

Dalles à voussoirs précontraints en pierre ou béton de réemploi

Itten+Brechbühl SA
Septembre 2025



Dalles à voussoirs pré-contraints en pierre et en béton de réemploi

Depuis janvier 2024, nous développons une méthode permettant de découper, réassembler et précontraindre des dalles de béton de réemploi et de pierre naturelle avec la société coopérative 2401, VSL Suisse et Marti Construction. Ce guide a pour objectif de partager le projet, le processus, les résultats et les perspectives !

INTRODUCTION

CONTEXTE ET ENJEUX

En Suisse, plus de 350 millions de mètres cubes de béton ont été coulés à ce jour – ce qui reviendrait à recouvrir l'ensemble du territoire d'une couche de 10 mm d'épaisseur. Chaque année, près de 40 millions de tonnes de béton sont utilisées dans le pays,¹ faisant de ce matériau un pilier de la construction. Avec environ 80 % des parts de marché dans le secteur,² il est omniprésent dans notre environnement bâti. Cette situation n'est pas propre à la Suisse : à l'échelle mondiale, la demande en béton ne cesse de croître. Depuis la révolution industrielle, on estime que plus de 900 milliards de tonnes de béton ont été ajoutées à la croûte terrestre.³ Le ciment, composant essentiel du béton, est produit à plus de 4 milliards de tonnes par an.⁴ Bien que le ciment ne représente qu'environ 12 % de la masse du béton, il est néanmoins responsable de 70 à 95 % de son impact carbone total. Donc dans un premier temps, si l'on veut réduire l'impact carbone du béton, il est impératif de réduire l'utilisation du ciment. Ces chiffres soulignent l'ampleur du défi : la décarbonation massive du béton n'est, à ce jour, pas encore réalisable à grande échelle. En vue de l'objectif des accords de Paris d'être neutre en carbone d'ici 2050, ce défi est primordial.

Au-delà du ciment, la production de béton repose sur l'extraction de ressources naturelles limitées, telles que le gravier et le sable. Or, ces ressources sont de plus en plus difficiles à exploiter en raison des réglementations environnementales, des conflits liés à l'usage des sols, et de l'épuisement progressif des gisements. Parallèlement, la Suisse est confrontée à un double enjeu : un parc immobilier vieillissant et des lois qui restreignent l'étalement urbain tout en favorisant la densification. Ces dynamiques génèrent une quantité croissante de déchets de béton, qu'il devient urgent de valoriser au lieu de continuer à extraire et produire du béton neuf.

Face à l'impératif de réduire la consommation de béton et donc de ciment, à l'épuisement des ressources et à l'augmentation des déchets de béton, la réutilisation des éléments existants s'impose comme une solution urgente et efficace pour réduire l'impact environnemental du bâti.

PARTS DU MARCHÉ DES MÉTÉRIAUX DE CONSTRUCTION EN SUISSE

D'après le rapport "Étude sur les matériaux de construction utilisés en Suisse." Société Suisse des Entrepreneurs SSE. (2021).

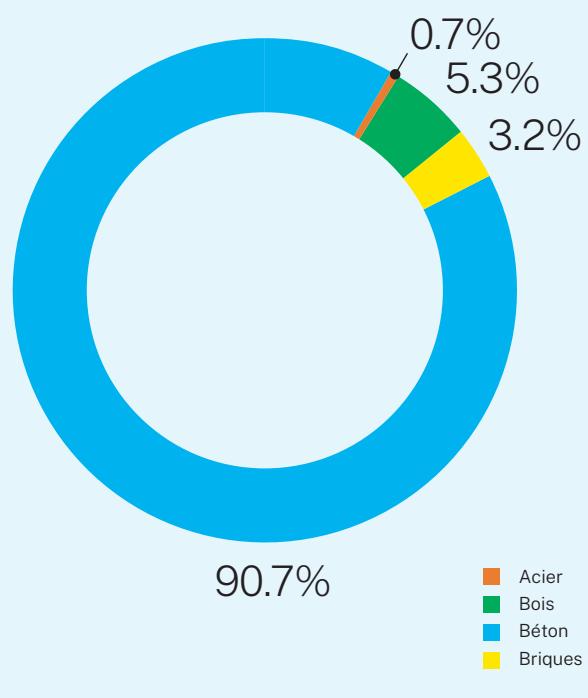


Fig. 1 Parts du marché des matériaux de construction en Suisse.

