers, pilastres, etc.	± 12	± 14	± 16	± 18	± 25	± 30	± 40
4	Espaces libres en élévation, par ex. sous des dalles ou des sommiers ²⁾	± 10	± 10	± 16	± 18	± 25	± 30	– ¹⁾
5	Ouvertures, par ex. pour fenêtres, portes, éléments encastrés	± 8	± 8	± 10	± 12	± 12	– ¹⁾	– ¹⁾
6	Ouvertures, par ex. pour fenêtres, portes, éléments encastrés, avec embrasures finies	± 5	± 5	± 6	± 8	± 10	– ¹⁾	– ¹⁾

¹⁾ Les écarts limites doivent être convenus.

²⁾ Les déformations dues au temps, aux charges, à la température et à l'humidité ne sont pas prises en compte.

Les exigences du tableau 1 doivent être respectées pour toutes les cotes nominales.

Fig. 8 : Tableau des écarts limites admissibles dans le gros œuvre (distance à mesurer et données), SIA 414/2

Si le projet cible n'est pas connu, le tracé de découpe, notamment pour faire des éléments de dalles doit être pensé en amont afin d'être le plus efficace possible selon les standards de la Figure 5 : Construction d'une dalle en béton de réemploi (eCCC-BAT C04) © Julien PATHE. L'extraction d'éléments de béton armé est une opération relativement complexe. Dans tous les cas, les dimensions des éléments sont limitées par les accès au lieu, les moyens de levage et le transport.

L'évacuation de pièces allant de quelques centaines de kilos à 2-3 tonnes ne nécessite pas des moyens de levage trop importants. Selon les moyens de levage à disposition, on peut imaginer des pièces plus lourdes (jusqu'à une douzaine de tonnes en cas de présence d'une grue fixe ou mobile).



Figure 9 : Photo de la découpe de la dalle à la scie routière, projet Rebuilt © KÜPFER Célia_EPFL-Baumettes



Figure 2 : Photo de la découpe d'un poteau à la scie, projet Rebuilt © KÜPFER Célia_EPFL-Baumettes

Le tableau ci-dessous donne quelques indications en lien avec la déconstruction de béton armé structural sur certains projets étudiés dans le cadre des recherches REMCO et Mat-loop.

	Dalles (Projet A)	Murs porteurs (Projet B)	Poutres/Sommiers (Projet C)	Poteaux (Projet C)
Module	Min : 4 x 50 x 50 cm Max : 23 x 480 x 500 cm	25 x 248.5 x 310 cm	25 x 75 x 320 cm	35 x 35 x 250 cm
Poids	Variable Min : 0.08T/pce Max : 13.80T/pce	4'815 kg	1'500 kg - -	765 kg - -
Temps de dépose /U Étayage Sciage	Non communiqué	Non communiqué	1-2 jours pour la livraison et la mise en place des éléments Le sciage se fait sur une journée pour quelques pièces. (2-4 personnes)	1-2 jours pour la livraison et la mise en place des éléments Le sciage se fait sur une journée pour quelques pièces. (2-4 personnes)
Sécurité et exécution	Étalement de la dalle Découpe à la scie diamant Pose de coins en bois pour maintenir l'intégrité de la structure	Tracer les éléments de murs Pose des étais pour empêcher le basculement des murs Découpe à la scie diamant avec rail de guidage Si la scie à diamant ne fonctionne pas, utiliser une scie à câble diamanté	Étalement de la poutre de murs Découpe à la scie diamant Sciage à un distance d du poteau Attention, armatures en positions hautes au niveau des appuis	Étalement sur 2 faces perpendiculaires Découpe à la scie diamant en pieds et en tête de poteau
Attention, la découpe au niveau des assemblages peut générer une perte de capacité de charges sauf pour un élément isostatique.				

Fig. 31 : Tableau de synthèse regroupant les informations propres à chaque cas d'étude

Une réception ayant été faite avant la déconstruction, il convient d'en réaliser une après la déconstruction afin de vérifier que la pièce n'a pas subi de dommage (fissure, éclatement du béton d'enrobage, déformation ou autre) et ainsi valider l'intégrité de la pièce.

Les éléments peuvent être marqués à la bombe de peinture pour les différencier selon leurs spécificités sinon, leurs caractéristiques peuvent être inscrites et référencées selon une nomenclature spécifique comme celle définie dans le guide pratique des SIG¹¹ liés à une base de données ou par un passeport matériaux¹² physiquement attaché à l'élément, par exemple sous forme de code barre ou QR code.

A titre informatif, la vérification de 255 éléments de dalles, représentant 2055m² de dalles sciées du chantier de déconstruction (Projet A, 2024-25) a mobilisé une personne pendant 8 heures. Le but de cette analyse visuelle de repérer la présence d'incorporés, des défauts liés au sciage ou des armatures coupantes, etc. Un taux de perte entre la matière inventoriée et celle issue de la déconstruction est inévitable. Pour le projet A, ces pertes s'élèvent à environ 5% de la matière inventoriée.

¹¹ Coopérative 2401, SIG, Guide sur le réemploi de béton armé, 2025

¹² J. Devènes, M. Bastien-Masse, C. Fivet, *Factsheet template for Reinforced Concrete Components, Obsolete Structure Audit*, EPFL, 2023

Manutention et transport

Les dimensions potentiellement importantes et le poids en général élevé des éléments en béton armé nécessitent une infrastructure lourde pour leur manutention et leur transport. Selon le poids maximal des éléments déconstruits, l'utilisation d'une grue pour le chargement sur le moyen de transport peut être préférable à celle d'un camion grue. Lorsque les éléments ont une largeur de maximum 2.50m un transport sur un pont de camion standard est possible. Au-delà, l'usage d'un convoi exceptionnel est requis. Les dimensions et le poids des éléments sciés doivent être compatibles avec les modes de transport.

	Dalles (Projet A)	Murs porteurs (Projet B)	Poutres/Sommiers (Projet C)	Poteaux (Projet C)
Ressources	2 grutiers, 2 aides grutier 2 chauffeurs de camion	2 personnes + grutier	1 ouvrier + 1 chauffeur / grutier	1 ouvrier + 1 chauffeur / grutier
Transport	Chargement : 20 T/camion (hors poids camion) 4-5 pc/trajet	Pas de transport	Camion-grue avec plateau de transport à l'arrière pc/trajet	Camion-grue avec plateau de transport à l'arrière pc/trajet
Manutention	1 grue à chaque poste (lieu source et lieu cible) : 2 camions 2 grues	Non communiqué	Levage à la grue. Les pièces ont été la plupart du temps levées avec des douilles de levages fixées dans les éléments en béton : cela garanti un levage et une manutention en sécurité.	Levage à la grue. Les pièces ont été la plupart du temps levées avec des douilles de levages fixées dans les éléments en béton : cela garanti un levage et une manutention en sécurité.
Exécution	Usage de cales en bois entre les éléments			
Nettoyage	Pas de nettoyage spécifique			

Figure 42 : Tableau de synthèse regroupant les informations propres à chaque cas d'étude

Une mauvaise manutention des éléments lors du chargement, transport, déchargement etc. peut endommager l'élément et potentiellement menacer son intégrité structurelle. Les points de levage installés lors de la déconstruction doivent rester en place jusqu'à la phase de repose. Pour une dalle, utiliser au moins 4 points de levage, 1 à chaque angle de la dalle. Les dalles doivent être transportées à l'horizontal. Les dalles sont espacées avec des carrelats de la hauteur des points de levage et doivent être attachées.

A titre informatif, 3 jours ont été nécessaires pour déplacer sur 1km les 255 éléments, représentant 2055m² de dalles sciées du projet A.



Fig. 13 : Photo du levage d'un élément de dalle, projet Rebuilt © Rebuilt_DSC



Fig. 5 : Photo du levage d'un sommier, projet C © Commune de Meyrin, ATBA, Atelier d'Ici, ZS, Sotrag SA, Construction Perret SA, Labotech



Fig. 6 : Photo du levage d'un poteau, projet C © Commune de Meyrin, ATBA, Atelier d'Ici, ZS, Sotrag, Construction Perret, Labotech

Stockage

Les préconisations à respecter pour le stockage des éléments de béton armé sont les suivantes :

- Réception de la matière par l'entreprise de pose si celle-ci est connue sinon réception par le MO ou par l'entreprise intermédiaire avec établissement d'un procès-verbal,
- Si le stockage doit être fait sur de la terre végétale, il est recommandé d'enlever les horizons A et B, de dérouler un géotextile de mettre une couche de grave variable selon le poids des éléments. Si les dalles doivent être stocké sur du bitume, la charge causée par le stockage des dalles générer des déformations du sol. Dans ce cas, et pour répartir les charges, il est possible d'envisager que la dalle en contact avec le bitume serve de dalle de répartition (cela pourrait l'abîmer et la rendre inutilisable pour la suite).
- Sécuriser la zone de stockage
- Les éléments précédemment utilisés en position verticale, tels que les murs ou les éléments de façade, peuvent être stockés horizontalement à condition qu'ils soient suffisamment armés pour éviter toute fissuration sous l'effet du poids propre lors de la manutention ou du stockage en soi. Les éléments horizontaux comme les dalles doivent être stockés horizontalement.
- Les éléments doivent être séparés par des carrelets en bois et peuvent être empilés les uns sur les autres (les points de levage doivent rester accessibles)
- La hauteur de stockage des éléments peut être variable, selon les capacités de levage du site.

- Le stockage intérieur est préférable, surtout pour une longue durée ; le stockage extérieur est lui possible mais pour une courte durée et en évitant les dispositifs de protection plastiques afin d'éviter l'accumulation de l'humidité qui remonte depuis le sol.
- Éventuellement, pour des raisons esthétiques, il est possible de poser d'utiliser une peinture anti-corrosion pour couvrir les fers.
- Les informations propres à chaque élément doivent être physiquement accessibles en tout temps pour pouvoir identifier la matière avec un lexique précis.
- Dans le cas où l'ordre de pose du chantier cible est connu, veiller à stocker les éléments selon les priorités de livraison pour éviter toute manutention inutile.



Fig. 16 : Photo du stockage des éléments de dalle, projet Rebuilt © Julien Pathé_2401-Mur de soutènement Renens

En raison du poids et des dimensions importants des éléments de béton armé, il convient de limiter au maximum les mouvements inutiles durant la période de stockage pour limiter les frais et les risque de dommages. Il est dès lors important de disposer d'un espace de stockage sur le long terme si cela est nécessaire. Afin d'éviter les déplacements intermédiaires, il convient d'organiser le stock pour avoir accès facilité à la matière et pouvoir enlever en tout temps les éléments à livrer pour tendre vers une rotation rapide du stock.

Un stock extérieur serait suffisant pour des durées courtes. Pour de longues durées de stockage (à éviter pour des questions de rotation économique du stock), un stockage à couvert est recommandé. La manutention sur la zone de stockage peut se faire à l'aide d'un palan, pont roulant, grue de chantier ou élévateur à fourche, en fonction du poids et de la géométrie des éléments entreposés.

Reconditionnement

Le béton armé ne nécessite que peu ou pas de reconditionnement. Un nettoyage au jet d'eau, après curage des matériaux non désirés est en général suffisant.

S'il s'avère insuffisant un nettoyage par sablage est envisageable en dernier recours. Ce procédé est lourd mais peut être utilisé pour des raisons esthétiques si le MO le souhaite. Il s'agit cependant de créer une chaîne de décapage/nettoyage qui augmenterait le coût du produit fini.

Dans la mesure du possible, il est recommandé de respecter les standards définis dans le chapitre "Déconstruction" afin d'éviter par la suite des découps supplémentaires. Dans certains cas particuliers, il peut être demandé à l'entreprise effectuant le stockage de procéder à des ajustements des modules en fonction du chantier cibles. Cela ne doit cependant pas être la norme.

Il est important pour les dalles et les murs de déterminer les surfaces invisibles et visibles. Dans le premier cas, il n'y a pas de prescription particulière mais dans la seconde, le béton peut être poli, lasuré ou vernis selon le rendu souhaité sur le chantier cible. Les extrémités des fers d'armatures sectionnés lors de la découpe peuvent être couvertes pour éviter la corrosion.

Au même titre que l'entrée en stock, la sortie de stock doit s'accompagner d'une réception de la matière par l'acquéreur, au moment du transfert du risque.

Remise en œuvre

Le contrat d'entreprise concernant la remise en œuvre peut s'appuyer sur la fiche F07 Clauses contractuelles de montage éditée par Zirkular et la ZHAW¹³.

Il est essentiel que la remise en œuvre soit exécutée dans le strict respect des spécifications prévues par l'ingénieur civil et dans les limites de l'aptitude au service et de la résistance des éléments définis lors des tests (3 tests de base et tests complémentaires) et diagnostics. En l'absence ou insuffisance de caractérisation des éléments lors de leur démontage il est impératif de le faire avant la remise en œuvre.

Dans la mesure du possible les éléments de réemploi devront être remis en œuvre en utilisant pleinement leurs capacités structurelles embarquées pour optimiser les gains environnementaux liés au réemploi. Pour faciliter la remise en œuvre, il est recommandé de ne pas chercher la reconnexion aux armatures.

Les éléments et supports doivent être réceptionnés lors de la phase de repose. Le tableau ci-dessous donne les conditions générales de repose pour quatre cas d'études.

