

EN TÊTE

TFE 2021 [LBARC2200] -LOCI Bruxelles

Titre : Proposition d'une structure démontable en éléments
de béton réemployés

Étudiant : POL Augustin

Copromoteur-expert : FIVET Corentin

Copromoteur 2 : VAN MOESEKE Geoffrey

Copromoteur 3 : MEYER Sandrine

Copromoteur 4 : JUNGERS Jean-Jacques

Copromoteur 5 : THIELEMANS Benoît

Date de présentation : 15 juin 2022

RÉSUMÉ

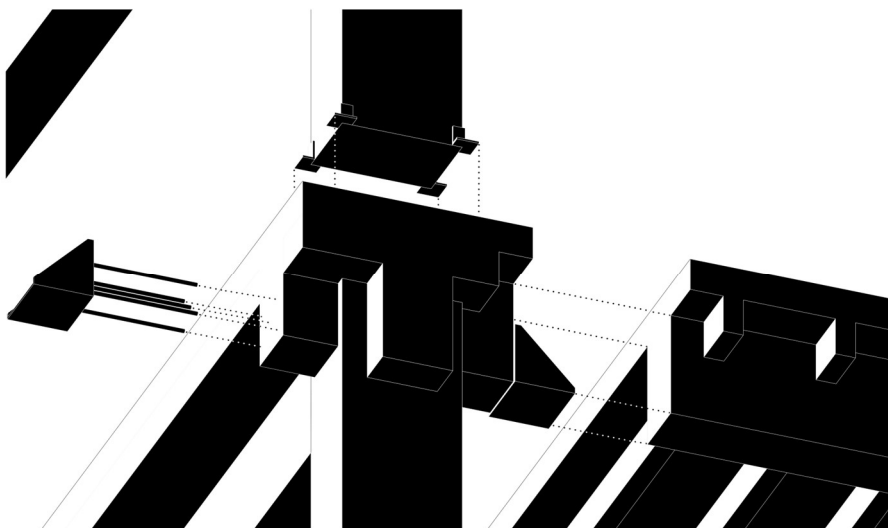
Dans une société contemporaine où les mentalités tournent leur attention vers une crise environnementale mondiale, ce mémoire essaye d'établir une solution répondant au plus grand reproche fait au béton jusqu'à maintenant : son empreinte environnementale. La production de cette pierre coulée a des impacts générant des problèmes environnementaux trop importants pour être ignorés. Cela concerne principalement les émissions de gaz carbonique lors de la production du ciment ainsi que l'épuisement du sable noble et la destruction des écosystèmes où il est récolté. Ce mémoire souhaite s'éloigner du monde du consumérisme et de la production de nouvelle matière pour s'intéresser à leur réemploi. Il veut trouver comment inverser cette tendance à sous-cycler le béton en gravats de fondation. De la même manière que pour le bois pour lequel des charpentes entières sont réutilisées dans de nouvelles structures, le chemin de la circularité doit être tracé pour le béton. Dans cette optique, cette étude cherche à démontrer de quelle manière des éléments structurels de béton peuvent être réemployés tels quels au sein d'un projet d'architecture contemporain et devenir démontables.

MOTS-CLEFS

bilan carbone, énergie grise, économie d'énergie, architecture écologique, béton, matériau recyclé, construction démontable

Proposition d'une structure démontable en éléments de béton réemployés

L'inscription dans un système circulaire du béton
armé déjà en œuvre dans des bâtiments bruxellois



Proposition d'une structure démontable en éléments de béton réemployés

L'inscription dans un système circulaire du béton armé déjà en œuvre dans des bâtiments bruxellois des années '50 et '60 en voie de démolition

*Travail de fin d'étude de
Augustin Pol*

*Co-promoteurs
Geoffrey Van Moeseke
Sandrine Meyer
Jean-Jacques Jungers
Benoît Thielemans*

*Expert
Corentin Fivet*

Université catholique de Louvain
Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme
(Site de Bruxelles)

“The biggest challenge we face is shifting human consciousness, not saving the planet, because the planet doesn’t need saving — we do.”

Xiuhtezcatl Roske-Martinez, 2014

Résumé

Dans une société contemporaine où les mentalités tournent leur attention vers une crise environnementale mondiale, ce mémoire essaye d'établir une solution répondant au plus grand reproche fait au béton jusqu'à maintenant : son empreinte environnementale.

Pouvoir couler une pierre et lui donner toutes les formes que l'on souhaite. Un fantasme qu'il est donné à tout architecte de réaliser, répondant à des demandes esthétiques complexes et toujours plus impressionnantes. Un fantasme aujourd'hui devenu la référence économique.

Un matériau déjà employé dans l'Antiquité par les Grecs et les romains, et dont l'utilisation a été réinventée à la fin du XIXème siècle, a explosé après la Seconde Guerre mondiale et est aujourd'hui encore le matériau que les constructeurs mettent le plus en œuvre à travers le monde.

Cependant, la situation a évolué. La production de cette pierre coulée a des impacts générant des problèmes environnementaux trop importants pour être ignorés. Cela concerne principalement les émissions de gaz carbonique lors de la production du ciment ainsi que l'épuisement du sable noble et la destruction des écosystèmes où il est récolté.

Les alternatives aux différents composants du béton comme les ciments *low-carbon*, la provenance de ses agrégats ou encore l'utilisation de sables éoliens plutôt que de sables nobles semble être un point intéressant à développer. Cependant, ce mémoire souhaite s'éloigner du monde du consumérisme et de la production de nouvelle matière pour s'intéresser à leur réemploi. Il veut trouver comment inverser cette tendance à sous-cycler le béton en gravats de fondation. De la même manière que pour le bois pour lequel des charpentes entières sont réutilisées dans de nouvelles structures, le chemin de la circularité doit être tracé pour le béton. Dans cette optique, cette étude cherche à démontrer de quelle manière des éléments structurels de béton

peuvent être réemployés tels quels au sein d'un projet d'architecture contemporain et devenir démontables.

Le réemploi c'est l'action d'“employer une nouvelle fois, [ce] qui signifie bien que l'on garde la matière et la forme (donc la trace de l'histoire) pour un nouvel usage.”

Jean-Marc Huygen, La poubelle et l'architecte, p. 170

Remerciements

Tout d'abord, mes remerciements vont vers Corentin Fivet qui m'a apporté un savoir et une expérience incomparable sur le sujet du réemploi. Il m'a également offert la chance de passer 2 mois au sein du bureau SXL de l'EPFL à Fribourg en Suisse. Cela m'a permis d'être d'autant plus proche de la recherche du sujet du réemploi, notamment celui du béton.

J'ai pu, par cette expérience faire la connaissance des différents doctorants et post-doctorants dont j'ai pu découvrir le travail et qui m'ont guidé et conseillé dans la réalisation de ce travail. Parmi eux, mes remerciements vont tout particulièrement à Barbara Lambec qui a pu me donner ses conseils avisés et toujours aussi pertinents.

D'autre part, mes plus chaleureux remerciements vont à Geoffrey Van Moeseke pour ses nombreux retours et son accompagnement tout au long de mes études d'architecte ainsi qu'à Jean-Jacques Jungers, Sandrine Meyer et Benoît Thielemans qui ont su m'orienter au travers de ce sujet qui me tient tant à cœur.

Enfin, je voudrai remercier mes parents pour leur soutien, leur intérêt et leur implication, notamment lors de nos conversations portant sur les nouvelles solutions durables portant sur le monde de la construction ou non. Je suis également extrêmement reconnaissant envers Clémentine Renaud et Nicolas Coppieters qui m'ont aussi accompagné tout au long de mes études et qui ont toujours été de très bon conseil et d'une aide sans pareil.

Table des matières

1. INTRODUCTION

- 1.1 Actualité
- 1.2 Enjeux

2. ÉTAT DE L'ART

- 2.1 Le réemploi du béton armé préfabriqué
- 2.2 Le réemploi du béton armé coulé sur place
- 2.3 Connexions réversibles du béton

3. HYPOTHÈSE DE RECHERCHE

4. INVENTAIRE

- 4.1 Citygate II - Bâtiment Nord de l'école pour tous
- 4.2 Inventaire
 - 4.2.1 Structure en béton armé
 - 4.2.2 Briques de façade
 - 4.2.3 Fenêtres de façade

5. (DÉ)COMPOSITION de la STRUCTURE SOURCE

- 5.1 Les matériaux, au cœur du projet
- 5.2 Le béton
- 5.3 Les briques
- 5.4 Les fenêtres
- 5.5 De l'élément réemployé au déchet
- 5.6 Le déplacement des éléments
- 5.7 Le bois
- 5.8 Les sabots

6. PROPOSITION de la STRUCTURE PROJÉTÉE

- 6.1 Phasage de chantier
- 6.2 Comparaison d'espaces

7. DISCUSSION

8. CONCLUSION

9. ANNEXES

- 9.1 Description du site et du projet Citygate
 - 9.1.1 Citygate I
 - 9.1.2 Citygate II
 - 9.1.3 Citygate III
 - 9.1.4 Critiques ou points d'attention
- 9.2 Tableau de phasage de chantier
- 9.3 Calculs

10. BIBLIOGRAPHIE

1. INTRODUCTION

Au travers de ce TFE, nous aborderons la question de la manière dont nous utilisons la matière pour construire notre environnement bâti. Peut-on se permettre de continuer à couler du béton et à produire des milliards de tonnes de ciments chaque année tout en démolissant et concassant des structures de béton armées dans un état encore totalement fonctionnel ? Quel exemple de solution pourrait être développé et mis en place pour remédier à cela ?

