

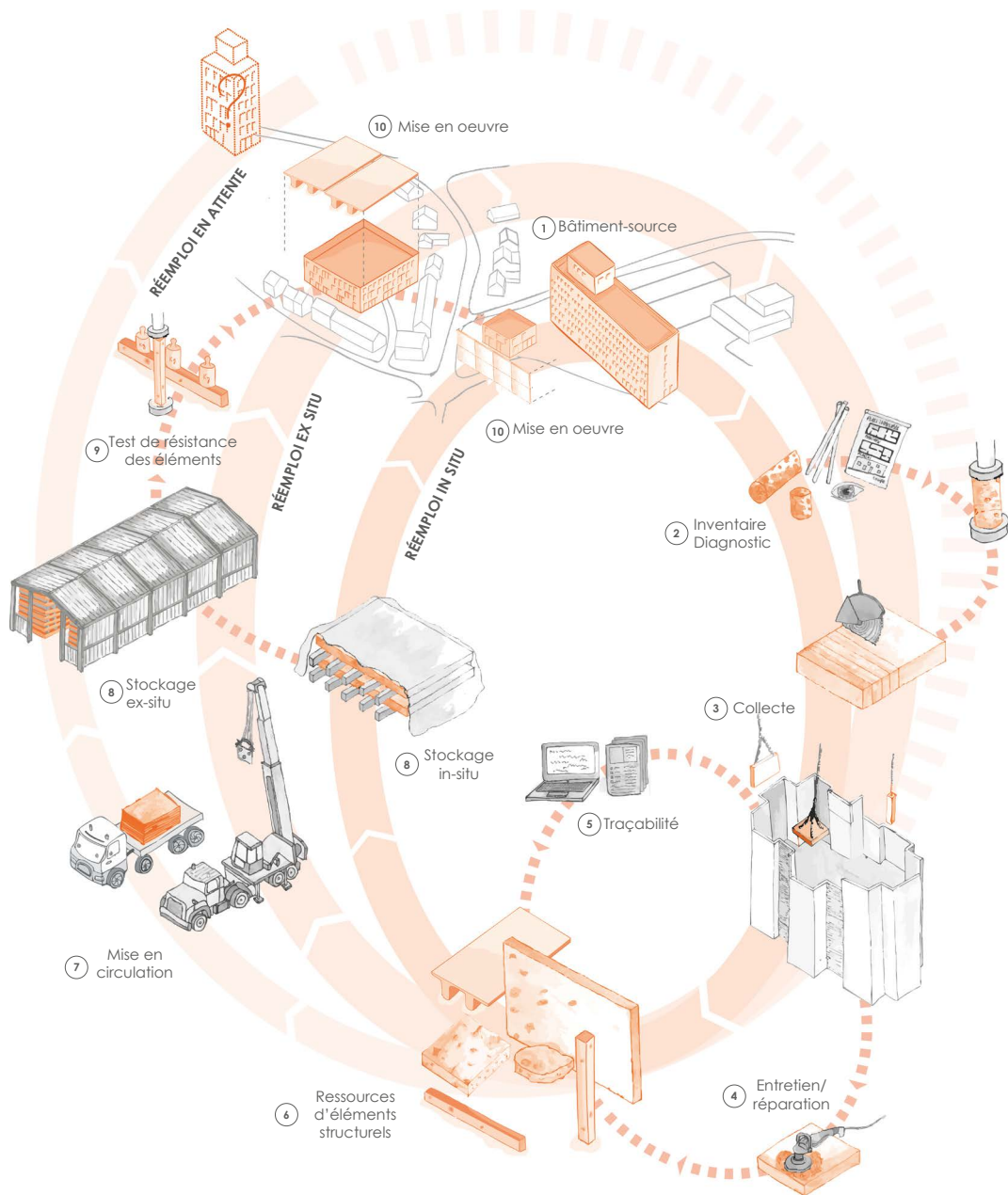
Réemploi d'éléments structurels en béton: vers une pratique architecturale accessible et répandue en Belgique

DU MORTIER Emilie

Copromoteur- expert:	VAUTRIN Elodie
Copromoteur 2:	VAN MOESEKE Geoffrey
Copromoteur 3:	THIELEMANS Benoît
Copromoteur 4:	MEYER Sandrine

RÉSUMÉ: Le béton est le matériau de prédilection dans le milieu de la construction. Cependant, sa production génère un fort impact environnemental, notamment à cause de la fabrication du ciment, source majeure d'émissions de CO₂, et de l'utilisation massive de ressources limitées comme le sable. Face à ces enjeux, comment continuer à utiliser ce matériau ? Les bâtiments en béton existants peuvent être vus comme des gisements de matériaux réutilisables plutôt que comme des structures vouées à la démolition. Le réemploi d'éléments en béton, préservant l'intégrité des éléments, se développe progressivement. Il permet de conserver leurs qualités techniques et architecturales tout en réduisant les déchets, la consommation de matières premières et les émissions de CO₂. Cependant, cette technique n'a encore que très peu de visibilité en Belgique. Comment sensibiliser les architectes au potentiel du réemploi des éléments structurels en béton et leur proposer des outils méthodologiques concrets pour faciliter son adoption dans la construction ?

MOTS CLÉS: Assemblages, Béton, Cycle de vie, Déconstruction sélective , Démontage, Diagnostic ressources, Economie circulaire, Eléments en béton, Eléments structurels, Guide , Inventaire, Outils, Phasage chantier, Réduction des déchets, Réemploi, Réutilisation, Réversibilité, Valorisation des déchets



RÉEMPLOI D'ÉLÉMENTS STRUCTURELS EN BÉTON

Vers une pratique architecturale accessible et répandue en Belgique

Réemploi d'éléments structurels en béton: vers une pratique architecturale accessible et répandue en Belgique

DU MORTIER Emilie

LBARC2200- Travail de fin d'études *en et sur* l'architecture en vue de l'obtention du Diplôme de Master en Architecture

Copromoteur- expert:	VAUTRIN Elodie
Copromoteur 2:	VAN MOESEKE Geoffrey
Copromoteur 3:	THIELEMANS Benoît
Copromoteur 4:	MEYER Sandrine

Année académique 2024- 2025

Université catholique de Louvain

Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme, LOCI Bruxelles

RÉSUMÉ

Le béton est le matériau de prédilection dans le milieu de la construction. Cependant, sa production génère un fort impact environnemental, notamment à cause de la fabrication du ciment, source majeure d'émissions de CO₂, et de l'utilisation massive de ressources limitées comme le sable. Face à ces enjeux, comment continuer à utiliser ce matériau ? Les bâtiments en béton existants peuvent être vus comme des gisements de matériaux réutilisables plutôt que comme des structures vouées à la démolition. Le réemploi d'éléments en béton, préservant l'intégrité des éléments, se développe progressivement. Il permet de conserver leurs qualités techniques et architecturales tout en réduisant les déchets, la consommation de matières premières et les émissions de CO₂. Cependant, cette technique n'a encore que très peu de visibilité en Belgique. Comment sensibiliser les architectes au potentiel du réemploi des éléments structurels en béton et leur proposer des outils méthodologiques concrets pour faciliter son adoption dans la construction ?

MOTS CLÉS

Assemblages, Béton, Cycle de vie, Déconstruction sélective, Démontage, Diagnostic ressources, Economie circulaire, Eléments en béton, Eléments structurels, Guide, Inventaire, Outils, Phasage chantier, Réduction des déchets, Réemploi, Réutilisation, Réversibilité, Valorisation des déchets

REMERCIEMENT

Je tiens à remercier,

Geoffrey Van Moeseke de m'avoir guidé vers des solutions justes et cohérentes et de m'avoir encouragé à atteindre les objectifs de mon mémoire. Benoît Thielemans pour son temps passé à lire précieusement nos écrits et nous apporter une vision parfois plus tranchée dans la manière de poser les enjeux d'un sujet de mémoire. Sandrine Meyer pour son apport enrichissant dans nos réflexions et nos idées.

Elodie Vautrin, pour sa disponibilité tout au long de l'année, pour l'apprentissage qu'elle a su me transmettre au mieux, pour son expérience, pour sa vision académique qui m'a été très utile pour mon écrit, pour toutes les riches références qu'elle m'a partagées.

Tous les professeurs qui m'ont soutenus et aidés pendant les périodes difficiles de mes études.

Mes amis et Amour, pour le soutien qu'on s'est apporté toute l'année, à ses échanges enrichissants, ses partages et les pauses de midi qui permettaient de souffler.

Ma famille, qui m'a soutenue et relevée dans les moments difficiles, qui ont partagé mon bonheur dans mes réussites, qui s'intéressent toujours à ce que je construis peu importe là où je vais et où j'irai.

Mais aussi, un merci plus personnel, à mon papa, qui a passé tant d'après-midi pour m'apprendre et m'enrichir de son expérience dans le domaine du béton.

TABLE DES MATIÈRES

I. L'INTÉGRATION DU BÉTON DANS UNE ÉCONOMIE CIRCULAIRE	14
1. Introduction	15
2. Contextualisation	16
2.1. Entre nécessité constructive et défi environnemental	16
2.2. La ville construite, comme ressource	17
2.3. Une alternative à la démolition totale	18
3. Défis et opportunités	23
3.1. Les forces limitantes	23
3.2. Les opportunités	26
3.3. Les avantages des propriétés mécaniques	27
4. Généralisation du réemploi d'éléments en béton	30
4.1. Objectif du travail	30
4.2. Méthodologie	31
 II. ÉTAT DE L'ART	 32
1. La documentation méthodologique et technique	33
1.1. Fiches techniques réemploi	33
1.2. Guide réemploi de béton en murs	36
1.3. Guide réemploi de béton en revêtement de sol	38
1.4. Les fiches réemploi FCRBE	40
1.5. Réemploi d'éléments structurels en béton	44
2. Retour critique des guides	46
2.1. Manque d'éléments en béton	46
2.2. Downcycling	46

2.3. Manque de documentation attractive	46
3. Les projets architecturaux	47

III. UN GUIDE MÉTHODOLOGIQUE À DESTINATION DES ARCHITECTES	54
---	-----------

1. Vers une pratique architecturale plus visible	55
2. Méthodologies: Création du guide	55
2.1. Le choix des éléments en béton	56
2.2. Les différentes étapes du réemploi	58
2.3. Le niveau de détail	58
2.4. Discussions approfondies avec des spécialistes	59
2.5. Attractivité du guide	59
2.6. Organisation et contenu du guide	60

IV. PROJET ARCHITECTURAL: L'HÔPITAL SAINT-PIERRE À OTTIGNIES	62
---	-----------

1. Contextualisation	63
1.1. Objectif du projet	63
1.2. Le site et le contexte	63
1.3. Le programme souhaité	64
2. Réhabilitation de l'hôpital	69
2.1. Stratégies de réhabilitation	69
2.2. Dédensification du site	69
2.3. Réaménagement du site	69
3. La logistique du chantier	71
3.1. L'inventaire des éléments en béton	71

3.2. Phasage des flux de matières	72
3.3. La collecte et la manutention	75
3.4. Le stockage	75
3.5. Le transport	76
4. Le bâtiment démonstratif	81
4.1. Organisation spatiale	81
4.2. La remise en oeuvre	83
4.3. Empreinte carbone	86
 V. CONCLUSION	 88
VI. RÉFÉRENCES	92
VII. ANNEXES	98
1. Définitions et terminologie	99
2. Fiche-d'identité projets architecturaux	101
3. MindMap des étapes du réemploi	118
4. Inventaire déconstruction et du bâtiment démonstratif	119

I. L'INTÉGRATION DU BÉTON DANS UNE ÉCONOMIE CIRCULAIRE

1. INTRODUCTION

«Depuis l'Antiquité, l'humain a cherché des moyens d'ériger des structures solides, durables, facile à mettre en œuvre et peu coûteuses. Le béton est devenu le matériau de prédilection pour réaliser cet exploit» (fehrgroup, 2023). Cependant, sa production génère un fort impact environnemental, notamment à cause de la fabrication du ciment, source majeure d'émissions de CO₂, et de l'utilisation massive de ressources limitées comme le sable. Dès lors, face à ces enjeux, comment continuer à utiliser ce matériau dans le domaine de la construction ?

Les bâtiments en béton existants peuvent être vus comme des gisements de matériaux réutilisables plutôt que comme des structures vouées à la démolition. Le réemploi d'éléments en béton, préservant l'intégrité des éléments, contrairement au béton d'agréats recyclés, se développe progressivement. Il permet de conserver leurs qualités techniques et architecturales tout en réduisant les déchets, la consommation de matières premières et les émissions de CO₂.

Cependant, cette technique n'a encore que très peu de visibilité en Belgique et se concentre uniquement sur certains éléments en béton. De plus, on constate que ces éléments structurels en béton sont souvent réutilisés à une moindre valeur que celle qu'ils ont initialement (downcyclé).

Comment sensibiliser les architectes au potentiel du réemploi des éléments structurels en béton et leur proposer des outils méthodologiques concrets pour faciliter son adoption dans la construction ?

2. CONTEXTUALISATION

2.1. Entre nécessité constructive et défi environnemental

Le béton a transformé notre paysage urbain et est devenu le pilier de la construction moderne (fehrgroup, 2023). Plus de 30 milliards de tonnes sont produits par an (Monteiro et al., 2017). En effet, il a de nombreux avantages architecturaux (guide du bâtiment durable, 2013):

- Quand il est coulé, il a une palette de formes et de dimensions très étendues.
- Il a une résistance à la compression élevée et lorsqu'il est couplé avec de l'acier, il est résistant en traction.
- Il peut devenir un élément préfabriqué qui est facile à mettre en œuvre, peu coûteux et très flexible au niveau dimensionnel
- Il est résistant au feu, a de très bonne performance acoustique et a une longue durée de vie

Cependant, la fabrication de ce matériau a un impact très néfaste sur notre environnement. Pour lier ensemble ses différents composants, l'eau et les granulats, il faut utiliser un liant, le ciment, qui représente, à lui seul, 10 % de la masse totale du béton et dont 4 giga tonnes sont produits par an (IEA, 2021). Celui-ci est responsable de 9% du CO₂ anthropique mondial et de 3% de la consommation d'énergie qu'il rejette lors de la calcination, une étape de son processus de fabrication (Monteiro et al., 2017).

De plus, les différentes matières premières qui le compose comme le sable, le gravier ou encore l'eau sont des ressources épuisables. Le sable est la 2ème ressource mondiale la plus exploitée par l'Homme après l'eau. On consomme 50 milliards de tonnes de sable par an et plus de 80% atterrissent dans les bétonnières. Le problème est qu'on en extrait plus rapidement qu'il ne se régénère, ce qui impacte énormément notre écosystème. La Belgique a évalué ses réserves de sable, elle pourrait encore tenir 80 ans

avant l'épuisement total (Arte, 2024).

Face à ces enjeux, comment continuer alors, à employer cette véritable prouesse architecturale dans le domaine de la construction?

2.2. La ville construite, comme ressource

Nos villes regorgent de constructions en béton dont les matériaux, bien que déjà mis en œuvre, possèdent encore d'excellentes propriétés intrinsèques (voir guide, Chapitre 2, inventaire & diagnostic). Si nous considérons ces bâtiments non plus comme des structures vouées à disparaître lorsqu'ils sont obsolètes, mais comme de véritables gisements de matériaux, il devient alors possible d'envisager des possibilités pour continuer à utiliser ce matériau, aux nombreux avantages.

Certaines stratégies ont déjà été mises en place pour arrêter de négliger le potentiel du béton déjà construit, et le considérer en tant que ressource précieuse et non plus comme déchet. La plus courante est le béton recyclé, formé à partir des agrégats obtenus par recyclage du béton démolé (Marinković et al., 2010). Cependant ces granulats doivent être de nouveau mélangés avec du ciment neuf. Cette technique permet donc de limiter la quantité de déchets de béton mise en décharge et limiter l'extraction de granulats, cependant elle ne réduit pas les émissions de CO₂ liée à la fabrication du ciment et la consommation de matières premières comme l'eau et le sable. Cette méthode n'est donc pas durable à long terme et de plus, restreint la réutilisation des bâtiments en béton à certains ouvrages¹.

La stratégie de réemploi d'éléments en béton issus de chantiers de déconstruction est en train de se développer et commence tout doucement à être mise en application. Contrairement au recyclage par concassage, le réemploi consiste à préserver l'intégrité des éléments en béton pour les utiliser tels quels dans de nouvelles constructions et prolonger ainsi leur durée de vie. Cette technique, quant à elle, permet de conserver la géométrie

(1) «Les granulats issus des chantiers de démolition sont essentiellement réutilisés en sous-couches et remblais de routes» (Bybeton, 2025)

et les capacités structurelles préexistantes des éléments réemployés, tout en réduisant l'utilisation de matières premières ainsi que la consommation de CO₂ ² et en diminuant les déchets de construction .

«Après avoir évalué la structure en béton armé existante pour déterminer la possibilité de réutilisation de ses éléments, des éléments relativement grands- parties de murs, dalles ou cadres complets- sont extraits par sciage et levage, transportés, stockés si nécessaire, et enfin ré-assemblés dans une nouvelle structure, en utilisant des techniques de connexion analogues à celles utilisées dans la préfabrication»(Fivet & al, 2024).

2.3. Une alternative à la démolition totale

Actuellement, la construction repose sur un modèle linéaire: extraire – construire – démolir – jeter, générant des millions de tonnes de déchets chaque année. Or, face aux enjeux climatiques actuelles, il est grand temps de repenser notre modèle de construction de manière circulaire: extraire- construire - Réhabiliter/réemployer - réintégrer. Pourquoi nos bâtiments sont-ils systématiquement démolis lorsqu'ils sont jugés obsolètes ? Et surtout, comment le réemploi pourrait-il offrir une alternative plus durable ?

Il est important de savoir que les stratégies prioritaires à adopter, seraient, tout d'abord, de réhabiliter nos bâtiments existants avant de les démolir. Cependant, de nombreuses raisons font que ceux-ci sont parfois impossible à réhabiliter et deviennent donc obsolètes, vouer à disparaître. C'est là que le réemploi des composants du bâtiment peut devenir intéressant en étant une solution plus viable et écologiquement pertinente en évitant de démolir complètement ces bâtiments. Si cette technique n'est toujours pas envisageable, alors on peut envisager le recyclage en dernier recours.

Nous allons, dans cette section, développer les principales raisons qui poussent à démolir les bâtiments jugés obsolètes et

(2) «Les recherches montrent qu'en réutilisant des composants concrets, l'empreinte carbone et la consommation d'énergie de la phase de produit peuvent être considérablement réduites jusqu'à 93-98 % par rapport à la production vierge ou au recyclage agrégé» (Recreate, 2021).

(3) Référence exacte: Belli-Riz, P., Benoit, J., Fabiani, S., Ghyoot, M., Guichard, C., Huygen, J.-M., de Guillebon, M., & Topalov, H. (2022). Réemploi, Architecture et construction: Méthodes, ressources, conception, mise en oeuvre (R. Berthaut, Ed. Le Moniteur ed.). de Gramont, C.

ensuite, explorer les alternatives possibles grâce au réemploi des éléments en béton. Ces raisons sont explicités dans le livre «Réemploi, Architecture et construction: Méthodes, ressources, conception, mise en œuvre» publié par le Moniteur ³.

2.3.1. Raisons techniques et économiques

- Constat

Certains bâtiments incluent des problèmes de solidité, de stabilité, de résistance, avec le risque qu'il puisse se dégrader et s'effondrer à plus au moins court terme. Certains bâtiments pourraient être entretenus régulièrement et durer indéfiniment comme le sont certains édifices avec une importance symbolique. Cependant, d'autres bâtiments ne répondent plus aux normes actuelles de construction (Résistance au feu, stabilité, etc) ou bien ils nécessitent une amélioration importante des performances en termes de confort (isolation thermique, étanchéité, etc).

- Alternative réemploi

Des travaux de renforcement, de maintenance et d'amélioration peuvent être effectués pour conserver certains bâtiments et limiter leur démolition totale. Cependant, si cette technique est bien trop coûteuse et donc très peu rentable, de nombreux éléments en béton encore en bon état pourraient être récupérés par déconstruction sélective.

2.3.2. Raisons financières

- Constat

La question de financement est cruciale, car certains bâtiments peuvent nécessiter des ressources financières importantes pour leur mise à jour. S'il n'est pas possible de trouver un financement adéquat pour leur rénovation, la démolition peut être envisagée.

- Alternative réemploi

Pourtant, réemployer des éléments en béton existants permettrait

de limiter certains coûts comme ceux associés à l'achat de matériau neuf et à la gestion des déchets. Si, le réemploi était une technique plus adoptée et répandue, elle pourrait devenir économiquement rentable, tout en réduisant la nécessité d'acheter des matériaux neufs.

2.3.3. Raisons fonctionnelles

- Constat

De nombreux bâtiments ont été construits avec une surdétermination des espaces par un programme particulier. Cependant, ne répondant plus aux besoins actuels, ils deviennent rapidement obsolètes. Si l'adaptation d'un édifice aux nouvelles exigences fonctionnelles est difficile voire impossible, alors on choisit de les démolir.

- Alternative réemploi

Parfois, certaines adaptations sont minimales pour recréer des espaces architecturaux qualitatifs et adaptés aux besoins. On peut donc facilement envisager de reconverter en récupérant des éléments en béton et en les réemployant pour recréer un projet. Par exemple, en récupérant des cloisons en béton, on peut facilement réadapter les espaces, en récupérant des dalles et des murs en béton, on peut facilement adapter les gabarits (hauteur, largeur, profondeur).

2.3.4. Raisons foncières

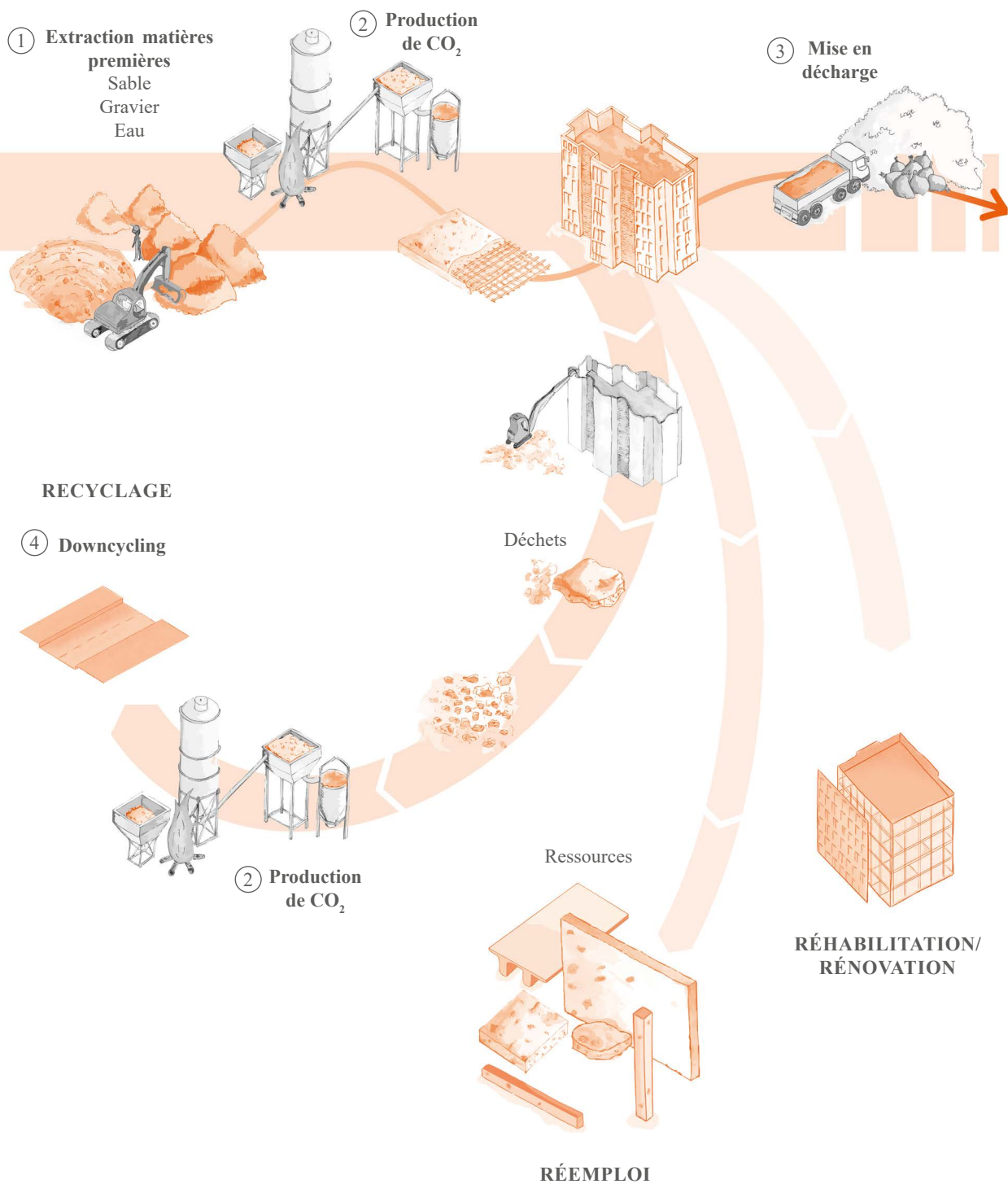
- Constat

Aujourd'hui, la recherche de nouveaux espaces devient cruciale, notamment dans les zones urbaines. La démolition permet de libérer du terrain pour des projets immobiliers adaptés aux besoins actuels. Certains bâtiments occupent des terrains aux potentiels de densification élevés, mais ne permettent pas une utilisation optimale de l'espace. Certains bâtiments ont uniquement leur enveloppe extérieure conservée, tandis que la structure intérieure est entièrement reconstruite.