LA SOLUTION

En réponse à ces défis, un groupement suisse – réunissant Itten Brechbühl SA, Société Coopérative 2401, VSL Suisse SA et Marti Construction SA – a développé un système modulaire de dalles précontraintes en béton de réemploi ou en pierre naturelle.

Plutôt que de broyer le béton pour le recycler, y stocker du CO₂ ou chercher des alternatives au ciment, la solution propose de déconstruire et de réutiliser directement des éléments structurels en béton. Les éléments en béton sont découpés de bâtiments voués à la démolition, assemblés et précontraints pour former des composants structurels capables de supporter de fortes charges et de s'adapter à différents types de bâtiments.

En préservant l'intégrité des matériaux, cette approche permet ainsi de limiter les traitements, de réduire la consommation de ressources vierges et de diminuer significativement les émissions de CO₂.

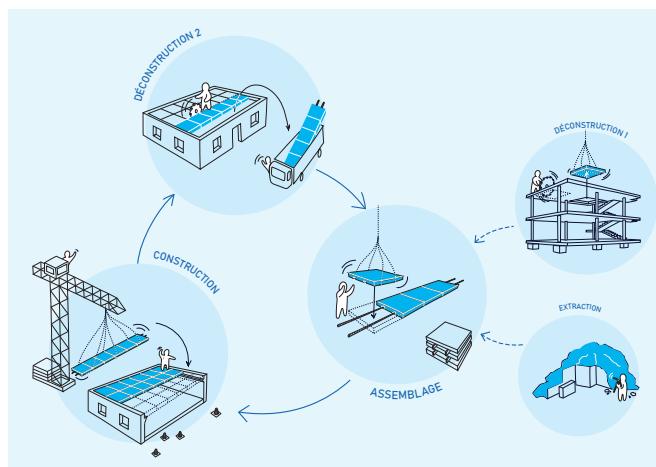


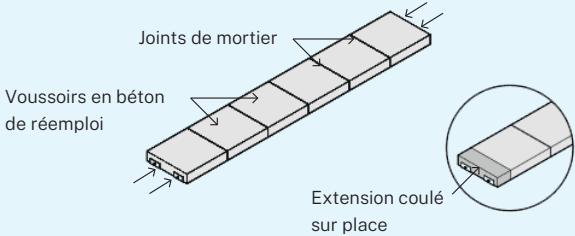
Fig. 2 Schéma du processus de déconstruction, extraction, assemblage, construction, et déconstruction.

LE PROJET

PRINCIPE ET RÉALISATION DES PROTOTYPES

Grace au soutien du projet Viva du Canton de Vaud à hauteur de 100'000 CHF par son fonds de soutien à l'économie circulaire, le groupement a développé et réalisé quatre prototypes : trois dalles précontraintes en béton de réemploi et une en pierre, toutes d'une épaisseur de 25 cm pour une portée de 6,5 mètres épaisseur de 25 cm pour une portée de 6,5 mètres.

SYSTÈME STRUCTUREL - VU DE DESSUS



SYSTÈME STRUCTUREL - VU DE DESSOUS

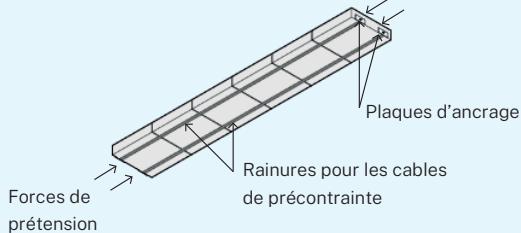


Fig. 3 Système structurel des dalles précontraintes

Le système de chaque dalle précontrainte comprend les éléments clés suivants :

- Vousoirs en béton armé récupéré ou en pierre, avec une résistance minimale à la compression de 20 MPa (résistance qui correspond à la majorité de bétons existants) ;
- Joints de mortier entre les vousoirs ;
- Deux encoches longitudinales pour accueillir les câbles de précontrainte ;
- Deux câbles de précontrainte, composés de 1 à 3 torons chacun, et deux plaques d'ancrage ;
- Un ajout en béton armé coulé en place (optionnel), permettant d'adapter la longueur si nécessaire.