	Dalles (Projet A)	Murs porteurs (Projet B)	Poutres/Sommiers (Projet C)	Poteaux (Projet C)
Conditions de repose	<p>Concept des éléments utilisés en extérieur (de bas en haut) :</p> <ul style="list-style-type: none"> -Couche de min 30 cm de gravier drainant non gélif sur le sol naturel, -Couche de 5 à 10 cm de gravier fin non compacté -Dalle de réemploi de 17 à 19 cm Surface de béton sablée ou grenillée -Mortier de ragréage classe R4 min 3 mm entre les éléments de dalle -Surface de protection + ajout de sable de quartz pour la rugosité 	<p>Pose en paroi berlinoise :</p> <p>Pose entre deux HEA 300 ou deux rails CFF soudés</p> <p>Maximiser la largeur d'appui de chaque côté des voiles afin de faire travailler les armatures</p> <p>Finition en ciment pour protéger les armatures en tête de la paroi + revêtement métallique</p>	<p>Étayage</p> <p>Platine et goudjons pour fixer 2 sommiers entre eux</p> <p>Les douilles de levage doivent être rhabillées. Les finitions dépendent du choix architectural.</p>	<p>Étalement sur 2 faces perpendiculaires</p> <p>Déterminer la zone d'ancrage en pieds de poteau si fondations requises</p> <p>Plaque métallique et goudjons en tête de poteau</p>

Fig.17 : Tableau de synthèse regroupant les informations propres à chaque cas d'étude

Il est fortement recommandé de prévoir un surplus de matière dans l'approvisionnement du chantier cible, au cas où certains modules seraient inutilisables au moment de la mise en œuvre (dégâts lors du transport ou du stockage, problème de tolérance dimensionnelle, etc.).

¹³ Clauses contractuelles de montage ANGST Marc, OEFNER Andreas, OTT Cynthia, STREIFF Olivier, ZOLLER-ECKENSTEIN Annette, trad. ACKERMANN Sarah, Zirkular GmbH / baubüro in situ et la Haute école spécialisée de Zurich ZHAW (2024)

Garanties

Dans le marché actuel, en l'absence de filière organisée et de système standardisé et labellisé de réemploi aucune garantie sur la matière n'est en général accordée par le propriétaire, les mandataires ou l'entreprise de déconstruction du chantier source pour le matériel proposé à l'issue du chantier de déconstruction. La responsabilité de la bonne utilisation du béton armé de réemploi est en principe du ressort de l'ingénieur civil en charge du chantier cible, couvert par son assurance de responsabilité civile.

L'art. 371 CO spécifie cependant que tout matériel installé sur une construction est garanti par défaut pour une durée de 5 ans. L'entreprise qui remet en œuvre les composants de réemploi doit donc veiller à obtenir de son « fournisseur » une garantie équivalente.

Si cette dernière ne peut lui être fournie, la loi ne permettant pas d'exclure la garantie en totalité (même d'entente entre les parties), il est indispensable de spécifier très clairement les limitations de garanties sur la matière fournie dans le contrat d'entreprise signé entre le maître de l'ouvrage du chantier cible et l'entrepreneur. En l'absence d'une telle clause, la fourniture et la pose seront considérées comme garanties par l'entrepreneur pour une période de 5 ans.

Remerciements

Nos remerciements vont à l'ensemble des chefs d'entreprises, directeurs d'agences, ingénieurs civils, juristes, maîtres d'ouvrages, pour leurs partages d'expérience, relectures, conseils et plus, qui ont contribué à nos recherches et à la rédaction de ces recommandations.

Un grand merci plus particulier à Malena Batién Masse, ingénieure civile, responsable de la filière génie civil d'HEPIA à Genève, à Julien Pathé, ingénieur civil, fondateur de la coopérative 2401 à Lausanne (VD) et Michel Porcelli, ingénieur civil, fondateur du bureau d'étude MPO ingénieurs Sàrl à La Sarraz (VD).

Bibliographie

- « Évaluation de la réutilisabilité des composants en béton armé avant la déconstruction à partir de bâtiments obsolètes », DEVENES Julie, BASTIEN MASSE Maléna, FIVET Corentin, éd. Journal of Building Engineering (2024)
- F05 Accord de transfert, ANGST Marc, OEFNER Andreas, OTT Cynthia, STREIFF Olivier, ZOLLER-ECKENSTEIN Annette, trad. ACKERMANN Sarah, Zirkular GmbH / baubüro in situ et la Haute école spécialisée de Zurich ZHAW (2024)
- F06 Clauses contractuelles de démontage ANGST Marc, OEFNER Andreas, OTT Cynthia, STREIFF Olivier, ZOLLER-ECKENSTEIN Annette, trad. ACKERMANN Sarah, Zirkular GmbH / baubüro in situ et la Haute école spécialisée de Zurich ZHAW (2024)
- F07 Clauses contractuelles de montage ANGST Marc, OEFNER Andreas, OTT Cynthia, STREIFF Olivier, ZOLLER-ECKENSTEIN Annette, trad. ACKERMANN Sarah, Zirkular GmbH / baubüro in situ et la Haute école spécialisée de Zurich ZHAW (2024).
- *Factsheet template for Reinforced Concrete Components, Obsolete Structure Audit*, DEVENES Julie, BASTIEN MASSE Maléna, FIVET Corentin, SXL-EPFL (2023)
- *The Influence of Consumer Behavior on Climate Change : The Case of Switzerland*, Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Technology and Society Laboratory, Cecilia Matasci, Marcel Gauch, Heinz Böni and Patrick Wäger, éd. Sustainability, MDPI (2021)
- Diagnostic des polluants et informations concernant l'élimination des déchets de chantier, HILTBRUNNER David, BURGI Daniel, éd. OFEV (2020)
- Diagnostic des polluants et concept d'élimination. Partie du module « Déchets de chantier ». Aide à l'exécution OLED, Annexe 4, éd. OFEV (2020)
- Oekobilanzdaten_ Baubereich_Donne_ecobilans_construction_2009-1-2022_v7.0

Normes utiles

- Norme SIA 430 Limitation des déchets de chantiers (2023)
- CEN/TS 17440 Évaluation et rénovation des structures existantes (2020)
- SIA 414/2 : Tolérances dimensionnelles dans le bâtiment (2016)
- Norme SIA 262 Construction en béton (2013)
- Norme SIA 269/2 Maintenance des structures porteuses – Structures en béton (2011)
- SN EN 206 : 2013 + A2 béton – Spécification, performances, production et conformités - Annexe nationale ND à
- SN EN 206 : 2013 + A2 2021(2025)
- SN EN 13791 Evaluation de la résistance à la compression sur site des structures et des éléments préfabriqués en béton (2019)
- SN EN 1504-10 Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Définitions, exigences, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité - Partie 10 : Application sur site des produits et systèmes et contrôle de la qualité des travaux (2017)
- NEN 2767-1 + C1 Mesure de l'état de l'environnement bâti – Partie 1 : Méthodologie (2019)
- CAN 241 F Constructions en béton coulé en places (2024)
- NF EN 12390 : Essais pour béton durci (2021)
- NF EN 13791 : Évaluation de la résistance à la compression sur site (2021)
- NF EN 12350 : Essais pour béton frais (2019)

Recommandations pour le développement du réemploi de
TOLES DE BARDAGE ET DE COUVERTURE METALLIQUES
Lot 3 Enveloppe du bâtiment

Institut : inPACT
Projet : MATLOOP
Date : Décembre 2025
Auteurs : Lionel RINQUET, professeur HES associé
Benoît SERAPHIN, collaborateur scientifique HES
Almir DELFIEU, assistant HES

Table des matières

Résumé	3
Summary	3
Lexique	4
Enjeux	5
Filière	6
Analyse	7
Déconstruction	9
Logistique	10
Stockage	11
Reconditionnement	12
Remise en œuvre	14
Garanties	14

Résumé

La production d'acier et d'aluminium, employés à de nombreux usages dans la construction, génère d'importants impacts environnementaux et émissions de gaz à effet de serre. Le réemploi de ces matériaux constitue un levier intéressant pour réduire l'empreinte carbone de la construction métallique. Les présentes recommandations s'appliquent plus particulièrement aux tôles de bardage et de couverture.

Les tôles de bardage et de couverture nécessitant des espaces de stockage à couvert, la clé de la réussite pour la mise sur pied d'une filière de récupération et de redistribution se situe au niveau de la rotation du stock. Il conviendra dès lors de se concentrer sur la récupération de lots homogènes (dimension et traitement de surface) et de la plus grande taille possible.

Les analyses préalables au réemploi doivent se concentrer sur les propriétés physiques du matériel, en particulier sur l'état et le type de traitement de surface. La déconstruction ne pose pas de problème particulier, les tôles étant généralement fixées par biais de fixations mécaniques à leurs supports, qui peuvent aussi être récupérés. Le transport des tôles se fait sur palettes en bois de taille adaptée et le stockage du matériel doit être effectué à l'abri de l'humidité, en veillant à séparer les tôles pour éviter tout risque de corrosion. Dans la mesure du possible on évitera de redécouper les tôles lors du reconditionnement et le nettoyage se fera en prenant garde. Ne pas endommager le traitement de surface existant. La remise en œuvre se fait selon les règles de l'art applicables au matériel neuf.

Summary

The production of steel and aluminum, which are used in many applications in construction, generates significant environmental impacts and greenhouse gas emissions. Reusing these materials is an attractive way to reduce the carbon footprint of metal construction. These recommendations apply more specifically to cladding and roofing sheets.

Since cladding and roofing sheets require covered storage space, the key to successfully setting up a recovery and redistribution business lies in stock rotation. It is therefore advisable to focus on recovering homogeneous batches (in terms of size and surface treatment) that are as large as possible.

Pre-reuse analyses should focus on the physical properties of the material, particularly its condition and type of surface treatment. Deconstruction does not pose any particular problems, as the sheets are generally attached to their supports using mechanical fasteners. The sheets are transported on wooden pallets of a suitable size and the material must be stored in a dry place, taking care to separate the sheets to avoid any risk of corrosion. As far as possible, the sheets should not be recut during reconditioning and cleaning should be carried out with care in order to avoid any damage to the existing surface treatment. Reuse must be carried out in accordance with the rules of good practice applicable to new material.

Lexique

Chantier cible : Chantier où sont remis en œuvre les matériaux de réemploi issus d'une déconstruction.

Chantier source : Chantier d'où proviennent les matériaux réemployés.

Downgrading : Anglicisme qui traduit une sous-utilisation, c'est-à-dire une perte de propriétés entre l'usage initial d'un matériau et son usage présent ou futur. Dans le cas du béton armé, dès que des armatures sont sciées, il y a une sous-utilisation des éléments découpés.

Recyclage : Valorisation de matériaux de construction issus de chantiers de déconstruction ou d'excavation avec transformation lourde de la matière, ramenée à l'état de matière première ou recomposée avec d'autres matières premières pour en faire un nouveau matériau.

Réemploi : Valorisation de matériaux de construction issus de chantiers de déconstruction ou d'excavation avec maintien de la fonction d'origine, sans ou avec peu de transformation.

Réemploi Déphasé : Réemploi avec stockage de la matière pour un certain temps

Réemploi Ex-situ : Réemploi d'éléments en provenance d'un chantier source autre que le chantier cible, avec transfert de la matière d'un site à un autre.

Réemploi Externe : Réemploi d'éléments avec transfert de propriété et de risque entre la source et la cible.

Réemploi Interne : Réemploi d'éléments sans transfert de propriété ni de risque.

Réemploi In-Situ : Réemploi d'éléments sur un chantier à la fois chantier source et chantier cible, sans transfert de la matière d'un site à un autre.

Réemploi simultané : Réemploi sans latence ni stockage intermédiaire entre les chantiers source et cible avec stockage intermédiaire en dehors du chantier

Réutilisation : Valorisation de matériaux de construction issus de chantiers de déconstruction ou d'excavation avec détournement de la fonction d'origine, sans transformation, ou avec un niveau de transformation faible à modéré.

Sourcing : Anglicisme qui désigne ici le travail d'inventaire, de traçabilité et de suivi de matériaux de réemploi en vue d'approvisionner un ou des chantiers cibles.

Enjeux

Les métaux (principalement l'acier et dans une moindre mesure l'aluminium) sont des matériaux omniprésents (et en partie incontournables) dans la construction, employés à de nombreux usages (armatures, charpente, revêtements de façade, gaines techniques, etc.). En Suisse, les métaux représentent près de la moitié des matériaux utilisés dans la construction (soit un peu moins de 2.6 millions de tonnes par an, près de 300kg par habitant par année)¹.

La production primaire d'acier et d'aluminium génère cependant d'importantes impacts environnementaux et émissions de gaz à effet de serre (GES) relatifs à l'extraction des matières premières, doublés pour l'acier par les émissions de GES liées à l'utilisation massive du coke dans les hauts fourneaux et pour l'aluminium des quantités élevée d'électricité nécessaires à l'électrolyse. Ainsi, la production d'une tonne d'acier nue induit 2'800 kg CO₂-eq et celle d'une tonne de tôle d'aluminium nue 5'580 kg CO₂-eq (KBOB). Le recyclage (près de 80% pour l'acier utilisé dans la construction)², bien que moins gourmand en énergie et moins impactant sur le plan environnemental que la filière primaire, génère quant à lui à volume égal et pour l'acier des émissions de GES équivalent à 50% de celles induites par la production à partir de minerai¹.