- Alternative réemploi

Une intégration du réemploi dans la planification urbaine permettrait de repenser la densification sans systématiquement démolir totalement les bâtiments. Plutôt que de tout reconstruire à neuf, on pourrait réutiliser les éléments de l'ancienne structure pour créer un projet plus durable et plus responsable.

Figure 1: Schéma des
problématiques de la
fabrication du béton et des
solutions pour l'intégrer
dans une économie
circulaire →



3. DÉFIS ET OPPORTUNITÉS

Si le réemploi des matériaux en béton est une solution durable et prometteuse, elle reste cependant très peu généralisée et répandue dans la construction en Belgique. Malgré les nombreuses opportunités que le réemploi a à offrir, de nombreux freins limitent son utilisation.

Pourquoi cette solution est peu courante ? Quelles sont les forces limitant son utilisation ? Quelles sont les opportunités que le réemploi apporte à l'architecture et à la construction ?

3.1. Les forces limitantes

La majorité des freins sont issus d'une synthèse d'un retour d'expérience et d'analyse de 77 projets de réemploi d'éléments en béton rédigée par Célia Kupfer, Maléna Bastien-Masse et Corentin Fivet⁴.

(4) Célia Kupfer, postdoctorante au laboratoire d'exploration structurelle (SXL) de l'EPFL
Maléna Bastien-Masse, ingénieur civile et chercheuse au SXL
Corentin Fivet, professeur associé au SXL

3.1.1. Techniques

- 1) Certains éléments en béton récupérés sont trop endommagés ou dégradés pour être réemployé comme éléments structurels.
- 2) Les études préalables pour évaluer la qualité du béton et des armatures en acier n'ont pas un protocole standardisé, il n'existe pas de normes ou de cadre industriel.
- 3) De nombreuses contraintes durant la déconstruction et le stockage limitent les dimensions maximales des pièces de béton: la charge supportable des engins de levage, les dimensions des passages tout au long du transport, les dimensions maximales transportables et les charges maximales admissibles par les dalles du stockage (quand il est en intérieur).
- 4) Pour réemployer les éléments en béton, il faut concevoir et calculer des détails de connexion sur mesure: les assemblages sec comme les plaques d'acier ou les assemblages humides comme le béton et le mortier sont parfois combinés pour

assurer la bonne transmission des efforts. Cependant, il existe très peu de retour ou de documentation sur les détails de connexion.

3.1.2. Économiques

- 1) Bien que la réutilisation de matériaux permet de faire des économies sur la ressource, cette technique engendre des coûts supplémentaires liés à la main d'œuvre exigeante, aux opérations de déconstruction et de reconditionnement des éléments.
- 2) Le nombre de projet en réemploi d'éléments en béton étant très faible, c'est très compliqué d'avoir un comparatif et de valider les estimations des coûts par rapport à un projet standard.

3.1.3. Logistiques

- 1) La logistique est plus complexe que celle d'un projet conventionnel vu qu'elle nécessite des étapes de projet supplémentaires comme l'inventaire des éléments existants, les phasages de déconstruction. De plus, aucun réseau de revendeur existe dans la filière du béton, ce qui implique soit une synchronisation minutieuse entre le bâtiment donneur et récepteur ainsi qu'une bonne collaboration entre les acteurs impliqués, soit la gestion d'espaces de stockage temporaires sur le site du bâtiment donneur ou celui du récepteur.
- 2) Les pratiques de démolition l'emportent sur la déconstruction car celle-ci demande d'être plus minutieuse et prend donc beaucoup plus de temps.
- 3) La réutilisation du béton, comme tout élément structurel remet en question la responsabilité de chaque acteur de la construction: la qualité des matériaux et les tolérances géométriques dépendent de l'appréciation faite par les bureaux d'ingénieurs, de la qualité des travaux de l'entreprise de déconstruction et de celle de l'entreprise de construction.

3.1.4. Socioculturelles et de conception

- 1) Il y a plus de risques de tolérances élevées lors de la remise en œuvre dus aux opérations de déconstruction moins précises que la préfabrication des éléments en usine.
- 2) Les opérations sur les éléments en béton étant plus coûteuses, la liberté de conception des projets est souvent restreinte ou contrainte pour minimiser les coûts.
- 3) Les projets de conception en réemploi d'éléments en béton dépendent de la disponibilité du stock de ceux-ci. Si les éléments sont récupérés avant le début de la conception du projet alors il n'y aura aucune influence sur les opérations de déconstruction. Cependant, si le bâtiment donneur est identifié avant la conception du projet mais que les éléments ne sont pas encore récupérés, alors la conception influencera les opérations de déconstruction. Si la conception débute avant d'avoir trouvé le bâtiment donneur, alors c'est elle, qui devra s'adapter aux éléments récupérés par la suite (tolérance des assemblages, dimensions des éléments, etc).
- 4) La déconstruction des structures en béton coulé sur place est complexe à planifier en raison de leur nature monolithique, nécessitant une approche de déconstruction différente des éléments en préfabriqué. Il faut donc définir des lignes de découpe cohérentes et limiter le downcycling.
- 5) Les éléments récupérés ont parfois des défauts visuels liés à leur utilisation et à leur assemblage avec d'autres couches d'élément. Le concepteur doit alors intégrer une esthétique moins contrôlée dans son architecture.

3.1.5. Réglementaire

- 1) La principale problématique de la réglementation d'éléments de réemploi est l'insécurité juridique concernant le statut de celui-ci : est-il un déchet ou un produit ? C'est cette ambiguïté qui complique leur mise sur le marché, en partie en ce

qui concerne l'obligation du marquage CE des matériaux. Cependant, Rotor⁵ propose comme solution un protocole d'évaluation spécifique et volontaire, sans le marquage CE, pour vérifier et garantir la qualité des produits de réemploi mais au cas par cas. Mais tout en reconnaissant leur valeur de marché et en clarifiant les responsabilités juridiques des acteurs.

3.2. Les opportunités

Au delà des bénéfices environnementaux qu'apporte le réemploi, comment convaincre alors les acteurs de la construction d'utiliser le réemploi d'éléments plutôt que de démolir et reconstruire neuf. Les opportunités sont issues du livre «Réemploi, Architecture et construction: Méthodes, ressources, conception, mise en œuvre»⁶.

3.2.1. Un renforcement de la coopération et des dynamiques collectives

Le réemploi stimule la collaboration entre les acteurs du projet (architectes, entrepreneurs, gestionnaires de plateformes, etc.), il favorise donc les réseaux d'échanges et une gestion inter-chantiers plus efficace.

3.2.2. Redéfinition du rôle de l'architecte

L'architecte doit s'adapter aux opportunités offertes par les matériaux de réemploi.

- 1) Une plus grande proximité entre le processus de conception et celui de réalisation: le réemploi remet en cause la séparation stricte entre conception et exécution, rapprochant ces deux phases. En effet, il impose au concepteur d'avoir une plus grande flexibilité dans le processus de projet, nécessitant des ajustements continus en fonction des matériaux disponibles.
- 2) Favoriser l'innovation: travailler avec des matériaux hétérogènes et en quantité limitée stimule l'expérimentation et la créativité. Il va développer de nouvelles esthétiques en

(5) Dans son article: Seys, S. (2017). Vers un dépassement des freins réglementaires au réemploi des éléments de construction: Un meilleur cadre pour le réemploi de produits, pas d'obligation de marquage CE et un système d'évaluation ad hoc. Rotor asbl.

(6) Référence exacte: Belli-Riz, P., Benoit, J., Fabiani, S., Ghyoot, M., Guichard, C., Huygen, J.-M., de Guillebon, M., & Topalov, H. (2022). Réemploi, Architecture et construction: Méthodes, ressources, conception, mise en oeuvre (R. Berthaut, Ed. Le Moniteur ed.). de Gramont, C.

s'éloignant des standards de l'architecture contemporaine

- 3) Élargir son champ d'action: rechercher des gisements, transformer les éléments de réemploi et anticiper la vie de l'ouvrage à long terme (sa démontabilité, son entretien, sa réversibilité, etc) seront des missions supplémentaires pour le concepteur.

Le concepteur devient alors plus polymorphe, plus proche des matériaux, plus créatif, plus ouvert aux opportunités et aux adaptations. «La démarche l'incite à renouer avec son rôle de bâtisseur » (Belli-Riz et al., 2022).

3.2.3. Évolution des savoir-faire et nouveaux métiers

Le réemploi valorise des pratiques plus empiriques, moins statistiques et plus adaptées aux spécificités des matériaux récupérés, stimulant ainsi une économie locale et diversifiée, avec un ancrage régional fort. Il favorise la création d'emplois variés, de la déconstruction à la reconstruction, impliquant divers acteurs économiques (experts en réemploi, juristes spécialisés, assureurs adaptés à cette nouvelle logique).

3.3. Les avantages des propriétés mécaniques

Le béton est caractérisé par différentes propriétés mécaniques et physiques : la résistance à la compression ; la résistance à la traction ; le module d'élasticité ; le coefficient de dilatation thermique ; le coefficient de fluage ; le retrait endogène.

Bien que ces propriétés varient selon la nature des constituants et la composition du béton, on observe tout de même un comportement analogue, propice au réemploi notamment concernant la résistance, le retrait et le fluage.

3.3.1. La résistance du béton

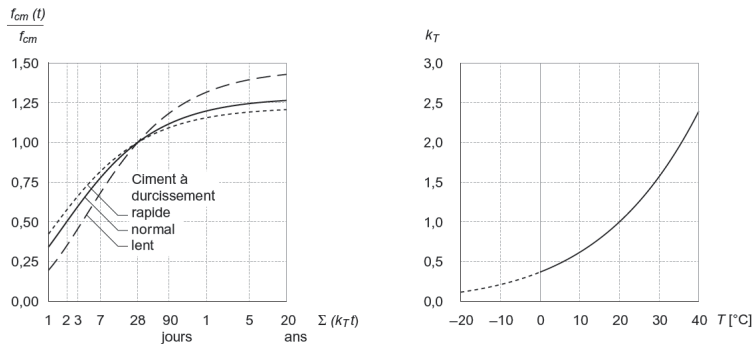


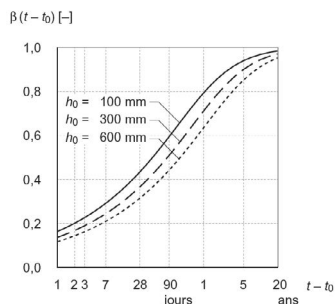
Figure 2: Évolution de la résistance à la compression en fonction du temps (SIA 262, 2013)

« L'évolution de la résistance à la compression en fonction du temps dépend de nombreux facteurs, comme la composition du béton, le type et la classe de résistance du ciment, les adjuvants, les conditions de production et de durcissement ainsi que le type de cure. La figure 2 donne des valeurs indicatives de l'évolution de la résistance à la compression au cours du temps » (Commission SIA 262, 2013).

« Les valeurs caractéristiques de la résistance à la compression du béton sont déterminées sur le béton âgé de 28 jours » (Commission SIA 262, 2013). On constate qu'après 28 jours, le béton continue à monter en résistance. En effet, les courbes tendent vers une asymptote horizontale, ce qui veut dire que le béton atteint sa résistance maximale après 20 ans.

Un béton de 20 ans est donc plus résistant qu'un béton jeune.

3.3.2. Le fluage



Le fluage, c'est la déformation du béton, différée dans le temps, due à l'application de charges durant une certaine période.

On constate bien sur le graphique que toutes les courbes tendent vers une asymptote horizontale,

Figure 3: Coefficients pour la détermination du coefficient de fluage du béton (SIA 262, 2013)

indiquant que le fluage augmente avec le temps mais fini par se stabiliser après plusieurs années.

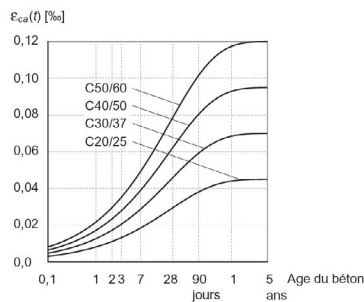
Plus un béton est ancien moins sa déformation potentielle, liée au fluage, est grande, ce qui est intéressant dans la construction. En effet, lorsqu'on doit limiter la déformation d'un élément, on doit soit augmenter sa section, son taux d'armatures ou lui appliquer une contre-flèche initiale afin de limiter les effets du fluage. C'est donc intéressant de travailler avec une plage de déformation plus faible⁷.

(7) Informations d'Elodie Vautrin, mon expert, lors d'une de nos entrevues

3.3.3. Le retrait endogène

« Le retrait endogène trouve son origine dans une autodessiccation c'est-à-dire une consommation interne de l'eau lors de l'hydratation du ciment » (Ployaert, 2010).

Figure 4: Coefficients (valeurs indicatives) pour le calcul du retrait spécifique de dessiccation du béton (SIA 262, 2013)



On constate que le retrait est rapide dans les premiers jours, particulièrement entre 1 et 28 jours. Mais au-delà de 90 jours (environ 3 mois), la vitesse de retrait diminue fortement, et la courbe commence à se stabiliser.

Un béton plus âgé est donc stabilisé vis-à-vis du retrait, ce qui est un avantage dans la construction car ça limite les mesures à prendre pour limiter les fissurations liées au retrait et éviter donc de ralentir le chantier.

4. GÉNÉRALISATION DU RÉEMPLOI D'ÉLÉMENTS EN BÉTON

4.1. Objectif du travail

Comme vu précédemment, le réemploi des éléments en béton est une alternative prometteuse face aux défis environnementaux, les premières initiatives émergent, plusieurs projets voient un aboutissement convaincant. Il apporte de nombreuses opportunités pour l'architecte et l'économie locale.

De plus, étant un matériau bien connu au niveau de ses propriétés mécaniques, le béton est très propice au réemploi. Lorsqu'il est désolidarisé de sa structure existante, ça devient un élément préfabriqué où la seule difficulté restante est la remise en œuvre.

La question n'est donc plus de savoir si cette solution est faisable mais plutôt comment nous allons l'intégrer massivement dans nos pratiques de construction.

Les obstacles techniques, économiques, logistiques, réglementaires et socio-culturels freinent son adoption à grande échelle. Cependant, ils sont transitoires et surtout liés à la nature pionnière de l'opération. Il pourrait donc être facilement levés et susceptible de disparaître si le réemploi des éléments en béton était mieux connu et plus répandu. Ce sont des ajustements, des adaptations à mettre en place durant toutes les phases du processus pour faire face à ses différents challenges.

De nombreux matériaux contemporains sont absents dans les filières de réemploi (béton, acier, cloisons vitrées, faux-plafond, etc). L'accès à la documentation, les connaissances techniques et une appréciation favorable des acteurs sont nécessaires pour surmonter cet obstacle (Rotor asbl, 2017).

En conclusion, le plus gros frein à lever est donc l'ignorance de la technique et l'absence de documentation sur le réemploi des éléments en béton.

(8) Entretien avec Wissam Salim, architecte du bureau OF7, lors de la visite du projet de réemploi Waterloo (projet lauréat Renolab). Réalisé par Emilie Du Mortier, à Ixelles, le 1 novembre 2024

« En réalisant ce projet de réemploi, on a du creuser pour réaliser les terrassements et on a trouvé des morceaux de dalles en béton. J'avais envie d'en faire quelque chose, de les réemployer mais je ne savais pas vraiment comment m'y prendre, il m'aurait fallu de la documentation. Du coup, on ne les a pas récupéré... »⁸.

L'objectif de ce mémoire est donc de tenter de lever ce frein et d'améliorer la visibilité du réemploi d'éléments en béton pour qu'il devienne plus répandue et utilisée en Belgique.

4.2. Méthodologie

Dans un premier temps, il a été nécessaire de rechercher et d'analyser la documentation existante sur le réemploi des éléments en béton pour comprendre les éléments concernés, leur organisation, leurs manquements ainsi que leurs limites. Une synthèse des limites et des manquements permettra de mieux comprendre les raisons pour lesquelles cette technique reste peu employée par les architectes.

Le projet architectural a constitué un élément central de la méthodologie, car sa réalisation a permis de révéler plusieurs blocages survenus à différentes étapes du processus de réemploi des éléments en béton. Un manque de documentation claire s'est fait ressentir sur certaines étapes ainsi qu'une absence totale sur certains types d'éléments en béton.

Ces manquements ont donc été longuement abordés au cours de nombreuses discussions approfondies, menées avec divers professionnels du secteur de la construction en béton afin d'en tirer des réponses et/ ou des solutions.

Enfin, un outil méthodologique destiné aux architectes a été conçu pour faciliter la mise en application du réemploi des éléments en béton et démontrer son potentiel aux acteurs de la construction.

II. ÉTAT DE L'ART

1. LA DOCUMENTATION MÉTHODOLOGIQUE ET TECHNIQUE

Les trois premiers documents présentés sont issus du 2^{ème} volet du programme de Recherche et Expertise sur le réemploi en construction, piloté par Bellastock en partenariat avec l'ADEME et le CSTB: REPAR 2.

Les fiches réemploi quant à elle , ont été réalisées par Bellastock dans le cadre du projet Interreg FCRBE - Facilitating the Circulation of Reclaimed Building Elements, soutenu par l'ensemble des partenaires du projet.

Le guide méthodologique d'éléments structurels en béton est en cours de réalisation par la Société Coopérative 2401, en Suisse.

Chaque document est présenté de manière succinct pour comprendre:

- L'élément en béton récupéré/ Élément en béton réemployé
- La structuration du document
- Les grandes étapes du réemploi de l'élément développé

1.1. Fiches techniques réemploi

12 fiches techniques réemploi ont été réalisées par Bellastock et ont reçu un avis technique dans le document REPAR 2. Elles sont toutes organisées de la même manière, comme une fiche d'identité de l'élément comprenant:

- 1) Une présentation du matériau pour composant d'ouvrage
 - L'accès au gisement: démolition, déconstruction, etc
 - L'état du matériau: localisation sur le bâti, sollicitations environnementales vécues, exigences géométriques et mécaniques attendues, autres diagnostics
 - L'expertise attendue: autocontrôle amont par le

diagnostiqueur, autocontrôle aval par l'entreprise, contrôle in situ ou ex situ

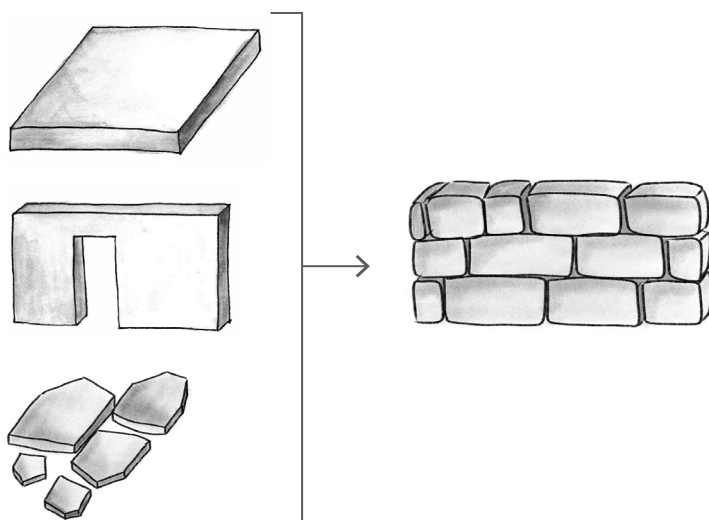
- Photo d'un matériau type AVANT déconstruction et préparation

2) Une présentation du composant d'ouvrage

- Définition du composant d'ouvrage
- Le contexte normatif: DTU de référence, conception et solidité, durabilité, étanchéité à l'eau, comportement en situation d'incendie, affaiblissement acoustique, préconisations d'usage
- Spécificités pour l'intégration au projet: stockage, pose, assemblage
- Photo d'un composant d'ouvrage à obtenir APRES préparation

5 de ses fiches concernent des éléments en béton.

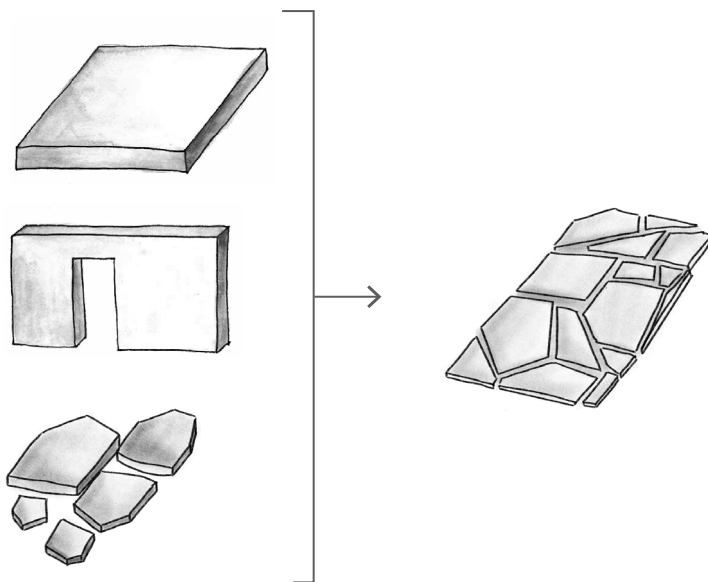
- Fiche n°3: Aménagement extérieur - Muret Pierre de béton:
Son origine peut être une dalle de compression, une façade, un mur, une cloison en béton.



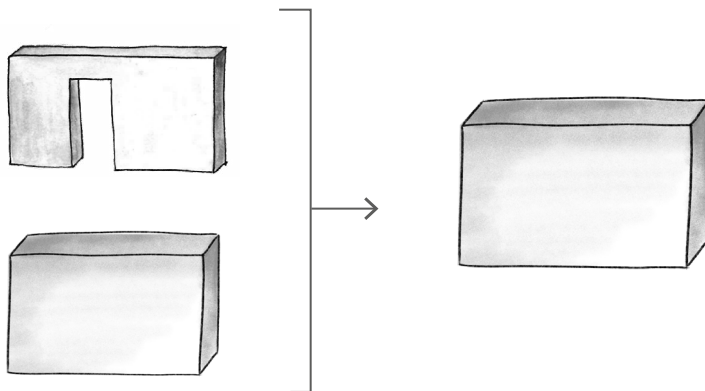
- Fiche n°6: VRD⁹- Revêtement de sol pavé béton - pose sèche: Son origine peut être une dalle de compression, une façade, un mur, une cloison en béton.

&

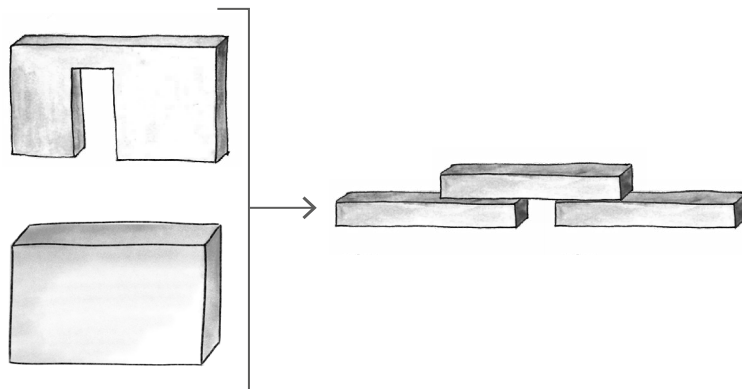
- Fiche n°7: VRD- Revêtement de sol pavé béton - pose scellée: Son origine peut être une dalle de compression, une façade, un mur, une cloison en béton



- Fiche n°8: Gros œuvre- Mur voile béton: Son origine peut être un voile béton intérieur ou extérieur armé



- Fiche n°9: Gros œuvre- Mur lamelles béton: Son origine peut être un voile béton intérieur ou extérieur armé

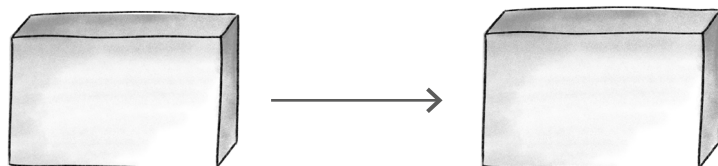


1.2. Guide réemploi de béton en murs

«L'étude est réalisée à l'occasion d'un projet mené par le bailleur social OPHLM de Seine Saint-Denis et l'association Bellastock. L'objectif de l'étude est de définir une méthodologie de validation des performances techniques de bétons issus d'ouvrages démolis pour un usage en mur (porteur ou non) dans des ouvrages neufs» (Prat, 2016).

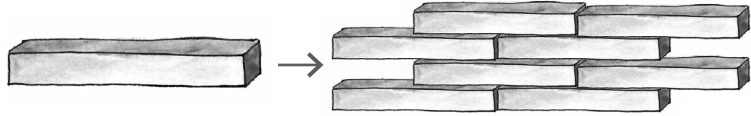
Deux types d'éléments en béton sont analysés dans ce guide:

- Les murs: réutilisation comme murs non-porteurs, comme murs porteurs avec un fonctionnement de type mur maçonnerie, comme murs porteurs avec un fonctionnement de type mur en béton armé.