Ci-dessous, les étapes clés de la construction des prototypes, avec les photos de chaque étape :

- **EXTRACTION** L'extraction des unités en pierre (granit, résistance à la compression de 188 MPa) de la carrière Sangiorio Elio à Lodrino, CH.

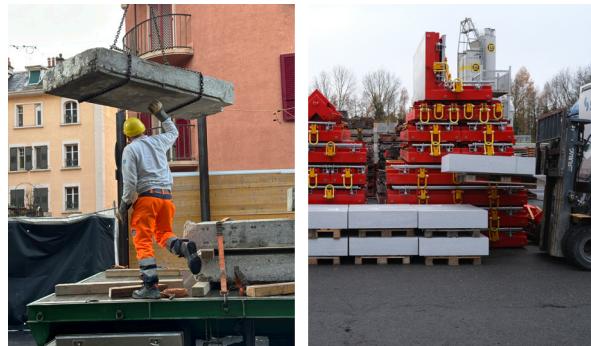


- **DÉCOUPE** La découpe des unités en béton de réemploi de la gare de Lausanne.



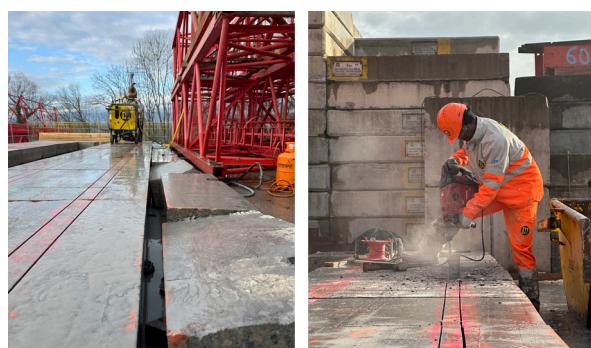
Pour les prototypes, les unités de pierre et de béton mesurent 1.25x1m afin de tester les comportements des joints entre les unités. Idéalement, les unités sont aussi grandes que possibles, soit 2.4x2.4m. Elles peuvent être redécoupées pour faire des éléments de 1.2x2.4m ou 1.2x1.2m selon les besoins.

- **TRANSPORT ET STOCKAGE** Les unités sont ensuite transportées par camion pour être stockées.



À la verticale, elles peuvent être utilisées comme mur.

- **PRÉPARATION** Les unités sont alignées, sciées, puis rainurées pour recevoir la précontrainte, en utilisant des outils et méthodes de construction standards tels qu'une scie de route ou un marteau piqueur.



- **ASSEMBLAGE ET PRÉCONTRAINTE** Une fois préparées, les unités sont assemblées et précontraintes. L'élément est ensuite retourné, puis gruté pour être transporté sur le chantier.



- **TESTS** Les prototypes ont été transportés à l'HEPIA (Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture) de Genève pour être testés.



Les tests ont confirmé que les dalles en béton de réemploi sont plus performantes (résistance à la déformation) que le béton armé, le béton précontraint, et le BFUP (béton fibré ultra-performant). Elles sont aussi plus performantes au niveau des émissions carbone ! Ces résultats sont élaborés dans la section « Résultats et perspectives » ci-dessous.

- **CYCLE CONTINUE** Enfin, le cycle continue avec la prochaine déconstruction des murs et des dalles, étendant le cycle de vie des unités de pierre ou de béton de réemploi.

UNE APPROCHE SYSTÉMIQUE ET REPRODUCTIBLE

Au-delà du développement et de la réalisation des prototypes, le projet porte sur la systématisation du processus du réemploi. Actuellement, les chantiers de démolition et de construction ne sont jamais synchronisés. Le processus de réutilisation fonctionne selon un modèle « juste à temps », et nécessite d'identifier un site de démolition, payer les frais et le temps de déconstruction, gérer le transport et le stockage, et espérer que les unités de réemploi soient prêtes à temps pour l'assemblage et l'installation sur le nouveau chantier. En l'absence de méthodes standardisées, l'accès aux dalles de réemploi reste limité.

Les filières de déconstruction et les chaînes d'approvisionnement étant encore peu structurées, la généralisation de cette pratique se heurte à de nombreux obstacles.

C'est pourquoi à la suite du développement et validation des prototypes, le groupement élabore des guides techniques, avec abaques de dimensionnement, pour permettre aux architectes, ingénieurs et constructeurs d'intégrer ce système dans leurs projets de manière concrète et reproductible. Ce guide permettrait de réorienter la démolition vers la déconstruction locale et faciliterait la création des sources d'approvisionnement locales en éléments de béton réutilisables.