Le réemploi des composants en acier (à l'exception des fers d'armature du béton armé difficilement réemployables) ou en aluminium est par conséquent une solution très efficace pour réduire l'empreinte carbone de la construction métallique (99% de réduction des émission de GES pour le réemploi par rapport au neuf, selon les calculs effectués dans le cadre du projet Matloop) facilité par le haut degré de standardisation et les assemblages mécaniques qui caractérisent généralement ce type de composants.

Les présentes recommandations visent plus particulièrement le réemploi des tôles de bardage et de couverture métalliques en acier ou aluminium et proposent des pistes pour orienter les acteurs de la construction (maîtres d'ouvrages, concepteurs, entreprises) au fil des différentes étapes du réemploi, en particulier de la chaîne logistique.

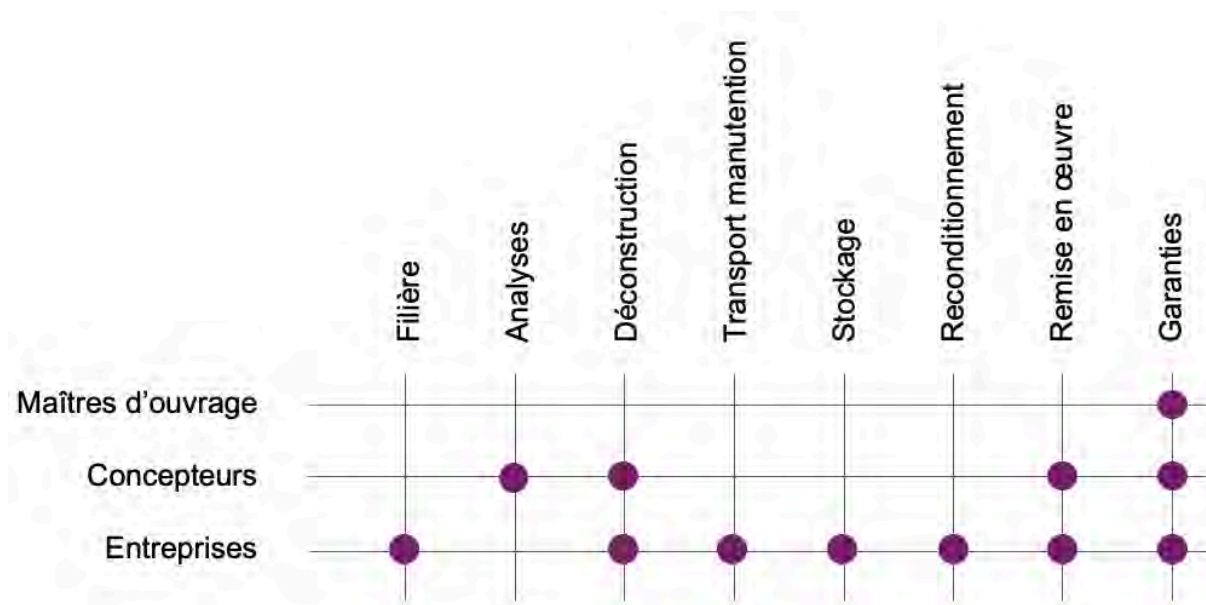


Fig.1 Chapitres traités par les recommandations et public ciblées

¹ Cecilia Metasci et al. The Influence of Consumer Behavior on Climate Change: The Case of Switzerland, EMPA, 2021

² <https://institut-economie-circulaire.fr/wp-content/uploads/2022/10/Fiche-Acier.pdf>

³ <https://www.kmu.admin.ch/kmu/fr/home/actuel/interviews/2025/decarbonation-batiment-filieres-locales.html>

Filière

Les éléments de bardage ou de couverture métallique se prêtent relativement aisément à la mise sur pied d'une filière de récupération et de distribution, pour autant que le matériel soit sain et la taille des lots suffisante.

La combinaison des différents types de réemploi implique six modèles qui présentent chacun des caractéristiques différentes :

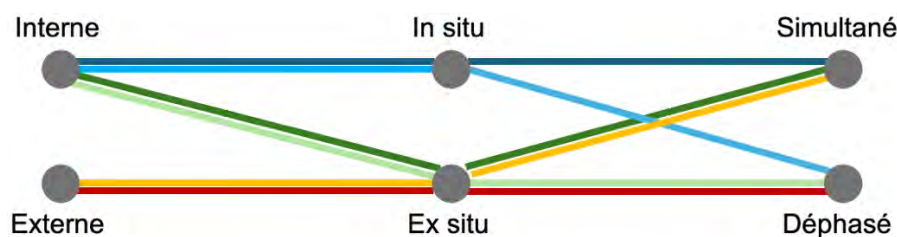


Fig.2 Types de réemploi envisageables

Le réemploi interne passe par la mise sur pied d'une organisation propre au maître de l'ouvrage, à priori destinée à ses seuls besoins. On ne peut dès lors pas parler à proprement parler de filière de distribution destinée à massifier le réemploi.

Les présentes recommandations explorent donc les deux modèles externes, déphasé (qui implique un stockage intermédiaire) et simultané, avec passage du chantier source (site de la déconstruction) au chantier cible (site de la remise en œuvre) sans stockage intermédiaire.

Réemploi externe ex-situ déphasé

Afin de favoriser la rotation des stocks et de pouvoir répondre à la demande de chantiers de taille moyenne à importante il convient de favoriser la récupération de matériaux issus de de déconstructions proposant des lots homogènes en qualité, types, traitement de surface, formats, et disponibles en quantité. Ces contraintes devraient orienter la filière vers les tôles de couverture, moins susceptibles que celle de façade d'avoir été débitées pour répondre au dessin sur mesure de la façade du bâtiment source. Cette remarque s'applique de même pour le traitement de surface, plus susceptible d'être homogène et standard en toiture qu'en façade, notamment au niveau des teintes.

La nécessité de stocker le matériel à couvert (voir chapitre stockage) incite également à favoriser des composants les plus standardisés possibles et en lots de grande taille afin favoriser la rotation des stocks.

La possibilité d'écouler des tôles en petits lots et moins homogènes existe bien entendu mais sera limitée à de petits projets ou à ceux qui sont prêts à accepter le surcroît de travail lié à un approvisionnement multiple et l'effet « patchwork » que cela implique.

Réemploi externe ex-situ simultané

De facto, le réemploi simultané n'implique pas de stock, ni les installations physiques afférentes. Une filière de réemploi simultané s'apparente donc à une plateforme facilitant l'échange de matériel entre un chantier source et un chantier cible.

La clé du succès d'une telle plateforme est de connaître avec le plus grand degré d'anticipation possible quel type de matériel sera disponible et dans quelles quantités afin que les chantiers sources et cibles puissent être coordonnés, avec éventuellement un stockage temporaire sur l'un des deux chantiers. Cela passe par un très haut degré de connaissance des projets de déconstruction planifiés (potentiellement par le biais d'un accès aux demandes d'autorisation de démolition) et des prises d'inventaires les plus précoces possible.

Plusieurs plateformes proposées par des ressourceries ou certaines associations tentent de mettre en place ce genre de modèle. Pour l'heure et à notre connaissance, en Suisse aucune plateforme n'est dédiée spécifiquement

à un matériau de gros œuvre, bardage métallique ou autre. Une forme de spécialisation est pourtant sans doute souhaitable pour atteindre le volume critique de matériaux stockés et le degré de compétence souhaitables pour permettre « d'industrialiser » le réemploi de ce genre de composant.

Analyse

Recommandations générales

Les tôles de revêtement en aluminium thermopoudrées ou éloxées ou en acier zinguées à chaud ou thermopoudrées ayant une bonne durabilité et n'ayant pas de fonction structurelle, il n'y a pas de conditions discriminatoires à leur réemploi. Il s'agit d'un produit spécifique réalisé par un fabricant qui peut être réutilisé dans différents projets et différents usages.

Une inspection visuelle par un expert (fabricant, ingénieur en façade, entreprise de construction métallique) s'avère suffisante dans la grande majorité des cas pour définir si le matériel est exempt de défauts liés à la corrosion, la grêle, ou autres chocs et acceptable sur le plan esthétique en vue d'un futur réemploi. La norme DIN-SPEC 91484 : 2023 (Procedure to record building materials as a base to evaluate the potential for a high-quality reutilization prior to demolition and renovation work) peut servir de base pour procéder à la récolte d'informations.

Dans tous les cas il convient de s'assurer et de documenter les éléments suivants :

- Types de matériau (acier ou aluminium, à l'aide d'un simple aimant), de profil et de traitement de surface (voir ci-dessous)
- Fonction sur le bâtiment source (toiture, façade, etc.)
- L'année de construction du bâtiment afin de savoir si la norme en vigueur s'applique encore
- L'absence de défauts majeurs : chocs, déformations, impacts de grêle (voir ci-dessous), etc.
- L'absence de corrosion et de traces d'humidité
- L'état de conservation du traitement de surface (voir ci-dessous)
- La présence de percements, d'anti-drum, etc.

L'idéal serait aussi d'obtenir les spécifications d'origine du produit pour attester de manière sûre les qualités de :

- Résistance mécanique
- Résistance aux forces concentrées
- Tolérances dimensionnelles
- Performances au feu extérieur
- Réaction au feu
- Type de traitement de surface

Les investigations relatives à la présence de polluants du bâti doivent être réalisées par un expert inscrit sur la liste du Fach. Selon art. 16 OLED et art. 3 OTConst, une investigation complète du bâtiment est obligatoire avant tout travaux. Il est judicieux de mentionner l'intention de réemploi, le niveau d'investigation et d'analyse pouvant varier selon les filières de traitement ou de réemploi envisagée.

Traitement de surface

L'état de conservation du traitement de surface peut être déterminant pour le réemploi des tôles, selon l'environnement auquel il est prévu de les exposer. Dans l'idéal les caractéristiques du traitement de surface devraient être établies avant le démontage pour qualifier et quantifier au mieux le gisement, mais en tous cas avant la remise en œuvre, pour éviter le réemploi de matériel dans des conditions qu'il ne supportera pas sur le long terme.

Les traitements de surface les plus communément rencontrés dans les tôles métalliques de bardage et de couverture sont les suivants :

- Galvanisation à chaud
- Pré-laquage (DU) 15 µm

- Revêtement polyester (SP / PVDF) d'une épaisseur de 25-30µm, y compris environ 5 µm de couche de fond
- Traitement multicouche à résistance accrue (type Colorcoat Prisma par exemple), épaisseur de 40-65µm

Si la documentation d'origine est disponible, le type et l'épaisseur du traitement de surface devrait pouvoir être facilement identifié. Dans le cas contraire, il conviendra de procéder à des analyses plus poussées, pour déterminer la composition du traitement de surface et son épaisseur. Dans certains cas simple (galvanisation à chaud de tôle acier par exemple) une inspection visuelle peut suffire pour définir le type. Si le traitement de surface est inconnu, des analyses chimiques ou physiques peuvent être nécessaires. L'épaisseur de la ou des couches de traitement peut être établie à l'aide un micromètre de surface ou d'un autre instrument de mesure appropriés comme des jauges d'épaisseur électroniques (magnétiques, à courants de Foucault ou à ultrasons)⁵.

Des tests de résistances à la corrosion peuvent également être menés selon la norme DIN 55634-1 : Produits de revêtement et revêtements – Protection contre la corrosion d'éléments porteurs à parois minces en acier.

Les informations récoltées ci-dessus sont utiles pour délimiter le champ d'application du matériel lors de sa remise en oeuvre, la durée de protection attendue est fonction des caractéristiques du traitement de surface (type et épaisseur de la couche).

La qualité du traitement de surface, combinée avec la classe d'exposition à laquelle la tôle sera exposée permet de définir une durée de protection, correspondant à la durée de vie du composant réemployé.

Classe d'exposition

- C1 (insignifiante),
- C2 (faible),
- C3 (modérée),
- C4 (forte)
- C5-I (très forte, industriel)
- C5-M (très forte, marin)

Durée de protection

- L = Faible (Low) : 2-5 ans
- M = Moyen (Medium) : 5-15 ans
- H = Élevé (High) : plus de 15 ans

Le tableau ci-dessous permet de définir la durée de protection attendue en fonction du type de traitement et de son épaisseur et de la classe d'exposition.

Matériau de revêtement	Épaisseur nominale Système de revêtement	Durée de protection attendue														
		C2			C3			C4			C5-I			C5-M		
		L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H
SP	15 my	x	x	x												
SP	25 my	x	x	x	x	x	x	x								
SP	35 my	x	x	x	x	x	x	x								
PVDF	25 my	x	x	x	x	x	x	x	x		x					
PVDF / PRISMA*	55 - 65 my	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	
PVC (P) / HPS200	200 my	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Figure 3 : Tableau indiquant la durée de protection attendue de quelques systèmes de revêtement dans différentes épaisseurs nominales© Montana

Grêle

⁵ <https://www.keyence.eu/frfr/ss/products/microscope/vhx-casestudy/chemistry/coating.jsp>

Les impacts de grêle ont non seulement des conséquences esthétiques, mais ils peuvent endommager le traitement de surface. Ils doivent donc être soigneusement inspectés pour établir l'étendue des dégâts avant réemploi.