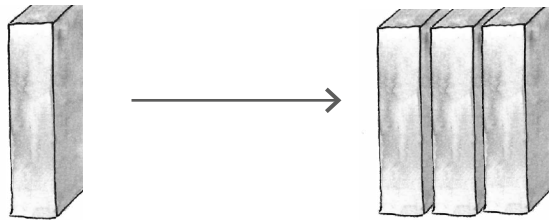


- Les lamelles

- Horizontales: réutilisation comme parois séparatives ajourées ou murs porteurs;



- Verticales: réutilisation comme parois séparatives ajourées.



Le guide est organisé en 4 grosses parties: les généralités, le diagnostic des performances d'un élément en béton, les étapes à suivre pour réemployer les murs et les lamelles, les annexes.

1.2.1. Les généralités des éléments

On retrouve le type d'élément en béton pouvant être récupéré, ici les murs et les lamelles ainsi qu'une définition du produit, ses dimensions, les enjeux de sa réutilisation.

Il y a aussi une partie vocabulaire ainsi qu'une série de documents reprenant la réglementation et les normes des essais et produits en béton.

1.2.2. Le diagnostic des performances d'un élément en béton

Cette partie détaille les deux étapes à suivre pour le diagnostic du bâtiment: l'investigation des documents et la reconnaissance in situ ainsi que les essais en labo. L'objectif de cette étape est de déterminer les performances du matériau.

Elles détaillent ainsi tous les essais de caractérisations des propriétés mécaniques du béton et des aciers d'armatures de l'élément (résistance à la compression, porosité, profondeur de carbonatation, etc).

1.2.3. Les étapes à suivre pour réemployer les éléments en béton

Chaque étape du processus de réemploi des éléments en béton sont détaillées précisément: le diagnostic, la collecte/ dépose, l'intégration au nouvel ouvrage (type de pose, fixation, solidité, durabilité, etc), la préparation des éléments, la phase de mise en œuvre, le transport, la manutention et le stockage, la traçabilité des éléments.

1.2.4. Les annexes

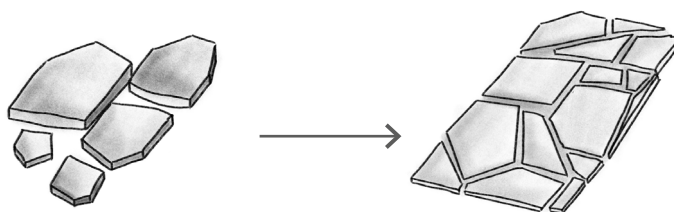
L'annexe 1 synthétise l'étape du diagnostic de l'élément en béton sous forme d'organigramme et de tableau.

L'annexe 2 et 3 sont des aides pour le dimensionnement des murs porteurs avec fonctionnement de type maçonnerie et de type mur en béton armé (mécanique des structures).

L'annexe 4 donne un exemple d'étiquette d'un élément de réemploi en béton pour faciliter sa traçabilité.

1.3. Guide réemploi de béton en revêtement de sol

« Dans le cadre du projet de recherche REPAR 2, mené en collaboration avec l'ADEME, l'association d'architectes BELLASTOCK explore les possibilités de prescription du réemploi. L'association souhaite définir une méthodologie de validation des performances techniques du béton de réemploi pour un usage en revêtement de sol, à moindre coût afin de ne pas limiter le potentiel d'utilisation de cette technique nouvelle. Il s'agit notamment d'évaluer la possibilité de s'écarter du contexte normatif relatif aux produits neufs, afin de faciliter le réemploi, tout en garantissant l'aptitude à l'usage des éléments modulaires issus de béton de démolition » (Millan & Phommaly, 2017).



Le guide est organisé en 3 parties : les domaines d'emploi envisageables ainsi que les normes et exigences associées, l'évaluation des performances du gisement et sa capacité à être réemployé comme revêtement de sol, l'exécution des ouvrages (préparation, mise en œuvre et entretien).

1.3.1. Détermination des domaines d'emploi envisageables

Ce chapitre est divisé en 3 parties :

- 1) Une présentation détaillée du contexte normatif et réglementaire qui prescrit les caractéristiques auxquelles les pavés et dalles en béton doivent répondre pour être fonctionnels. On retrouve trois domaines envisageables : les pavés en béton pour jardins et ceux pour voirie et espace public, les dalles en béton pour voirie et espace public. Le but étant de passer en revue les exigences normatives et de déterminer si on ne peut pas déroger à certaines dans le cadre du réemploi.
- 2) Les différents critères de sélection des bétons de réemploi pour une utilisation comme revêtement de sol : les critères issus des normes produits (caractéristiques visuelles, géométriques, physiques et mécaniques), les critères portant sur les aciers
- 3) Une comparaison avec les exigences relatives aux éléments en pierre naturelle

1.3.2. Diagnostic du gisement et caractérisation des matériaux

Cette partie détaille les deux étapes à suivre pour le diagnostic du gisement : l'investigation des documents et la reconnaissance in situ. Si nécessaire, des essais en labo peuvent aussi être réalisés sur des carottes.

L'investigation documentaire permet de mieux connaître le ou les gisements tandis que le diagnostic in situ permet de déterminer l'état de dégradation du béton et d'évaluer ses propriétés mécaniques.

1.3.3. Prescription pour la mise en œuvre

Ce chapitre détaille les différentes étapes à suivre pour mettre en œuvre un élément de réemploi : La collecte et la préparation des éléments modulaires, la mise en œuvre ainsi que les traitements (type de pose), l'entretien (nettoyage des surfaces, regarnissage des joints, démontage et remplacement des pavés et dalles en béton), le contrôle et la traçabilité des produits.

1.3.4. Les annexes

L'annexe 1 décrit le marquage CE (marquage réglementaire) et la marque NF (complément au CE).

L'annexe 2 donne un exemple d'étiquette d'un élément de réemploi en béton modulaire pour faciliter sa traçabilité.

1.4. Les fiches réemploi FCRBE

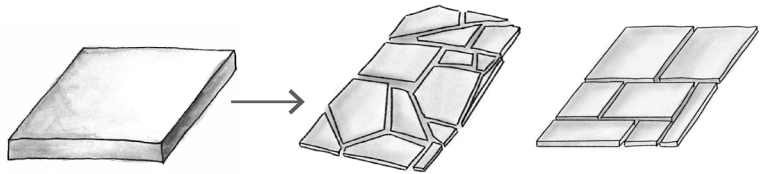
Les fiches réemploi sont adressées aux concepteurs, prescripteurs et aux équipes de projet de construction qui ont envie de réemployer des éléments en béton dans leurs projets.

Ce sont en fait, des fiches qui synthétisent les deux guides méthodologiques et techniques présentés précédemment (environ une dizaine de pages par fiche). Seule la fiche pavés et dalles en béton n'a pas de guide qui développe la méthode et les démarches à suivre.

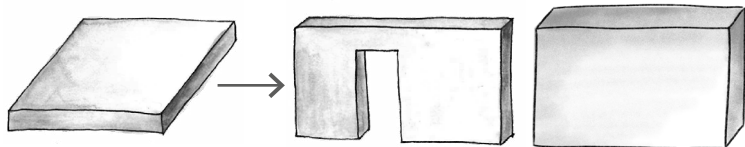
Elles permettent donc aux acteurs intéressés de les guider facilement durant toutes les étapes/ opérations du réemploi des éléments en béton.

On retrouve donc trois fiches pour chaque élément en béton ayant un potentiel de réemploi:

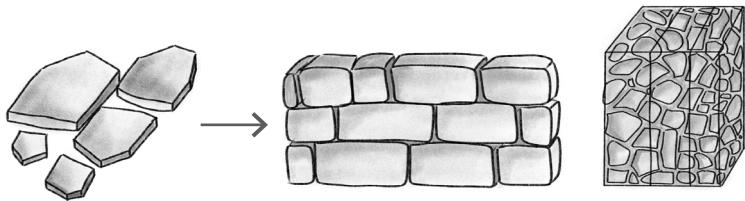
- Éléments en béton présentant deux faces planes // (voiles, dalles, fermes): réutilisation en pavage ou dallage



- Les voiles en béton porteurs ou non/ coulée sur place ou préfabriquée : réutilisation soit comme mur non-porteurs, soit comme mur porteur avec un fonctionnement de type mur maçonné, soit comme mur porteur avec un fonctionnement de type mur en béton armé



- Gravats issus de la démolition: réutilisation en moellons pour des murets, gabions, réalisations paysagères

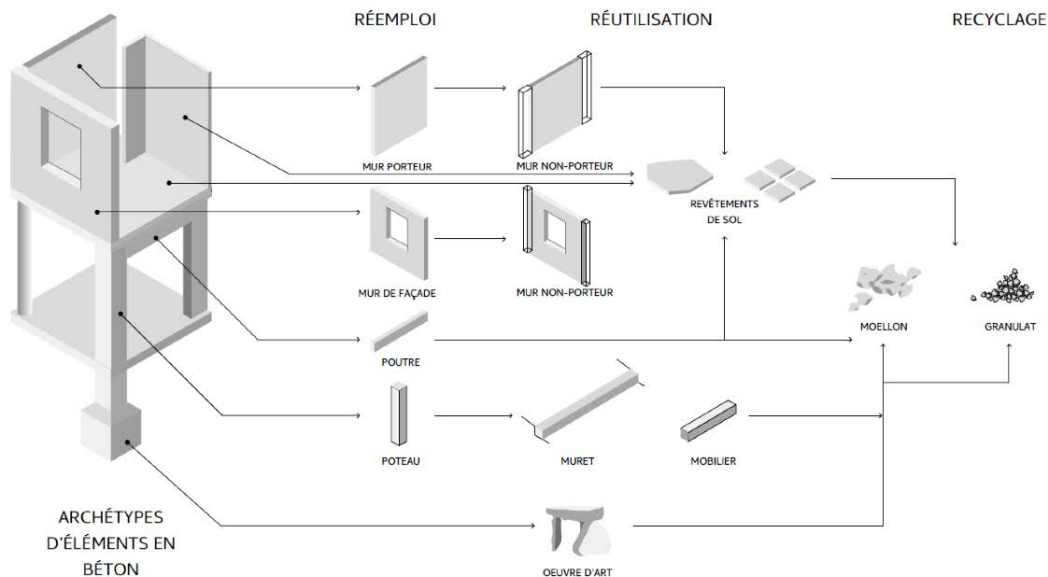


Chaque fiche est présentée de manière identique, en suivant différents points clés:

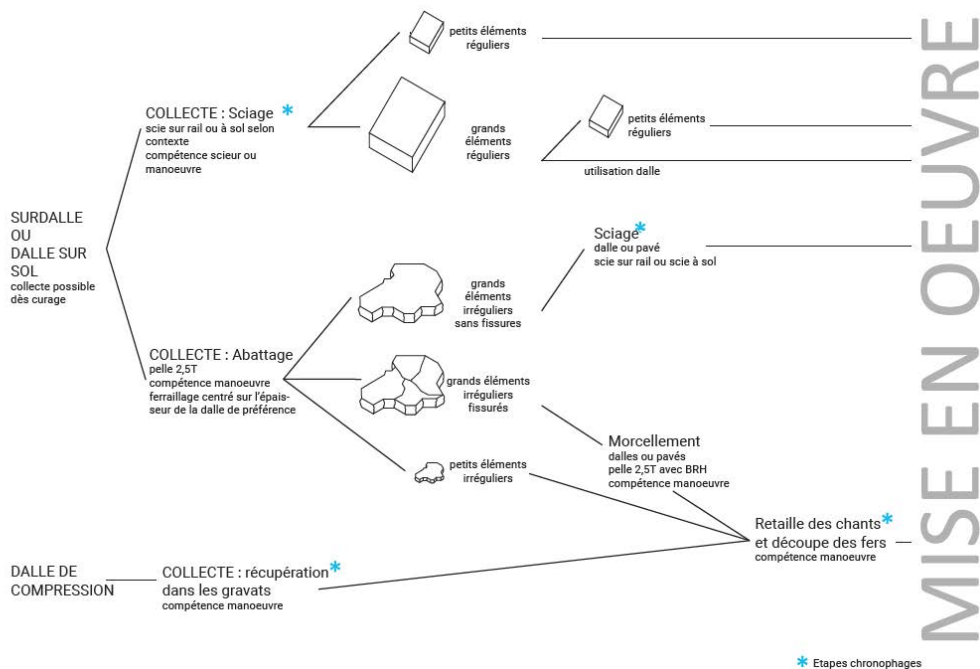
- 1) La description du matériau/ élément: une définition du

matériau ainsi que sa future utilisation, les dimensions de l'élément, les différents types d'éléments de construction en béton pouvant être récupérés pour produire l'élément en question, les aspects à prendre en compte pour identifier l'élément (épaisseur, ferraillage, l'état des surfaces, etc).

- 2) La récupération du matériau: explication des différentes étapes à suivre avant que l'élément soit remis en œuvre. Les différentes étapes sont relativement similaires pour les trois éléments, cependant certaines étapes sont plus lourdes et demandent plus de moyens que pour d'autres éléments plus petits comme les moellons. On retrouve toujours les études préalables, la dépose des éléments d'origine, la transformation des éléments d'origine, les traitements complémentaires, le stockage et transport.
- 3) L'application et la mise en œuvre: les points d'attention et les réglementations à respecter pour chaque élément, les applications possibles, les caractéristiques possibles à suivre pour avoir une certaine homogénéité dans les lots d'éléments, les différents types de fixation (pour les voiles surtout).
- 4) Les caractéristiques et aptitudes à l'usage: Tableaux reprenant toutes les exigences relatives aux caractéristiques physiques et mécaniques des éléments en béton (dimensions, épaisseur, qualité de la surface, imperméabilité, exigences mécaniques, résistance, durabilité, etc).
- 5) Les disponibilités de l'élément: pas commercialisé, juste pour des commanditaires et des concepteurs.
- 6) Les prix indicatifs des éléments en béton.
- 7) Les substances dangereuses et les précautions à prendre.
- 8) Embodied Carbon: calculs rapides de l'empreinte carbone de l'utilisation de chaque élément.



GISEMENT DALLE



1.5. Réemploi d'éléments structurels en béton

Le guide se concentre spécifiquement sur le réemploi des éléments structurels en béton armé. «Ce guide se présente comme une boîte à outils à destination des concepteurs d'une démarche de réemploi des éléments structurels en béton armé, qu'ils soient coordinateur réemploi et/ou spécialiste réemploi structure» (Société coopérative 2401, ...). Comme il est en cours d'élaboration, il va encore évoluer mais pour le moment, il est divisé en 8 grands chapitres:

- Chapitre 1: L'objet du guide et son champ d'application
- Chapitre 2: Un lexique avec les différentes terminologies
- Chapitre 3: Une description des prestations spécifiques à une démarche de réemploi pour chacune des phases SIA, à l'intention de la personne en charge des études des éléments de structure
- Chapitre 4: Une proposition d'outils de gestion de projet adaptés aux grandes étapes d'une démarche de réemploi et permettant d'aboutir à la rédaction d'un plan d'orientation
- Chapitre 5: Des outils de rédaction pour les différents livrables des différentes phases. Il inclut notamment la liste des informations à relever lors de l'inventaire détaillé et intégrer au rapport d'AVP (études d'avant-projet)
- Chapitre 6: Un regroupement des éléments en béton pouvant faire l'objet d'études détaillées et des outils nécessaires à leur obtention et analyse
- Chapitre 7: Des préconisations pour chaque grande étape du projet de réemploi une fois les éléments intégrés au projet receveur, telles que la préparation,

Figure 5: Schéma de principe présentant les hypothèses de solutions de réemploi à partir d'un gisement type (Benoit & al, 2018)

Figure 6: Les étapes de la dalle au produit, cas de récupération d'une dalle de compression. Le contrôle des performances techniques du béton se fait en amont des opérations de collecte. Le contrôle de l'état des matériaux se fait à chaque étape du processus. (Benoit & al, 2018)

la déconstruction, le conditionnement et la remise en œuvre

- Chapitre 8: Des cas d'application illustrant les différents scénarios de réemploi identifiés

2. RETOUR CRITIQUE DES GUIDES

2.1. Manque d'éléments en béton

Les guides s'attardent sur les dalles coulées sur place, les voiles, les moellons mais on n'en retrouve aucun sur les dalles préfabriquées, les poutres ou encore les colonnes.

2.2. Downcycling

De nombreux éléments sont souvent sous-réemployés (downcycling¹⁰) voir recyclés comme les dalles réutilisées en dallage/ pavage ou alors les granulats issus de la démolition réutilisés en gabions. Comme expliqué précédemment (Voir Chapitre I , 2.3. Une alternative à la démolition totale), si le réemploi n'est pas envisageable pour plusieurs raisons, alors le recyclage peut être une solution. Cependant, cette solution sort de notre cadre d'étude.

On constate donc le manque de documentation concernant la réutilisation d'éléments structurels en béton en éléments structurels à l'exception du guide méthodologique et technique pour le réemploi de béton en murs réalisé par Bellastock. La Suisse a d'ailleurs compris cette lacune et est en train de réaliser un guide pour le réemploi d'éléments structurels (Société Coopérative 2401).

2.3. Manque de documentation attractive

Les guides pour le réemploi de béton en murs et le réemploi de béton comme revêtement de sol sont trop techniques , ils sont difficiles à comprendre et très denses. Les fiches techniques réemploi sont quant à elles, attractives mais manque d'informations précises pour certaines étapes du réemploi des éléments . La documentation est donc soit trop technique et peu attractive, soit trop globale.

Les fiches réemploi FCRBE ont un bon équilibre entre attractivité et complétude. Elles pourraient donc servir d'exemple à suivre pour les éléments en béton manquants.

(10) Downcycling:
c'est quand un élément est réemployé mais pour une moindre valeur que celle qu'il a initialement (une dalle est réutilisée en dallage extérieur)

Upcycling:
c'est quand un élément est réemployé mais pour une plus grande valeur que celle initiale (une dalle est réutilisée en une dalle précontrainte)

Equivalente:
c'est quand un élément est réemployé mais pour une valeur équivalente à celle initiale (une dalle est réutilisée en une dalle)

3. LES PROJETS ARCHITECTURAUX

Dans un contexte où la documentation reste souvent centrée sur des petites éléments non structurels ou bien les mêmes éléments comme les dalles, il est nécessaire d’interroger les pratiques existantes à travers des projets réalisés. Cette double analyse vise à identifier les types d’éléments en béton réemployés et leur niveau de réemploi (downcyclé, équivalent ou upcyclé).

• Analyse 1

La première analyse est faite selon 13 projets de réemploi d’élément en béton, analysé dans le cadre du projet FCRBE dans «32 detailed project sheets: projects info, reuse rates and reused elements»¹¹. Celle-ci est organisée selon la position de l’élément dans le bâtiment: structure, enveloppe, revêtement intérieur, infrastructure extérieure, revêtement extérieur.

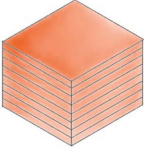
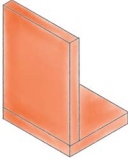
Cette analyse met en avant le type d’élément en béton qui est réemployé.

(11) Rotor, CSTB, Bruxelles environnement, TU Delft, LIST, Utrecht, & Bellastock. (2023). 32 detailed project sheets: projects info, reuse rates and reused elements.

Tableau 1: Réutilisation de la couche structurelle



Réutilisation Éléments structurels

	Blocs	Mur de soutènement	Linteau
Type d'éléments en béton			
Projets réalisés	Green house Circular Pavillion Three House	Kaysersberg	Sanitary block VLA office

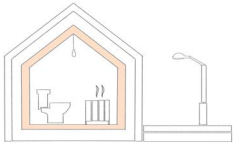
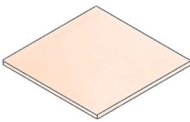
		Réutilisation revêtement intérieur
Type d'éléments en béton	Carreaux 	
Projets réalisés	Maison des Canaux	

Tableau 2: Réutilisation du revêtement intérieur

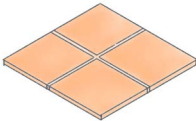
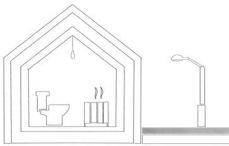
		Réutilisation enveloppe extérieure
Type d'éléments en béton	Carreaux 	
Projets réalisés	Botany Institue uLg	

Tableau 3: Réutilisation de l'enveloppe extérieure

Tableau 4: Réutilisation
du revêtement extérieure



Réutilisation revêtement extérieure

Type d'éléments en béton	Carreaux 	Bordures 
Projets réalisés	Clos Dupont Circl Pavilion Botany Institue uLg Cremestraat Place de Molenbeek	Cremerstraat

On constate, en effet, que pour la plupart des 13 projets, les éléments en béton réemployés sont soit des petits éléments structurels (linteaux, blocs), soit des éléments non-structurels (pavés, dallage). On a donc très peu de projets dont les éléments structurels sont réemployés en éléments structurels (dalle en dalle ou voile en dalle).

• Analyse 2

La deuxième analyse regroupe plusieurs projets de réemploi d'éléments en béton réalisés en Suisse et en France. Les critères d'analyse sont basés sur leur niveau de réemploi: downcyclé, équivalent, upcyclé ou autres utilisations. Une fiche d'identité comprenant une description plus complète de chacun des projets se trouvent en annexe (voir VI. Annexe, 2. Fiche d'identité projets architecturaux).

Réutilisation Downcyclé	
Projets	Stade des Arbères (FAZ architects)
Elément récupérés	Dalles
Réutilisation	Dallage intérieur & extérieur

Tableau 5: Réutilisation downcyclé des éléments en béton

Réutilisation Equivalente		
Projets	Flo: Re (Epfl)	RebuiLT (Epfl)
Elément récupérés	Dalles en flexion	Dalle champignon + Pilier
Réutilisation	Dalles en flexion	Ensemble: Dalle + Pilier + Dalle

Tableau 6: Réutilisation équivalent des éléments en béton

Tableau 7: Réutilisation upcyclé des éléments en béton

Réutilisation Upcyclé				
Projets	Re:Crete (Epfl)	Clos Saint-Lazarre (Bellastock)	VSL passerelle (HEIA-fr)	Passerelle Canton du Valais (HEAI-fr)
Elément récupérés	Dalles	Agrégats ou petits morceaux de dalles	Morceaux de dalles	Morceaux de dalles
Réutilisation	Dalles post-tendu (câbles)	Pavage ou murets	Dalles + câbles pré-contraints	Dalles + câbles suspendus

Tableau 8: Autres réutilisation des éléments en béton

Autres réutilisations			
Projets	ConcRETE 2 (Bellastock)	ConcRETE 1 (HEIA-fr)	Boulodrome (bureau MacIver-Ek Chevroulet)
Elément récupérés	Dalles	Dalles	Dalles
Réutilisation	Petits blocs porteurs	Mur de soutènement avec dalles verticales	Murs porteurs

Ces projets montrent à la fois le potentiel autour du réemploi d'éléments en béton et les limites rencontrées lors de sa remise en œuvre. Pour la majorité des projets, les éléments récupérés sont des éléments peu contraints structurellement (dalles coulées sur place, petits blocs) ou bien ils nécessitent d'être couplés à d'autres éléments (câble précontraint, câble suspendu) pour être réutilisés pour d'autres contraintes structurelles. C'est réalisable mais ça engendre des adaptations techniques complexes.

Ces constats confirment donc l'importance et la nécessité d'avoir des outils méthodologiques qui permettent de guider et d'encourager les architectes à intégrer le réemploi d'éléments structurels dans leurs projets.

III. UN GUIDE MÉTHODOLOGIQUE À **DESTINATION DES ARCHITECTES**

1. VERS UNE PRATIQUE ARCHITECTURALE PLUS VISIBLE

Comme dis précédemment, un des plus gros frein au réemploi est l'ignorance de la technique et l'absence de documentation. En effet, comme détaillé dans l'état de l'art, il existe très peu de documentation complète, attractive et donc à portée de main des architectes.

L'objectif est donc de créer un guide méthodologique qui permettrait de donner envie, de mettre en confiance les architectes quant à l'utilisation d'éléments de réemploi en béton dans leurs projets. Cet outil a pour objectif d'accompagner l'architecte tout au long du processus du réemploi d'un élément en béton, allant de son identification à sa remise en œuvre. De plus, il propose une seule solution de remise en œuvre, qui est celle appliquée dans le projet architectural, développé dans ce travail. Ce choix permet de laisser aux utilisateurs du guide la liberté d'explorer d'autres options constructives et d'exprimer leur créativité lors de la conception.

Le guide serait, en quelque sorte, un complément aux fiches de réemploi de FCRBE, il se focaliserait sur tous les éléments structuraux en béton identifiés sur le site du projet architectural de ce travail: la poutre, la colonne, la dalle alvéolée, la dalle préfabriquée, la dalle coulée sur place.

2. MÉTHODOLOGIES: CRÉATION DU GUIDE

Le guide a été élaboré en parallèle du projet architectural, ses différentes phases ayant alimenté son élaboration tout au long du processus. La réalisation d'un projet «concret» a permis de se confronter aux étapes réelles que doit suivre un architecte dans le cadre du réemploi d'éléments en béton, et ainsi de concevoir un guide aussi clair et complet que possible.