Cette approche systémique à circuit court vise à rendre la réutilisation du béton structurel accessible, reproductible et compatible avec les contraintes logistiques, techniques et économiques du secteur.

- **DES COMPOSANTS STANDARDISÉS** Des éléments standards, carrés et faciles à extraire sur site (2.40×2.40 m), compatibles avec les gabarits de transport et les hauteurs d'étage minimums dans les bâtiments existants. Les modules sont pensés pour être faciles à découper, à stocker et à assembler.
- **UNE FAIBLE DÉPENDANCE À LA RÉSISTANCE DU BÉTON** Il n'est pas nécessaire de connaître avec précision la qualité du béton récupéré : le système est conçu pour fonctionner dès 20 MPa de résistance, ce qui couvre la majorité des bétons présents dans les bâtiments existants.
- **DES OUTILS DE CONCEPTION PRÉCOCE** Des outils de conception clairs, disponibles dès les premières phases du projet, notamment des abaques de dimensionnement permettant d'évaluer l'épaisseur du béton et l'effort de précontrainte nécessaire en fonction de la portée et des charges prévues.

Le projet vise à inscrire la réutilisation structurelle dans les pratiques et normes industrielles, tout en tenant compte des contraintes techniques, logistiques et économiques propres à ce domaine. En consolidant la filière béton, il contribue à la création de nouvelles activités locales liées à la déconstruction, à la logistique et au façonnage. Le développement de filières de réemploi à l'échelle locale – dans un rayon de 30 km autour des chantiers – permettra de mutualiser les infrastructures, de renforcer les savoir-faire régionaux et de favoriser un environnement bâti circulaire, résilient et à faible empreinte carbone.

RÉSULTATS ET PERSPECTIVES

Une fois le système élaboré et les prototypes construits, il ne restait plus qu'à vérifier le comportement de ces dalles avec des tests en laboratoire et de calculer leurs impacte carbone.

DES PERFORMANCES STRUCTURELLES AU-DELÀ DES ATTENTES

Les essais de flexion grandeur nature ont été confiés au Laboratoire d'essais des matériaux et structures (LEMS) de la Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève (HEPIA).

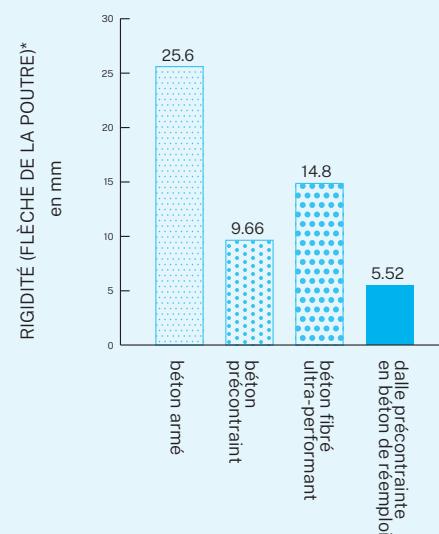
Le béton de réemploi présente les avantages majeurs suivant lors de sa mise en œuvre :

- La déformation de la dalle est réduite par rapport à une dalle coulée sur place lié à un fluage plus faible, car plus le béton vieillit plus il est résistant à la compression.
- Pas de fissuration sur un élément précontraint
- Pas de retrait sur un élément de réemploi

Ces tests ont confirmé la robustesse du système : aucune fissure n'est apparue dans les voussoirs sous charge d'exploitation, et les poutres ont montré un comportement élastique non linéaire maîtrisé.

La rigidité à long terme est assurée par la précontrainte et le faible fluage du béton réutilisé.

RIGIDITÉ



* Comparaison calculée pour des poutres de 6,60 m de longueur, sous leur propre poids et une charge de 700 kg/m².

Fig. 4 Comparaison de la rigidité des dalles.

Les essais ont permis de vérifier la sécurité structurelle pour des niveaux de charges élevés. En effet, les ruptures se sont produites pour des charges équivalentes à environ 1500 kg à 2000 kg/m². Il serait donc possible de réaliser des portées plus importantes que celles des essais en réduisant les charges admissibles.

DALLES PRÉCONTRAINTE

Lors des essais, les déformations instantanées mesurées se sont avérées relativement faible grâce à l'utilisation de la précontrainte et à la rigidité du béton de réemploi.