1.1 Actualité

La question de l'utilisation du béton concerne en tout particulier les architectes et les maîtres d'ouvrage mais aussi les gouvernements en place et, en particulier, les entreprises productrices des ciments qui le composent. Ces dernières se penchent d'ailleurs depuis quelques années sur le développement de ciments *low-carbon* telles que de grandes entreprises comme Holcim. Cependant, il est important de rester conscient du réel impact que les entreprises de cette envergure ont et qui continue d'augmenter, et donc de l'aspect *Greenwashing* que ces développements peuvent cacher derrière eux. D'autres entreprises telles qu'Hoffmann Green se dédient, pour leur part, au développement de ces ciments peu émetteurs de CO₂ car certains d'entre eux ne nécessitent pas de clinker¹ par exemple. Chaque année les valeurs de résistance permises par ces ciments se rapprochent de plus en plus de celles de ciments traditionnels tel que le ciment Portland.

Ces nouveaux ciments performants et plus respectueux de l'environnement seront d'excellentes solutions pour les fondations des bâtiments ou tout autres éléments nécessitant du béton neuf. Néanmoins, bien que ce sujet de développement semble prometteur, il apparaît comme d'autant plus intéressant

¹ Le clinker est un mélange aux proportions variant autour de $\frac{3}{4}$ de calcaire et $\frac{1}{4}$ de silice. Son obtention par cuisson se réalise à une température de 1450 °C.

de se pencher vers un mode constructif où l'on chercherait plutôt à produire le moins de matière neuve possible. En effet, de même que d'autres matériaux, le béton neuf émet une quantité de gaz carbonique hautement plus élevée que le béton déjà coulé dans notre patrimoine bâti. Ainsi, de nombreux bureaux d'architectes ont déjà pu réutiliser différents éléments de béton préfabriqués pour leur donner une nouvelle utilité au sein d'une nouvelle construction. Cependant, pour ce qu'il en est du béton coulé sur place, son réemploi se limite encore fort à un *downcycling*² par concassage, à l'exception de certains laboratoires réutilisant des morceaux découpés ou quelques applications architecturales non structurelles. Le réemploi de béton coulé sur place est donc pour le moment à ses prémices et commence à intéresser de plus en plus le domaine de la construction, allant de pair avec l'intérêt grandissant pour la gestion de la crise environnementale actuelle.

1.2 Enjeux

La question du béton comprend tout d'abord un grand enjeu économique. La main d'œuvre pour le mettre en place coûte peu et le matériau encore moins. Il est donc un facteur de développement économique et participe grandement à la prospérité des pays en voie de développement en luttant contre la pauvreté ; notamment via la construction des routes et des infrastructures essentielles à un prix réduit (Schneider M., 2019). Cet aspect répond au premier des SDGs³ établis par les Nations Unies. Ainsi, ce côté bon marché, sa rapidité de mise en œuvre mais aussi sa pérennité et son excellente conservation en comparaison avec de nombreux autres matériaux expliquent pourquoi la grande majorité de notre patrimoine bâti est aujourd'hui composé de béton.

² Le *downcycling* (en français décyclage ou encore dévalorisation) est le procédé transformant un déchet de matière en un nouveau matériau de qualité inférieure, à l'inverse de l'*upcycling*.

³ Les SDGs (Sustainable Development Goals) sont une série de 17 objectifs adoptés par les Nations Unies en 2015 avec l'objectif de remplacer la pauvreté par la durabilité.

Pour ces différentes raisons, entre autres, il apparaît essentiel de s'attarder sur les possibilités de réutilisation de toute cette pierre coulée qui nous entoure. Cette recherche d'une utilisation de la matière déjà en place et de l'économie de production et de consommation constitue donc également un des grands enjeux de cette recherche, également en correspondance avec la douzième des SDGs.

Enfin, relié au treizième des objectifs des Nations Unies, découlant de cette responsabilisation de consommation et de production, le plus grand des enjeux de cette recherche est celui de la protection de l'environnement et de la diminution d'émissions de CO₂. Ce projet cherche une solution permettant de minimiser la production de ciment pour une construction. En moyenne, la production d'une tonne du ciment le plus largement utilisé, le ciment Portland, émet l'équivalent de 866 kg de gaz carbonique dans l'air (GES-ADEME) et l'industrie cimentière représente près de 8% des émissions mondiales de CO₂, soit 2,8 gigatonnes par an (Nature). Enfin, la valeur qui sera utile à cette recherche pour établir une évaluation de la quantité d'émissions de gaz carbonique évitée par le nouveau système constructif développé est l'impact CO₂ d'une tonne de béton armé estimé à 159 kg (GES-ADEME).

2. ÉTAT DE L'ART

Le réemploi est la réutilisation d'un matériau ou d'un élément sans porter atteinte à ses caractéristiques physiques à l'inverse du recyclage. Il s'inscrit dans une logique d'économie circulaire venant en opposition au système de consommation linéaire où les matériaux sont extraits, transformés, utilisés et éliminés. L'économie circulaire fait perdurer la phase d'utilisation en prônant en tout premier lieu la prévention au moment du design par les concepteurs afin d'assurer la pérennité maximale à l'élément. Suit alors l'entretien de cet élément, sa rénovation, sa réparation, puis sa réutilisation et enfin, en dernier recours, son recyclage. Une fois que le matériau n'est plus recyclable mais est encore utilisable, il peut alors terminer sa « vie active » immobilisé. Enfin, lors de son élimination, la matière est soit incinérée avec, de préférence, une récupération d'énergie générée par la combustion, soit, dans le pire des cas, mise en décharge. Cette hiérarchie correspond à celle que propose l'Échelle de Delft réalisée en 2000 sous la direction du professeur Ch. F. Hendriks, et inspirée de l'Échelle de Lansink développée par le gouvernement néerlandais en 1979.

Un exemple de réemploi remonte à un siècle et démontre que la réutilisation d'éléments de plus grande échelle de la même manière que ce que cette recherche souhaite mettre en place existe depuis déjà longtemps. En 1811, à Eglisau, en Suisse, un pont de bois est construit pour traverser le Rhin. En 1919, ce pont ayant été assemblé selon la pratique traditionnelle à emboîtements secs, il put être démantelé et réassemblé en une charpente pour la construction du toit d'une ferme à Rheinau, 15 kilomètres en amont sur le Rhin.



Fig. 1 - Photographie du pont en bois à Eglisau

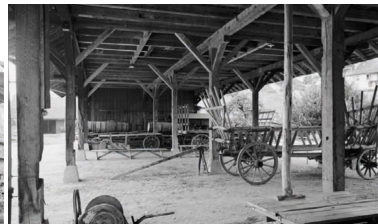


Fig. 2 - Photographie de la charpente de la ferme à Rheinau

2.1 Le réemploi du béton armé préfabriqué

Le béton armé préfabriqué est une solution efficace lorsque la possibilité de réutiliser un béton déjà en place ne se présente pas. En effet, il permet une mise en œuvre réversible où la récupération des différents éléments afin de leur procurer une nouvelle vie dans la composition d'un autre bâtiment peut être bien plus aisée que pour un béton coulé sur place. L'architecte devra être cependant attentif à cet aspect lors de la réalisation du détail d'accroche et de recouvrement qui devra être reproduit sur chantier.

Aux Pays-Bas, à MiddelBourg, une série d'immeubles souffrent d'un taux d'occupation trop faible. Pour y remédier, les 7 derniers des 12 étages furent déconstruits. Une étude de faisabilité dû d'abord être réalisée avant de pouvoir mettre en pratique la valorisation des panneaux, des murs et des dalles de béton préfabriqué. Des études vérifiant la démontabilité et la réutilisabilité de ces éléments ainsi que la stabilité du bâtiment durant le démontage ont ainsi permis de récupérer plus de 900 éléments de construction distincts. Comme dans de nombreux bâtiments en béton préfabriqué, le joint de béton coulé entre les dalles et les murs a une résistance bien moindre en comparaison avec l'élément structurel et son adhérence avec ces derniers est faible. Les éléments récupérés participent à la construction de 3 nouvelles barres de logements situées également à Middelbourg. Pour la découpe et le transport des éléments, une scie à diamants et un cadre de levage furent utilisés (Coenen et al., 1990).

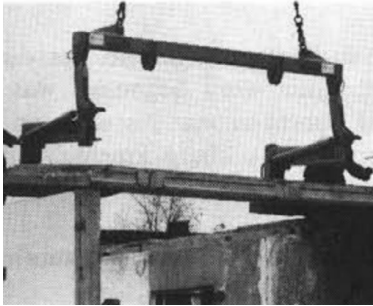


Fig. 3 – Photographie du cadre de levage employé

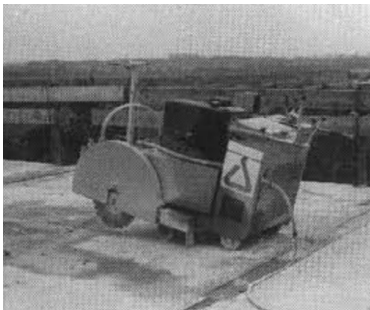
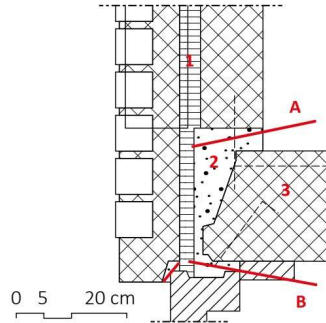


Fig. 4 – Photographie de la scie à diamant employée



1 mur préfabriqué composé de:

- › une face extérieure 8,5 cm, composée des briques incrustées dans du mortier
- › 3 cm d'isolant en polystyrène
- › 9 cm de béton maintenues par des tiges d'ancrage en acier

2 joint en béton coulé

3 dalle préfabriquée en béton

A/B coupes effectuées lors du démontage

Fig. 5 – Coupe de détail de la découpe du joint de béton coulé entre la dalle et le mur préfabriqués

2.2 Le réemploi du béton armé coulé sur place

La découpe de dalles de béton coulé sur place nécessite une attention d'autant plus particulière lorsqu'il s'agit de les réemployer. La trame de découpe à la scie circulaire à diamants doit être soigneusement positionnée et rigoureusement respectée sur le chantier. L'élément de dalle à découper est, au préalable, étayé en utilisant un platelage de bois afin d'assurer la sécurité des opérateurs en comblant le vide formé lorsque la dalle est extraite du bâtiment. Dans le même temps, un minimum de 4 poignées de levages auxquelles la grue viendra s'accrocher sont fixées. Lors de la découpe, la scie circulaire est guidée par un rail. La pièce peut alors être soulevée par la grue et déplacée. La récupération de tels éléments dans leur état inchangé plutôt que par concassage permet la diminution de déchets de chantier mais aussi celle de l'extraction matière neuve.