2.1. Le choix des éléments en béton

2.1.1. Le cas d'études: l'Hôpital Saint-Pierre à Ottignies

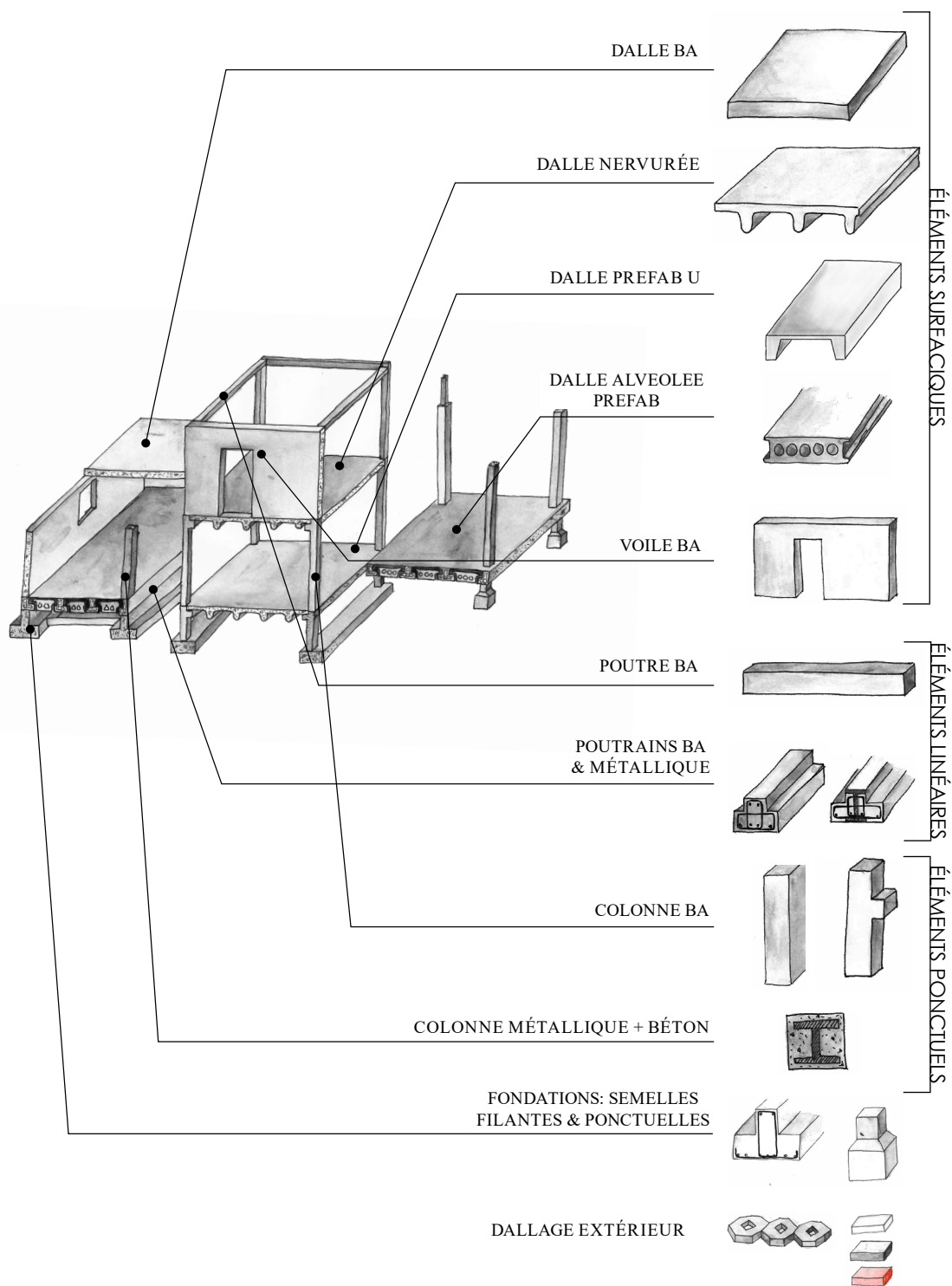
Afin de déterminer quels éléments en béton développer dans le guide, un inventaire a d'abord été réalisé sur certaines parties du bâtiment destinées à être déconstruites, dans le cadre de la réhabilitation de l'hôpital. L'analyse s'est concentrée sur les zones ayant une forte répétition d'un même type d'élément en béton armé. Les éléments métalliques recouverts de béton armé ont été écartés, car ils sortent du cadre défini pour ce travail.

2.1.2. La documentation des éléments préfabriqués en béton

Le guide du bâtiment durable¹² développe les différents éléments de structure en béton existants. Parmi eux, on retrouve deux grandes catégories: les éléments horizontaux comme les dalles nervurées, alvéolées, prédalles, entrevous, poutrains, poutres et les éléments verticaux comme les voiles ou les colonnes. De plus, on peut les classer en trois sous-catégories: les éléments surfaciques comme les dalles et les voiles, les éléments linéaires comme les poutres et poutrains, et les éléments ponctuels comme les colonnes.

Toutes les catégorisations ont permis de déterminer les principaux éléments structurels à développer pour compléter les guides existants: la poutre en béton armé, la colonne en béton armé et les dalles en béton armé que ce soit les dalles alvéolées, préfabriquées ou coulée sur place.

(12) Guide du bâtiment durable. (2013). Eléments de structure en béton. <https://guidebatimentdurable.brussels/elements-structure-beton>



2.2. Les différentes étapes du réemploi

Un mindmap dégagant les étapes clés du réemploi de matériaux a été établi (voir VI. Annexe 3. Mindmap) à partir du livre «Réemploi, Architecture et construction: Méthodes, ressources, conception, mise en œuvre»¹³.

De plus, grâce à l'analyse des fiches réemploi du projet FCRBE, les étapes ont pu être affinées au réemploi d'éléments en béton.

On retrouve:

- L'audit & l'inventaire
- La collecte & la manutention
- La réparation & l'entretien
- Le stockage
- Le transport
- La remise en œuvre

2.3. Le niveau de détail

Le niveau de détail du guide est une étape cruciale pour savoir le degré de précision à adopter pour chaque étape du réemploi:

- Le niveau 1 va balayer les étapes, il évoque quelques points d'attention à avoir et un avant/ après de l'élément à réemployer
- Le niveau 2 va développer les étapes d'un point de vue de la méthodologie à suivre
- Le niveau 3 va développer les étapes de manière plus techniques et scientifiques (tests en labo, caractéristiques du béton, etc)

Le guide va donc viser un niveau entre le 2 et le 3 pour s'adapter le mieux possible aux besoins des architectes et leur fournir un outil méthodologique le plus complet possible. Tout le guide est détaillé à un niveau 2, seules certaines indications ou précautions

(13) Belli-Riz, P., Benoit, J., Fabiani, S., Ghyoot, M., Guichard, C., Huygen, J.-M., de Guillebon, M., & Topalov, H. (2022). Réemploi, Architecture et construction: Méthodes, ressources, conception, mise en oeuvre (R. Berthaut, Ed. Le Moniteur ed.). de Gramont, C.

Fig. 7: Schéma des éléments structuraux principaux de l'Hôpital ← Saint- Pierre à Ottignies

à prendre visent le niveau 3. Le niveau 3 dépasse l'expertise d'un architecte, ce sont les ingénieurs qui peuvent fournir ou alimenter ses informations plus précises.

2.4. Discussions approfondies avec des spécialistes

Un brouillon de chaque étape a été établi pour permettre de dégager les questionnements relatifs à l'élément.

L'audit et l'inventaire étant pratiquement identique pour chaque élément en béton, il a pu être généralisé et développé grâce à l'article du labo SXL de l'EPFL, «Reusability assessment of reinforced concrete components prior to deconstruction from obsolete buildings»¹⁴.

(14) Devènes, J., Bastien-Masse, M., & Fivet, C. (2024). Reusability assessment of reinforced concrete components prior to deconstruction from obsolete buildings. Journal of Building Engineering.

Les questionnements touchés surtout les étapes de collecte (désolidarisation de l'élément à sa structure initiale) et de remise en œuvre de l'élément (système d'assemblage). Des solutions ont été longuement réfléchies et discutées avec différents professionnels du béton:

- Elodie Vautrin, coopératrice ingénieure civile et architecte dans la société coopérative 2401, à Lausanne: experte dans le réemploi d'élément en béton.
- Yves Du Mortier, technico commercial chez Leviat Plakabéton: spécialiste en connection du gros œuvre du bâtiment.

2.5. Attractivité du guide

En plus d'être complet et pertinent, le guide est un outil avant tout attractif pour les architectes. De nombreuses références de guide existant dans la construction ont permis d'alimenter et d'atteindre cet objectif:

- Les fiches réemploi du projet FCRBE de Bellastock
- La brochure de vulgarisation à destination des acteurs du secteur de la construction et du réemploi: «Récupération

et réemploi dans les projets de construction: se fixer des objectifs et les atteindre» d'Objectif zéro

- Le manuel de démontage avec une finalité réemploi de CDR Construction

2.6. Organisation et contenu du guide

Le guide est divisé en 6 grands chapitres:

- Chapitre 1: Présentation des différents points à savoir avant de se lancer dans un projet de réemploi d'éléments en béton; le champ d'application et l'objectif du guide, le public visé par le guide, la manière d'utiliser le guide, les acteurs impliqués dans l'élaboration du guide, les types d'éléments structurels, la documentation existante.
- Chapitre 2: Explication pour réaliser un inventaire complet d'une structure existante et de ses composants ainsi que l'évaluation du potentiel de réutilisation de chacun de ses éléments. Cette étape a déjà été approfondie par le labo SXL de l'EPFL, seule la mise en page a donc été adaptée dans le guide
- Chapitre 3: Développement de l'étape de collecte et de manutention, c'est-à-dire la désolidarisation des éléments à la structure donatrice ainsi que le levage. On retrouve donc les étapes à effectuer en amont du sciage (organisation des découpes, stabilisation et sécurité de la structure démontée, intégration des systèmes de fixation dans les éléments), les techniques et outils de levage, les techniques et outils de sciage
- Chapitre 4: La réparation et l'entretien des éléments une fois désolidarisés; protection des armatures, classes d'exposition du béton
- Chapitre 5: Explication des points importants à prendre en compte pour le stockage des éléments que ce soit à l'intérieur

ou à l'extérieur, pour préserver la résistance et la sécurité des éléments stockés

- Chapitre 6: Présentation des différentes solutions de remise en œuvre des éléments en béton récupérés ainsi que les différents types d'assemblages

Les différentes étapes sont généralisées à tous les types d'éléments structurels en béton. Cependant, certaines sont propres à un type d'élément et sont donc développées au cas par cas, avec l'aide de spécialistes (les assemblages, les systèmes de levage).

De nombreuses étapes nécessitent l'intervention de bureaux d'études, notamment pour le dimensionnement des systèmes de levage, de soutien ou des assemblages. Chaque point concerné est spécifiquement indiqué dans le guide.

IV. PROJET ARCHITECTURAL: L'HÔPITAL SAINT-PIERRE À OTTIGNIES

1. CONTEXTUALISATION

1.1. Objectif du projet

L'objectif du projet architectural est de se confronter concrètement aux différentes étapes du processus de réemploi d'éléments en béton, en faisant face aux difficultés et problématiques qui peuvent survenir. Tout au long de son développement, le projet a ainsi alimenté le guide méthodologique, en fournissant un exemple pratique permettant de suivre pas à pas les étapes du réemploi et d'illustrer les obstacles rencontrés.

Pour chaque étape du réemploi, les aspects plus techniques sont donc détaillés dans le guide, qui vient compléter et enrichir les explications du projet.

1.2. Le site et le contexte

Situé proche du centre d'Ottignies, l'hôpital Saint-Pierre est voué à déménager. En effet, un nouvel hôpital plus moderne est en cours d'élaboration à Wavre. Mais que va devenir le site de l'hôpital à Ottignies après son déménagement?

1.2.1. Les causes du déménagement de l'hôpital

Selon le document de la réunion d'information préalable au nouvel hôpital (Commune de Wavre, 2021), voici les causes de l'obsolescence de l'ancien site:

- 1) L'infrastructure est en déficit de superficie d'environ 23 000 m²:
 - Impossibilité d'ajouter encore des annexes sur le site
 - Déstructuration de l'organisation interne de la clinique; chemins de soins complexes pour les patients, multiplication des équipements, espaces dans les unités de soins insuffisants
- 2) Le bâtiment n'est plus conforme aux normes actuelles
- 3) L'enveloppe est très mauvaise en terme de performances énergétiques.

1.2.2. Les raisons de son avenir incertain

«Pour nous, ce serait désolant de devoir démolir complètement le bâtiment. Je pense que ce n'est plus du tout non plus une politique au goût du jour et qu'il vaut mieux faire de la reconversion »¹⁵ (Van Peel, 2023).

Cependant, certaines ailes ont des configurations tellement complexes que les rénover ou les réhabiliter serait bien trop compliqué.

De plus, on constate une très forte densité de bâti sur le site. En effet, durant les dernières années, des ailes ont été rajoutées à l'aile du bâtiment principal et ont commencé à l'étouffer. Sur certaines façades, au RDC et même au 1^{er} étage, il y a un manque de lumière et de vue vers l'extérieur, ce qui le rend difficilement aménageable en fonctions habitables (bureaux, logements, etc) (voir figure 9) .

1.3. Le programme souhaité

L'hôpital pourrait devenir un nouvel écoquartier, intergénérationnel et aux fonctions multiples: Logements (personne âgées, handicapées, kots étudiants), Crèche, maison de repos. Une partie polyclinique dans l'aile la plus récente serait conservée et des maisons unifamiliales et/ou des petits immeubles à appartements pourraient être construits à la place des parkings actuels (Van Peel, 2023).

(15) P h i l i p p e Pierre, directeur médical et coordinateur général de la clinique dans l'article: Van Peel, H. (2023). Que deviendra le site de la clinique Saint-Pierre à Ottignies après le déménagement à Wavre? Rtbf.

Légende:

- ★ Gare d'Ottignies
- Education
- Social, santé et loisirs
- Commerces et services
- ▲ Lieu de culte



Figure 8 : Plan
d'implantation Hôpital
Saint-Pierre



N 0 3,5 14m

Légendes

-  Parkings
-  Années 1970
-  Années 1990
-  Années 2000
-  Années 2010
-  Années après 2010

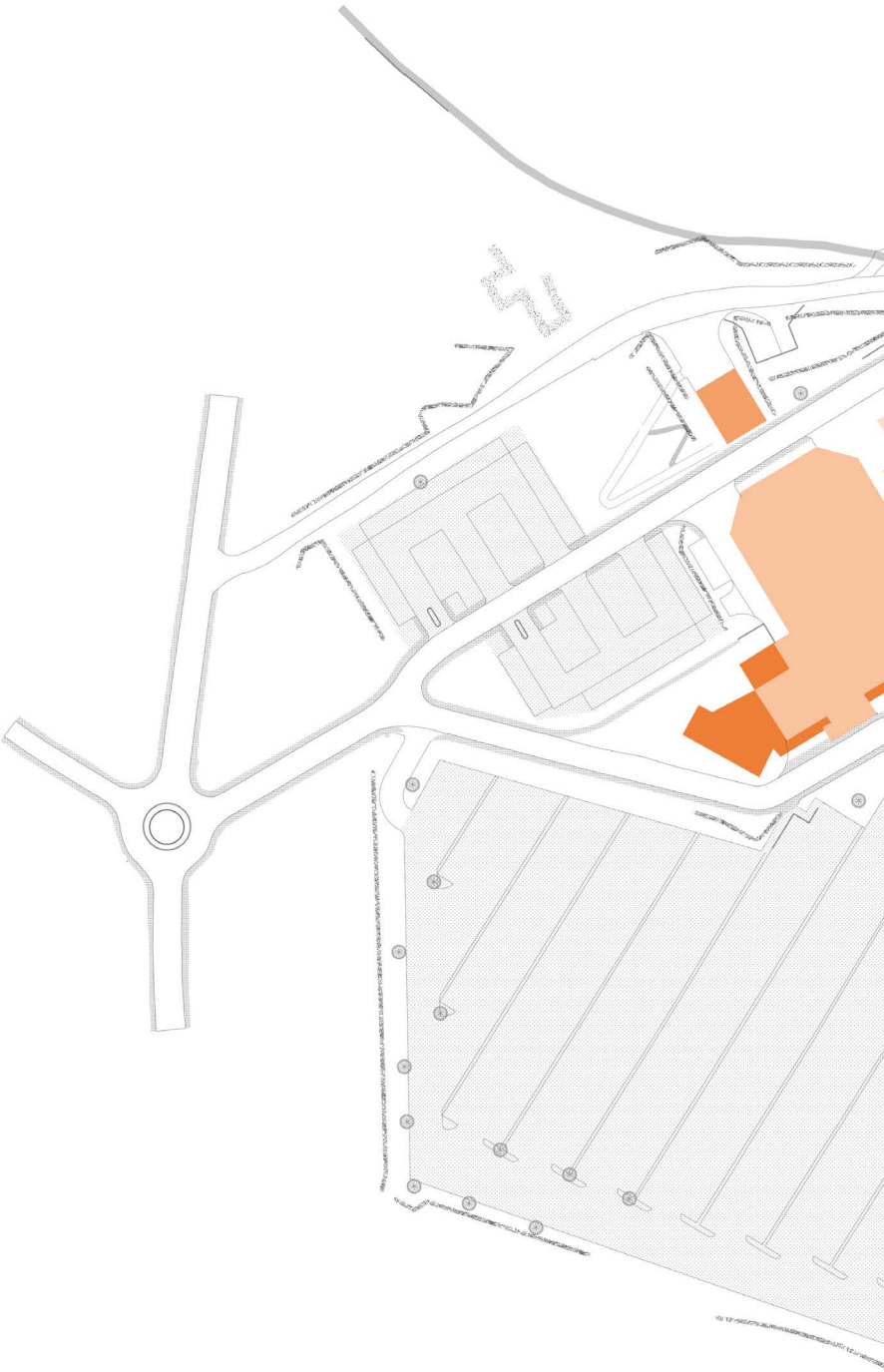


Figure 9 : Plan de construction des différentes ailes



2. RÉHABILITATION DE L'HÔPITAL

2.1. Stratégies de réhabilitation

La première stratégie à adopter lorsqu'on fait face à un site jugé «obsolète», c'est une étude sur le potentiel de réhabilitation du bâti existant. Cependant, plusieurs raisons font que ce n'est pas toujours faisable de réhabiliter dans son ensemble un site. Ici la complexité de l'aménagement des ailes ainsi que la densité du bâti entraînent «l'obligation» de démolir partiellement certaines ailes pour rendre le site habitable. La deuxième stratégie est d'envisager alors la déconstruction sélective du site et la réutilisation d'élément en béton plutôt que la démolition de ceux-ci.

2.2. Dédensification du site

L'extension avant de l'aile 200, l'aile 500 ainsi que l'aile 900 sont entièrement déconstruites pour permettre de dégager les vues pour l'aile H principal. Le 1^{er} étage hors sol de l'aile 600 et 700 est déconstruit et accueillera une grande toiture végétale en continuité avec le niveau de la rue à l'avant. La partie de l'aile 1100 contre l'aile 400 est elle aussi déconstruite pour permettre de libérer de la lumière pour la façade latérale de l'aile 400.

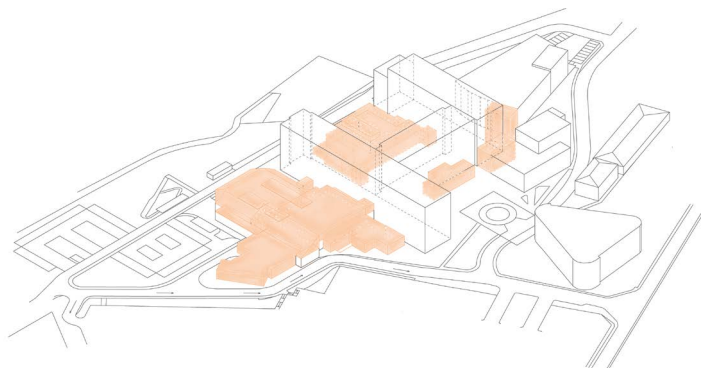


Figure 10: Axonométrie
déconstruction Hôpital
Saint-Pierre

2.3. Réaménagement du site

2.3.1. Socle industriel

Les sous-sols sont réaménagés comme «socle industriel», l'aile

600 accueille une industrie de Mycélium tandis que l'aile 700 sert de stockage temporaire pour les éléments en béton récupérés. L'idée est de mettre des fonctions qui nécessitent peu de lumière dans les demi sous-sols (-1 et -2) et les fonctions habitables (logements, bureaux) en surface pour qu'elles bénéficient d'une belle luminosité.

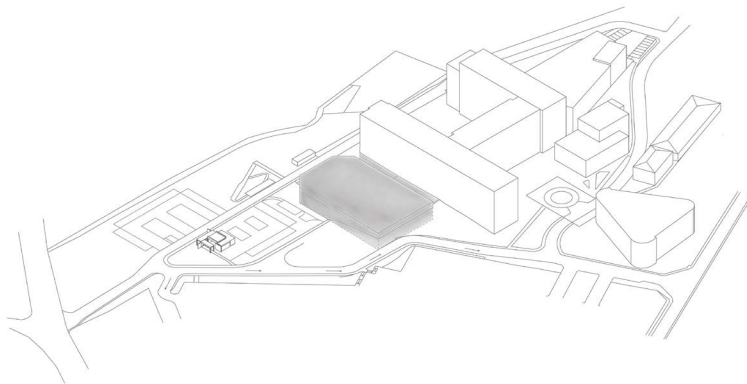


Figure 11: Axonométrie zone industriel

2.3.2. Espaces verts

Le parking étant en partie dallé et en partie macadamé, on peut envisager de perméabiliser facilement les zones dallées pour recréer des espaces verts qualitatifs pour le site.

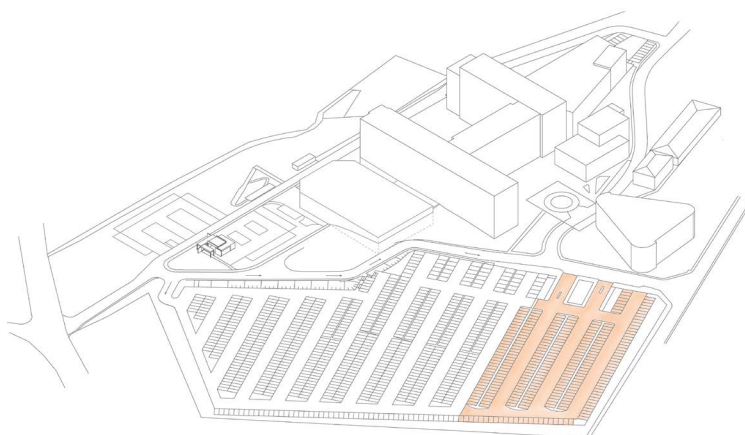


Figure 12: Axonométrie déconstruction partie parking

3. LA LOGISTIQUE DU CHANTIER

Le projet architectural s'attarde surtout sur toute la logistique du chantier allant de la déconstruction à la revente des éléments récupérés en béton. La logistique s'organise d'une part sur les parkings à gauche des ailes 600 et 700 et d'autre part dans l'aile 700. Il y a donc une partie du stockage qui se fait à l'intérieur et une partie à l'extérieur. . L'emplacement de la logistique permet de ne pas encombrer le grand parking qui pourrait servir de futur site de construction. Par ailleurs, l'utilisation des parkings existants limite l'imperméabilisation de sols supplémentaires pour un usage temporaire.

L'objectif du projet est aussi d'expérimenter la remise en œuvre et le réassemblage d'éléments en béton de réemploi et ce, par la construction d'un bâtiment démonstratif qui serait complètement démontable après son utilisation. Il sert temporairement de point de vente et de locaux de sensibilisation au réemploi d'éléments en béton.

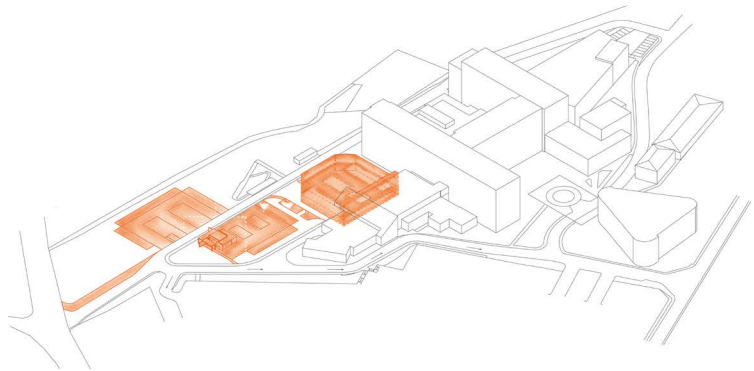


Figure 13: Axonométrie
agencement zones
logistiques

3.1. L'inventaire des éléments en béton

Se référer au chapitre 2 du guide méthodologique

Étant donné le caractère fictif du projet, il n'a pas été possible de réaliser l'ensemble des étapes réelles liées au réemploi d'éléments en béton. L'inventaire et le diagnostic précis des

éléments n'ont donc pas pu être réalisés. Une hypothèse a ainsi été posée : l'ensemble des éléments récupérés sont considérés en bon état, c'est-à-dire que les propriétés mécaniques du béton permettent leur réemploi dans un usage structurel.