Si les spécifications techniques d'origine du produit sont disponibles on veillera à les indiquer sur le passeport matériaux du produit destiné à l'accompagner en vue de son réemploi. Pour mémoire on distingue 5 classes de résistance fonctionnelle à la grêle, de HW1 à HW5 :

- HW 1 pour la fonctionnalité signifie qu'un élément de construction résiste à des grêlons d'un diamètre maximal de 1 cm sans que sa fonction ne soit affectée.
- HW 3 signifie par exemple qu'à partir d'une taille de grêle de 3 cm, des bosses peuvent apparaître ; en dessous, l'enveloppe reste visuellement impeccable.
- HW 5, l'élément de construction résiste à des grêlons de la taille d'un œuf de poule, avec une épaisseur de tôle minimale de 1 mm,

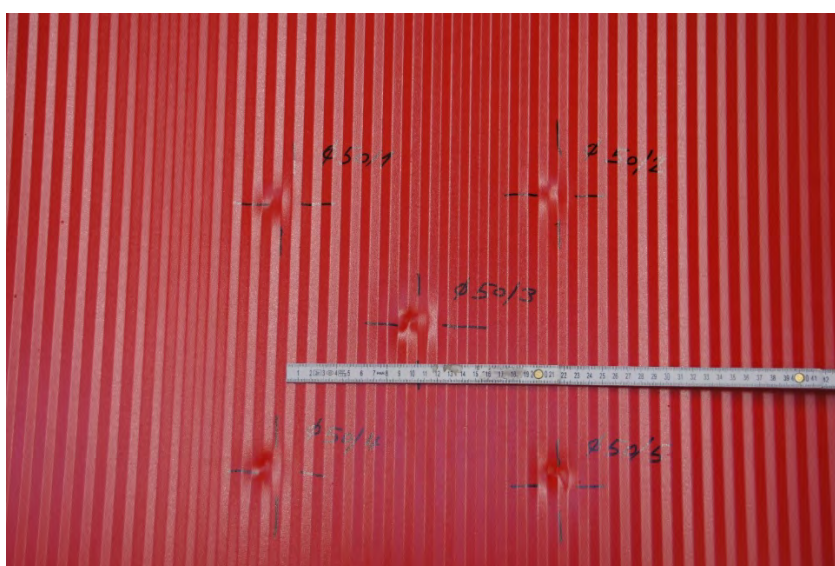


Figure 4 : Images d'une tôle avec mesures des impacts de grêle © Montana

Déconstruction

La dépose des tôles de bardage ou de couverture, en général fixées à la sous-structure au moyen de fixation mécaniques (vis) et dont le poids est relativement faible, est en général aisée. L'outillage requis est limité et la main d'oeuvre en nécessite pas de qualification particulière.

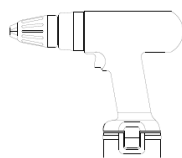


Figure 5: Croquis illustrant l'outillage nécessaire à la déconstruction © Benoît SERAPHIN

Le démontage doit être exécuté avec soin pour ne pas endommager les panneaux, par simple dévissage (ne pas arracher !). Attention, dès que la vis est enlevée, la détérioration du panneau au droit du percement peut être rapide (corrosion).

Récupérer les filières et autres pièces de sous-construction, en général en bon état car non-exposées aux intempéries, brut, et potentiellement réemployables avec d'autres tôles peut s'avérer être une opportunité intéressante.

Le risque principal de dégradation des tôles est lié à la manipulation et la manutention des éléments, par nature assez fragiles une fois désolidarisés de leurs supports. Il conviendra donc de veiller à utiliser des moyens de levage adapté pour l'enlèvement des tôles de la zone de travail et de vérifier l'état des éléments durant la dépose puis le stockage. Dans l'idéal des palettes en bois sur mesure, correspondant à la dimension des éléments serviront de support pour le levage et le transport une fois les tôles empilées.

Avant le transfert sur le chantier cible ou le stock intermédiaire, il est important de stocker le matériel au sec, en séparant les tôles au moyen de listes en bois ou de carton, par exemple, pour éviter tout risque de corrosion (notamment galvanique) et d'endommager le traitement de surface.

Logistique

Une fois les tôles déposées sur des palettes de bois adhoc et correctement séparées les unes des autres, les paquets peuvent être cerclés à l'aide de feuilards synthétiques ou métallique. Le cerclage doit être réalisé avec précaution afin d'éviter d'endommager ou de plier les éléments, en utilisant des listes en bois pour éviter le contact entre les feuilards et les tôles et le raguage.

Chaque palette doit être accompagnées d'une fiche d'identification physique ou numérique (par exemple QR code) contenant les informations utiles pour la remise en œuvre :

- Matériau
- Caractéristiques du traitement de surface
- Marques, certificats, fabricant
- Usage à l'origine
- Dimensions et poids
- Autres propriétés physiques
- État du matériel et dommages résiduels
- Autres informations

Le document développé par öbu et disponible via le lien ci-dessus définit le type d'informations utiles à indiquer sur la fiche d'identité du produit.

<https://oebu.pepadocs.com/fr/openWindow/Documents/byCode/d3d48b2e438c3d7ea4eda32ef1bde5a0/asMainPage/>

Le matériel doit être transporté sur des camions bâchés et la manutention doit respecter certaines règles (ci-après, selon le fabricant Kingspan) :

- Empiler au maximum deux paquets l'un sur l'autre. Veillez dans ce cadre à ce que les palettes de transport en bois soient également superposées.
- Protéger les faces inférieures et les rives de produits en cas d'utilisation d'un engin de levage (ex : chariot élévateur)
- Soulever les panneaux pour éviter le frottement de l'extrémité d'un parement contre celui de l'autre.
- La manipulation lieu de stockage au lieu de mise en œuvre pour sa pose de préférence sur chant.
- Le déchargement, la manipulation ou le transbordement sur le chantier doivent être impérativement réalisés au moyen d'élingues afin de protéger les divers revêtements.

- Pour des panneaux de masse supérieure à 70 kg, il est conseillé l'emploi de moyen de manutention adapté (palonnier à ventouses, attention, si le parement extérieur est muni d'un film de protection, celui-ci doit être impérativement retiré au moins au droit de l'emplacement des ventouses.
- Les paquets de petites dimensions (moins de 6 m) peuvent être également soulevés et enlevés au moyen d'un élévateur, de manière appropriée en protégeant les fourches (d'un revêtement caoutchouc). Les tôles profilées revêtues d'un feutre anti-condensation ne peuvent être soulevées qu'au moyen d'élingues.
- Avec les longs paquets (plus de 6 m), il convient de tenir compte du risque de fléchissement ou de flexion ! Pour éviter ce phénomène, l'entrepreneur doit utiliser des élingues supplémentaires combinées à des poutres ou traverses. Attention à l'équilibre lors du soulèvement des paquets. Les arêtes des paquets doivent être protégées sur leur face supérieure, à l'aide de lattes en bois par exemple.

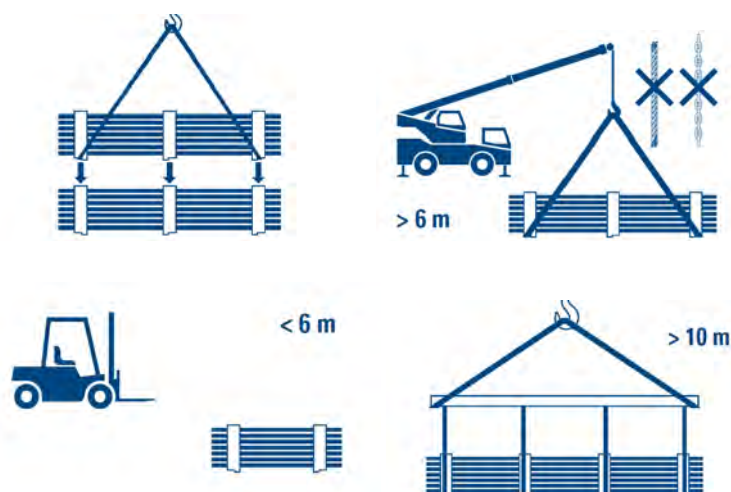


Figure 6 : Croquis illustrant les modes de manutention recommandés © Montana

Stockage

Recommandations générales

Les éléments doivent être stockés sur palettes, le moins longtemps possible à l'extérieur afin d'éviter toute formation d'humidité entre les éléments et de prévenir les risques de corrosion (y compris galvanique). Les palettes doivent être légèrement inclinées pour faciliter l'écoulement de l'eau même en intérieur (condensation), à moins que le matériel ne soit stocké dans un lieu couvert et chauffé.

Condition de stockage extérieur :

- Pour le stockage intermédiaire de courte durée (entre 2 à 4 semaines maximum), protéger les paquets des intempéries et de la saleté avec une bâche textile imperméable et respirante. Une aération par des ouvertures sur les côtés de la tête empêche la condensation. Stockez les paquets en biais – ainsi, malgré la protection contre les intempéries, l'eau qui aurait pu s'infiltrer peut s'écouler.

Condition de stockage intérieur :

- Pour le stockage intermédiaire de longue durée, c'est-à-dire au-delà d'un mois, choisir un lieu de stockage couvert et bien ventilé
- Stocker les éléments au sec et à l'abri des intempéries. Éviter les variations de température et attention à la possible condensation. Attention à la présence d'eau interstitielle ou résiduelle.



Figure 7 : Croquis illustrant les modes de stockage recommandés © Benoît SERAPHIN

Si l'humidité ne peut pas sécher en raison d'un apport d'air insuffisant, de la rouille blanche se forme en très peu de temps sur les surfaces galvanisées, même si elles sont également peintes. L'humidité traverse alors la couche de peinture jusqu'à la surface du zinc et se forme de l'hydroxyde de zinc. Cette rouille blanche s'infiltré dans la couche de peinture et la peinture se détache.

En été notamment, de la condensation peut se former dans la pile en raison des différences de température entre le jour et la nuit. Enfermé entre les éléments de construction, celui-ci ne peut pas s'évaporer, ce qui entraîne souvent la formation de rouille blanche en l'espace de quelques jours. Les températures diurnes élevées en été accélèrent encore la corrosion⁶.



Figure 8 : Photo illustrant un cas de tôle avec de la rouille blanche © Montana

Le stockage d'éléments de construction en aluminium nu est particulièrement délicat. Ils doivent être stockés complètement au sec et à l'abri des intempéries. Éviter absolument la formation de condensation dans le paquet à la suite de variations de température.

Reconditionnement

Le reconditionnement devrait dans l'idéal être fait directement après la dépose des éléments pour limiter la manutention. Cependant, les conditions du chantier que ce soit de déconstruction ou de construction (poussière, espace limité, pression des délais, etc.) rendent le reconditionnement in-situ compliqué. Il devra donc probablement être exécuté dans le lieu de stockage intermédiaire, soit lors de l'entrée en stock, soit avant la sortie de stock.

Recommandations générales

⁶ <https://www.montana-ag.ch/fr/blog/savoir/stockage-dans-les-regles-de-l-art-eviter-d-endommager-les-elements-de-construction>

Avant de procéder à une réparation, il est toujours recommandé d'évaluer l'effet visuel d'un dommage à une distance raisonnable de la façade. Dans de nombreux cas, les déformations légères et les petites différences de teinte sur le traitement de surfaces sont à peine perceptibles et peuvent être laissées sans correction si la protection contre la corrosion est encore garantie. Si les points de réparation sont plus visibles qu'un petit dommage, autant ne pas intervenir.

Les petits dommages sur la surface revêtue sont corrigés de préférence avec une peinture de retouche. Appliquez la peinture de manière ciblée à l'aide d'un pinceau fin. L'application au pinceau donne généralement de meilleurs résultats que la peinture au pistolet. En effet, la pulvérisation présente le risque de créer des nuages de pulvérisation. De plus, la surface à retoucher – qui se distingue souvent de la peinture d'origine par sa teinte et surtout par son degré de brillance – est généralement plus grande que nécessaire.

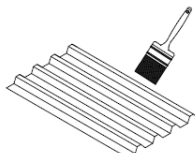


Figure 1 : Croquis illustrant les possibilités de reconditionnement © Benoît SERAPHIN

Nettoyage

Exposés à la pollution atmosphérique et souvent peu voire pas entretenue au cours de la vie du bâtiment, les tôles de couverture et de façade sont sujettes à l'encrassement. Un nettoyage est donc indispensable avant la remise en œuvre. Il convient d'appliquer les recommandations suivantes :

1. Travailler avec soin, évitez de salir et d'endommager le revêtement, surtout au moment de la séparation des pièces prélaquées.
2. Éliminer immédiatement la limaille, de préférence en la soufflant, évitant ainsi un départ de rouille sous l'action de l'humidité.
3. Éliminer les saletés à l'aide de matériel non abrasif et d'eau tiède savonneuse ou additionnée de nettoyant universel (max 10%). Ne pas utiliser de produits acides ou alcalins). Enlever les résidus de matières grasses avec de la benzine
4. Rincer abondamment à l'eau claire
5. Laisser sécher les éléments avant de les remettre en palette, toujours avec une couche de séparation entre les tôles, par exemple des bandes de carton.

Attention : avant chaque nettoyage, procédez à un essai de nettoyage adapté sur une petite surface !