Une telle méthode fut suivie à Lancy dans le canton de Genève en Suisse. La structure en béton coulé sur place d'un immeuble a été découpée et a fait l'objet d'une déconstruction sélective. Ce procédé permet, par la même occasion, d'éviter les nuisances qu'aurait pu produire la démolition par concassage du bâtiment et de protéger l'environnement bâti. Une fois découpées, les dalles sont emportées par camion dans un centre de réemploi à Meyrin où elles seront redimensionnées si nécessaire pour leur usage futur. Dans le cas décrit, les matériaux sont réutilisés comme dalles extérieures du Jardin Botanique Alpin. Pour permettre la réalisation d'une telle opération, toute une série de paramètres entrent en jeu (Favre & Gonçalves). Il est, cependant, important de noter, comme le font remarquer Célia Küpfer et Corentin Fivet dans leur ouvrage « Déconstruction Sélective – Construction Réversible » que « La réussite de ce réemploi est soutenue par divers facteurs dont: (1) une technique de déconstruction établie, (2) un contexte urbain nécessitant un démontage soigneux, (3) des architectes du projet «recepteur» impliqués dans une démarche écologique, (4) un soutien important de la maîtrise d'ouvrage du projet «recepteur», (5) l'implication du même bureau d'ingénieur-e-s civil-e-s à la fois dans le bâtiment «donneur» et le projet «recepteur» ainsi que (6) un grand nombre de potentiels bâtiments «donneurs» parmi les chantiers des ingénieur-e-s, ce qui a augmenté les chances des

disposer des justes quantités de dalles aux bonnes dimensions en temps voulu. »



Fig. 6 - Photographie de l'extraction d'une des dalles de béton



Fig. 7 - Photographie de l'échafaudage et du platelage

Un autre cas réemployant du béton coulé sur place est le projet RE:CRETE du Structural Exploration Lab de l'EPFL qui consiste en un ensemble de murs porteurs en béton armés sciés et réassemblés au sein de leur atelier pour la réalisation d'une passerelle de 10 mètres de long. L'arc formé par la mise bout à bout des éléments récupérés est maintenu par deux tirants de métal et système de posttension injecté dans les dalles sur toute la longueur du pont. J'ai eu la chance d'avoir pu m'impliquer dans quelques-unes des dernières étapes de sa mise en œuvre, me permettant de prendre conscience de nombreux aspects très terre à terre du réemploi de plus grands éléments de béton armé.

En effet, le pont est entré en fonction bien plus tôt que ce que les concepteurs auraient pu imaginer, il a donc fallu le préparer à l'usage public en plein air. Ainsi, de nombreux facteurs liés à l'imperméabilisation du projet et un traitement antirouille ont dû être appliqués. Chaque petite imperfection du pont a dû être remplie afin d'éviter tout endommagement par stagnation de l'eau. L'ensemble du projet RE:CRETE a également été recouvert d'une couche de produit hydrophobe. Enfin, pour la sécurité des futurs usagers, une série de bandes antidérapantes et un garde-corps en éléments métalliques de récupération furent installés tout du long.

La multitude d'étapes de préparation d'une telle structure mettent en évidence le côté complexe, technique et perfectionniste d'un projet d'une telle envergure devant résister autant que possible aux intempéries et à l'usage public. Pour le projet développé dans ce mémoire - bien que celui-ci mette en œuvre les structures bétonnées en intérieur - ceci est un indicateur des étapes et détails qui devront nécessairement être résolus pour permettre une mise en œuvre des plus aboutie et laissant aux éléments les plus grandes probabilités de connaître plusieurs vies dans différents bâtiments.

Le projet RE:CRETE est un des rares cas de réemploi d'éléments de béton armé coulé sur place réutilisés pour la création d'un ensemble structurel d'une telle envergure. Ce sujet est encore à ces balbutiements et, par la recherche menée actuellement, on peut espérer la popularisation et l'utilisation à encore plus grande échelle de ce genre de mode constructif.



Fig. 8 - Découpe à la scie à diamants des murs en béton armé



Fig. 9 - Pose des blocs sur un arc en bois. Les câbles de posttension sont déjà disposés (ci-dessus)



Fig. 10 - Coupe de détail de la découpe du joint de béton coulé entre la dalle et le mur préfabriqués



Fig. 11 - Application de l'antirouille sur un des deux tendeurs



Fig. 12 - Application de l'antirouille sur les barres d'armature apparentes

2.3 Les connexions réversibles du béton

Le béton est, dans la pensée collective, un matériau monolithique aux extrémités encastrées, lourd et immuable. Ce qui, pour une grande majorité du patrimoine bâti actuelle est vrai. Cependant, cette majorité diminue chaque année grâce à la prise de conscience du monde de la construction, et, notamment des architectes, utilisant de plus en plus fréquemment des systèmes préfabriqués réemployables.

Un projet allant à l'encontre de tous les préjugés que l'on pourrait avoir sur le béton a été mené par une équipe de chercheurs de l'EPFL. Ils conçurent un pavillon modulaire en béton renforcé par du textile. Chaque élément est démontable et remontable et ne pèsent pas plus de 60 kg - à l'exception des coques du toit de 100 kg chacune - afin d'être transportable par seulement deux personnes. Les connexions des différents éléments sont assurées par des tiges filetées composées de polymères renforcés mais aussi de vis et de boulons par endroits.



Fig. 13 - Photographie du pavillon TRC



Fig. 14 - Photographie d'une jonction de dalles et de ses tiges filetées M10 en polymère renforcé de fibres et mastiquées

D'autre part, une méthode industrialisée a été mise au point par l'entreprise française Peikko. Cette dernière est connue des architectes et est déjà mise en œuvre sur de nombreux chantiers. Elle concerne des structures poteaux-poutres de béton préfabriqué et permet leur réutilisation par démontage. Les étapes de ce système sont les suivantes : assemblage, serrage, coulage, usage, hydroblast, desserrage, désassemblage et réemploi. Afin de reprendre les moments induits par l'élément maintenu, les tiges filetées auxquelles il est boulonné sont prolongées par une armature profondément ancrée dans l'élément sous-jacent.

Cette solution propose un système structurel en béton réellement circulaire et aisément réemployable. Cependant, ce système est très bien adapté à des éléments préfabriqués neufs mais plus difficilement à des éléments structurels de béton coulé sur place récupérés par découpe comme dans le cas de ce mémoire.

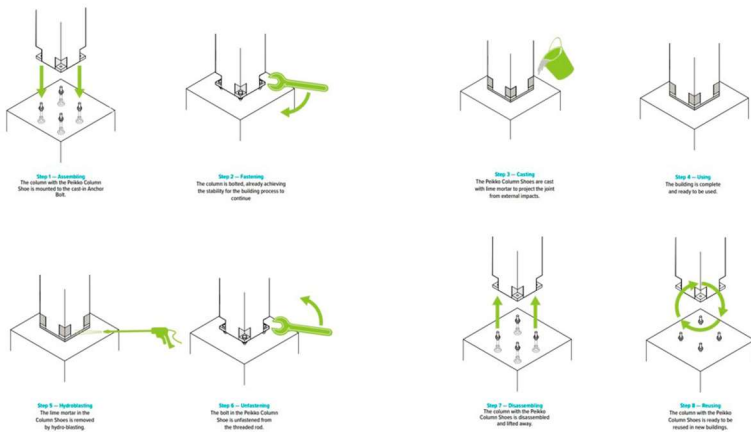


Fig. 15 – Étapes du système Peikko

Enfin, une solution qui pourrait permettre de réemployer des éléments structurels de béton coulé sur place découpés serait plutôt du côté de la construction en bois. En effet, les techniques d'emboîtement ou l'utilisation de sabots métalliques permettent au matériau qu'est le bois une réutilisation simple par démontage et avec un minimum d'altération de la matière comme le premier cas de ce chapitre l'a démontré. Cependant, le travail en emboîtement adapté au béton semble inadéquat puisque les éléments structurels de béton armés sont composés en leur sein de barres d'armatures métalliques leur procurant une grande partie de la qualité de leur propriété physique. Pour ne pas perdre en résistance, la solution du sabot semble une piste porteuse, permettant de conserver l'élément structurel intact.

Pour supporter une dalle de béton armé de grande envergure, le calcul de dimensionnement du sabot devra faire partie intégrante de cette recherche afin de s'assurer de la faisabilité du concept et d'avoir une idée de la quantité de matière utilisée puisque même si la logique du système constructif de réemploi divise l'empreinte environnementale de ses éléments par nombre de réutilisation, la production de métal a un impact non négligeable. Cependant, pour donner suite au calcul de la section du métal nécessaire, une recherche de sabots correspondant à réemployer pourrait également s'effectuer.