Grâce aux plans de coffrage et de ferrailage ainsi qu'aux précieuses informations sur la structure, données par Emmanuel Rigot ¹⁶, un inventaire détaillé a été effectué sur l'extension avant de l'aile 200, le RDC de l'aile 600 et 700 (voir VI. Annexe, 4. Inventaire). Grâce à l'expertise de Yves Du Mortier, on a pu comprendre les différents nœuds constructifs et envisager la manière dont les éléments vont être désolidarisés de la structure initiale.

Les autres ailes à déconstruire ont, quant à elles, fait l'objet d'un inventaire plus global, en raison de la complexité de leur structure et du manque d'informations disponibles à leur sujet.

Les éléments des ailes 200, 600 et 700 ont donc pu être quantifiés précisément tandis que les autres ont été estimées.

3.2. Phasage des flux de matières

- 1) Déconstruction de certaines dalles U du -1 de l'aile 700 pour aménager le lieu de stockage intérieur ainsi que le RDC de l'aile 700 et l'extension avant de l'aile 200. Ces éléments récupérés serviront pour le nouveau bâtiment démonstratif.
- 2) Construction du bâtiment démonstratif, aménagement des zones de stockage intérieur et extérieur et adaptation de la route pour le passage des semi-remorques.
- 3) Déconstruction de la totalité de l'aile 500.

→ A ce stade, par estimation, le lieu de stockage intérieur et extérieur seront complets, ils peuvent accueillir environ 40% des éléments récupérés issus de la déconstruction. Cependant, supposons que le stockage va s'évacuer au fur à mesure soit pour des projets in situ ou ex situ ou bien pour d'autres filières. Les

(16) E m m a n u e l
Rigot: chef de projet
adjoint porjets spécifiques
cellule horizon
Louvranges

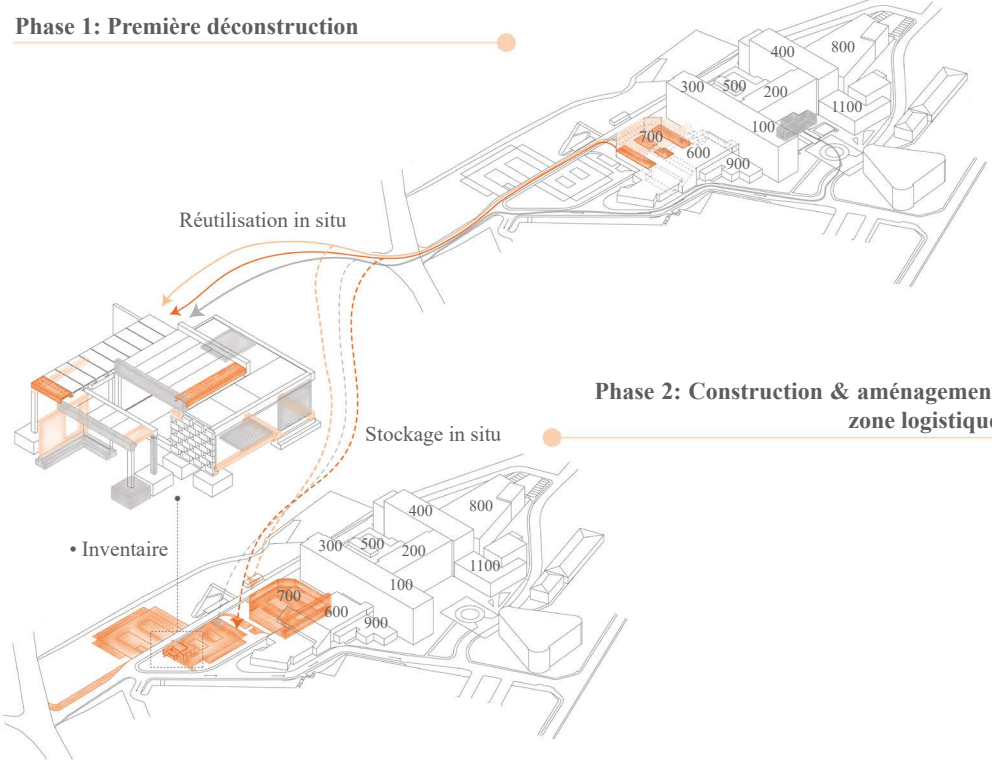
éléments des autres ailes pourront donc de nouveau être stockés.

Déconstruction du RDC de l'aile 600, de la totalité de l'aile 900 et d'une partie de l'aile 1100.

- 4) Stockage évacué, réaménagement des lieux de stockage intérieur et extérieur par l'entreprise d'isolant en Mycélium.

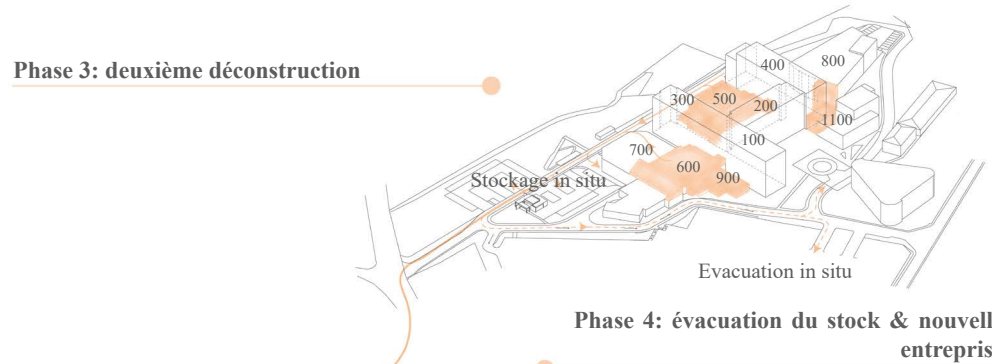
Figure 14: Phases
de déconstruction et
agencement du site &
gestion des flux →

Phase 1: Première déconstruction

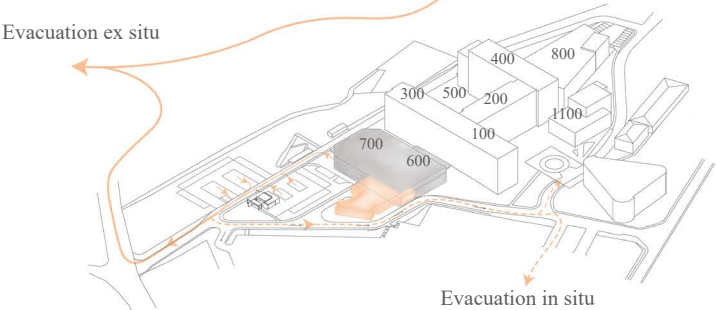


Phase 2: Construction & aménagement zone logistique

Phase 3: deuxième déconstruction



Phase 4: évacuation du stock & nouvelle entreprise



3.3. La collecte et la manutention

Se référer au chapitre 3 du guide méthodologique

Les éléments doivent être découpés dans des dimensions standards permettant ainsi de faciliter la manutention, le transport et la remise en œuvre. Les éléments surfaciques font des dimensions maximales de 2m50¹⁷.

(17) 2m50 permet d'avoir des hauteurs sous plafond suffisantes pour du logement ou des bureaux. De plus, la largeur des camions en Europe est de maximum 2m55.

La manutention a été étudiée pour limiter les déplacements intermédiaires entre la collecte et le stockage. Deux grues permettent donc d'assurer les déplacements de la matière vers une zone tampon sur le parking de stockage extérieur. Ce sont, ensuite, des clarks qui permettent d'acheminer les éléments vers les zones de rangements.

3.4. Le stockage

3.4.1. Lieu de stockage intérieur

Se référer au chapitre 5 du guide méthodologique

Quelques dalles préfabriquées en U sont déconstruites dans l'aile 700, pour permettre de créer des espaces à double hauteur et utiliser la dalle du -1 comme étagère pour ranger les petits éléments de réemploi. Les éléments sont donc disposés sur les dalles du -1 à l'aide des clarks.

Elodie Vautrin a calculé et estimé la résistance des dalles du -2 et du -1: respectivement $2t/m^2$ et $1t/m^2$. Le stockage a donc été organisé en fonction de ses données:

- 1) Privilégier un stockage à plat des dalles pour faciliter la manutention;
- 2) Limiter l'empilement à 6 éléments surfaciques (dalles, voiles) pour garantir la stabilité et la sécurité de l'ensemble (quand le poids le permet);
- 3) Poser la première dalle directement au sol pour répartir au mieux les efforts et réduire les risques de poinçonnement du

Figure 15: Plan zones
logistiques ↓

radier au sol;

- 4) Mettre des appuis en bois de 20 x 20cm entre chaque élément:
2 ou 3 voir 4 appuis en fonction de la taille des éléments;
- 5) Limiter les petits éléments plus légers comme les colonnes, voiles, dallage sur les dalles de l'étage;
- 6) Laisser des travées libres de 6m pour le rayon de braquage des clarks.

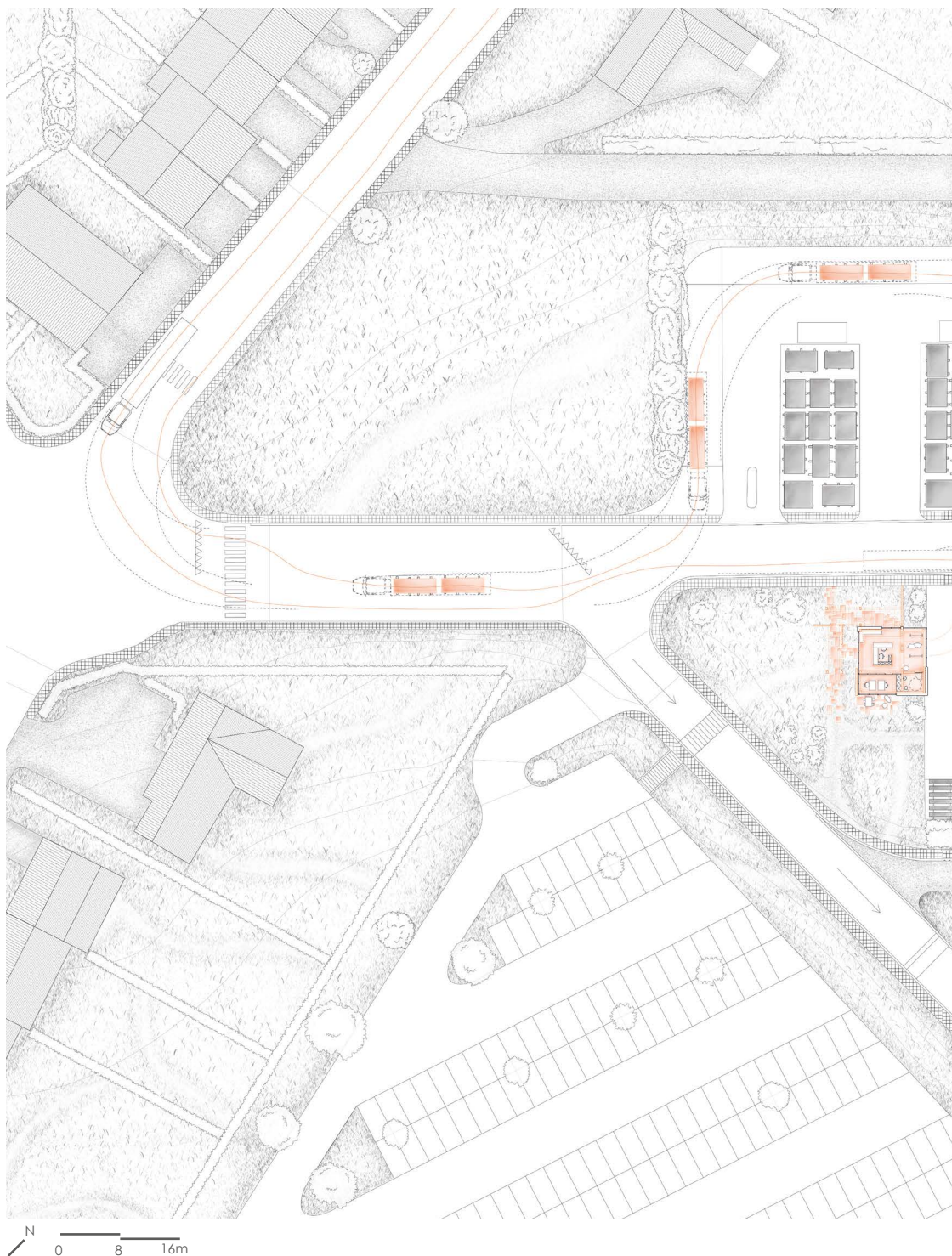
A l'étage, au fond, les espaces accueillent aussi des bureaux pour la logistique, des vestiaires pour les travailleurs, des sanitaires et une kitchenette.

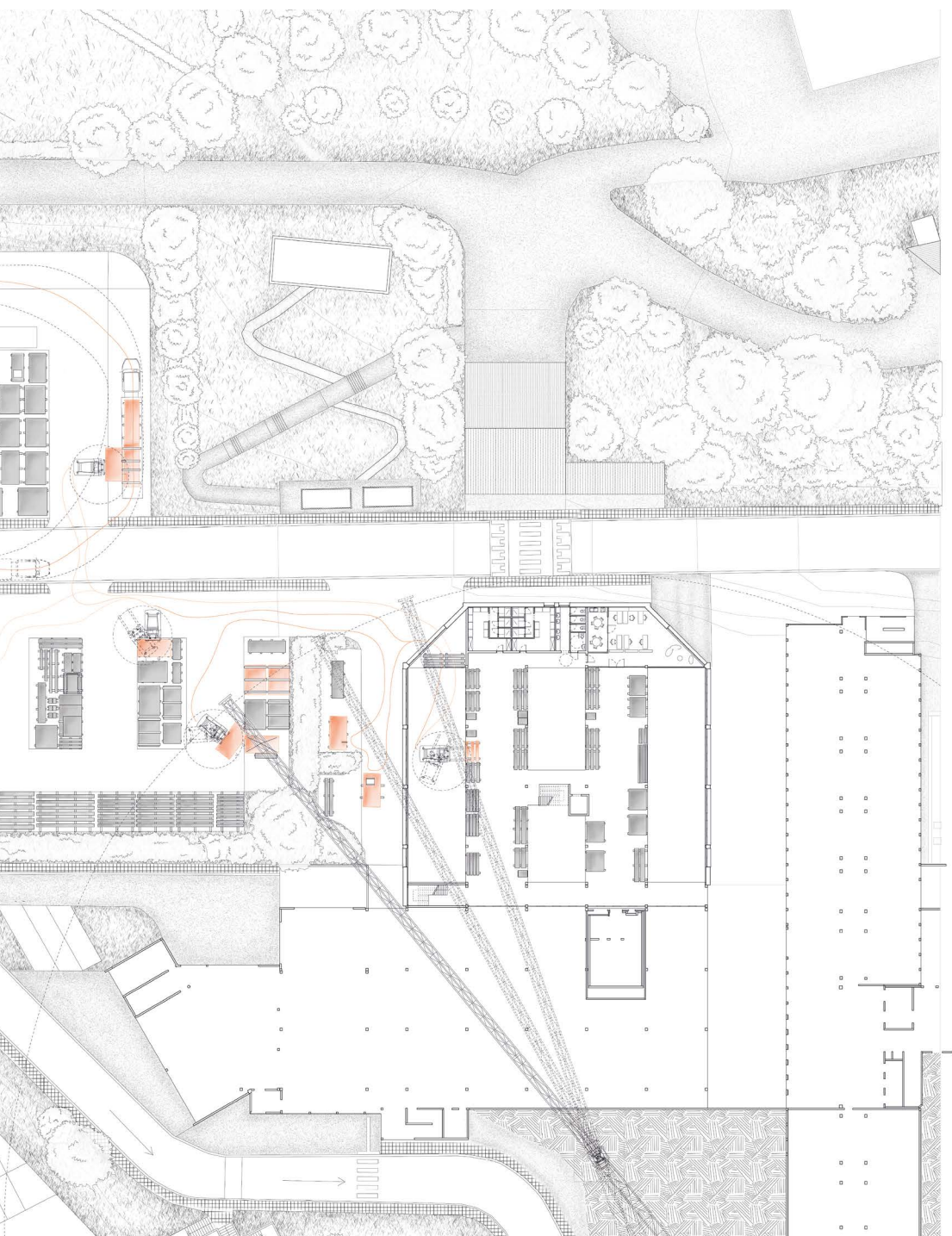
3.4.2. Lieu de stockage extérieur

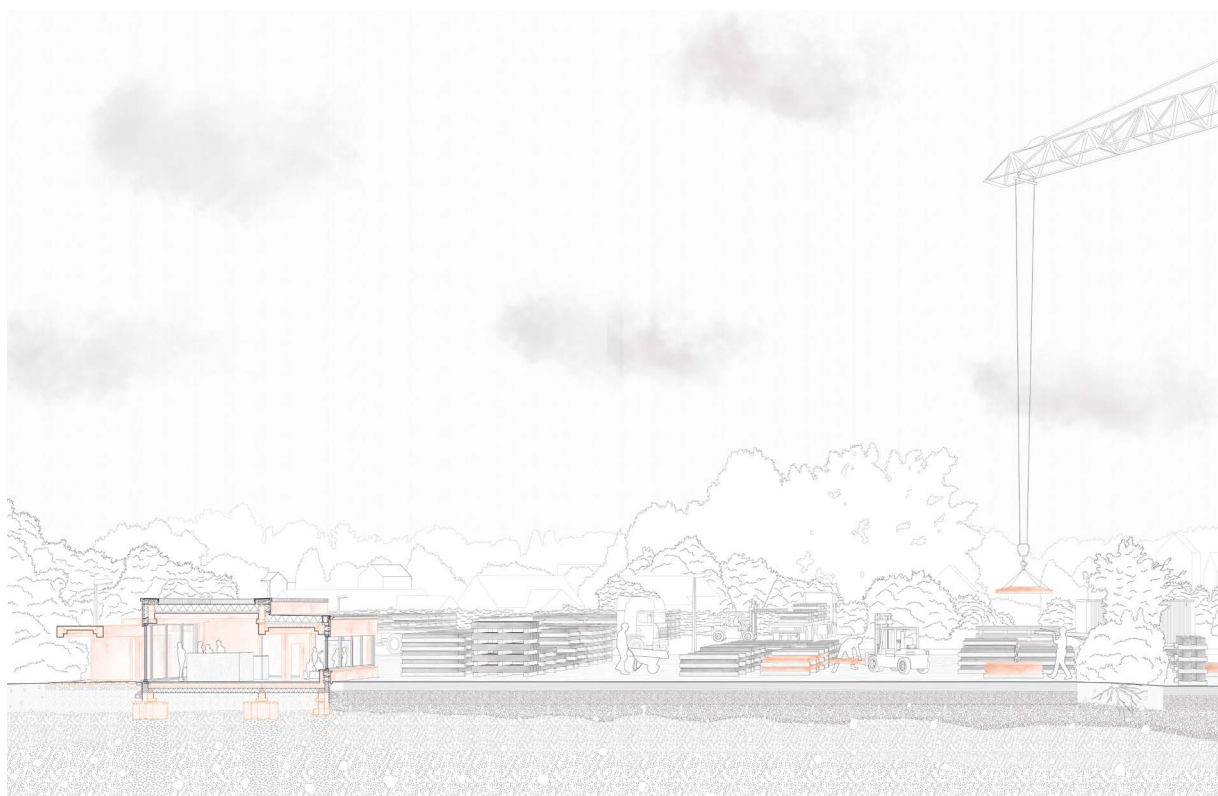
Les plus gros éléments comme les dalles U préfabriquées, les dalles et les voiles sont, quant à eux, stockés sur les parkings à l'extérieur et doivent répondre aux mêmes exigences que le stockage intérieur.

3.5. Le transport

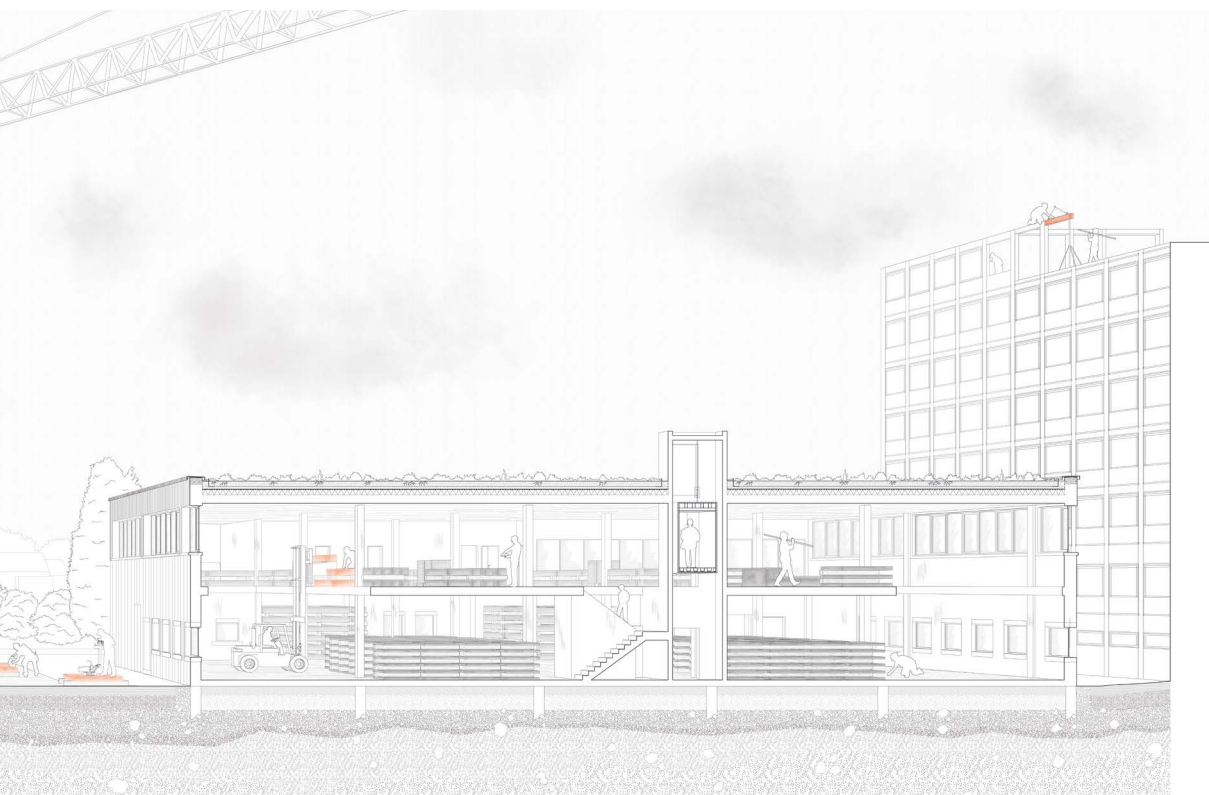
La route menant de l'avenue du Roi Albert au lieu de stockage est agrandie pour permettre aux camions d'atteindre la zone de chargement sur le parking de la logistique. La zone de chargement est organisée de manière à avoir une zone d'attente pour que les clarks chargent les camions et une zone centrale de stockage. Une fois chargés, ils peuvent faire facilement demi-tour et reprendre leur route. Cette zone est la plus stratégique et réduit les travaux d'infrastructures à mettre en place.