La remise en œuvre de films de protection peut exceptionnellement être envisagée mais leur utilité et leur pertinence dans le cadre du réemploi est douteuse et elle induira des coûts supplémentaire.

Travaux de coupe

Dans la mesure du possible on évitera de recouper les éléments récupérés. Cependant, selon le calepinage envisagé sur le chantier source, des recoupes peuvent éventuellement être nécessaires.

Les travaux de coupe nécessaires, p.ex. ouvertures en toiture, découpes diverses et travaux d'adaptation sont effectués de manière professionnelle à l'aide d'appareils ne produisant pas d'étincelles.

Une scie sauteuse affichant une grande profondeur de coupe et une lame correspondante (entraxe de dent de 1 mm environ) convient pour découper les plaques profilées Montana ou alors une scie circulaire.

Pour couper des tôles profilées et des pièces de finition, l'on utilise une cisaille à tôles électrique ou une « grignoteuse », lesquelles réalisent une découpe propre, même biaisée.

Il est recommandé de ne pas utiliser de tronçonneuses à disque, celles-ci détruisant le revêtement métallique au niveau de la coupe et donc son effet cathodique protecteur. Dans ce dernier cas, les surfaces de tôles à l'air libre,

surtout en présence d'un revêtement, doivent être protégées contre la projection d'étincelles, celles-ci pouvant par de petits éclats métalliques entraîner à court terme une corrosion de sur face ponctuelle.

Outre les machines mentionnées, divers outils sont également nécessaires, par exemple : cisailles à tôle, pinces plates, marteau, équerre etc. Après la pose, traiter les coupes visibles, en particulier celles exposées aux intempéries, avec une laque de réparation.

Remise en œuvre

Recommandations générales

La remise en œuvre des tôles de bardage métalliques réemployées ne diffère pas fondamentalement de la mise en œuvre de matériel neuf et ne présente pas de difficulté supplémentaire. La pose doit s'effectuer selon les règles de l'art usuelles pour la pose de matériel neuf.

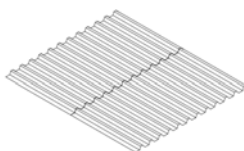


Figure 10 : Croquis illustrant l'aspect fini lié à la repose © Benoît SERAPHIN

Il convient cependant de veiller à ce que le matériel soit utilisé en fonction de ses capacités. Les tôles de bardage métalliques susceptibles d'être réemployées sont majoritairement présentes sur les toitures et les façades des bâtiments sources. Le réemploi un pour un au niveau de la fonction représente une forme d'assurance. Il n'est toutefois absolument pas exclu d'utiliser une tôle précédemment posée sur un toit pour revêtir une façade est vice versa. Dans ces circonstances il convient néanmoins de vérifier soigneusement si le changement de destination peut s'opérer sans risque, notamment en fonction du nouveau cas de charge et de la résistance mécanique liée au profil et à l'épaisseur de la tôle, à sa classe de résistance à la grêle et aux intempéries, etc.

Garanties

Dans le marché actuel, en l'absence de filière organisée et de système standardisé et labellisé de réemploi aucune garantie sur la matière n'est en général accordée par le propriétaire, les mandataires ou l'entreprise de déconstruction du chantier source pour le matériel proposé à l'issue du chantier de déconstruction.

L'art. 371 CO spécifie cependant que tout matériel installé sur une construction est garanti par défaut pour une durée de 5 ans. L'entreprise qui remet en œuvre les composants de réemploi doit donc veiller à obtenir de son « fournisseur » une garantie équivalente.

Si cette dernière ne peut lui être fournie, la loi ne permettant pas d'exclure la garantie en totalité (même d'entente entre les parties), il est indispensable de spécifier très clairement les limitations de garanties sur la matière fournie dans le contrat d'entreprise signé entre le maître de l'ouvrage du chantier cible et l'entrepreneur. En l'absence d'une telle clause, la fourniture et la pose seront considérées comme garanties par l'entrepreneur pour une période de 5 ans.

Remerciements

M. Philippe Paraire, Sottas SA, 1630 Bulle

M. Alberto Cerri, Association Öbu, Der Verband für nachhaltiges Wirtschaften, 8005 Zurich

Recommandations au développement du réemploi de

FAUX PLANCHERS TECHNIQUES

Lot 4 Aménagements intérieurs

Institut : inPACT
Projet : MATLOOP
Date : Décembre 2025
Auteurs : Lionel RINQUET, professeur HES associé
Benôit SERAPHIN, collaborateur scientifique HES
Almir DELFIEU, assistant HES

Table des matières

Résumé	3
Summary	3
Lexique	4
Enjeux	5
Filière	6
Analyse	6
Déconstruction	8
Logistique	9
Stockage	9
Reconditionnement	10
Remise en œuvre	11
Garanties	12

Résumé

Le réemploi des éléments de faux planchers techniques induit d'énormes bénéfices sur le plan environnemental par rapport au neuf, ne présente pas de difficultés techniques et concerne un produit hautement standardisé ce qui garantit l'existence de gisements et de débouchés locaux.

Une filière de récupération, reconditionnement centralisé et redistribution des composants de planchers techniques a été mise sur pied en France par Mobius Réemploi. Les présentes recommandations s'en inspirent très largement.

Le démontage soigné implique peu voire aucune opération supplémentaire par rapport à une démolition classique. Le conditionnement peut se faire sur des euro palettes standard. La manutention et le transport n'impliquent pas de moyen de levage ou de type de camion particuliers. Le stockage doit être effectué à couvert, à température ambiante (15-25°) et dans des conditions hygrométriques contrôlées. Le reconditionnement manuel est relativement chronophage mais ne requiert pas de qualifications spécifiques. La remise en œuvre est identique au neuf. Le haut degré de standardisation du produit et l'identification relativement aisée des défauts peut permettre à l'intermédiaire de fournir une garantie sur le produit.

Summary

The reuse of raised access floor components offers enormous environmental benefits compared to new products, does not present any technical difficulties, and involves a highly standardized product, which guarantees the existence of local sources and outlets.

A business specializing in the recovery, centralized reconditioning, and redistribution of technical floor components has been set up in France by Mobius Réemploi. These recommendations are largely based on this model.

Careful dismantling involves little or no additional work compared to conventional demolition. Packaging can be done on standard Euro pallets. Handling and transport do not require any special lifting equipment or type of truck. Storage must be carried out under cover, at room temperature (15-25°C) and in controlled humidity conditions. Manual reconditioning is relatively time-consuming but does not require any specific qualifications. Reuse is identical to new. The high degree of product standardization and the relatively easy identification of defects allow the intermediary to provide a warranty on the product.

Lexique

Chantier cible : Chantier où sont remis en œuvre les matériaux de réemploi issus d'une déconstruction.

Chantier source : Chantier d'où proviennent les matériaux réemployés.

Downgrading : Anglicisme qui traduit une sous-utilisation, c'est-à-dire une perte de propriétés entre l'usage initial d'un matériau et son usage présent ou futur. Dans le cas du béton armé, dès que des armatures sont sciées, il y a une sous-utilisation des éléments découpés.

Recyclage : Valorisation de matériaux de construction issus de chantiers de déconstruction ou d'excavation avec transformation lourde de la matière, ramenée à l'état de matière première ou recomposée avec d'autres matières premières pour en faire un nouveau matériau.

Réemploi : Valorisation de matériaux de construction issus de chantiers de déconstruction ou d'excavation avec maintien de la fonction d'origine, sans ou avec peu de transformation.

Réemploi Déphasé : Réemploi avec stockage de la matière pour un certain temps

Réemploi Ex-situ : Réemploi d'éléments en provenance d'un chantier source autre que le chantier cible, avec transfert de la matière d'un site à un autre.

Réemploi Externe : Réemploi d'éléments avec transfert de propriété et de risque entre la source et la cible.

Réemploi Interne : Réemploi d'éléments sans transfert de propriété ni de risque.

Réemploi In-Situ : Réemploi d'éléments sur un chantier à la fois chantier source et chantier cible, sans transfert de la matière d'un site à un autre.

Réemploi simultané : Réemploi sans latence ni stockage intermédiaire entre les chantiers source et cible avec stockage intermédiaire en dehors du chantier

Réutilisation : Valorisation de matériaux de construction issus de chantiers de déconstruction ou d'excavation avec détournement de la fonction d'origine, sans transformation, ou avec un niveau de transformation faible à modéré.

Sourcing : Anglicisme qui désigne ici le travail d'inventaire, de traçabilité et de suivi de matériaux de réemploi en vue d'approvisionner un ou des chantiers cibles.

Enjeux

Les faux planchers techniques, éléments très répandus, hautement standardisés, facilement démontables et transportables, souvent composés en de tôles en acier (matériau à forte empreinte carbone), les éléments de faux plancher technique standardisés sont communément utilisés dans de très nombreux immeubles administratifs et commerciaux (susceptibles de subir des travaux de transformation relativement fréquents), assurant de facto un gisement et des débouchés intéressants pour le réemploi.

Sur l'intégralité du processus et selon la provenance il a été calculé que 90-99% d'émission de CO₂ sont épargnées avec le réemploi des dalles de faux plancher sur un poids carbone neuf de 8.7 kgco₂/m².

Les présentes recommandations proposent des pistes pour orienter les acteurs de la construction (maîtres d'ouvrages, concepteurs, entreprises) pour la mise sur pied de filières de récupération, reconditionnement et redistribution de ce matériel et pour les différentes étapes de son réemploi, en particulier au fil de la chaîne logistique.

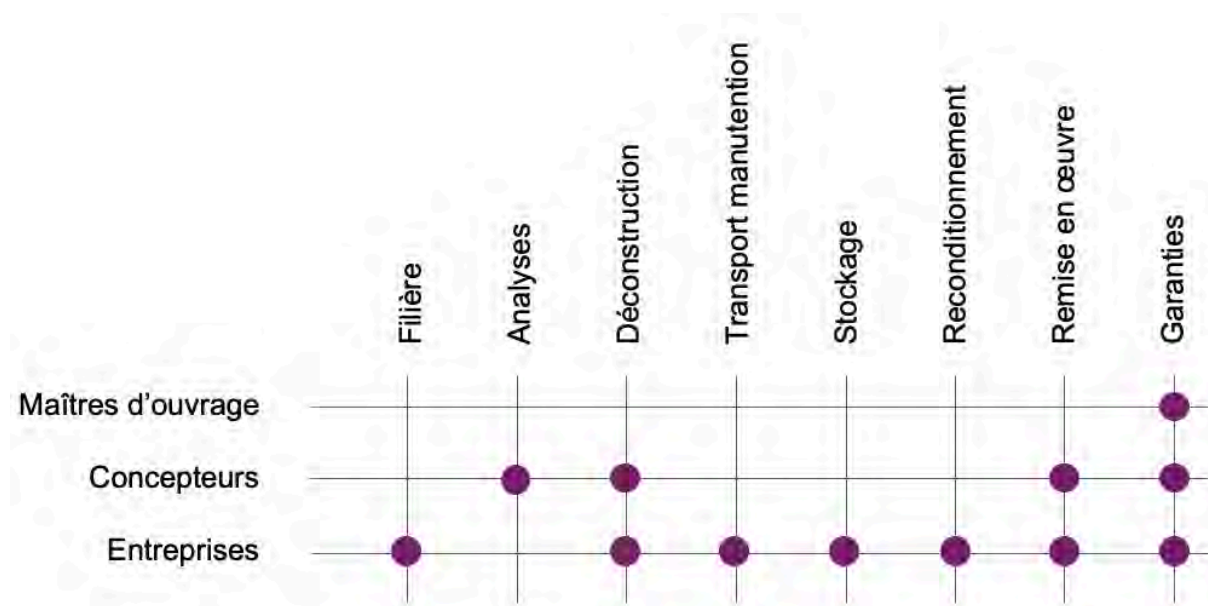


Fig.1 Chapitres traités par les recommandations et public ciblées

Filière

La combinaison des différents types de réemploi (*in situ* / interne / externe, *ex situ*, simultané / déphasé)¹ implique que six modèles sont envisageables, et que chacun présente des caractéristiques différentes.

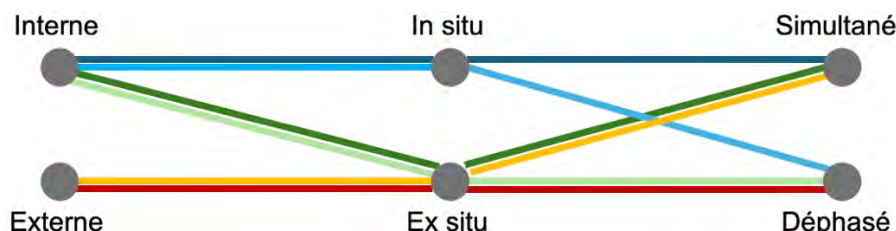


Fig.2 Types de réemploi envisageables

Les faux planchers techniques se prêtent aisément à la mise sur pied d'une filière de récupération et de distribution. Le modèle d'affaire décrit ci-après est inspiré de celui de Mobius réemploi, organisme actif en France et en Belgique, qui a mis sur pied une filière spécifique aux composants de faux planchers techniques depuis déjà plusieurs années, répondant au modèle de réemploi externe, ex-situ et déphasé, auquel ce type de matériel est bien adapté.