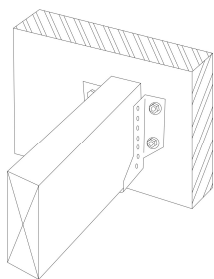


Fig. 16 - Dessin de sabot de poutre en bois

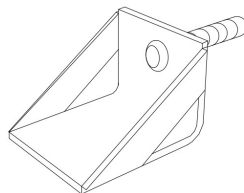


Fig. 17 - Dessin de sabot de pont d'ascenseur

3. HYPOTHÈSE DE RECHERCHE

Il est possible de faire un projet d'architecture contemporain avec du réemploi d'éléments structurels de béton armé récupéré sur un bâtiment en voie de déconstruction in situ.

Pour prouver cela, un exercice de projet est réalisé sur un des bâtiments d'une école au sein du programme de développement Citygate II prenant place à Cureghem. Ce projet sera réalisé suivant certaines directives avec l'objectif d'utiliser le minimum de ciment possible. Pour cette raison, les éléments de plancher et de murs neufs seront en bois, les connexions seront en métal et les fondations et les chapes utiliseront un béton de ciment *low-carbon* (*Hoffmann Green* par exemple). Tous les raccords entre éléments seront réversibles. Cela comprend aussi bien les simples raccords de parois que les connexions entre éléments de structure de béton armé réemployé.

Par la même occasion, cet essai structure une démarche séparée en trois grandes parties.

Tout d'abord, un inventaire de bâtiment déconstruit est réalisé. Celui-ci reprend tous les éléments sujets à un réemploi dans le bâtiment existant et à la quantification de ces derniers.

Une deuxième partie de (dé)composition reprenant tous les éléments utilisés au sein du projet sur base de l'inventaire réalisé au préalable. Il y sera décrit la manière dont ces éléments sont découpés et récupérés dans le bâtiment existant aussi bien sur l'aspect de leurs dimensions que l'aspect de leur transport et leur déplacement. Leur assemblage et le détail de leur connexion y seront également précisés. Enfin une gradation du type d'élément de construction utilisé dans le projet sera explicitée, du matériau neuf, réemployé ou jeté.

Dans un troisième temps, une proposition de projet sera décrite, reprenant, elle, les aspects plus descriptifs de l'espace produit. Dans un premier temps ce passage établira le phasage du chantier de manière complète depuis la première découpe dans le bâtiment existant jusqu'à la dernière pose d'élément réemployé. Les différentes décisions d'adaptations du projet existant et de planification de ce nouveau projet y seront également expliquées.

Les différents défis architecturaux à relever avec une structure réemployée y seront repris.

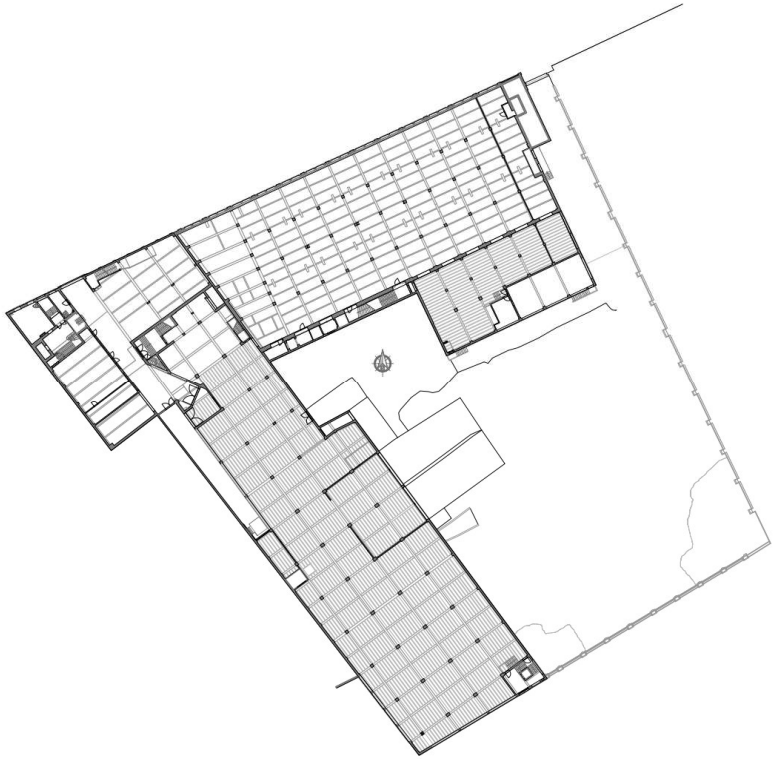


Fig. 18 - Plan du rez-de-chaussée de l'ancienne usine pharmaceutique au 152 rue des Goujons à Anderlecht



Fig. 19 - Photographie de l'aile Sud



Fig. 20 - Photographie de l'aile Nord

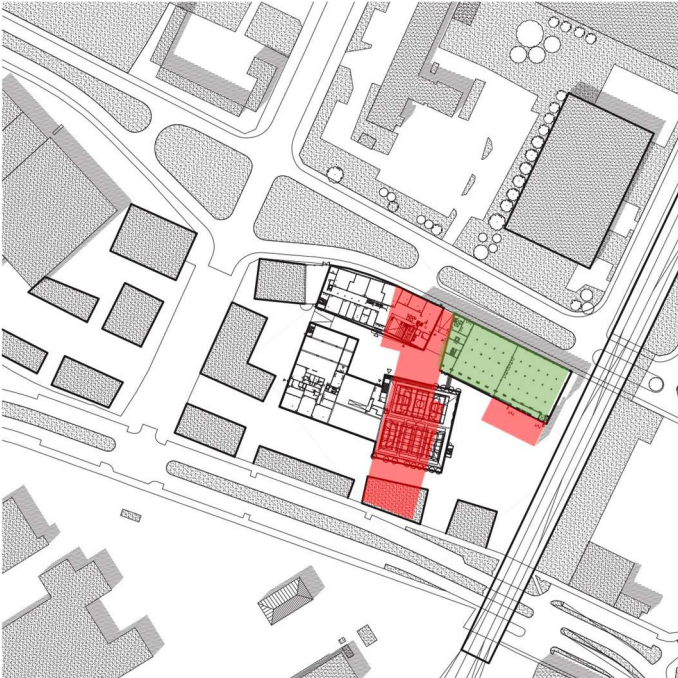


Fig. 21 - Plan du projet CityGate II avec les parties rasées du bâtiment existant en rouge et conservées en vert

4. SITE et INVENTAIRE

Le projet prend place à Bruxelles, dans le quartier de Cureghem dans la commune d'Anderlecht. Entre la rue des Deux Gares et la rue des Goujons, c'est dans une ancienne usine pharmaceutique du 19^{ème} désaffectée depuis une bonne dizaine d'année que se tiennent désormais différentes activités temporaires tels que des studios d'artistes, musiciens et plastiques, un fab lab, des ateliers participatifs et de découverte ainsi qu'un restaurant social. Ces différentes activités alternent sous la direction de la SPRL Entrakt - ayant développé Studio CityGate - dont les bureaux sont au sein même du bâtiment. Cette organisation constitue la deuxième plus grande occupation temporaire de Belgique.

L'aile Sud du bâtiment datant elle du début des années '50 va être démolie dans le courant de l'année 2024 ainsi qu'une portion de l'aile Nord (cf. Fig. 20), laissant place à l'ensemble de projets se déployant tout le long de l'ancienne friche, développés par un consortium international d'architectes poussant la mixité fonctionnelle des espaces mis en forme. L'activité économique et les commerces sont projetés à l'avant de la scène. Ce sont à la fois les activateurs de l'espace public, et les catalyseurs reliant les nouveaux arrivants aux riverains en les servant tous deux également et en leur proposant différentes activités. Parmi ces dernières, une grande école d'une capacité de 1.250 élèves de première année de primaire à troisième de secondaire proposant ainsi ses services également aux enfants riverains. De cette manière, le programme mixte comprenant 400 logements dont 277 sociaux, est composé d'une école francophone de pédagogie de l'ASBL "École de Tous" fonctionnant en tronc commun avec des regroupements de deux années dans une même classe.

Ce sont donc les éléments constitutifs de ces deux parties du bâtiment en voie de démolition qui nous intéresseront pour la réalisation de l'inventaire et l'identification des matériaux propices à la constitution d'un des bâtiments de la nouvelle école.

4.1 Citygate II - Bâtiment Nord de l'École pour Tous

L'équipe de bureaux d'architecture ayant proposé, entre autres, le plan de cette école est composé de noAarchitecten, Aurélie Hachez + Elseline Bazin, Korteknie Sruhlmacher architecten, Sergison Bates architects et Boom Landscape pour un maître d'ouvrage composé de SLRB-BGHM, citydev.brussels et École de Tous. Le plan du nouveau bâtiment Nord est immédiatement apparu comme celui qu'il faudrait adapter au nouveau mode constructif développé par ce mémoire. Il est positionné à proximité de l'aile détruite mais pas au même emplacement. Cela permet un phasage de chantier qui sera développé plus loin dans cette recherche où le découpage du bâtiment existant peut être réalisé en même temps que le montage du bâtiment neuf en positionnant la grue entre les deux édifices. De plus, les dimensions des dalles récupérées dans l'inventaire qui suit correspondent à l'aire des classes proposées.