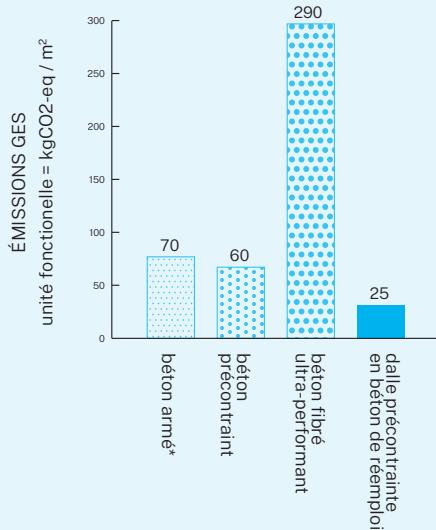
De plus, la limitation du fluege dans les bétons de réemploi, permet d'estimer que les déformations à long terme seront particulièrement faibles. Par conséquence, le système structurel proposé présente ainsi une rigidité à long terme nettement plus grande que les systèmes existants en béton, c'est-à-dire le béton armé, précontraint et le béton fibré ultraperformant. Grâce à la rigidité importante de ce plancher, à court et long terme, il sera possible de réaliser des dalles de grande portée plus fine que les autres systèmes concurrents actuels (béton armé, béton précontraint)

Par le recours à la précontrainte, ce système pourrait proposer des portées plus longues. Ceci permettrait également de réaliser des travées plus importantes permettant une modularité accrue et de modifier les affectations de bâtiments au cours de leurs vies.

UN POTENTIEL ENVIRONNEMENTAL REMARQUABLE

Une analyse du cycle de vie révèle une réduction des émissions de gaz à effet de serre pouvant atteindre les deux tiers par rapport à une dalle en béton armé conventionnelle, car on ne détruit pas le béton et on n'ajoute que très peu de ciment (joints entre les voussoirs).

ÉMISSIONS GES



* Émissions GES pour la conception (avant-projet) de dalles calculés à partir des données KBOB

Fig. 5 Comparaison des émissions des gaz à effet de serre des dalles. Comparaison calculée pour des poutres de 6,60 m de longueur pouvant résister à leur propre poids et une charge de 700 kg/m²

Le système se montre également bien plus performant que les solutions bois-béton en matière d'émissions globales.

Elle permet aussi la réduction en demande de granulat naturel et de la réduction immédiate de l'empreinte hydrologique.

DES PERSPECTIVES TECHNIQUES, ÉCONOMIQUES ET SOCIALES PROMETTEUSES

- Ce projet ouvre la voie à une réutilisation structurelle du béton à grande échelle. Des recherches sont en cours pour modéliser précisément le comportement en phase fissurée, affiner les hypothèses de fluege à long terme et développer des outils de conception simplifiés à destination des ingénieurs et architectes.
- En réponse à la raréfaction du béton, cette approche innovante propose une alternative durable qui sécurise les

emplois locaux et en crée de nouveaux, notamment dans la déconstruction.

- Le projet mène à créer des filiales locales au sein de villes.
- Elle encourage la formation aux techniques de production de dalles en pierre et béton de réemploi, tout en stimulant des synergies locales entre acteurs de la construction.
- L'utilisation de matériaux inertes, sans produits chimiques ni additifs, améliore également les conditions de travail et la sécurité des ouvriers.

ET APRÈS ?

Les partenaires du projet entament une nouvelle phase cruciale. Après des résultats techniques concluants, ils visent désormais à :

- Finaliser les tests complémentaires en laboratoire,
- Publier les résultats dans des revues scientifiques spécialisées,
- Rédiger un manuel de conception et de dimensionnement pour préparer l'industrialisation du système de dalle,
- Identifier un maître d'ouvrage prêt à expérimenter ce procédé à l'échelle réelle
- Et s'adjointre l'aide de partenaire clef, afin de boucler le cercle de compétence requise pour être en mesure d'assurer toutes les étapes de la chaîne de valeur.

LES PARTENAIRES

Le développement, la réalisation, et la continuation de ce projet reposent sur les compétences et le financement des 4 partenaires principaux (présentés ci-dessous) ainsi que par le financement du fonds de soutien à l'économie circulaire du Canton de Vaud, et le CBI Booster de l'ETH Zurich et Innosuisse (présentés dans la section intitulée « Les coûts »).