Les composants des faux planchers techniques sont standardisés, en général disponible en lots de taille relativement importante et simples à déconstruire, à transporter, à reconditionner et à remettre en œuvre, avec un haut degré d'acceptabilité, le matériel étant in fine caché sous le revêtement de sol final. Ces caractéristiques permettent une rotation des stocks élevée, condition sine qua non pour dégager une forme de rentabilité. Elles. Permettent également, dans certains cas, de pouvoir fournir des garanties sur la matière reconditionnée, ce qui est un avantage indéniable par rapport à d'autres types de matériel.

L'expérience de Mobius démontre que seul le traitement de volumes importants permet de bénéficier des économies d'échelle nécessaires pour arriver à rentabiliser l'opération. A l'échelle de la Suisse, le montage d'une filière spécifique ne pourra se justifier que considéré à l'échelon régional (romand ou suisse alémanique) voir national. Cette réalité permet d'imaginer l'implantation d'une telle structure dans une région où les surfaces nécessaires seraient disponibles à des tarifs abordables. Les impacts environnementaux de transport étant limités vu les faibles distances en Suisse et contrebalancés par le gain carbone important vis à vis du matériel neuf.

Analyse

Types de planchers

Les éléments de faux plancher sont produits des produits standardisés fabriqués industriellement. Le nombre de types de planchers est relativement restreint. On cherchera dans un premier temps à identifier le type de matériel installé sur le chantier source, sur la base de la documentation d'origine si elle est disponible, à défaut par inspection visuelle.

Les principaux types employés sont :

Dall'R30B

- Dimensions : 60 cm x 60 cm, épaisseur 30 mm.

¹ L. Riquet, S. Citherlet et al, REMCO, état des lieux sur le réemploi des matériaux de construction en Suisse romande, HES-SO, 2025

- Composition : âme en panneau de particules haute densité (minéral ou bois), faces latérales et sous-face revêtues d'une tôle d'acier traité pliée 5/10ème.
- Finitions : Brute, sans revêtement.
- Réaction au feu : Euroclasse BflS1 (LNE rapport n°190236)
- Caractéristiques mécaniques :
 - o Classe de charge : 1
 - o Classe de flèche : A

Dall'R38B

- Dimensions : 60 cm x 60 cm, épaisseur 38 mm.
- Composition : âme en panneau de particules haute densité, faces latérales et sous-face revêtues d'une tôle d'acier traité pliée 5/10ème, ou chants PVC et sous-face tôle.
- Finitions : Brute, sans revêtement.
- Réaction au feu : Euroclasse BflS1 (LNE rapport n°190236)
- Caractéristiques mécaniques :
 - o Classe de charge : 2
 - o Classe de flèche : A

Dall'R30S (=stratifié, revêtement technique : nettoyage seul, pas de ponçage)

- Dimensions : 60 cm x 60 cm, épaisseur 30 mm.
- Composition : Ame en panneau de particules haute densité, faces latérales et sous-face revêtues d'une tôle d'acier traité pliée 5/10ème.
- Finition : Revêtement stratifié.
- Réaction au feu : Euroclasse BflS1 (LNE rapport n°190236)
- Caractéristiques mécaniques :
 - o Classe de charge : 1
 - o Classe de flèche : A

Dall'R38B 675

- Dimensions : 67,5 cm x 67,5 cm, épaisseur 38 mm.
- Composition : Ame en panneau de particules haute densité, faces latérales et sous-face revêtues d'une tôle d'acier traité pliée 5/10ème, ou chants PVC et sous-face tôle. Brute, sans revêtement.
- Réaction au feu : Euroclasse BflS1 (LNE rapport n°190236)
- Caractéristiques mécaniques :
 - o Classe de charge : 2
 - o Classe de flèche : A

Analyse visuelle

Une analyse visuelle des éléments constitutifs du faux plancher est en général suffisante pour s'assurer de la réemployabilité du matériel. Une première analyse peut être effectuée avant le démontage sur quelques dalles pour définir le type de produit auquel on est confronté et obtenir une première idée de l'état du matériel. Lors du démontage chaque dalle doit être inspectée pour s'assurer de son aptitude au réemploi. Les vérins et rails de supports ne sont en général pas récupérables (déformations, présence de colle en surabondance, voire de polluants, etc.). Si l'inspection visuelle ne peut être totalement menée à bien directement au démontage elle le sera avant la mise en stock intermédiaire, mais cela requiert des manipulations supplémentaires.

Les tests d'aptitude sont décrits ci-après :

- Vérifier l'état d'usure du revêtement de surface (moquette, PVC, etc.) et évaluer l'opportunité de le conserver.
- Vérifier l'état des chants. En cas de chants en PVC, celui-ci peut se détacher or le chant doit rester couvert : pas de réemploi possible. Pas de problèmes si les chants sont métalliques.
- Vérifier les déformations et la planéité des dalles. Ces déformations sont généralement liées à l'humidité. La tolérance cible est de +/- 1mm :

- Essayer de faire tourner la dalle sur une surface plane (elle n'est pas censée tourner). Rattrapable lors du conditionnement.
- Mesurer la différence d'épaisseur entre le chant et le centre de la dalle. Non rattrapable lors du reconditionnement.
- Vérifier les tolérances dimensionnelles : 0,5 mm sur une règle de 2 m, vérifier l'affleurement entre 2 dalles.
- Repérer les éventuelles traces de corrosions des éléments métalliques.
 - S'il s'agit d'une dalle à noyau en bois, elle risque d'être irrécupérable.
 - S'il s'agit d'une dalle à noyau minéral, une corrosion de surface n'est pas problématique.
- Mesurer la flèche résiduelle et fluage :
 - Flèche la plus défavorable de 2,5 mm
 - Flèche résiduelle après 30' de chargement ne doit pas excéder 0,5 mm
- Toxicité : avant les années 1990, risque élevé (formaldéhyde, PCP). Matériel inapte au réemploi (coût du traitement des polluants trop onéreux)
- Réaction au feu : Dalles minérales : incombustibles, réemploi sans contrainte. Dalles en bois aggloméré : faiblement combustibles, réemploi selon contraintes propres au projet cible.
- Performances acoustiques : Tests onéreux et chronophage. Éventuellement effectués avant la remise en oeuvre, uniquement à la demande de l'acousticien du chantier cible.

Déconstruction

Le démontage soigné des faux planchers techniques implique peu voire aucune opération supplémentaire par rapport à une démolition classique. Temps de travail estimé : 200m²/personne/jour (selon les bâtiments).

Caractéristiques des dalles standard :

- Dimensions 600 x 600mm (500 x 500 mm dans certains cas)
- Épaisseur entre 16 et 44 mm
- Environ 10 à 15 kg/dalle, 20 kg/dalle pour une dalle minérale
- Pertes lors du curage : env. 20%

Avant toute intervention veiller à la mise hors tension des réseaux électriques.

Dépose soignée :

- Démontage/décollage des revêtements de sol éventuellement posés à cheval sur plusieurs dalles (les revêtements collés individuellement sur les dalles peuvent être décollés en atelier si l'opération est trop contraignante sur le chantier. Implique des manutentions supplémentaires.
- Brossage/ponçage des dalles (face et chants) après décollage des revêtements pour retirer les résidus de colle. Si la déconstruction des plafonds et des cloisons se fait avant la dépose des planchers, la poussière se déposera sur les résidus de colles qui seront plus faciles à poncer.
- Dépose des dalles par ventouses. Pied de biche pour détacher la première dalle (perdue). La dépose peut s'effectuer après ou avant le décollage du revêtement et/ou le ponçage, selon les caractéristiques du revêtement et du chantier.
- Empilement des dalles sur palettes, en séparant les dalles (avec restes de moquette par exemple) pour éviter qu'elles ne se collent entre elles en raison des résidus de colle ayant échappé au ponçage.
- Attention aux contraintes des dalles et à la présence de réseaux : Charger les palettes en fonction de la charge utile des planchers existants et ne pas exercer des forces ponctuelles anormales sur le plancher.
- Évacuation des vérins et des traverses (en général irrécupérables) dans des big bag pour traitement en tant que déchets.



Fig. 3 : Dépose met conditionnement de FP sur palette aggloméré ©Mobius

Logistique

- Stockage horizontal (empilement simple), sur Euro-palettes (80 x 120 cm), permettant de recevoir 2 piles de 40 dalles. Éviter 4 piles car le débordement de 20 cm de chaque côté risque d'endommagements ou à minima de déformations les dalles durant le transport ou le sanglage. Attention au sens de cerclage côté pour lequel la dalle arrive à ras bord.
- Séparer les dalles sur les palettes avec des intercalaires (utiliser des chutes de moquettes, mais sans exagérer pour limiter les déchets lors de la remise en œuvre sur le chantier cible).
- Documenter le contenu de chaque palette.
- Manutention au transpalette. Le chargement en une semi-remorque (30 à 33 palettes d'environ 800 kg/palettes) est conseillé pour optimiser les coûts et l'empreinte carbone liée au transport.

Stockage

- Condition de stockage à couvert en maintenant une température ambiante de 15-25°C
 - A l'abri de la poussière (hors d'air)
 - A l'abri de l'humidité (hors d'eau) avec 45-65% d'humidité relative (éviter de stocker dans un parking)

Ne pas emballer les palettes avec du film de protection car il crée des risques de condensation favorisant la corrosion et génère des déchets de plastique (éventuellement utiliser du papier).



Fig. 1 : Lieu de stockage de Mobius et chaîne de production © Mobius

Reconditionnement

Le reconditionnement peut être exécuté sur le chantier source ce qui permet de réduire les manutentions. Cependant, en général les travaux de reconditionnement ne sont pas inclus dans les prestations des entreprises de dépose et les délais, espaces disponibles et conditions du chantier peuvent rendre quasiment impossible la tenue de ces opérations sur un chantier. Le reconditionnement se fera donc en principe sur le lieu de stockage intermédiaire, consistant en :

- Brossage/ponçage des dalles pour retirer les résidus de colle (utilisation d'une ponceuse à bande/calibreuse),
- Enlèvement des agrafes des flancs abimés ou décollés
- Ré agrafage des chants
- Ponçage de finition
- Tests/contrôles techniques

Les opérations peuvent être effectuées sur des tables à billes pour faciliter le travail et en réduire la pénibilité.



Fig. 2 : Ponçage industriel © Mobius



Fig. 3 : Agrafage des champs © Mobius

L'expérience de Mobius démontre que l'on peut s'attendre à un taux de perte de 20% à 35% entre la phase d'analyse et la fin du reconditionnement.

Remise en œuvre

Les conditions de la remise en œuvre sont identiques au neuf, selon les règles de l'art. Le choix des matériaux se fera selon les usages, charges associées et performances souhaitées (isolation thermique et acoustique, résistance au feu, étanchéité à l'air, protection des chocs électriques, tirants et renforts d'ancrages, traverses diagonales pour les zones sismiques, etc.).



Fig. 4 : Repose du produit après reconditionnement © Mobius

Garanties

Dans le marché actuel, en l'absence de filière organisée et de système standardisé et labellisé de réemploi aucune garantie sur la matière n'est en général accordée par le propriétaire, les mandataires ou l'entreprise de déconstruction du chantier source pour le matériel proposé à l'issue du chantier de déconstruction.

L'art. 371 CO spécifie cependant que tout matériel installé sur une construction est garanti par défaut pour une durée de 5 ans. L'entreprise qui remet en œuvre les composants de réemploi doit donc veiller à obtenir de son « fournisseur » une garantie équivalente.

Si cette dernière ne peut lui être fournie, la loi ne permettant pas d'exclure la garantie en totalité (même d'entente entre les parties), il est indispensable de spécifier très clairement les limitations de garanties sur la matière fournie dans le contrat d'entreprise signé entre le maître de l'ouvrage du chantier cible et l'entrepreneur. En l'absence d'une telle clause, la fourniture et la pose seront considérées comme garanties par l'entrepreneur pour une période de 5 ans.

L'expérience de Mobius sur le marché français démontre qu'il est possible à l'entreprise assurant le reconditionnement de fournir une garantie à l'issue de ce dernier. Le produit est très standardisé, n'est en principe pas soumis à de fortes agressions extérieures comme pourraient l'être des éléments d'enveloppe, se nettoie relativement facilement et les défauts sont en général apparents ou détectable moyennant un contrôle visuel attentif. Mobius a obtenu en France une attestation d'assurance de la SMABTP (assureur de référence dans la construction en France) pour l'ensemble de son processus de reconditionnement. La garantie produit couvre les dommages compromettant la solidité de l'ouvrage ou le rendant impropre à sa destination pendant une durée de dix ans après la réception des travaux.

La Suisse ne connaît pas le même système de garantie décennale que le marché français. On peut cependant estimer que si les étapes de vérification et de reconditionnement adoptées en France ont permis l'obtention de l'attestation précitée, la mise sur pied d'un processus de contrôle qualité basé sur le même modèle doit permettre à un intermédiaire suisse de garantir le produit pour son usage sur le marché local.

Rien ne s'oppose par ailleurs au réemploi en Suisse des produits reconditionnés en France (moyennant formalités douanières). Même si un circuit plus court serait préférable, malgré l'empreinte carbone du transport de la marchandise depuis la France, le bénéfice environnemental du réemploi par rapport au neuf reste très important.