L'édifice est composé de 9 étages, dont les 3 et demis premiers sont dédiés à l'école et les 5 et demis derniers à un immeuble d'appartement. Ce bâtiment est composé de bureaux administratifs, de classes, de laboratoires et d'un logement de concierge. D'autre part ce bâtiment possède une double hauteur par-dessus les gradins du forum d'entrée et sa volumétrie n'est pas droite mais opère un changement de direction en son centre. Ces deux derniers éléments de la composition architecturale proposée constituent un moyen de démontrer les possibilités mais aussi les difficultés engendrées par le système constructif développé dans ce mémoire.

Le plan proposé par les architectes sera suffisamment respecté pour que la nouvelle proposition de projet puisse, potentiellement, être implémentée dans le projet CityGate II ou du moins, démontre qu'il est possible de composer une architecture de qualité comparable en réutilisant des éléments structurels de béton armé coulés sur place.



Fig. 22 – Plan du projet de l'École pour tous proposé par les architectes avec le bâtiment traité pour cette recherche encadré de traitillés rouges



Elévation Nord sur le parc de la Petite Senne Echelle

Fig. 23 – Elévation Nord du projet Citygate II proposé par les architectes avec le nouveau bâtiment de l'école traité pour cette recherche mis en évidence

4.2 Inventaire

Pour pouvoir décider de quelle portion de l'ancienne usine pharmaceutique un inventaire devait être effectué, la possibilité de ne pas déconstruire la même portion que celle que les architectes avaient décidé devait être envisagée.

Tout d'abord, ne rien démolir et réaffecter toute l'aile en école et en logement est une solution permettant de réutiliser le maximum de matière déjà en place. Cependant, cette solution s'oppose trop grandement à la proposition des architectes et empêcherait de démontrer la faisabilité de projet contemporains avec le système constructif développé dans cette recherche.

Ensuite, ne démolir que la partie du bâtiment se superposant au projet de CityGate II et réhabiliter l'angle reliant les deux ailes apparaît comme une autre solution intéressante. Cependant, le plan de cette portion du bâtiment est constitué d'une succession d'escaliers et, pour les mêmes raisons que précédemment, cette idée sort aussi de la proposition faite par les architectes décidant ainsi de l'écartier. Par ailleurs, cette recherche montre l'adaptation d'un projet existant et l'aspect de l'alignement aux fondations ne peut pas être exploité bien qu'il relève d'un grand intérêt.

Enfin, partir sur la base établie par les architectes et considérer toute cette aile Sud et cette fraction de l'aile Nord comme matériau potentiel de réemploi apparaît comme la solution servant au mieux le propos de ce mémoire. Bien que la réhabilitation de structure déjà en place est souvent le meilleur moyen d'économiser de la production de matière structurelle neuve, le propos de ce travail est l'étude du réemploi de structures en place mais ne convenant pas à une réhabilitation selon la décision des concepteurs du nouveau projet.

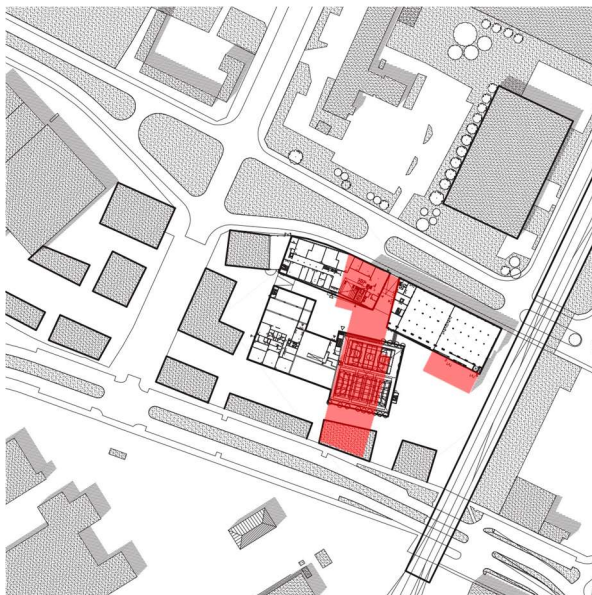


Fig. 24 - Plan du projet CityGate II avec les parties rasées du bâtiment existant en rouge



Fig. 25 - Zoom sur l'angle du plan du rez-de-chaussée du 152 rue des Goujons à Anderlecht

4.2.1 Structure en béton armé

Le volume total de béton armé disponible dans les portions déconstruites est de 3844 m³. La valeur de 159 kg de CO₂_{émis}/tonne (bilans GES de l'ADEME) de béton armé de 2,5 tonnes/m³ nous donne une première indication sur la potentielle économie d'empreinte carbone : le rejet de 1528 tonnes de CO_{2e} pourrait être évité, soit la consommation annuelle de 187 belges (8,18 tonnes de CO_{2e}/belge, chiffres de la Banque Mondiale).

À chaque étage, les colonnes possèdent des sections différentes : R-1 : 65x65, R0 : 65x50, R+1 : 60x40, R+2 : 50x30, R+3 : 30x30 (cm x cm).

4.2.2 Briques de façade

La superficie totale de brique des façades déconstruites est de 4100,9 m². Cependant, selon Opalis, on peut estimer qu'entre 30 et 50% des briques provenant d'un mur démantelé ne sont plus réutilisables en tant que telle. En prenant l'estimation la plus pessimiste, il reste donc 2050,4 m² de briques.

Si ces briques étaient assemblées avec un autre liant que du mortier de chaux, il faudrait, pour les réutiliser, avoir recours à des encadrements métalliques de portions de ces murs.

4.2.3 Fenêtres de façade

La superficie des fenêtres de façade réutilisable est de 600 m². Les baies entières mesurent 7 m x 2 m 50 et disposent d'une vitre ouvrante à chaque coin. Celles-ci seront utilisées pour du vitrage intérieur de séparation entre le couloir central et les classes afin de permettre à la lumière d'y pénétrer un maximum. Il est, en effet, préférable d'utiliser des châssis neufs pour la façade pour des raisons énergétiques.



Fig. 26 - Photographie de la structure poteaux-dalles en béton armé coulé sur place



Fig. 27 - Photographie des briques de façade



Fig. 28 - Photographie des fenêtres de façade

5. (DÉ)COMPOSITION de la STRUCTURE SOURCE

Sur base de l'inventaire, ce chapitre cherche à opérer une décomposition des éléments à disposition à partir de laquelle se mettra en place une composition. Il participe à démontrer que dans un projet d'architecture contemporain il est possible d'utiliser un système constructif où le béton d'un bâtiment que l'on comptait démolir est réemployé. Plutôt que de la détruire, la matière est découpée, réutilisée afin que les éléments qu'elle compose constituent la structure d'un nouveau bâtiment sur le même site.

5.1 Les matériaux, au cœur du projet

En tout premier lieu, il est important d'établir que le projet réalisé suit un principe d'économie de matière et, encore plus étroitement, un principe d'économie de consommation et donc de production de ciment et de béton neuf. Cela concerne aussi bien le béton préfabriqué que le béton coulé sur place. Bien entendu, pour les puits de fondations semi-profonde et pour la dalle de fondation en béton armé, il faudra se tourner vers des ciments *low-carbon* autant que possible. Cela est également valable pour les chapes des classes et les potentielles retouches des éléments structurels récupérés. Ainsi, les éléments structurels du projet sont en béton réemployé - à l'exception des fondations - et ce qui est neuf est en bois ou en métal. Du bois de récupération peut évidemment être utilisé si l'opportunité se présente. En effet, d'après Corentin Fivet, expert de ce TFE et directeur du laboratoire SXL, le béton reformé à partir de béton concassé émet autant de CO₂ que le béton neuf. Il ne constitue donc pas un matériau alternatif intéressant. Le métal laisse lui aussi une empreinte environnementale non négligeable. Pour cette raison, il sera utilisé un minimum au profit du bois.

Cette différenciation entre les matériaux réemployés et les matériaux neufs a son importance au sein du projet construit. Aussi bien dans le message que véhicule le projet quant à sa logique de minimisation de production de ciment, que pour faire

sentir l'histoire du site même en laissant le béton apparent autant que possible. La poésie engendrée par la réutilisation de ce qui était déjà là occupe un grand rôle dans ce mémoire et dans le message qu'il souhaite passer.

Lors de l'inventaire, l'impact du béton en place a été mis en évidence afin d'avoir une référence aussi bien quantitative estimant l'empreinte laissée par la matière *down-cyclée* après la démolition, que comparative évaluant la diminution de l'impact environnemental générée par cette recherche une fois que la quantité nette réemployée aura été définie.

Cependant, il est indispensable de rester conscient que toute la mise en pratique de ce dispositif constructif nécessite une énergie qui n'aurait pas été nécessaire pour un système traditionnel. Ce compris l'énergie requise pour le transport des éléments par la grue mais aussi pour la production du métal utile à la conception des sabots. De la même manière que pour le bois, si des sabots aux dimensions nécessaires au projet sont disponibles au réemploi, ils seraient engagés dans le processus de construction. Par ailleurs, le métal permet, malgré tout, de visser des éléments et donc de réaliser des connexions sèches et réversibles, offrant plusieurs vies à la matière, utilisée dans plusieurs bâtiments de suite divisant et diminuant son impact environnemental. Le bois, pour sa part, est un matériau stockant le carbone, certes, mais son origine doit être un point de vigilance important. L'empreinte de son transport est également très élevée et les forêts dont il provient doivent impérativement suivre une exploitation régénératrice. Même le bois labellisé doit être source de méfiance car un label s'achète facilement et, au nom de la rentabilité, des arbres provenant de forêts protégées sont vendus comme labellisés d'après le site earthsight.org ainsi que de nombreuses autres organisations de défense de l'environnement.