0 3,75 7,5m



↑ Figure 16: Coupe étapes du réemploi allant de l'inventaire/ diagnostic des éléments à la remise en œuvre

4. LE BÂTIMENT DÉMONSTRATIF

Le bâtiment sert avant tout à démontrer la remise en œuvre d'éléments en béton de réemploi (voir VI. Annexe, 4. Inventaire)

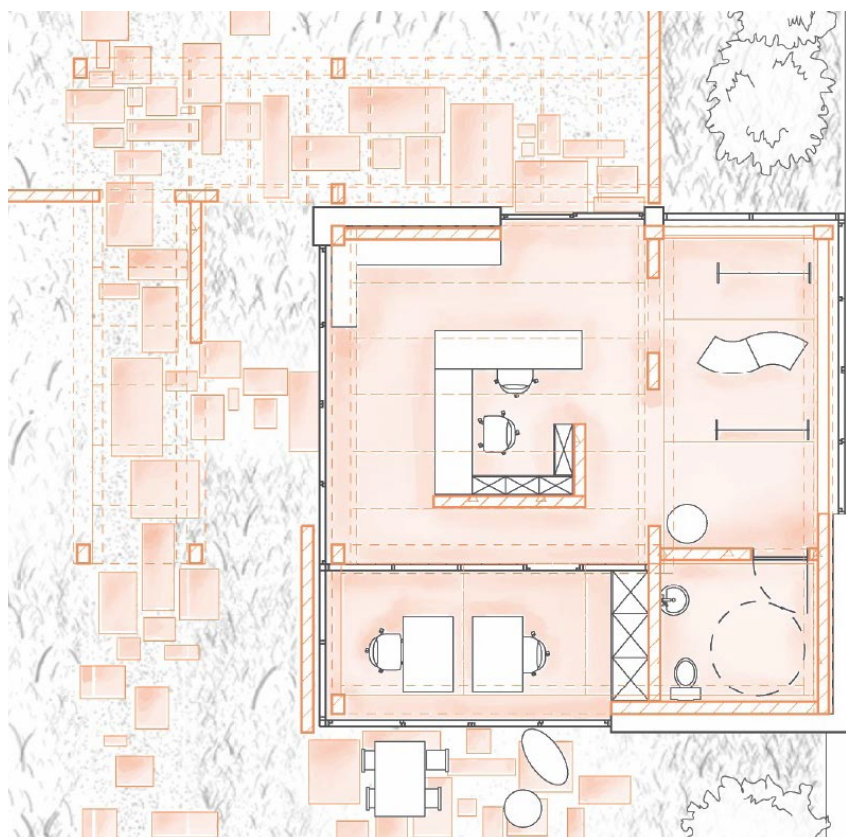
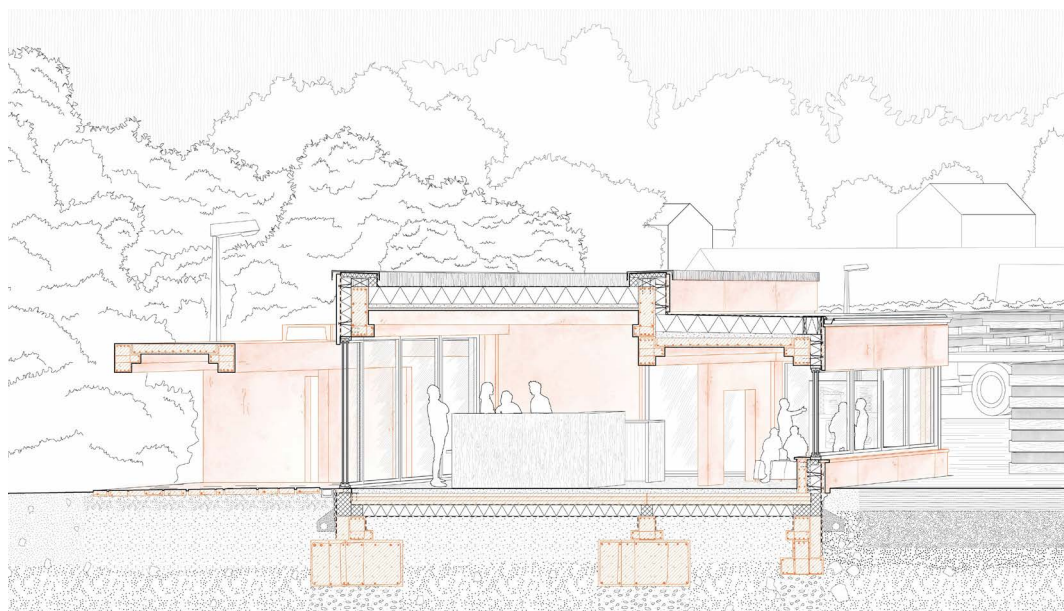
Une partie des espaces accueille le point de vente temporaire pour la logistique, des bureaux et un espace d'exposition pour sensibiliser au réemploi.

4.1. Organisation spatiale

Le bâtiment se compose de deux parties distinctes et désolidarisées l'une de l'autre : une, de plan carré, isolée et étanche, démontre la possibilité de reconstruire comme du neuf en utilisant des matériaux de réemploi ; l'autre, plus ouverte, fait office de portique extérieur et met en valeur la réintégration d'éléments en béton brut. Ce bâtiment marque donc l'entrée de la zone logistique et invite les utilisateurs à venir observer les éléments remis en œuvre dans une structure simple.

Dans la partie isolée et étanche, les fonctions sont agencées autour d'un espace central de plan carré accueillant l'accueil du point de vente. Autour de cet espace viennent s'articuler respectivement; une zone d'exposition sensibilisant aux étapes de construction/ déconstruction du réemploi d'éléments en béton, les sanitaires et des bureaux pour le personnel.

Figure 17: Coupe et plan bâtiment démonstratif →



0 1 2m

4.2. La remise en œuvre

Se référer au chapitre 6 du guide méthodologique pour plus de détails sur les assemblages.

Le bâtiment étant temporaire et démonstratif, le processus de construction est exploité au maximum, il est donc démontable et permet donc une réversibilité totale des matériaux. Les assemblages ont été étudiés avec l'aide du spécialiste, Yves Du Mortier et permettent de réassembler/ désassembler les éléments en béton comme des pièces préfabriqués.

4.2.1. Types d'assemblage

On peut classer les assemblages en trois catégories:

- La pose: certains éléments soumis uniquement à la compression peuvent juste être déposés sur le support.
- Les assemblages mécaniques: équerres, plats métalliques ancrés soit avec des boulons expansibles, soit avec des tiges filetées/ goujons ancrés préalablement dans l'élément par ancrage chimique, soit par des tiges filetées mais traversant complètement l'élément et boulonnées de part et d'autre de celui-ci.

Parfois, les efforts sont tellement importants que ces deux types d'assemblages ne suffisent pas à reprendre les contraintes structurelles. On peut alors faire recours aux:

- Assemblages chimiques: soit par ancrage de tiges filetées, soit par ancrage de goujons scellés ensuite à l'autre élément, soit par raboutage d'armatures (manchons à rajouter sur l'armature existante et ajout d'une nouvelle armature pour refaire des nœuds constructifs coulés et solidarisés).

4.2.2. Assemblage et esthétique

La partie principale du bâtiment étant isolée par l'extérieur, les systèmes de fixation des éléments ne seront donc pas visibles et peuvent donc être réfléchis de manière simple. Ce sont donc

principalement des plats métalliques, des équerres ou bien des goudjons d'ancrage qui resolidariseront les éléments entre eux.

La partie du portique extérieur, quant à elle, n'est pas isolée. Les éléments en béton étant visible, le système de fixation a été réfléchi pour être camouflé. En effet, les systèmes d'assemblage sont soit placés à l'intérieur des éléments ou entre les éléments quand il s'agit de plats ou équerres métalliques, soit des système de goudjons d'ancrage, de boulons expansibles et de tiges filetées boulonnées ont été employés.

4.2.3. Contreventement

Un point important à ne pas négliger est que le bâtiment doit être contreventé. Les éléments en béton étant désolidarisés les uns des autres, les systèmes de fixation devraient être surdimensionnés pour reprendre de tels efforts dans les colonnes. Des câbles tendus ou des voiles sont donc une solution pour reprendre ses efforts. Dans ce bâtiment, des voiles ont donc été , avec l'aide d'un ingénieur, placées à des endroits stratégiques pour stabiliser toute la structure.

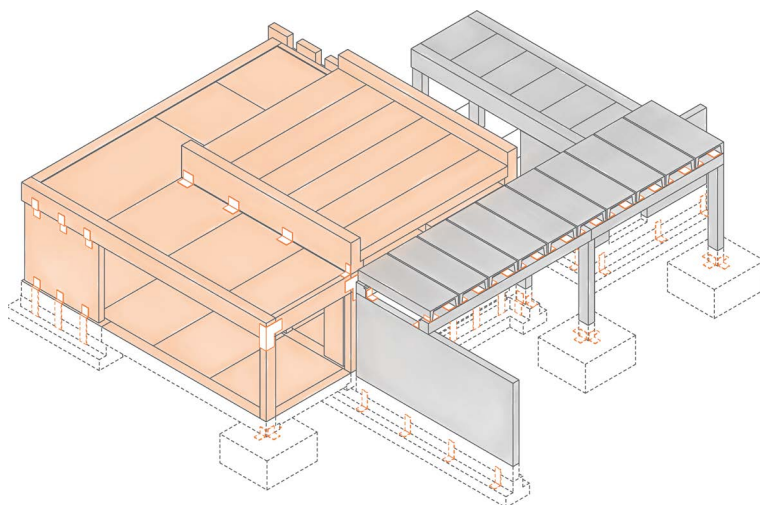
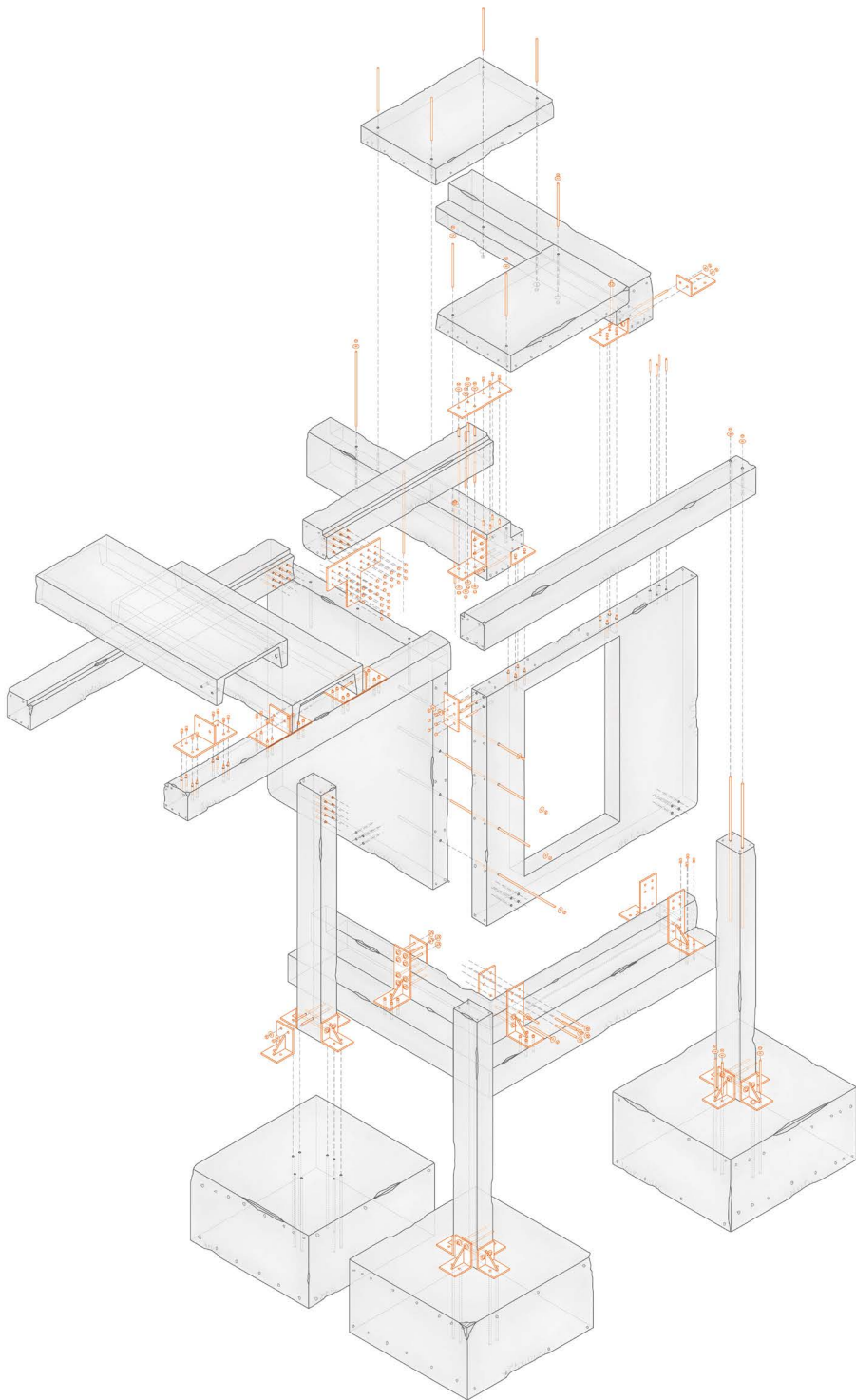


Figure 18: Schéma bâtiment démonstratif. Orange: espaces isolés par l'extérieur / Gris: portique extérieur avec éléments en béton visible



4.3. Empreinte carbone

Un inventaire précis des éléments réutilisés permet d'avoir une estimation du pourcentage de matières issus de la déconstruction. Approximativement 66,8 m³ d'éléments en béton récupérés sont mis en œuvre dans le bâtiment démonstratif, ce qui équivaut à 107 tonnes. L'équivalent neuf de ce bâtiment aurait émis, environ 23 tonnes de CO₂.

Aucune estimation n'a pu encore être faite quant à l'émission de CO₂ d'un 1m³ de béton issu du réemploi. Les étapes ont beaucoup trop de facteurs variables pour établir une estimation fixe pour tous les cas d'études: distances du bâtiment récepteur par rapport au donneur, difficulté de déconstruction, réparation des éléments, etc. Cependant, les études de 85 exemples de projet de réemploi d'éléments en béton ont fait état d'une réduction drastique des émissions de CO₂ par rapport aux techniques conventionnelles, avec des exemples quantifiés de plus de 80% et 75%, respectivement (Küpfer & al, 2023).

Figure 19: Détail système
d'attache partie du
←portique extérieur

5. UNE LOGISTIQUE RIGOUREUSE

Le projet architectural met en évidence l'importance d'une gestion rigoureuse de la logistique sur un chantier de déconstruction. Il illustre également la manière dont un site déconstruit peut être temporairement réaménagé pour servir de zone de stockage, notamment lorsque le bâtiment récepteur n'est pas immédiatement disponible. Cela implique une organisation logistique précise ainsi que l'ajout de certaines étapes. Cet exemple démontre pourtant la faisabilité de ce mode de gestion des flux, qui pourrait être répliquée sur d'autres chantiers de déconstruction. Voici quelques points d'attention à avoir lors de l'organisation de la logistique:

- Réaliser un inventaire précis pour pouvoir quantifier la matière à stocker
- Trier les éléments par taille: voiles/ dalles > poutre/ colonne > pavés
- En cas de stockage en intérieur, vérifier la capacité portante maximale des dalles
- Évaluer la capacité de stockage des espaces pour déterminer les éléments à évacuer rapidement vers l'extérieur
- Anticiper le positionnement et les déplacements (rayon de braquage) des engins de chantier : grue, camions de transport, clarks, pour limiter les déplacements intermédiaires des flux de matières
- Définir des zones de stockage extérieur pour les éléments sans que ça entrave l'organisation et la logistique du futur projet
- Réfléchir à la réaffectation des espaces de stockage, une fois les éléments évacués

V. CONCLUSION

Le réemploi d'éléments en béton est une pratique pionnière dans le secteur de la construction, mais qui tend à se développer. En intégrant cette technique dans un projet concret, on se rend rapidement compte de la complexité logistique qu'elle implique : inventaire, collecte, manutention, stockage, organisation du chantier, remise en œuvre des éléments. Autant d'étapes qui nécessitent une planification rigoureuse. L'objectif premier de ce travail a donc été d'élaborer un outil méthodologique à destination des architectes pour les accompagner et les guider au mieux tout au long de ce processus et leur permettre de maîtriser chaque étape du réemploi.

Le deuxième objectif était d'explorer concrètement le potentiel du réemploi d'éléments en béton dans le cadre d'un projet architectural. À travers cette expérimentation, plusieurs constats et enseignements ont pu émerger.

Tout d'abord, il est important de souligner les limites de cette étude. Ne disposant pas de tous les outils techniques, de l'expertise nécessaire et le site étant encore exploité actuellement, vérifier l'état des éléments n'a donc pas été possible. De nombreuses hypothèses ont donc été posées, notamment pour l'inventaire, les scénarios de déconstruction ou l'évaluation précise des éléments réemployables, limitant parfois la finesse de l'analyse. Cependant, les grandes étapes du processus et les principaux défis à relever ont quand même pu être explorés.

Ce travail a aussi mis en évidence un aspect fondamental : le réemploi transforme le rapport à la conception architecturale. Il ne s'agit plus de créer à partir d'un panel infini de matériaux neufs, mais de composer avec des éléments existants non-standardisés. Cela suppose une autre forme de créativité, à la fois architecturale et technique, par exemple en ce qui concerne les systèmes d'assemblage.

Par ailleurs, ce projet a permis de constater que le béton est un matériau particulièrement propice au réemploi. Une fois désolidarisé de sa structure d'origine, il devient un élément

préfabriquée où la remise en œuvre, c'est-à-dire resolidariser les éléments entre eux, n'est plus que la seule difficulté restante. Cependant, la remise en œuvre offre une grande liberté de conception : les échanges avec des spécialistes du secteur ont permis de confirmer qu'il est souvent envisageable de réaliser des assemblages, sur mesure mais adaptés aux spécificités de chaque élément récupéré. Cela montre que les contraintes ne relèvent pas tant de la technique que de la logistique et de l'organisation. Le véritable enjeu réside dans l'anticipation en amont, la gestion rigoureuse du chantier, et surtout dans la capacité d'adaptation de l'architecte face aux ressources disponibles, en rupture avec la conception habituelle, fondée sur des matériaux standardisés.

En conclusion, ce travail a démontré que le réemploi d'éléments en béton est une nécessité aujourd'hui pour ouvrir la voie vers une architecture plus responsable et plus ancrée dans les ressources déjà disponibles, soucieuse de limiter son empreinte environnementale. Cette technique est non seulement possible, mais aussi riche de potentiel. Le réemploi d'éléments en béton demande cependant un changement de posture de l'architecte, davantage tourné vers l'observation, l'adaptation et la planification, par rapport à une conception architecturale partant de rien. Ce changement se fera progressivement et plus ces techniques de construction seront connues, plus elles seront adoptées et leurs enjeux facilement appréhendés et gérés.

VI. RÉFÉRENCES

ARTE. (2024). Serons-nous bientôt à court de sable ? Le Dessous des cartes. <https://www.arte.tv/fr/videos/109818-005-A/serons-nous-bientot-a-court-de-sable/>

Bastien-Masse, M., Küpfer, C., & Fivet, C. (2024). A concrete answer for circular construction: three prototypes reusing saw-cut elements. *The institution of Structural Engineers*, 102(4), 32-37.

Bastien-Masse, M., Küpfer, C., & Fivet, C. (2023). Reuse of concrete components in new construction projects: Critical review of 77 circular precedents. *Cleaner Production*, 383, Article 135235.

Bellastock. (2021). Pavé et dalle en béton. Partenariat Interreg FCRBE

Bellastock. (2021). Introduction au réemploi des éléments en béton de ciment. Partenariat Interreg FCRBE

Bellastock. (2021). Voile en béton. Partenariat Interreg FCRBE

Bellastock. (2021). Moellon en béton. Partenariat Interreg FCRBE

Belli-Riz, P., Benoit, J., Fabiani, S., Ghyoot, M., Guichard, C., Huygen, J.-M., de Guillebon, M., & Topalov, H. (2022). Réemploi, Architecture et construction: Méthodes, ressources, conception, mise en oeuvre (R. Berthaut, Ed. Le Moniteur ed.). de Gramont, C.

Bougrain, F. (2023). L'assurance et le réemploi: enseignements des études de cas et perspectives. FCRBE.

Brussels environnement. (2023). L'économie circulaire dans la construction et la rénovation <https://environnement.brussels/pro/gestion-environnementale/renover-et-construire/leconomie-circulaire-dans-la-construction-et-la-renovation>

Buildwise. (2023). Protocole de déconstruction pour la Région de Bruxelles-Capitale. bruxelles environnement.

Commission SIA 262. (2013). Construction en béton. In (pp. 102). SIA: Société suisse des ingénieurs et architectes.

Commune de Wavre. (2021). Réunion d'information préalable: projet Louvranges, Clinique Saint-Pierre

de Laage, M. (2022). Local Environnement: l'écoconstruction comme culture. espazium. <https://www.espazium.ch/fr/actualites/local-environnement-lecoconstruction-comme-culture>

Etudiants epfl. (2023). Le Pavillon rebuiLT. rebuilt. <https://rebuilt.cargo.site/>

FEHR group. (2023). Le béton: bien plus qu'une simple matière. FEHR. <https://fehrgroup.com/le-beton-bien-plus-quune-simple-matiere/>

FirstBéton. Quelle est la durée de vie du béton. <https://www.firstbeton.com/actualites/quelle-est-la-duree-de-vie-du-beton>

Galle, W., Cambier, C., De Temmerman, N., & Elsen, S. (2019). Building a Circular Economy. Buildings, a Dynamic Environment. In: Vrije Universiteit Brussel - VUB Architectural Engineering.

Gorgolewski, M., & Morettin, L. (2008). Designing with reused building components: Some challenges. Building Research and Information - BUILDING REINFORM, 36, 175-188. <https://doi.org/10.1080/09613210701559499>

Ghyoot, M. Rotor asbl. (2017). Objectif réemploi: Pistes d'action pour développer le secteur du réemploi des éléments de construction en Région de Bruxelles-Capitale.

Guide du bâtiment durable. (2013). Eléments de structure en béton. Guide du bâtiment durable. <https://guidebatimentdurable.brussels/elements-structure-beton>

Guide du bâtiment durable. (2024). Récupération et réemploi des matériaux de construction. Guide du bâtiment durable. <https://guidebatimentdurable.brussels/recuperation-reemploi-materiaux-construction>

Habert, G., Miller, S. A., John, V. M., Provis, J. L., Favier, A., Horvath, A., & Scrivener, K. L. (2020). Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. Nature Reviews Earth & Environment, 1(11), 559-573. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>

Hermet, B. (2025). Béton recyclé dans le béton, où en est-on? . <https://bybeton.fr/beton-recycle-dans-le-beton-ou-en-est-on?cmplz-force-reload=1739037556062>

IEA. (2023). Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach. IEA. Paris. <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway->

to-keep-the-15-0c-goal-in-reach. Licence: CC BY 4.0

Küpfer, C., & Fivet, C. (2023). Panorama of approaches to reuse concrete pieces: identification and critical comparison. 8th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering. Journal of Physics.

Marinković, S., Radonjanin, V., Malešev, M., & Ignjatović, I. (2010). Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. Waste Management, 30(11), 2255-2264. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.012>

Millan, T., & Phommaly, S. (2017). Guide méthodologique et technique pour le réemploi de béton en revêtements de sol (REPAR 2: Le réemploi passerelle entre architecture et industrie, Issue.

Monteiro, P. J. M., Miller, S. A., & Horvath, A. (2017). Towards sustainable concrete. Nature Materials, 16(7), 698-699. <https://doi.org/10.1038/nmat4930>

Objectif Zero. (2024). Récupération et réemploi dans les projets de construction: se fixer des objectifs et les atteindre. In F. Interreg North-West Europe & Renolution (Eds.): Objectif Zéro asbl.

Ployaert, C. (2010). Limiter la fissuration: condition indispensable à la durabilité des bétons. Febelcem.

Prat, E. (2016). Guide méthodologique et technique pour le réemploi de béton en murs (REPAR 2: Le réemploi passerelle entre architecture et industrie, Issue.

Recreate. (2021). Reusing precast concrete for a circular economy. <https://recreate-project.eu/>

Renolution. La Rénolution bruxelloise. Renolution.brussels. <https://renolution.brussels/fr/la-renolution-bruxelloise>

SALIM, W. *Entretien personnel*. Réalisé par Emilie Du Mortier. Ixelles, 1 novembre 2024.

Société coopérative 2401. (...). Guide méthodologique: Eléments structurels en béton.

Société coopérative 2401. (2023). Réemploi structurel du béton: la déconstruction d'un chantier donne naissance à quatre projets. <https://2401.ch/reemploi-structurel-du-beton-la-deconstruction-dun-chantier-pilote-donne-naissance-a-quatre-projets/>

Stein, V. (2023). MixCity à Renens/VD: plus qu'un lieu d'activité, un catalyseur d'innovation. le Journal de l'Immobilier. <https://jim.media/articles-jim/articles-de-une/mixcity-a-renens-vd-plus-quun-lieu-dactivite-un-catalyseur-dinnovation/>

Van Peel, H. (2023). Que deviendra le site de la clinique Saint-Pierre à Ottignies après le déménagement à Wavre? . <https://www.rtb.be/article/que-deviendra-le-site-de-la-clinique-saint-pierre-a-ottignies-apres-le-demenagement-a-wavre-11169324>

Valbø, S. (2023). Investigating the Reuse of Cast-inPlace Reinforced Concrete in Load Bearing Structures in Norway NTNU].

Varini, L. (2023). La démolition d'un bâtiment à Renens donne naissance à quatre projets. batimag. <https://www.batimag.ch/monde-de-la-construction/un-chantier-de-demolition-a-renens-explore-quatre-pistes-de-reemploi-du-beton-6046>

Figure 2: Évolution de la résistance à la compression en fonction du temps. Commission SIA 262. (2013). Construction en béton. In (pp. 102). SIA: Société suisse des ingénieurs et architectes.

Figure 3: Coefficients pour la détermination du coefficient de fluage du béton. Commission SIA 262. (2013). Construction en béton. In (pp. 102). SIA: Société suisse des ingénieurs et architectes.

Figure 4: Coefficients (valeurs indicatives) pour le calcul du retrait spécifique de dessiccation du béton. Commission SIA 262. (2013). Construction en béton. In (pp. 102). SIA: Société suisse des ingénieurs et architectes.

Figure 5: Schéma de principe présentant les hypothèses de solutions de réemploi à partir d'un gisement type. Benoit J, Saurel G, & al, REPAR#2 Le réemploi passerelle entre architecture et industrie, mars 2018, p108.

Figure 6: Les étapes de la dalle au produit, cas de récupération d'une dalle de compression. Benoit J, Saurel G, & al, REPAR#2 Le réemploi passerelle entre architecture et industrie, mars 2018, p108.

- **Reproduction d'illustrations**

Tableau 1, 2, 3 & 4: illustrations issues de:

Rotor, CSTB, Bruxelles environnement, TU Delft, LIST, Utrecht, & Bellastock. (2023). 32 detailed project sheets: projects info, reuse rates and reused elements.