Remerciements

M. Noé Basch, Mobius Réemploi, 75011 Paris

Recommandations au développement du réemploi de

PANNEAUX SOLAIRES THERMIQUES

Lot 5 Installations techniques

Institut : inPACT
Projet : MATLOOP
Date : Décembre 2025
Auteurs : Lionel RINQUET, professeur HES associé
Benôit SERAPHIN, collaborateur scientifique HES
Almir DELFIEU, assistant HES

Table des matières

Résumé	3
Summary	3
Lexique & acronymes	4
Enjeux	5
Filière	6
Analyse	8
Déconstruction	9
Logistique	9
Stockage	9
Reconditionnement	9
Remise en œuvre	10
Garanties	11

Résumé

Les panneaux (ou capteurs) solaires thermiques présente un double bénéfice environnemental. Ils produisent de la chaleur directement à partir de l'énergie solaire contribuant à diminuer l'impact environnemental du bâtiment en phase d'exploitation. Standardisés, produits industriellement, technologiquement assez simples, les capteurs solaires thermiques ne présentent pas de difficultés techniques particulières en vue du réemploi qui permet de réduire l'impact environnemental du chantier cible grâce au carbone embarqué non négligeable qu'ils contiennent.

Le démontage soigné implique peu voire aucune opération supplémentaire par rapport à une démolition classique. Le conditionnement peut se faire sur des palettes standard. La manutention et le transport n'impliquent pas de moyen de levage ou de type de camion particuliers. Le stockage doit être effectué à couvert. Le reconditionnement est une opération manuelle qui requiert un certain savoir-faire, sans nécessiter cependant d'installations complexes ou onéreuses. La remise en œuvre est identique au neuf. Le haut degré de standardisation du produit et l'identification relativement aisée des défauts peut permettre à l'intermédiaire de fournir une garantie sur le produit.

Une filière de récupération, de reconditionnement centralisé et de redistribution des capteurs solaires thermiques a été mise sur pied en Suisse romande par l'association Sebasol. Les présentes recommandations s'en inspirent très largement.

Summary

Solar thermal panels (or collectors) offer a dual environmental benefit. They produce heat directly from solar energy, helping to reduce the environmental impact of the building during its operational phase. Standardized, industrially produced, and technologically fairly simple, solar thermal collectors do not present any particular technical difficulties for reuse, which reduces the environmental impact of the target construction site thanks to the significant amount of embodied carbon they contain.

Careful dismantling involves little or no additional work compared to conventional demolition. Packaging can be done on standard pallets. Handling and transport do not require any special lifting equipment or trucks. Storage must be carried out under cover. Reconditioning is a manual operation that requires a certain amount of expertise, but does not require complex or expensive equipment. Reuse is identical to new. The high degree of product standardization and the relatively easy identification of defects allow the intermediary to provide a warranty on the product.

A system for the recovery, centralized reconditioning, and redistribution of solar thermal collectors has been set up in French-speaking Switzerland by the Sebasol association. These recommendations are largely based on that system.

Lexique & acronymes

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie française

CECB : Certificat Énergétique Cantonal des Bâtiments

Chantier cible : Chantier où sont remis en œuvre les matériaux de réemploi issus d'une déconstruction.

Chantier source : Chantier d'où proviennent les matériaux réemployés.

Downgrading : Anglicisme qui traduit une sous-utilisation, c'est-à-dire une perte de propriétés entre l'usage initial d'un matériau et son usage présent ou futur. Dans le cas du béton armé, dès que des armatures sont sciées, il y a une sous-utilisation des éléments découpés.

ECS : Eau Chaude Sanitaire

HPE : Haute Performance Énergétique (label genevois)

Recyclage : Valorisation de matériaux de construction issus de chantiers de déconstruction ou d'excavation avec transformation lourde de la matière, ramenée à l'état de matière première ou recomposée avec d'autres matières premières pour en faire un nouveau matériau.

Réemploi : Valorisation de matériaux de construction issus de chantiers de déconstruction ou d'excavation avec maintien de la fonction d'origine, sans ou avec peu de transformation.

Réemploi Déphasé : Réemploi avec stockage de la matière pour un certain temps

Réemploi Ex-situ : Réemploi d'éléments en provenance d'un chantier source autre que le chantier cible, avec transfert de la matière d'un site à un autre.

Réemploi Externe : Réemploi d'éléments avec transfert de propriété et de risque entre la source et la cible.

Réemploi Interne : Réemploi d'éléments sans transfert de propriété ni de risque.

Réemploi In-Situ : Réemploi d'éléments sur un chantier à la fois chantier source et chantier cible, sans transfert de la matière d'un site à un autre.

Réemploi simultané : Réemploi sans latence ni stockage intermédiaire entre les chantiers source et cible avec stockage intermédiaire en dehors du chantier

Réutilisation : Valorisation de matériaux de construction issus de chantiers de déconstruction ou d'excavation avec détournement de la fonction d'origine, sans transformation, ou avec un niveau de transformation faible à modéré.

SIA : Société des Ingénieurs et Architectes

SPF : Institut für Solar Technik de la haute école OST

Sourcing : Anglicisme qui désigne ici le travail d'inventaire, de traçabilité et de suivi de matériaux de réemploi en vue d'approvisionner un ou des chantiers cibles.

ST : Solaire Thermique

THPE : Très Haute Performance Énergétique (label genevois)

Enjeux

Les panneaux (ou capteurs) solaires thermiques permettent de produire ou de préchauffer de l'eau chaude sanitaire (ECS) grâce à la chaleur du soleil (fig.1). Ils peuvent aussi constituer un appoint pour le chauffage et sont utilisés depuis plusieurs décennies sur de nombreux bâtiments en Suisse. Produit relativement standardisé, facilement démontables, transportables, relativement simple à réparer, et composés de matériaux à forte empreinte carbone, les panneaux solaires thermiques sont régulièrement démontés sur des toitures qui doivent être rénovées ou en raison de dysfonctionnement du système, souvent liés à d'autres composants de l'installation, sans que la performance en des panneaux ne soit en cause, ces éléments n'étant que peu soumis à l'usure du temps.

Récupérer, le cas échéant reconditionner, et réemployer les panneaux solaires thermiques bien souvent encore aptes au service fait du sens du point de vue environnemental, à l'heure où la réduction de l'empreinte carbone des constructions doit être réduite et où la part de cette dernière attribuable aux installations techniques est loin d'être négligeable, dès lors qu'elle se monte à plus de 20% de l'empreinte carbone du cycle de vie complet d'une construction neuve¹.

Les présentes recommandations ont été rédigées avec le concours de l'association Sebasol, dont l'action et l'expertise sont reconnues par Swissolar et plusieurs services cantonaux de l'énergie, et qui travaille avec sous licence avec des entreprises et avec des particuliers pour la remise en fonction de panneaux issus de déconstruction.

Ces recommandations proposent des pistes pour orienter les acteurs de la construction (maîtres d'ouvrages, concepteurs, entreprises) pour la mise sur pied de filières de récupération, reconditionnement et redistribution de panneaux solaires thermiques et pour les différentes étapes de leur réemploi, en particulier au fil de la chaîne logistique.

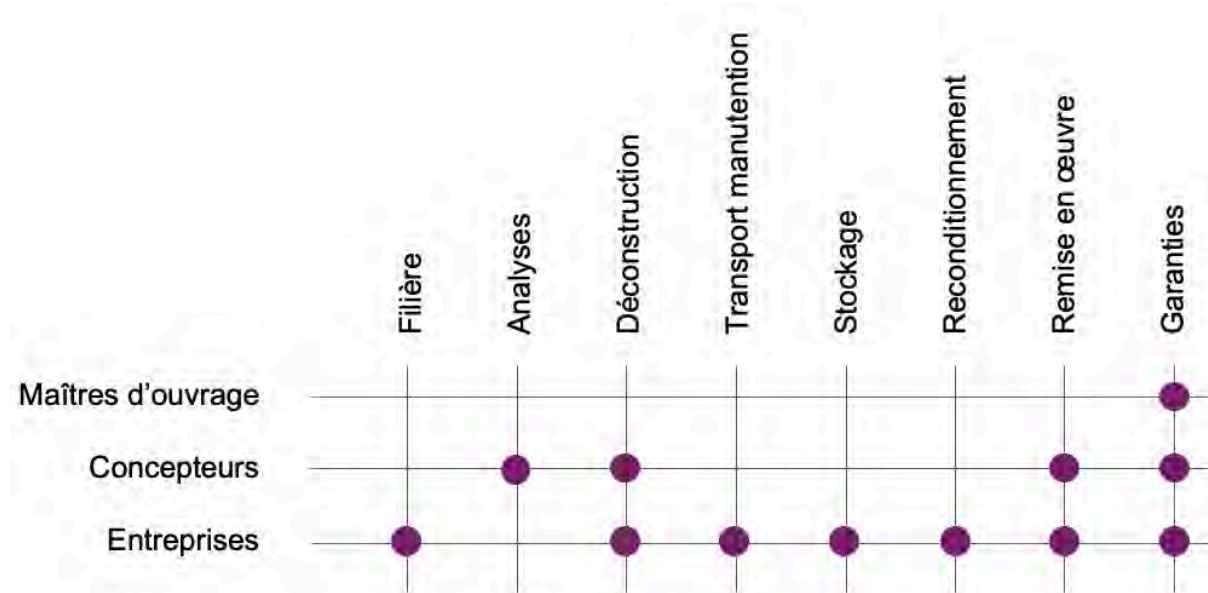


Fig.1 Chapitres traités par les recommandations et public ciblées

¹ Guide de mise en oeuvre du règlement d'application des articles 117 et 118 de la loi sur les constructions et les installations diverses (LCI), canton de Genève, juillet 2025.

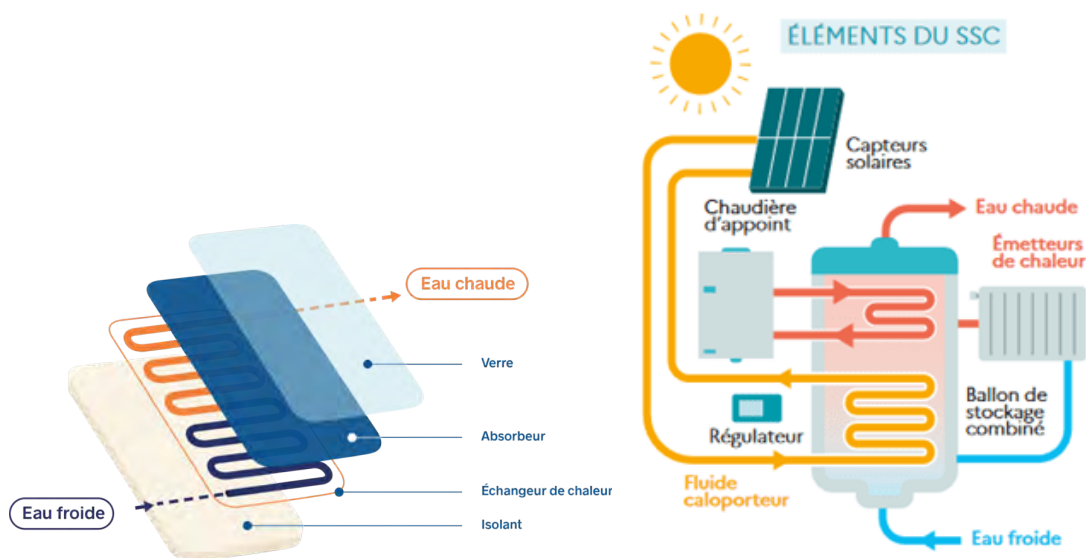


Fig.2 Schéma de fonctionnement d'une installation solaire thermique (capteur plan-viré) © ADEME



Fig.3 Image du prototype de présentation de Sebasol (image : Sebasol)

Filière

La combinaison des différents types de réemploi (*in situ* / interne / externe, *ex situ*, simultané / déphasé)² implique que six modèles sont envisageables, et que chacun présente des caractéristiques différentes.

² L. Riquet, S. Citherlet et al, REMCO, état des lieux sur le réemploi des matériaux de construction en Suisse romande, HES-SO, 2025

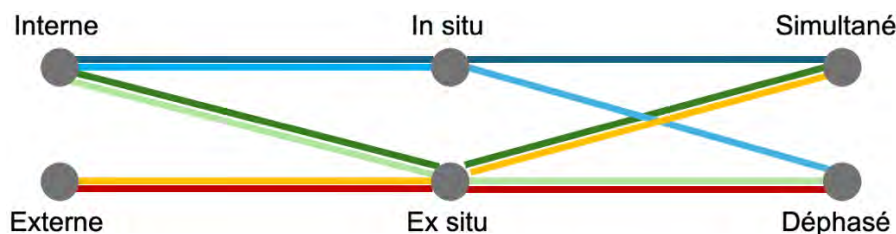


Fig.4 Types de réemploi envisageables

Le modèle d'affaire dont ces recommandations sont inspirées est de celui de Sebasol, association sans visées commerciales active en Suisse depuis 1998 dans la valorisation de l'énergie solaire thermique.

Les panneaux solaires thermiques se prêtent relativement aisément à la mise sur pied d'une filière de récupération et de distribution. Ils constituent un des composants principaux des systèmes permettant de produire de l'ECS à partir de l'énergie solaire, sont issus de filières de production industrielles (donc relativement standardisés au niveau de la technique et des dimensions), sont facilement démontables et transportables et contribuent à décarboner l'exploitation du bâtiment par substitution des énergies fossiles par des énergies renouvelables.