5.2 Le béton

Tout d'abord, les éléments structurels prévus pour le réemploi doivent être identifiés et nommés en fonction de leurs dimensions.

Afin de faciliter le travail de découpe à la scie à diamants, une trame de découpe doit être tracée sur le plan du bâtiment. Les alignements permettront à la scie d'effectuer une découpe continue et évitera la perte de temps résultant de son déplacement mais aussi la perte de matière s'opérant à chaque début et à chaque fin de découpe. D'autres part, ils produiront la découpe d'un côté de deux éléments en un seul passage. Cette économie de moyen, de temps et de matière vient définir précisément les dimensions des modules réemployés. Deux autres éléments venant terminer de donner les dimensions de nos modules sont, d'une part, qu'il faut un espace de 20 cm pour assurer le passage de la scie et, d'autre part, que l'on recherche à optimiser la quantité de matière et donc à récupérer les modules les plus grands possibles.

Ainsi, du quadrillage de chacun des plans du bâtiment découle 4 modules différents :

- 1 module constitué de deux colonnes découpées à 20 cm du sol existant reliées par une poutre de 820 cm de long et de 115 cm de large. Sa hauteur de 380 cm définit la différence entre étages du nouveau projet.

- 3 modules de 820 cm de long mais aux largeurs différentes.

- Dalle S : 820 cm x 270 cm

- Dalle M : 820 cm x 460 cm

- Dalle L : 820 cm x 485 cm

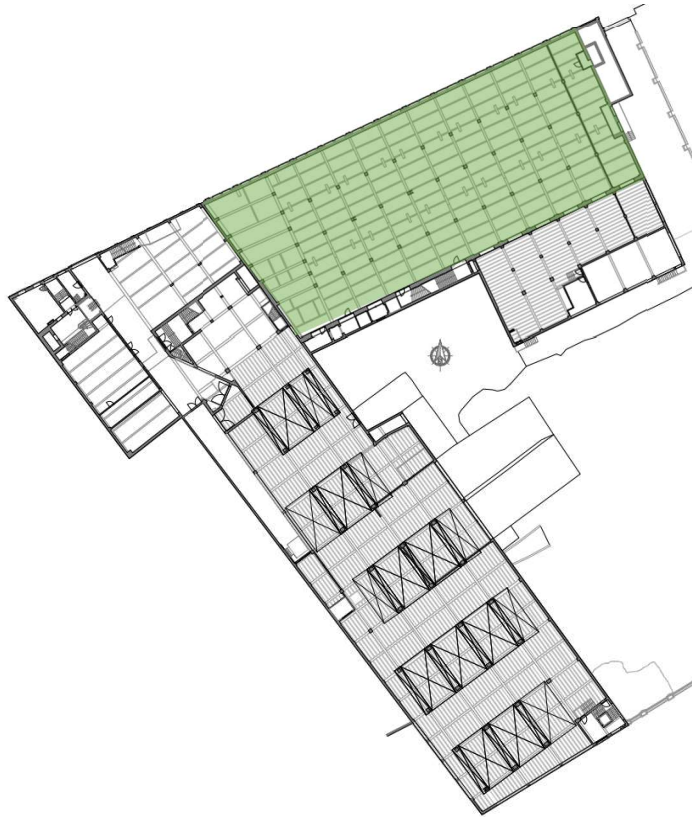


Fig. 29 - Découpage des structures dans le plan avec la partie conservée en vert

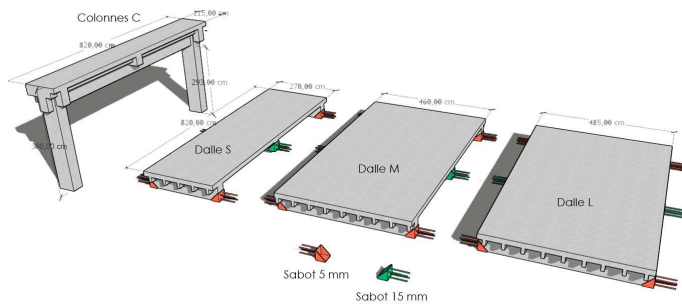


Fig. 30 - Les 4 modules structurels de béton armé

Les éléments situés entre les modules récupérés ne possèdent plus de poutres d'encadrement et ne peuvent donc plus être réutilisés comme dalle. Ils seront concassés et réutilisés ainsi que les déchets de béton produits par le chantier. Les plus grands morceaux seront utilisés pour constituer un mur à moellons sur la façade ouest du projet faisant contreventement. Les plus petits serviront de graviers de fondation pour ce projet ainsi que pour d'autres.

Au total, 938,9 m³ de modules structurels de béton armé sont réemployés pour le projet et 266,1 m³ sont mis à la disposition d'autres projets. Un volume de 1205 m³ d'éléments est réemployé ce qui équivaut, pour un béton standard de 2,5 tonnes/m³ à un poids de 3012,5 tonnes. En reprenant la valeur de 159 kgCO_{2e}/tonne de béton données par les bilans des gaz à effet de serre de l'ADEME, cela équivaut à 479 tonnes de CO_{2e} économisé, soit les émissions annuelles de 59 belges selon les chiffres de la Banque Mondiale.

Sur le total de 3844 m³, cela laisse 2639 m³ de déchets dont 241,9 m³ seront réutilisés en moellons pour constituer la façade ouest et les 2397,1 m³ concassés restant serviront pour les fondations de projets et d'autres.



Fig. 31 - Vue perspective du modèle 3D des dalles assemblées aux arcs de colonnes

5.3 Les briques

Sur les 2050,4 m² de briques récupérées, 1538 m² sont nécessaires pour la réalisation du parement des façades du projet.



Fig. 32 – Élévations Nord et Sud du nouveau projet proposé par cette étude

5.4 Les fenêtres

Les 46 fenêtres d'intérieur séparant les classes de l'espace de circulation central reprennent à chaque fois une moitié des baies réemployées, disposant ainsi d'un ouvrant en partie haute pour, par exemple, avoir une ventilation par *night cooling*⁴ lors des saisons chaudes. La baie existante est découpée et divisée à la scie autour de ses vitres centrales. Un nouveau cadre en bois doit être réalisé pour entourer chacune des baies. Elles mesurent désormais 2 m x 3 m et réemploie un total de 276 m² de fenêtres sur les 600 m² disponibles. Le surplus peut être stocké afin d'être réemployé dans d'autres projets. Les vitres doivent être nettoyées et, pour certaines, remplacées. Il sera également nécessaire de réaliser un tri des vitres ou des baies les plus défectueuses afin de sélectionner celles en meilleurs états.



Fig. 33 - Photographie des baies avec leurs ouvrants

⁴ Le *night cooling* est une technique de ventilation consistant à laisser ouvertes les fenêtres durant la nuit lors des saisons chaudes afin de profiter de cette fraîcheur pendant la journée en les refermant le matin.

5.5 De l'élément réemployé au déchet

Parmi les matériaux récupérés sur le bâtiment existant, une gradation allant du réemployé au déchet peut être observée. Au début de la liste se situe la meilleure récupération possible du matériau. Cet état se détériore en descendant dans celle-ci.

- L'élément réemployé est directement installé dans le projet à la suite de l'extraction sur le bâtiment source.

- L'élément réemployé est mis de côté à la suite de son extraction en attendant de pouvoir l'installer dans le projet.

- L'élément réemployé est stocké afin d'être mis à la disposition d'autres projets.

- L'élément doit être traité ou réparé en atelier avant d'être réemployé.

- L'élément est trop endommagé ou dans l'impossibilité d'être réemployé tel qu'elle est doit être recyclé et perdre en qualité afin de trouver un usage sur site.

- L'élément est trop endommagé ou dans l'impossibilité d'être réemployé tel quel et doit être recyclé et perdre en qualité afin de trouver un usage.

- L'élément ne peut plus doit être brûlé avec valorisation énergétique.

- L'élément doit être brûlé.

- L'élément doit être jeté en décharge.

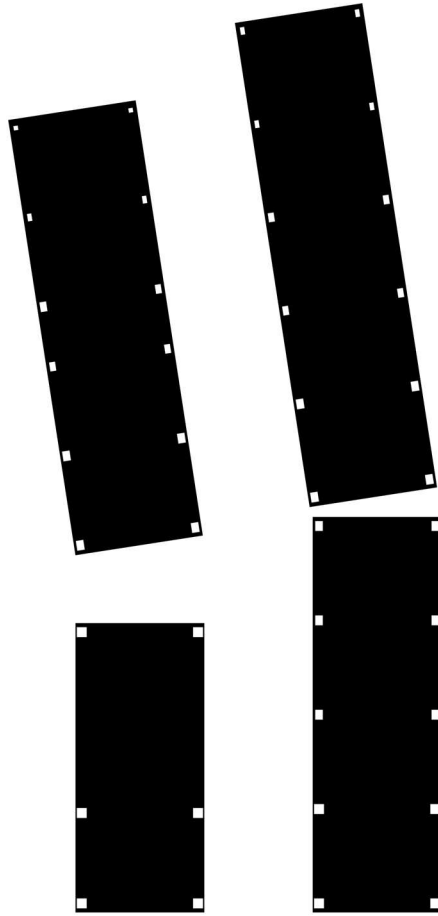


Fig. 34 - Schéma typologique du projet

5.6 Le déplacement des éléments

Afin de sélectionner la grue qui opérera sur chantier, c'est le poids de la plus grande dalle qui est considéré. Le module de dalle L de 4 m 85 de large par 8 m 20 de long a un volume de 10,4 m³. Afin de prendre un minimum de risque et parce que ces éléments ont été dimensionnés pour supporter des charges d'usine, le poids du m³ de béton est considéré comme étant 3 tonnes et plus seulement 2,5 tonnes. La grue doit donc être capable de pouvoir élever une charge 31,2 tonnes. Cependant, la recherche du modèle de grue nécessaire doit tenir compte d'un positionnement optimal de la grue entre le bâtiment déconstruit et le projet construit, lui permettant d'utiliser un bras de levier court lui demandant ainsi moins de résistance.