Rotor, CSTB, Bruxelles environnement, TU Delft, LIST, Utrecht, & Bellastock. (2023). Analyse a posteriori de 32 projets de construction et de rénovation.

- **Réalisations personnelles**

Figure 1; 7-19: schémas, plans et coupes

VII. ANNEXES

1. **DÉFINITIONS ET TERMINOLOGIE**

- **Le réemploi**

« Le réemploi représente toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui ne sont pas des déchets sont utilisés de nouveau sans modification chimique ou physique de la matière. Les matériaux de réemploi sont en effet démontés et parfois un simple nettoyage est nécessaire avant leur remise en œuvre. Le réemploi permet ainsi de prolonger la durée de vie des matériaux en leur offrant plusieurs utilisations ». (Objectif Zero, 2024)

- **Stock**

« C'est donc l'ensemble des matériaux qui constituent les bâtiments, les voiries, les espaces publics, etc. Il s'agit des aménagements préexistants qui font l'objet de projets de transformations. Cela correspond à ce qui ne bouge pas, ce qui reste sur site ». (Objectif Zero, 2024)

- **Flux sortants et taux de récupération**

« Quelle que soit leur nature, les travaux envisagés vont occasionner des mouvements de matière : les flux.

Les flux sortants ou flux out : matières sortantes, c'est-à-dire tout ce qu'on évacue du bâtiment d'origine. Au sein de ces flux, certains éléments peuvent généralement être récupérés en vue d'être réemployés ultérieurement. On peut mesurer ce que représente cette part de matériaux récupérés par rapport à l'ensemble des éléments évacués : on parle alors du taux de récupération.

Le taux de récupération correspond à la fraction des matériaux et éléments récupérés en vue d'être réemployés par rapport à l'ensemble des matériaux sortants du chantier. Ce taux s'exprime en pourcentages. Que ce soit sur le même site ou sur un autre chantier et qu'ils passent ou non par l'intermédiaire d'une entreprise professionnelle de récupération. Dans le taux de récupération, sont donc inclus des éléments démontés dans le bâtiment d'origine qui seront remis en œuvre lors des nouveaux travaux : ceci correspond au cas particulier du réemploi sur site. » (Objectif Zero, 2024)

- **Taux de préservation**

« Le taux de préservation correspond à la fraction du bâtiment maintenue

par rapport au bâtiment d'origine exprimée en pourcentages. »(Objectif Zero, 2024)

- **Flux entrants et taux de réemploi**

« Les travaux de rénovation et de construction occasionnent également un flux de matières entrantes : les flux entrants ou flux in. Cela correspond à l'ensemble des matières qui sont nécessaires à la réalisation des travaux. Une partie de celles-ci peuvent provenir des filières de production de matériaux neufs mais une partie peut aussi contenir des matériaux récupérés (qu'ils aient été récupérés dans le bâtiment d'origine ou ailleurs).

Le taux de réemploi est la proportion de matériaux de réemploi remis en œuvre par rapport à l'ensemble des matériaux mis en œuvre (flux entrant) exprimée en pourcentages ».(Objectif Zero, 2024)

- **Le bâtiment donneur et receveur**

Le bâtiment donneur est celui qui fournit les matériaux de réemploi, c'est donc celui qui est démonté.

Le bâtiment receveur est celui qui reçoit les matériaux de réemploi du bâtiment démonté, donc du donneur. Un bâtiment donneur peut aussi être le receveur.

- **Les différents lieux de réemploi : in-situ et ex-situ**

On parle de réemploi sur site ou in-situ quand les éléments issus d'un bâtiment sont remis en œuvre dans un nouveau bâtiment mais sur le même site. (Rotor asbl, 2017). A l'inverse, on parle de réemploi ex-situ lorsque les éléments issus d'un bâtiment sont remis en œuvre dans un nouveau bâtiment mais sur un site différent.

Parfois, les éléments issus d'un bâtiment doivent parfois passer par des revendeurs professionnels qui vont donc acheter et vendre les matériaux réemployables. Ils passent donc par une phase de stockage et parfois par une phase de réparation avant d'être réemployés.

2. FICHE-D'IDENTITÉ PROJETS ARCHITECTURAUX

Re:Crete: passerelle



Equipe de conception

Equipe de l'EPFL, SXL (structural Xploration Lab)

Projet

Passerelle en arc segmentaire post-tendu, d'une portée de 10m

Eléments en béton existant → élément en béton réemployé

Mur de 20cm → 25 Bloc de béton de 120cm x 40cm

Efforts mécaniques repris par les éléments en béton

Les armatures ne servent plus, récupération de la résistance à la compression du béton

Assemblage

Par câbles de post-tension

Joints

Mortier entre éléments en béton

Durabilité

Gaines des câbles injectées de mortier et joints imperméabilisés à l'époxy

Autres éléments réemployés

Rambarde avec tubes métalliques issu du réemploi

Analyse du cycle de vie (AVC)

PRP¹ généré < de 63% à celui d'une arche similaire en béton monolithique
recyclé coulé sur place

PRP généré < de 74% à celui d'une arche fabriquée à partir de poutres en acier

PRP généré presque = à celui d'une arche fabriquée à partir de poutres en bois
lamellé-collé

1 PRP: potentiel de réchauffement de la planète

Flo:Re: plancher de bâtiment



Equipe de conception

Equipe de l'EPFL, SXL (structural Xploration Lab)

Projet

Démontrer la faisabilité de la construction d'une structure de plancher porteuse à très faible émission carbone juste en utilisant des éléments récupérés

Eléments en béton existant → élément en béton réemployé

Dalle issue d'un immeuble de bureau des années 60 → dalle en béton armé sciée de 2,5m x 3m

Acier issu d'un hall industriel des années 70 → 3 poutres en acier à larges ailes en H réutilisées de 5m de long

Efforts mécaniques repris par les éléments en béton

Réutilisation des armatures du béton pour reprendre la flexion

Passage d'un système statique à un système où la dalle est simplement soutenue, les éléments ont donc des dimensions max de 3m pour reprendre la flexion (soit 3/4 de la portée de la dalle donneur)

Tests préliminaires

Les tests ont été effectués dans le hall du prototypage car planning pour la déconstruction trop serrée → normalement doit s'effectuer avant la déconstruction

Assemblages

Transfert des charges latérales au système de contreventement vertical par friction par des tiges filetées précontraintes boulonnées dans chaque coin des éléments de la dalle

→ facile à assembler et démonter

Analyse du cycle de vie (AVC)

80% de réduction PRP par rapport à une dalle en béton armé de 22cm si bâtiment récepteur à 140km du donneur → 15 kgCO₂/m²

92% de réduction si à 20km → 6 kgCO₂/m²

94% de réduction si le bâtiment récepteur = site du bâtiment donneur → 5 kgCO₂/m²

Stade des Arbères



Equipe de conception

Bureau d'architecture FAZ architects

Situation

Meyrin en Suisse

Projet

Locaux d'exploitation pour le stade

Eléments en béton existant → élément en béton réemployé

Dalle → Dallages pour revêtement de sol et dalles du RDC

Surplus des toupies des camions malaxeurs → Mur d'enceinte de la cour

Matériaux biosourcés

Laine de bois/ liège/ sciure de bois

Autres éléments de réemploi

Lavabos/ Eviers/ Robinets/ Chaises et tables

Matériaux locaux

Epicea massif suisse

Points d'attention

Pour limiter des découpes des éléments en béton et résoudre le calepinage entre les travées, ils jouent sur la tolérance des interstices des joints

Le clos Saint-Lazare



Equipe de conception

Bellastock

Situation

à Stains

Projet

Reconstruire du lien social autour d'un chantier ouvert et faire acte de pédagogie en expliquant les vertus du réemploi

Eléments en béton existant → élément en béton réemployé

Fragments en béton → paver une allée + muret en béton

Dalles → blocs en béton pour un module

Déconstruction bâtiment en béton armé



Acteurs impliqués

Steiner: entreprise générale

2401: coordinateur réemploi

Cand-Landi: Démolition et déconstruction

Marti: Travaux spéciaux

Mauroux: sciage et percements

Situation

Avenue des Baumettes, 21 à Renens (Suisse)

Construit en 1974

Bâtiment

3 niveaux + 1 attique

Épaisseur dalle: 22 à 25cm

Trame structurelle: 8m x 7m

Dalle champignon en béton armé/ pilier en béton armé de 40 x 40cm

Projets alimentés

RebuiLT

Projet Boulodrome

Projet ConCRETE pour MixCity

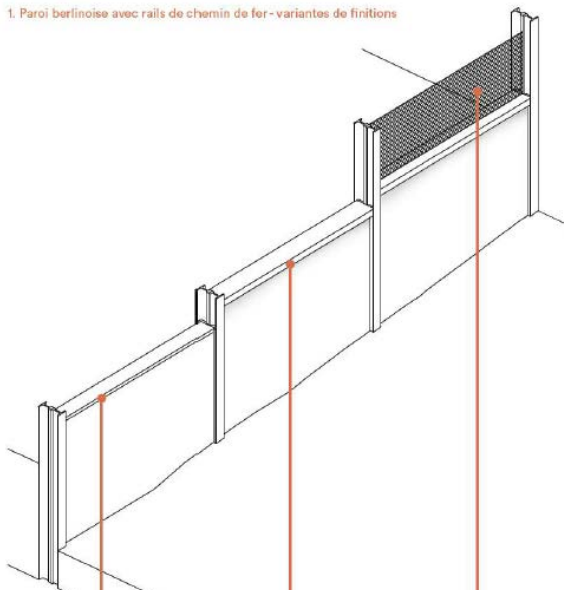
Projet ConCRETE

VSL: passerelle à voussoirs précontraints

Canton du Valais: passerelle suspendue

Projet ConCRETE: pour le projet MixCity

1. Paroi berlinoise avec rails de chemin de fer - variantes de finitions



Equipe de conception

Les étudiants de la Haute école d'ingénierie d'architecture de Fribourg (HEIA-fr)

Situation

Sur le site de déconstruction des Baumettes

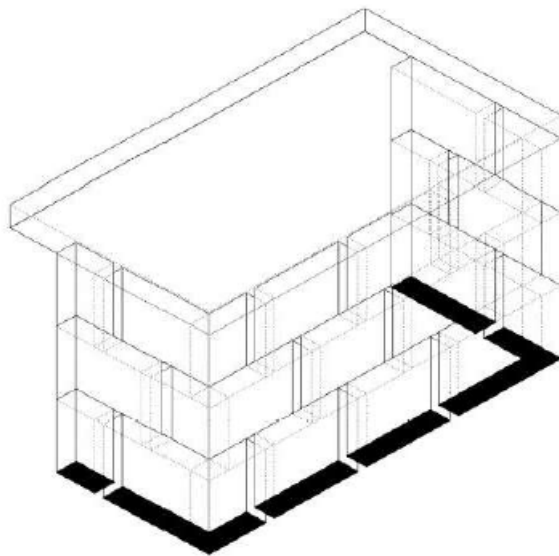
Projet

Mur de soutènement , séparant le site avec le terrain voisin

Eléments en béton existant → élément en béton réemployé

Dalle → dalles insérées verticalement dans des piliers métalliques (anciens rails de chemin de fer) fichés dans le sol

Projet ConcRETE



Equipe de conception

Les étudiants de la Haute école d'ingénierie d'architecture de Fribourg (HEIA-fr)

Projet

Abri de vélo

Eléments en béton existant → élément en béton réemployé

Dalle → Bloc de taille moyenne et toiture avec dalle

Points d'attention

L'objectif est d'identifier les freins et opportunités des petits blocs et de standardiser la technique

rebuiLT: pavillon



Equipe de conception

Les étudiants de l'EPFL

Situation

Dans le site de l'école du Pontet, à Ecublens, en Suisse

Projet

Projet interdisciplinaire pour la construction d'un pavillon utilisant des éléments de réemploi et des techniques lowtech

Eléments en béton existant → élément en béton réemployé

Colonne + dalle → 1 assemblage autoportant = 1 colonne champignon + 1 dalle inférieure + 1 dalle supérieure

Autres éléments récupérés

Bois massif/ bois lamellé-collé/ tuiles/ fenêtres

Éléments biosourcés

Isolant/ paille + argile

Points d'attention

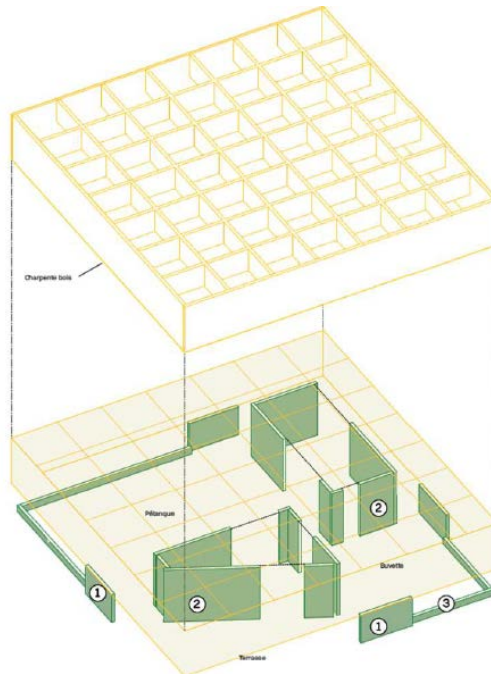
Il faut une bonne coconception et une coordination étroite de la déconstruction du bâtiment donneur et de la construction du projet récepteur

Taille des éléments optimisés pour les espaces et être adaptables

Analyse du cycle de vie (AVC)

PRP 2x moins élevé qu'un pavillon en béton armé coulé sur place

Projet Boulodrome



Equipe de conception

Bureau d'architectes MacIver- Ek Chevroulet

Projet

Boulodrome à Renens

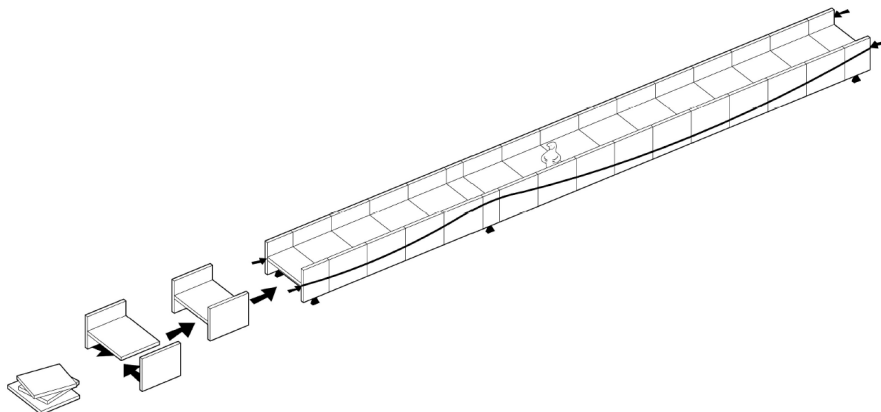
Eléments en béton existant → élément en béton réemployé

Dalle → Murs Porteurs pour la charpente en bois

Points d'attention

Eléments découpés dans une taille standard pour faciliter le réemploi des éléments à l'avenir

VSL: passerelle à voussoirs précontraint



Equipe de conception

Les étudiants de la Haute école d'ingénierie d'architecture de Fribourg (HEIA-fr)

Situation

Au dessus de l'autoroute A9 à Montreux

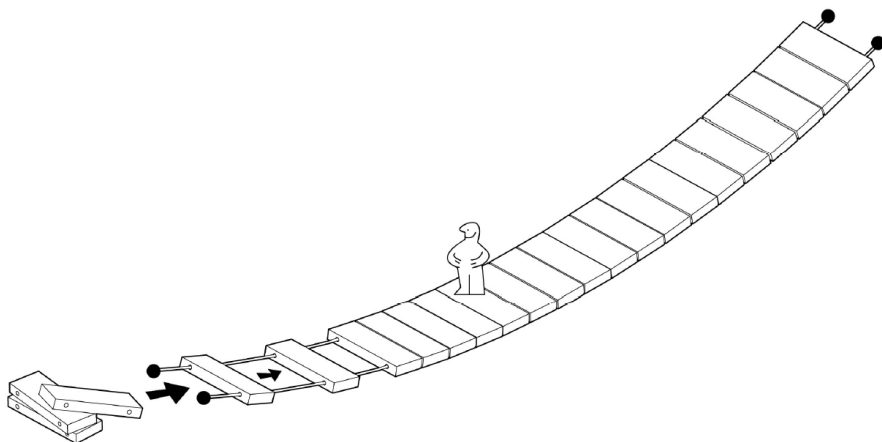
Projet

Passerelle à portée courte de 15m et une portée longue de 30m

Eléments en béton existant → élément en béton réemployé

Dalle → plus petits morceaux de dalle

Canton du Valais: passerelle suspendue



Equipe de conception

Les étudiants de la Haute école d'ingénierie d'architecture de Fribourg (HEIA-fr)

Situation

Projet en cours: promenade en montagne au-dessus du village de Saint-Martin en Valais

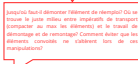
Projet

Passerelle suspendue en chaînette de portée 16m

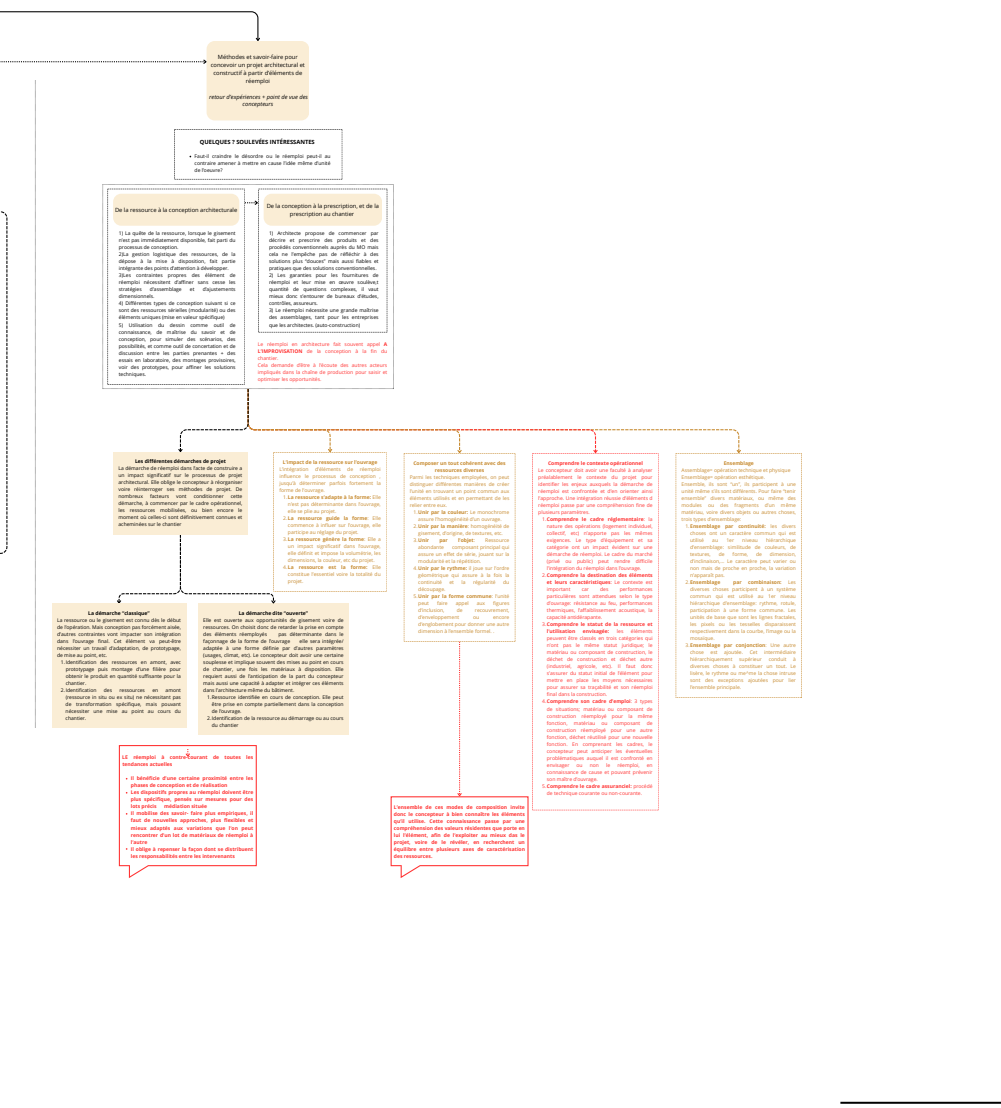
Eléments en béton existant → élément en béton réemployé

Dalle → plus petits morceaux de dalle

- Rester alerte : veiller de près pour le réemploi hors-site : comment extraire les matériaux réutilisables de bâtiments publics ; 2015.
- Site internet Harvestmap (Pays-Bas)



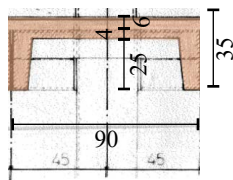
Créé à partir du livre: Belli-Riz, P., Benoit, J., Fabiani, S., Ghyoot, M., Guichard, C., Huygen, J.-M., de Guillebon, M., & Topalov, H. (2022). Réemploi, Architecture et construction: Méthodes, ressources, conception, mise en oeuvre (R. Berthaut, Ed. Le Moniteur ed.). de Gramont, C.



4. INVENTAIRE DE LA DÉCONSTRUCTION ET DU BÂTIMENT DÉMONSTRATIF

4.1. Inventaire de la déconstruction des ailes de l'Hôpital Saint-Pierre

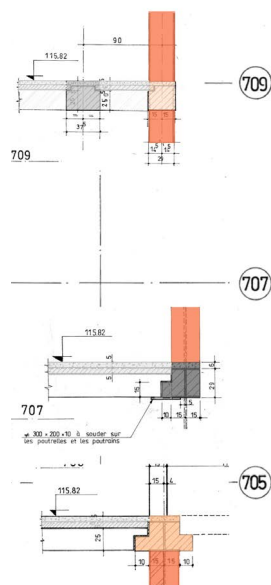
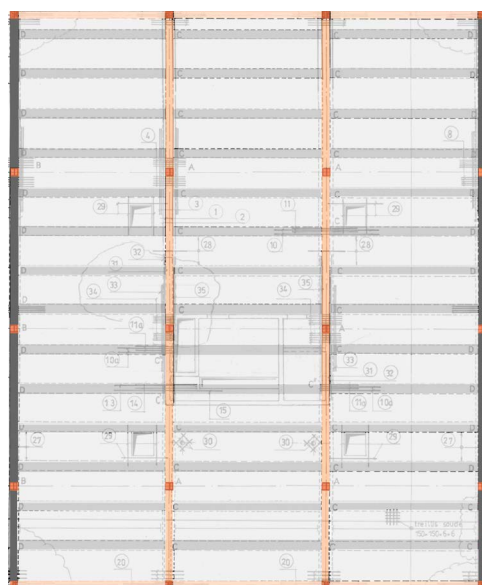
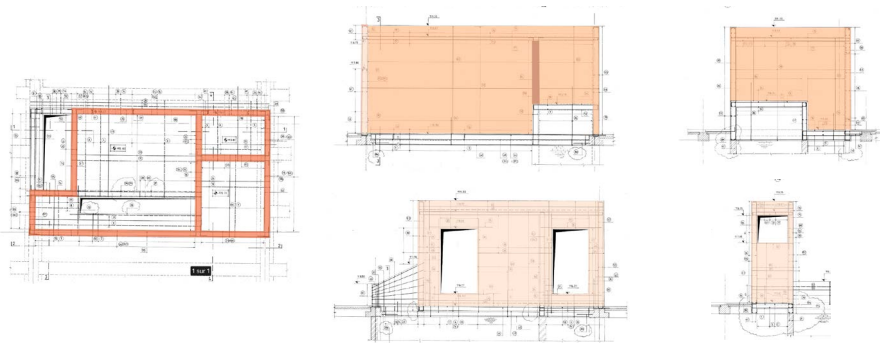
- Inventaire 1er étage aile 700