Actuellement négligés au profit des installations solaires photovoltaïque avec lesquelles elles peuvent pourtant être complémentaires pour une meilleure exploitation du potentiel solaire, les installations solaires thermiques existent sur de nombreux bâtiments et sont souvent sous-exploitées et vouées à être déconstruites lors de rénovation des toitures ou en raison d'un déficit d'entretien du système de production d'ECS, qui n'est pas forcément lié à un défaut des panneaux en soi. Les panneaux (en particulier les capteurs plans-vitrés) sont souvent encore aptes au service et peuvent dès lors être récupérés et, moyennant un contrôle technique et un éventuel reconditionnement, être réemployés sur de nouvelles constructions ou des projets de rénovation.

Il s'agit donc d'un produit qui se prête bien à tous les types de réemploi. La création d'une filière ayant pour objectif d'atteindre le seuil de rentabilité nécessite une bonne intégration dans le marché des entreprises mettant en œuvre des installations de panneaux solaires thermiques qui sont la plupart du temps les mêmes que celles qui les démantèlent dans le cadre de projets de rénovation ou de déconstruction.

Le modèle d'affaire peut donc prévoir de mettre sur pied une filière totalement intégrée à la branche des installateurs sanitaires (Fig. 3), ou, comme c'est le cas pour Sebasol, de créer une entité spécialisée qui centralise la récupération des panneaux à pied d'œuvre auprès des entreprises de démontage (souvent les mêmes qui assurent le montage), leur contrôle technique, leur remise en état, leur certification, le stockage et la livraison à des partenaires installateurs pour leur remise en service (Fig. 4). L'acceptabilité du réemploi ne pose en général pas de problème, le matériel de réemploi présentant la même apparence que le neuf.

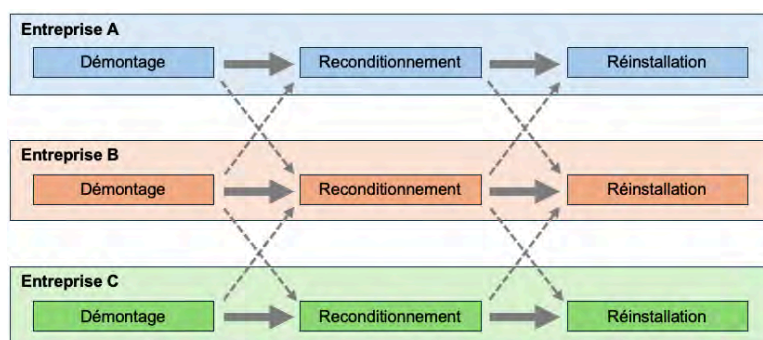


Fig.5 Modèle d'affaires intégré

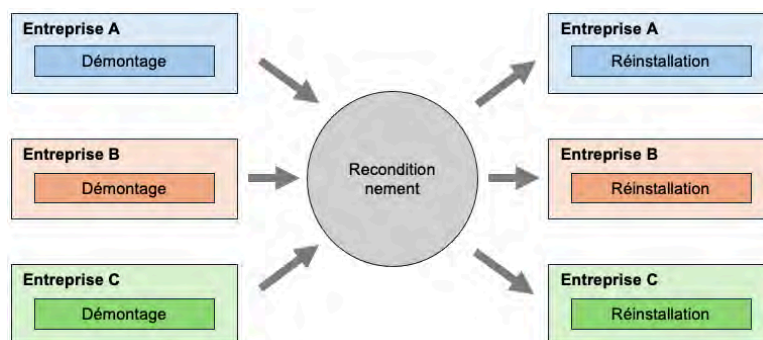


Fig.6 Modèle d'affaires centralisé

Ces types de modèles s'adaptent bien à plusieurs combinaisons de types de réemploi déphasé, interne ou externe, in situ ou ex-situ.

L'atteinte du seuil de rentabilité exige probablement un certain volume d'affaire. A l'échelle de la Suisse, le montage d'une filière spécifique ne pourra se justifier que considéré à l'échelon régional (romand ou suisse alémanique) voir national. Cette réalité permet d'imaginer l'implantation d'une telle structure dans une région où les surfaces nécessaires seraient disponibles à des tarifs abordables. Les impacts environnementaux de transport étant limités vu les faibles distances en Suisse et contrebalancés par le gain carbone important vis à vis du matériel neuf.

NB : Les capteurs à tubes sous vide sont rares, très complexes voire impossible à démonter et très difficile à intégrer avec d'autres systèmes. Il n'est donc pas recommandé de s'y intéresser dans le cadre de la mise sur pied d'une filière de réemploi.

Analyse

Lors du démontage d'une installation, l'intégralité d'un système de capteurs solaires thermique (capteurs, circuit, régulation, réservoir) est susceptible d'être récupéré, reconditionné et réemployé. Dans la pratique le réemploi se limite en général aux capteurs solaires, à l'exclusion des réservoirs, des circuits et des régulations, par manque de temps et en raison du coût plus élevé de récupération de ces éléments.

Les capteurs (panneaux) solaires thermiques standard, dits à plan vitré, sont facilement démontable, reconditionnable et récupérables dans une nouvelle installation. Ce sont donc les composants qui offrent la meilleure opportunité pour un réemploi.

Une fois prise la décision de démonter l'installation le temps manque en général pour réaliser in situ une enquête exhaustive pour analyser les composants et déterminer quels capteurs sont récupérables ou non. Les analyses sont en général menées après le démontage.

Diagnostic des capteurs :

- Déterminer le type de capteur et d'absorbeur (plan-vitré, sous vide, échangeur en inox ou en cuivre, etc.). L'étiquette Solar Keymark (ou autre) apposée sur le panneau permet de connaître le fournisseur et de réaliser une enquête auprès de lui - s'il existe encore - ou des instituts de test - si les archives sont encore consultables. Sinon le démontage permet d'obtenir les renseignements nécessaires.
- Analyse visuelle des capteurs pour repérer d'éventuelles traces de fuites.

- Analyse visuelle de l'état des verres
- Analyse visuelle de l'état des connecteurs (pièces galvanisées en particulier)
- Tester la circulation dans le capteur pour repérer les éventuelles fuites non visibles en première analyse et les possibles obturations liées au glycol cuit.
- Évaluer l'opportunité de conserver les supports en vue d'une future remise en œuvre.

Déconstruction

La dépose soignée ne se distingue pas particulièrement d'une dépose « standard ». Le système est purgé et les capteurs solaires sont déposés et évacués à pied d'œuvre à la main vers le lieu où les analyses et le reconditionnement seront exécutés.

NB : les tubes du circuit en métal reliant les capteurs aux réservoirs ont une valeur économique élevée au travers de la filière recyclage. Les supports sont faciles à stocker et en général réemployables après un simple nettoyage.

Logistique

- Conditionnement : pose horizontale sur palettes avec intercalaires en carton. Prendre garde à ne pas endommager le matériel lors du cerclage.
- Transport : par camionnette ou camion (selon la surface de capteurs démontés), sous bâche.

Stockage

- Stockage intérieur en atmosphère sèche des capteurs. Dans ces conditions, la durée de stockage est illimitée.
- Stockage extérieur sous bâche des supports, à condition que ce soient des galvanisés ou inox. Dans ces conditions, la durée de stockage est illimitée.

Reconditionnement

N'importe quel capteur solaire thermique plan-vitré est susceptible d'être reconditionné et réemployé. Les étapes de reconditionnement consistent à démonter les verres des panneaux pour accéder au cœur des éléments puis à nettoyer voire réparer les composants du capteur.

Verre :

Les panneaux plans-vitrés exposés à la pollution atmosphérique et souvent peu voire pas entretenus au cours de la vie du bâtiment, les capteurs solaires sont sujets à l'encrassement. Un nettoyage est donc indispensable avant la remise en œuvre pour éliminer les salissures. Il convient d'appliquer les recommandations suivantes :

- Éliminer les saletés à l'aide de matériel non abrasif et d'eau tiède savonneuse ou additionnée de nettoyant universel (max 10%). Ne pas utiliser de produits acides ou alcalins). Enlever les résidus de matières grasses avec de la benzine
- Rincer abondamment à l'eau claire
- Laisser sécher les verres avant de les remettre en place

Attention : avant chaque nettoyage, procéder à un essai de nettoyage adapté sur une petite surface !

Les panneaux plans vitrés étant munis de verres trempés, ils ne présenteront pas de fissures mais peuvent comporter des impacts de grêle. Dans ce cas il est préférable de remplacer le verre

Circuits et absorbeurs :

- Pour les circulations en cuivre, si tuyau est percé, colmater la fuite (brasage tendre ou Castolin, raccords métalliques olive, pas de sertissage, pas de joints, pas d'organique (silicone) : que du métal).
- Pour les circulations en inox, si le tuyau est percé possibilité de réparation par soudure sous gaz inerte (onéreux). Attention : l'eau chlorée attaque l'inox à des températures supérieures à 95°C. Privilégier l'eau sans chlore dans les circuits.
- Si la circulation est bouchée en raison de la présence de glycol cuit, un débouchage des tubes (chimique et/ou sous pression) sera nécessaire.
- Le facteur de récolte (Thin factor) de l'absorbeur peut être amélioré (plus la feuille d'absorbeur est mince, plus les tubes sont distants de l'absorbeur et plus la conduction au liquide circulant diminue) en épaississant la feuille de l'absorbeur via divers moyens résistants à la chaleur. Les performances du capteur sont ainsi améliorées.
- Pour améliorer la performance des absorbeurs anciens non sélectifs (peinture noire), il est possible de fixer/coller une feuille sélective (issue de chutes d'absorbeurs défectueux, de production d'industrie etc.) via divers moyens résistants à la chaleur et en assurant le contact thermique. Les performances du capteur sont ainsi améliorées.

Lorsque le reconditionnement est exécuté avec soin les performances des capteurs usagés peuvent être considérées comme similaire au neuf.

NB : les fabricants font état de performances testées en Institut (p. ex. SPF de OST à Rapperswil) mais il faut préciser que la qualité du capteur n'est qu'un facteur, souvent non prioritaire, qui détermine la production de l'installation et/ou le taux de couverture des besoins d'un bâtiment. En effet, ce taux dépend des besoins eux-mêmes et de la conception/dimensionnement correcte de l'installation, aussi en chaufferie.

Dans le cas de récupération et de reconditionnement de grandes séries de capteurs il peut s'avérer intéressant de faire tester un échantillonnage auprès du SPF.

Remise en œuvre

La remise en œuvre des capteurs réemployés est très proche de celle du neuf, et à exécuter selon les règles de l'art. Le choix des panneaux et le dimensionnement de l'installation dépendra des exigences et attentes de chaque projet.

L'utilisation de panneaux de différentes dimensions. Si la quantité de capteurs réparés est insuffisante pour le projet cible, il est envisageable de compléter avec des capteurs neufs ou d'un autre type. Il s'agit alors de :

- Prévoir une régulation solaire capable d'opérer deux champs de capteurs (option standard dans les régulations solaires professionnelles sur le marché)
- Ajuster les débits de chaque famille de capteurs pour obtenir la même température de sortie (à l'aide de manchons de régulation de débit ou autre moyen).

Garanties

Dans le marché actuel, aucune garantie sur la matière n'est en général accordée par le propriétaire, les mandataires ou l'entreprise de déconstruction du chantier source pour le matériel proposé à l'issue du chantier de déconstruction.

L'art. 371 CO spécifie cependant que tout matériel installé sur une construction est garanti par défaut pour une durée de 5 ans. L'entreprise qui remet en œuvre les composants de réemploi doit donc veiller à obtenir de son « fournisseur » une garantie équivalente.

Si cette dernière ne peut lui être fournie, la loi ne permettant pas d'exclure la garantie en totalité (même d'entente entre les parties), il est indispensable de spécifier très clairement les limitations de garanties sur la matière fournie dans le contrat d'entreprise signé entre le maître de l'ouvrage du chantier cible et l'entrepreneur. En l'absence d'une telle clause, la fourniture et la pose seront considérées comme garanties par l'entrepreneur pour une période de 5 ans.

L'association Sebasol a cependant développé un modèle de garantie pour ses partenaires qui réemploient les capteurs qu'elle a reconditionnés. Cette garantie selon la norme SIA 118 concerne l'installation dans son ensemble, pas les seuls capteurs. L'association a reçu un Label Solar Keymark développé par l'entreprise Solar Heat Europe/ESTIF et le CEN (Comité Européen de Normalisation).

La garantie proposée par Sebasol est basée sur des procédures de réception certifiant l'installation et le procédé est homologué par le SPF. Le protocole de réception détaillé utilisé par Sebasol est disponible en annexe. Il inclut un passage gratuit sur place pour relever les productions et les caractéristiques de fonctionnement, dans les 5 ans qui suivent le PV de réception. Le maître de l'ouvrage peut prolonger la durée de pour 3 à 5 ans et ainsi de loin en loin. Cette procédure est idéale pour les particuliers. Pour les grandes installations sur les immeubles un contrat d'entretien annuel est préférable.

Remerciements

M. Pascal Cretton, Association Sebasol (<https://www.sebasol.ch/contacts/>)