D'autre part, lors du déplacement des modules, une rigidification systématique des éléments doit être réalisée afin d'éviter toute désolidarisation potentielle. De la même manière que ce qui a pu être analysé dans l'étude de cas, un cadre de levage métallique devra être employé et le phasage de chantier devra en tenir compte pour assurer son glissement sous le module également lors du réassemblage.

5.7 Le bois

Le bois constituera le matériau en dialogue avec le béton réemployé dans ce projet. Qu'il soit neuf ou également de réemploi, il recouvrira l'espace central du projet dédié à la circulation. Il sera maintenu par des sabots fixés à la structure de béton réemployé. En façade, l'isolation est maintenue dans une structure de bois autoportante, retenue cependant par des équerres à la structure de béton. En plan, le bois aura une marge d'erreur de 2 cm de chaque côté, en relation avec le béton qui l'encadre.

5.8 Les sabots

Les sabots utilisés pour porter les dalles de béton sont fixés de chaque côté du module C, d'un seul côté ou d'aucun côté si nécessaire, aux six amorces de poutres découpées. Afin de supporter un tel poids, le sabot central doit avoir une épaisseur de métal de 1,5 cm tandis que les deux sabots extrêmes doivent, eux, avoir une épaisseur de 0,5 cm. Le plan est dessiné de telle manière que 2 cm de marge d'erreur sont toujours prévus de chaque côté de la dalle pour que ses 3 poutres puissent s'insérer aisément dans le sabot. Ce dernier est également dimensionné 2 cm plus large que les poutres pour les mêmes raisons. Des sabots sont également utilisés pour soutenir les poutres de bois soutenant le plancher de l'espace central de circulation. Par ailleurs, des équerres sont disposées aux 4 coins de la base des colonnes pour parer tout éventuel déplacement.

Tout comme présenté lors de l'étude de cas, le sabot utilisé est inspiré des sabots de pont d'ascenseur disposant d'une armature métallique. Celle-ci serait démultipliée par 4 ou 6 et installée dans le module C foré à cet effet, dans de l'époxy coulé entourant les armatures et assurant leur bonne tenue et accroche à l'élément structurel.

Afin d'insérer ces armatures de la meilleure des manières, un des modules C en surplus sera découpé à perte afin de pouvoir en analyser le ferrailage et en tirer des conclusions quant à la disposition des armatures déjà en place des autres modules si la documentation traitant de ce sujet n'est pas disponible.

Enfin, ces sabots devront encore faire l'objet d'un développement plus poussé pour s'assurer de la possibilité de leur production puisqu'aucun modèle de sabot pour une connexion béton-béton n'a été encore trouvé.

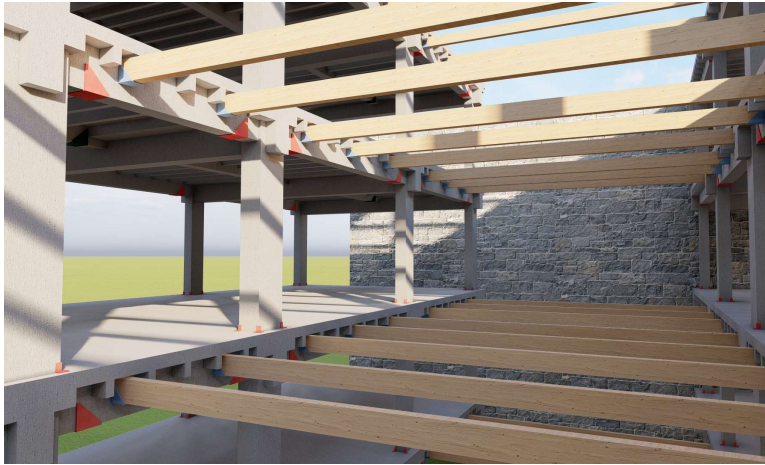


Fig. 35 - Vue perspective du modèle 3D des poutres en bois assemblées aux dalles au moyen de sabots

6. PROPOSITION de la STRUCTURE PROJETÉE

Ce travail de fin d'étude porte sur une proposition d'un nouveau système constructif en adaptant un projet existant. Pour cette raison, une comparaison de ces deux projets a son importance afin d'évaluer ce que le système développé a pu affecter. D'autre part, une explication des différentes décisions opérées lors de la réalisation du nouveau projet dans son ensemble permettra de saisir son langage. Aussi bien à l'échelle du site via la volumétrie, à l'échelle du programme via la dimension de ses classes ou la disposition de ses espaces ou à l'échelle de la technique via les détails des différentes connexions.

6.1 Phasage de chantier

Comme mentionné précédemment, un aspect essentiel de ce travail est l'organisation du découpage et du montage des modules structurels de béton armé.

Afin de pouvoir facilement recenser les différents modules récupérés et leur localisation dans le nouveau bâtiment, un code a été mis en place.

Les différents étages sont désignés comme suit :

- sous-sol : 01
- rez-de-chaussée : 00
- premier étage : 10
- deuxième étage : 20
- troisième étage : 30

C30.03-09 désigne les modules C numéro 3 à 9 (03-09) du 3^{ème} étage (30).

Étage d'origine	Découpe	Stockage	Montage
R+3	C30.01	/	C00.01
	C30.02	1C30	C20.12
	C30.03-09	(7C30)	/
	L30.01-06	(6L30)	/
	M30.01-03	3M30	M10.13-15
	M30.04-05	(2M30)	/

Fig. 36 - Extrait du tableau de phasage de découpage-montage

Dans la troisième colonne intitulée de « Stockage », lorsqu'un « / » apparaît, cela signifie que l'élément est directement transporté depuis son emplacement dans le bâtiment source jusqu'à son emplacement final dans le bâtiment projeté. La quantité de modules est notée avant le code. Ainsi, 7C30 indique que 7 modules C du troisième étage sont en stockage. Si le code est encadré de parenthèse, c'est qu'il est mis à disposition d'autres projets, sinon, c'est qu'il est en stockage dans l'attente de pouvoir être installé à son emplacement définitif dans le projet. Cet emplacement est repris dans la dernière colonne.

Afin d'informer les architectes et les clients des autres projets alentours de la disponibilité des éléments, ceux-ci doivent être enregistrés dans une banque de matériaux en ligne.

Ce phasage demande donc une démolition lente et progressive doublée de l'intervention d'une même entreprise pour réaliser la déconstruction et la construction, pour démolir en même temps que de construire.

Très logiquement, le découpage des modules commence par les derniers étages ce qui explique que les modules que l'on

retrouve du côté du mur aveugle de contreventement en moellon du côté ouest du bâtiment projeté soient les modules plus fins des derniers étages en premier lieu. Par la suite, lorsque différents modules se superposent, les modules des étages inférieurs sont installés autant que possible en partie basse du projet. Dans l'illustration ci-dessous, les modules sont positionnés à leurs emplacements précis sur le site d'abord dans leur position dans le bâtiment déconstruit, puis dans le bâtiment projeté. Les différents modules sont aussi représentés suivant un code couleur par étage du bâtiment existant.

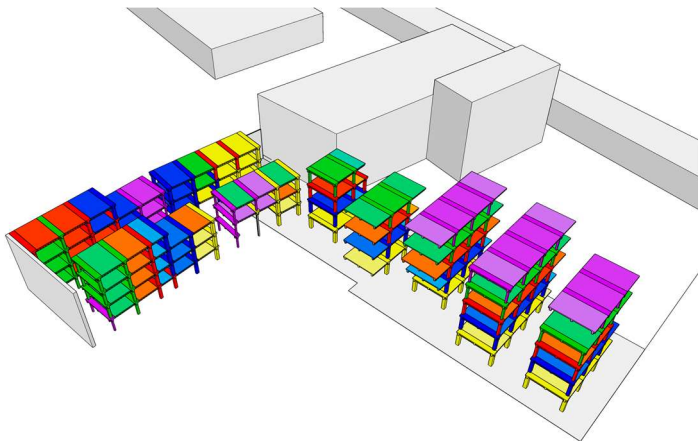


Fig. 37 - Modélisation 3D des modules dans le bâtiment existant et dans le bâtiment projeté

6.2 Comparaison des espaces

Le nouveau projet proposé par cette étude se compose d'un espace de circulation central en bois encadré par deux séries d'éléments structurels en béton armé réemployé le séparant de la façade à l'exception des espaces centraux où le bois assure la reprise du changement de direction de la volumétrie et des extrémités de l'espace de circulation traversant le bâtiment de sa façade est à sa façade ouest.

La double hauteur surplombant les gradins du forum d'entrée a pu être conservée, reprise par deux colonnes métalliques soutenant les dalles du troisième étage de l'école. Les gaines techniques ne passent pas à travers le béton réemployé afin de ne pas couper dedans, de le garder le plus réemployable possible, en définitive de ne pas le sous-cycler. C'est la circulation centrale en bois qui est percée par les gaines techniques de ventilation, de canalisations et d'électricité. Le module de ventilation se situe sur la toiture du quatrième étage de l'école tandis que l'espace créé par le virage du bâtiment du côté Nord est utilisé au R0 comme salle des machines pour l'eau, le gaz et l'électricité. Aux étages supérieurs, cet espace est combiné à la classe adjacente afin de former une classe plus spacieuse.