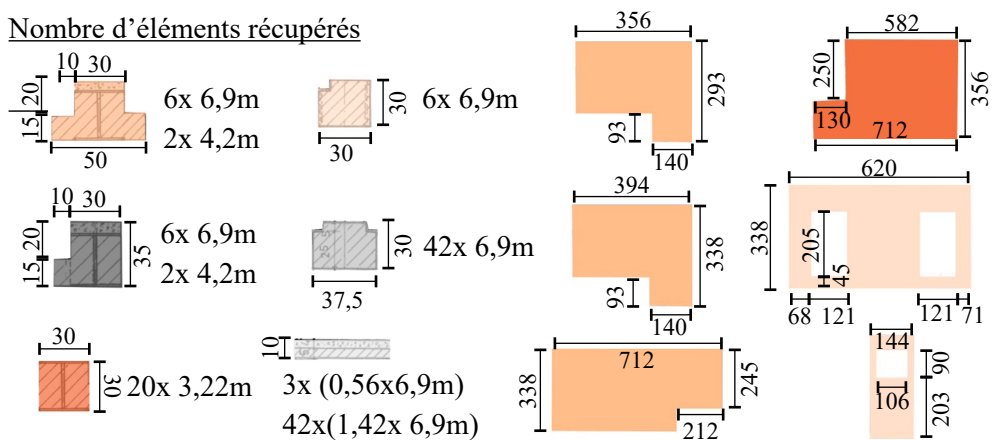
Longueur: 6,9m

Nombre de U préfabriqué récupéré: 42

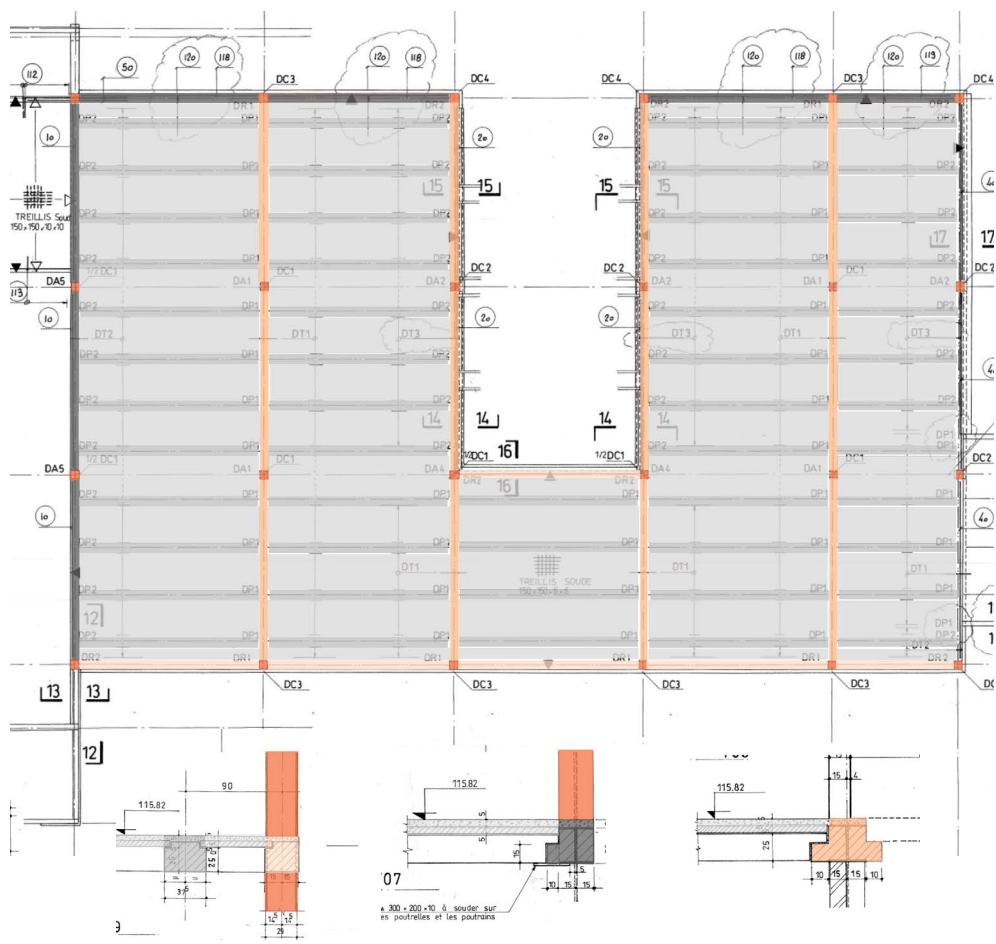
- Inventaire RDC aile 700



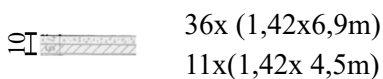
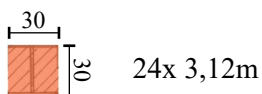
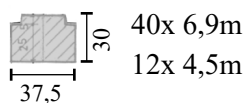
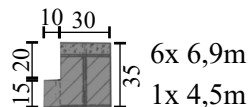
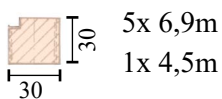
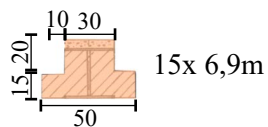
Nombre d'éléments récupérés



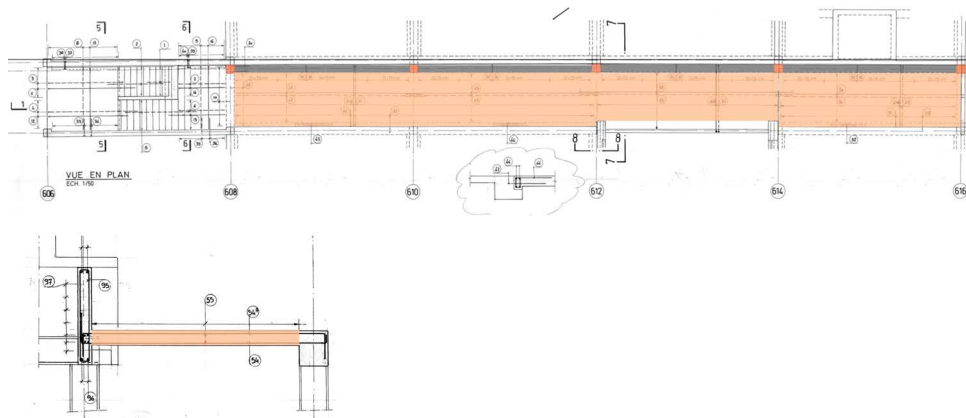
- Inventaire Toiture (RDC) aile 600



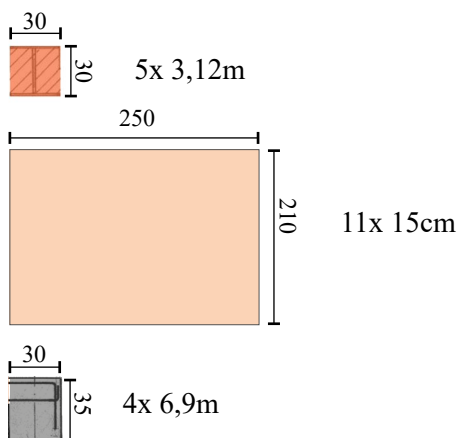
Nombre d'éléments récupérés



- Inventaire jonction entre aile 600 et 700, toiture

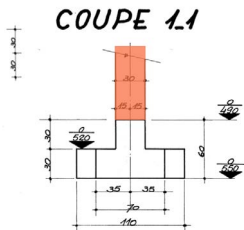
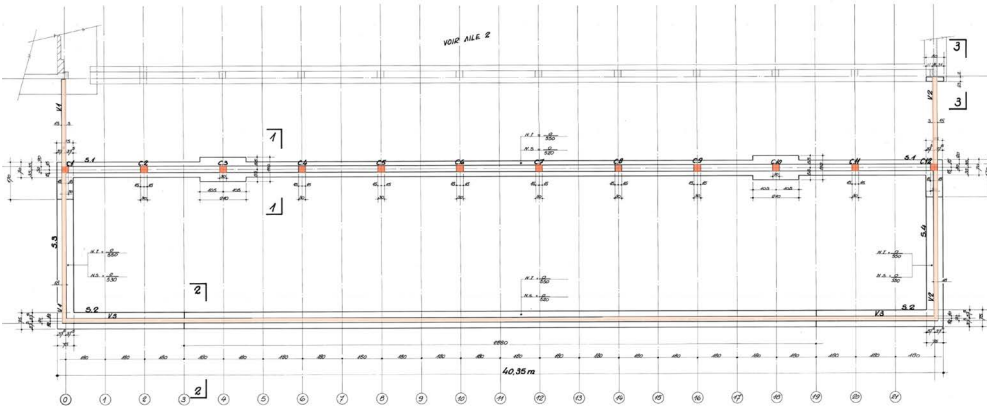


Nombre d'éléments récupérés

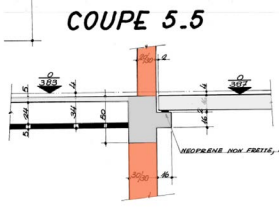
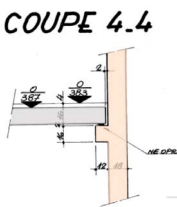
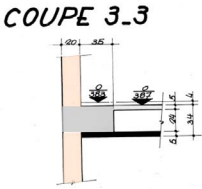
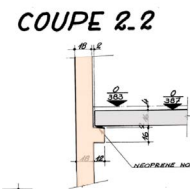
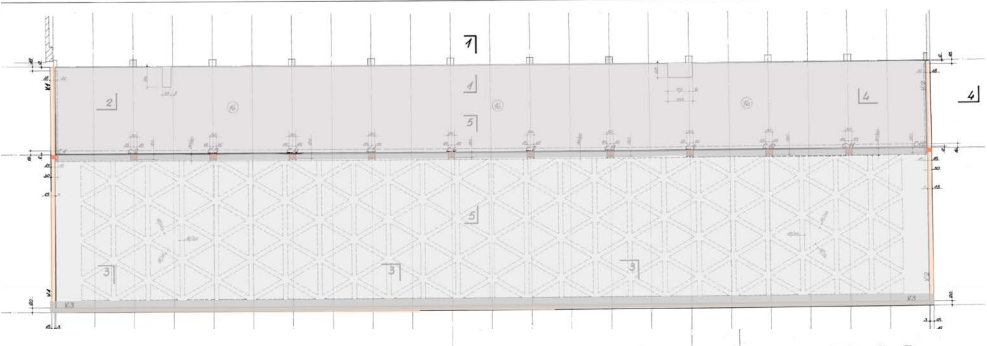


- Inventaire aile 200 avant

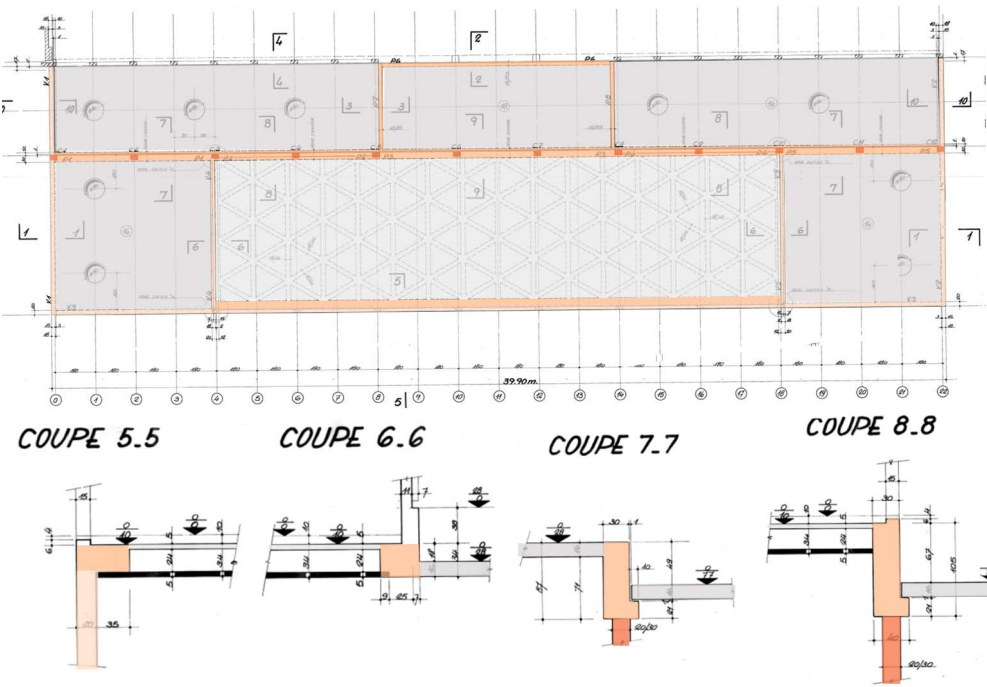
-1



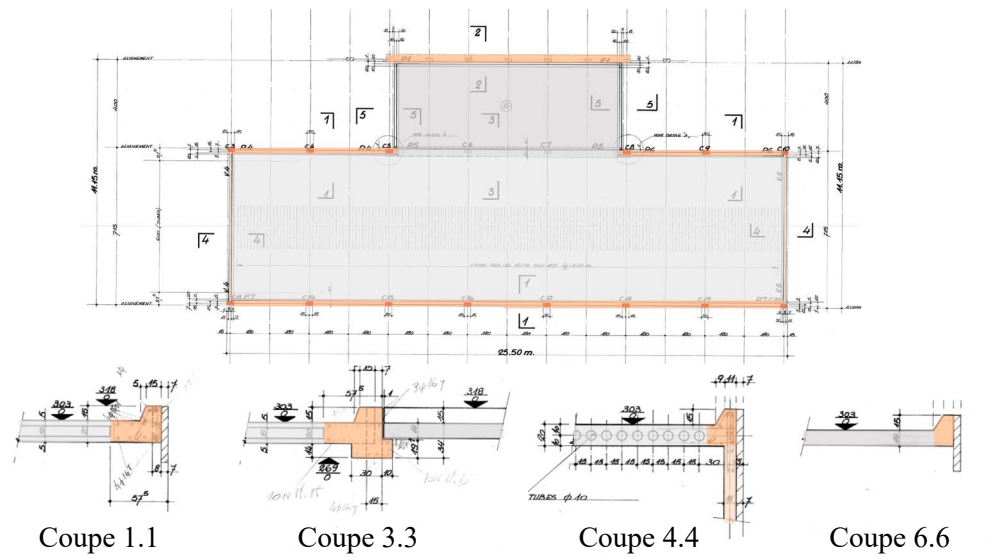
RDC bas



RDC haut

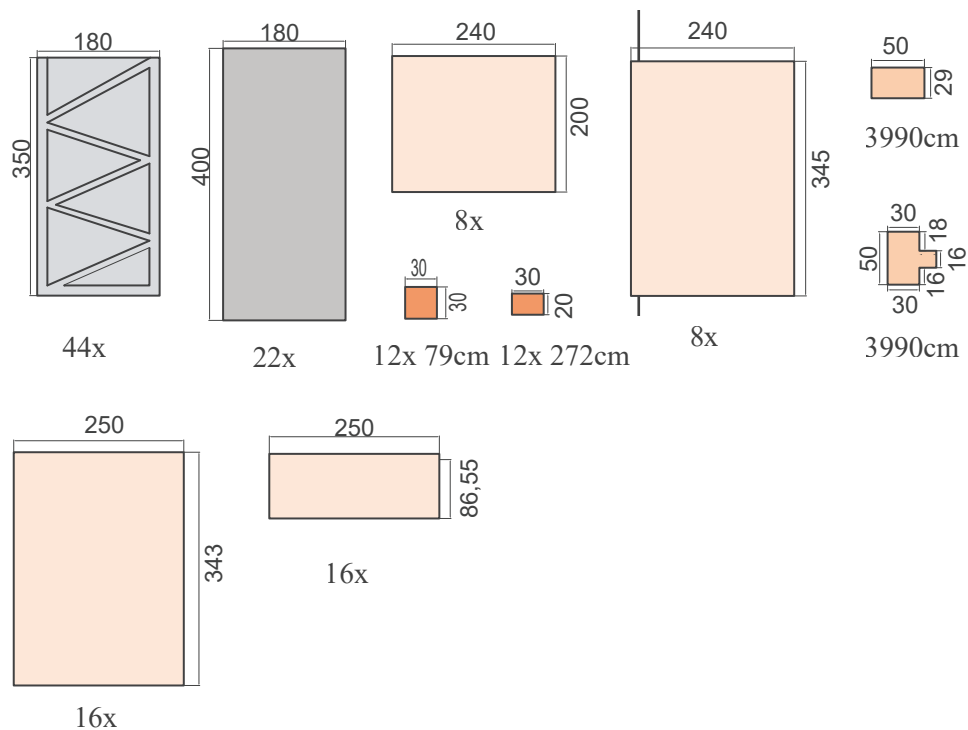


Toiture

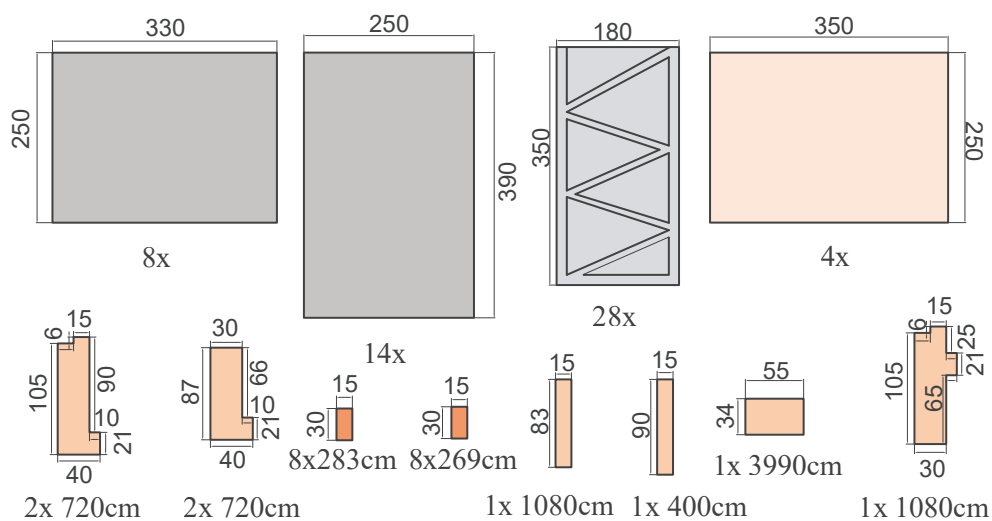


Nombre d'élément récupérés

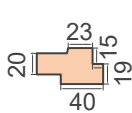
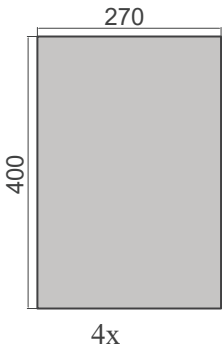
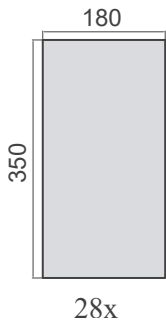
-1



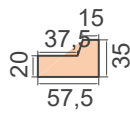
RDC



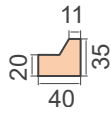
Toiture



1x1080cm

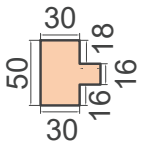
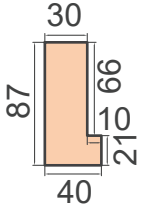
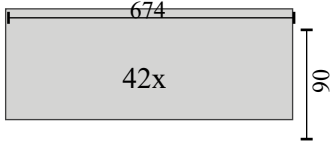
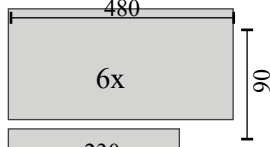
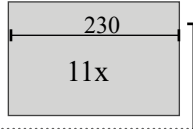
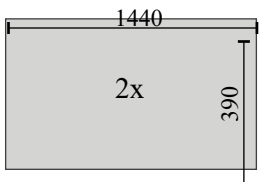
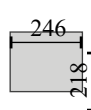


2x2550cm

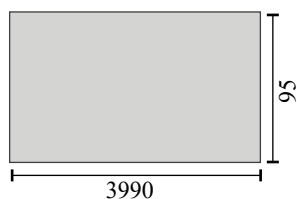


2x715cm

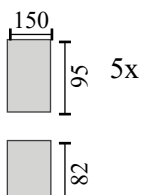
4.2. Inventaire éléments récupérés et remis en œuvre dans bâtiment démonstratif

Elément initial	Elément réemployé	Provenance
- Poutres  1x 3990cm  2x 720cm  1x 1080cm	- Poutres 2x 557cm 2x 495cm 2x 487cm longueur= 3078cm 2x 540cm 2x 455cm  1x 245cm  1x 210cm 	Aile 200 extension avant
Dalles préfabriquées U 	Dalle Préfabriquée U  	Aile 700 Dalle -1
Dalles plates 	Dalles  2x  2x  	Aile 200 extension avant → Dalle RDC

- Voiles

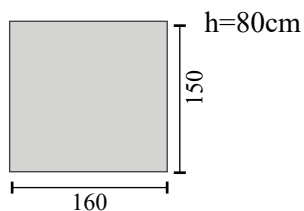


- Dalles



- Aile 200
extension avant
→ Voile fondation

- Semelle ponctuelle

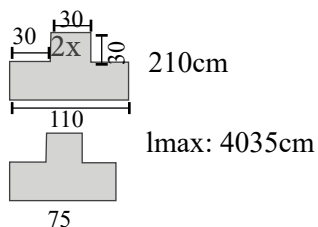


- Semelle

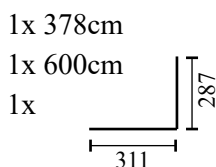
8x

- Aile 200
extension avant

- Semelle filante

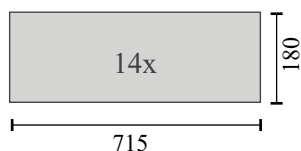


- Semelle

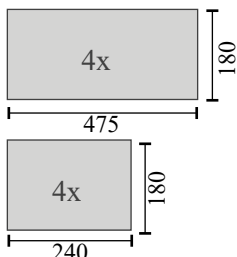


- Aile 200
extension avant

- Hourdis

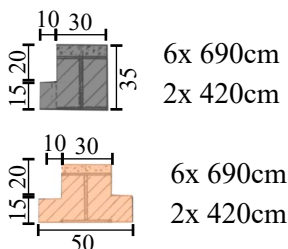


- Hourdis

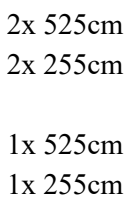


- Aile 200
extension avant
→ Toiture

- Poutres

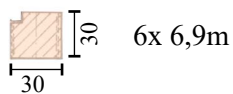


- Poutres



- Aile 700 →
Toiture

- Poutrains



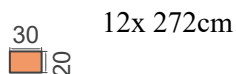
- Dalles

2x 4,75m
2x 520cm
2x 240cm
2x 380cm

- Aile 700

→ Poutre toiture

- Colonnes

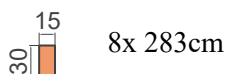


- Colonnes

9x 272cm

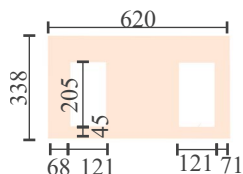
- Aile 200

extension avant



2x 272cm

- Murs

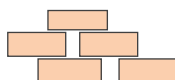
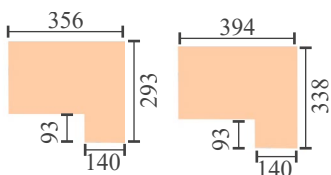
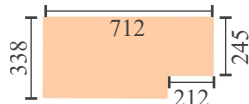


- Murs

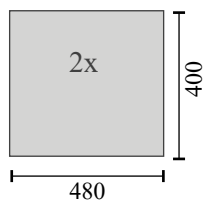


- Aile 700

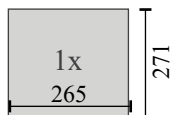
Toiture



- Voiles

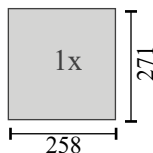


- Hourdis



- Aile 200

extension avant



DECLARATION DE DEONTOLOGIE à intégrer aux documents du TFÉ

Considérant que le plagiat est une faute inacceptable sur les plans juridique, éthique et intellectuel ;

Reconnaissant que le Règlement Général des Etudes et Examens de l'UCLouvain précise la notion de plagiat et décrit les procédures et sanctions liées à sa pratique : <https://uclouvain.be/fr/etudier/reglement-general-des-etudes-et-des-examens.html>

Notant que les étudiant-e-s sont sensibilisé-e-s aux questions d'intégrité intellectuelle durant leur parcours académique et que le site web de l'UCLouvain met à disposition des ressources spécifiques sur le sujet : <https://uclouvain.be/fr/etudier/lutter-contre-le-plagiat.html>

Je déclare sur l'honneur que ce travail de fin d'étude a été écrit et dessiné de ma plume, sans avoir sollicité d'aide extérieure illicite, qu'il n'est pas la reprise d'un travail présenté dans une autre institution pour évaluation, et qu'il n'a jamais été publié, en tout ou en partie. Toutes les informations (dessins, maquettes, idées, phrases, graphes, tableaux, ...) empruntées ou faisant référence à des sources primaires ou secondaires sont référencées adéquatement selon la méthode universitaire en vigueur.

Notant qu'un travail universitaire est le fait d'une production personnelle, réflexive et critique, je déclare en outre avoir fait l'usage suivant des outils d'intelligence artificielle de type agent conversationnel et/ou de production graphique :

	Oui	Non
J'ai utilisé l'IA	✓	
J'ai utilisé l'IA pour produire/retravailler des images, auquel cas une mention explicite est indiquée en légende desdites images ;		✓
J'ai utilisé l'IA pour retravailler/traduire mon texte, auquel cas une mention explicite est indiquée en préambule ;		✓
J'ai utilisé l'IA pour récolter/compiler des données, auquel cas une mention explicite des requêtes formulées et des réponses reçues de l'IA est indiquée dans la section présentant la méthode de recherche ;		✓
J'ai utilisé l'IA pour synthétiser/analyser de l'information, auquel cas la réponse produite par l'IA est utilisée comme source secondaire faisant l'objet d'une analyse critique personnelle explicite, impliquant que je reconnais comme miens les éléments présentés dans le travail et prends toute responsabilité à leur égard.	✓	

Fait à Saint-Gilles

Le 30/05/2025

Signature de l'étudiant-e