ITTEN+BRECHBÜHL SA IB est l'un des plus grands bureaux d'architecture en Suisse, reconnu pour son expertise dans la conception et la réalisation de projets complexes et de grande envergure. Ses compétences couvrent l'ensemble du processus, de la phase de conception à l'exécution. En tant qu'architectes du projet de dalles précontraintes réemploi, IB poursuivra le développement de cette approche innovante et l'intégrera dans ses futures propositions, qu'il s'agisse de concours, de mandats directs ou d'appels d'offres.

LA SOCIÉTÉ COOPÉRATIVE 2401 Cette coopérative d'architectes et d'ingénieurs spécialisés dans la construction à faible impact environnemental a développé une expertise particulière dans la mise en œuvre du béton de réemploi. En collaboration avec VSL et Marti Construction, elle prend en charge tous les aspects liés aux calculs et à la statique nécessaires au projet, tout en contribuant au développement des aspects constructifs.

VSL SUISSE SA Experts le domaine de la précontrainte au niveau mondial, VSL conçoit le système de précontrainte pour l'assemblage des dalles. A la suite, VSL continuera le développement, la fabrication, l'installation et l'opération des éléments nécessaires pour l'assemblage des dalles.

MARTI CONSTRUCTION SA Acteur majeur de la construction dans le canton de Vaud, Marti Construction SA contribua au développement du processus et à la réalisation des dalles en béton de réemploi et en pierre, prenant en charge l'assemblage des prototypes. Forte de sa connaissance approfondie du marché local, Marti Construction SA intégrera cette innovation dans ses appels d'offres, élargissant ainsi son potentiel de clients.

LES COÛTS

Le coût du projet a été financé par les 4 partenaires, ainsi que par les fonds de soutien à l'économie circulaire du Canton de Vaud dans le cadre du concours Viva de projets collaboratifs, et le CBI Booster de l'ETH Zurich et Innosuisse (présentés ci-dessous).

LES SOUTIENS FINANCIERS

- **VIVA VAUD** Porté par le Service de la promotion de l'économie et de l'innovation (SPEI), en collaboration avec le Bureau de la durabilité, le fonds de soutien à l'économie circulaire du Canton de Vaud dans le cadre du concours Viva de projets collaboratifs soutient depuis juin 2023 des projets innovants en faveur d'une économie durable, circulaire et locale. Il encourage des approches novatrices en matière de ressources, d'énergie et de modèles économiques. Le projet de dalles en béton de réemploi ou en pierre s'inscrit pleinement dans cette vision, avec lequel le groupement a pu développer le projet et réaliser les tests techniques.
- **CBI INNOVATION BOOSTER** Le CBI Innovation Booster est un programme de l'ETH Zurich, soutenu par Innosuisse, dédié à l'innovation circulaire dans la construction. Il réunit chercheurs, entreprises et institutions autour de projets concrets. L'objectif : faire émerger des solutions durables et reproductibles pour le bâtiment. Le projet de dalles à voussoirs précontraints en béton de réemploi est l'une des initiatives soutenues par le CBI Booster. Ce prix permettra à l'équipe de développer et publier un guide de conception afin d'aider les constructeurs, les ingénieurs et les architectes à intégrer cette solution dans leur pratique quotidienne.

BIBLIOGRAPHY

Habert, G., Miller, S. A., John, V. M., Provis, J. L., Favier, A., Horvath, A., et Scrivener, K. L. (2020). Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature Reviews: Earth & Environment*, 1, 559-565. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>

Matasci, C., Gauch, M., Böni, H., Wäger, P. (2021). The Influence of Consumer Behavior on Climate Change: The Case of Switzerland. *Sustainability* 2021, 13 (2966). <https://doi.org/10.3390/su13052966>

Société Suisse des Entrepreneurs SSE. (2021). Étude sur les matériaux de construction utilisés en Suisse. Société Suisse des Entrepreneurs SSE Politique et Communication. https://shop.baumeister.ch/shop/document_download.php?document=%C3%89tude_mat%C3%A9riaux-de-construction_web_FR.pdf

- 1 Matasci et. al. (2021).
- 2 Société Suisse des Entrepreneurs SSE (2021).
- 3 Habert et. al. (2020).
- 4 Ibid.