Les appartements situés par-dessus la moitié de l'école bénéficient d'une gaine technique et d'un espace de circulation verticale traversant l'édifice en son centre. Le plan des appartements n'est pas traité car, tout d'abord, la quantité de matériaux récupérés dans le bâtiment déconstruit ne suffit pas à la réalisation de cette extension et, d'autre part, les architectes avaient déjà l'intention de différencier la partie reprenant l'école des appartements en utilisant un autre matériau pour sa façade. Cela pourrait suivre la même logique pour son intérieur.

Les classes sont séparées par une épaisse cloison acoustique en bois et leur sol est recouvert d'une chape coulée par-dessus la dalle également pour des raisons acoustiques. Celle-ci ne se solidarise cependant pas avec la dalle, la laissant donc conserver son potentiel de réemploi. Leur éclairage est assuré par un système Paulmann apparent afin de profiter du béton apparent constitué d'une multitude de plus petites poutrelles

participant elles aussi à casser le son, afin de proposer une acoustique des plus confortables dans les classes.

À l'intersection entre les deux matières, le béton et le bois, le changement de matérialité laisse un espace de marge d'erreur pour insérer les différentes poutres supportant le plancher du couloir central. Cet espace doit nécessairement être rempli d'un joint RF (résistant au feu) et acoustique. Il en va de même pour la connexion béton-béton au sein des classes.

Finalement, ce bois central léger et ces deux façades lourdes sont à l'image de leur fonction : un espace de circulation où l'on se déplace entre les classes où l'on s'assied pour apprendre.

7. DISCUSSION

Au fil de cette recherche, différentes difficultés ont pu être rencontrées face à l'adaptation d'un système constructif et la mise en œuvre d'éléments structurels réemployés en béton armé.

Comme il a déjà été fait mention, la réutilisation des anciennes fondations est un point de recherche très intéressant dans une logique d'économie de la matière et de la production de ciment neuf. Celles-ci définiraient alors l'espacement des éléments structurels du nouveau bâtiment, le réemploi de cette grande quantité de béton ferait loi pour la définition de la volumétrie. Il serait nécessaire de développer ce point dans une recherche ultérieure pour pouvoir parer à cette fatalité qu'est l'utilisation obligatoire de béton neuf pour des fondations. Cependant, il est indispensable de noter que l'on construit 4 à 8 fois plus que ce que l'on détruit, ce qui constitue une des limites du projet, aussi bien pour cette question de la réutilisation des fondations que pour celle du réemploi des structures existantes. C'est pour cette raison que la recherche au sujet des ciments *low-carbon* est si essentielle à l'avenir de notre planète. Cela étant dit, cette profusion de construction neuve sur des terrains encore non-bâti est sûrement un des premiers éléments à remettre en question dans la manière dont notre société construit et s'étale sur la nature plutôt que de proposer des bâtiments plus compacts et efficaces sur un terrain déjà urbanisé.

Une autre réflexion qui bénéficierait d'une plus grande profondeur de recherche et de développement serait celle portant sur les sabots des liaisons béton-béton à armatures forées dans de l'époxy coulée. Un système similaire n'a pas encore été trouvé et nécessiterait donc un développement plus approfondi afin de concrétiser d'autant plus la proposition de ce mémoire.

Du point de vue de la réalisation du projet, la volumétrie du projet proposé et celle du projet des architectes ne correspondent pas. En effet, l'utilisation des modules a arrêté la largeur de la structure à 8 m 20, basé sur l'espacement de deux colonnes et de la découpe de leur pourtour. La volumétrie a donc dû être élargie afin de conserver une largeur confortable pour l'espace de circulation centrale.

Enfin, d'après une estimation de Corentin Fivet et de son laboratoire SXL, si tout le béton déjà mis en œuvre était réemployé, l'empreinte carbone mondiale pourrait diminuer de 1%. 1 seul pourcent qui représente pourtant une énorme quantité de carbone économisé pour notre planète sur les 35 mégatonnes annuelles.

8. CONCLUSION

Ainsi, par l'utilisation de sabots métalliques ancrés, des colonnes et des dalles de béton armé déjà en œuvre dans un bâtiment peuvent, théoriquement, être découpées et réemployées, de préférence sur le même site afin d'économiser les émissions liées au transport. Ces différents modules peuvent effectivement composer la structure d'un projet contemporain. Le système constructif développé dans cette recherche constitue une alternative plus durable aux structures bétonnées coulées sur place aujourd'hui encore si populaires.

En outre, ce mémoire a établi que, lors de la réalisation d'un nouveau projet impliquant la démolition d'un bâtiment, un ordre de réflexion doit toujours être respecté. Il est, tout d'abord, préférable, avant même de vouloir démolir, de se pencher sur l'adaptation de l'édifice, puis d'étudier le potentiel de réemploi de ses éléments, aussi bien ceux nécessaires au parement que ceux dédiés à la structure. Après cette étude, la matière restante peut être *downcyclée* ou, s'il n'y a pas d'alternative, brûlée ou mise en décharge.

De plus, cette étude a pu démontrer que, grâce à l'omniprésence du béton dans notre environnement bâti, et grâce à la pérennité de cette matière, le potentiel d'économie d'émissions de CO₂ émis est gigantesque et doit être exploité.

Seulement, est-il possible, dans un monde où la rentabilité fait loi, de se permettre de patienter pour une découpe à la scie à diamants au nom de la planète que nous laissons aux futures générations ?

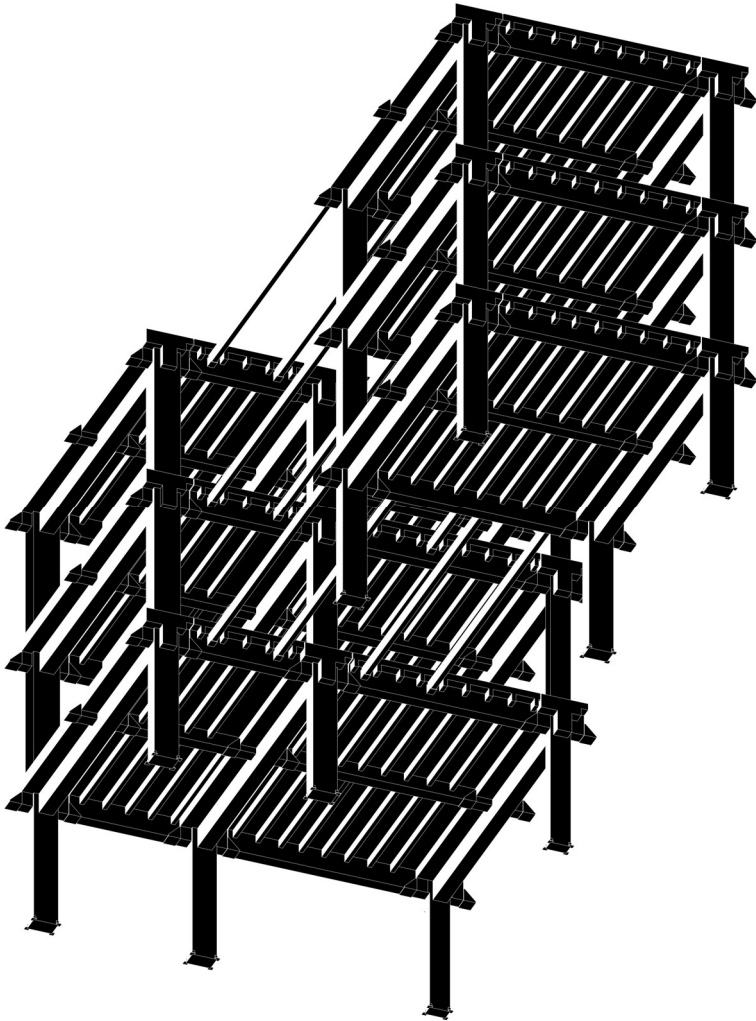


Fig. 38 - Axonométrie du système structurel du projet

9. ANNEXES

9.1 Description du site et du projet Citygate

Le projet s'implante à Cureghem. Ce quartier bruxellois se situe dans la commune d'Anderlecht, entre la Gare du Midi et le canal de Bruxelles. Le sujet de ce travail porte sur la proposition d'un système constructif différent pour l'un des bâtiments composant le projet Citygate II.

À Anderlecht, entre la Senne et le Canal, le long de la voie de chemin de fer, le projet CityGate est le fruit de la coopération de deux administrations régionales, celle de citydev.brussels et celle de la SLRB (société du Logement de la Région Bruxelles-Capitale). Cet ensemble de 3 projets doit répondre aux recommandations du contrat de quartier Canal-Midi. Il est intégré dans le PPAS (plan particulier d'affectation du sol) de Biestebroeck et est également inscrit aux ZEMU (Zones d'Entreprises en Milieu Urbain). Autant de cadres à suivre par les différents architectes engagés sur le développement de projets mixtes assurant une redynamisation de ce quartier de la partie sud-ouest de Cureghem. C'est un territoire bruxellois d'une superficie de plus de 90.000 m² que cette intervention vient travailler.

9.1.1 CityGate I

Cette première étape du projet se situe dans un espace charnière entre la gare du Midi, le quartier Cureghem et les différents projets fleurissant le long du Canal. Entre les rues Docteur Kuborn, des Marchandises et des Deux Gares, différentes friches industrielles sont à réhabiliter. Ces espaces désaffectés doivent recevoir plusieurs centaines de logements, des commerces et des services et équipements et l'espace public qui les entoure est également à retravailler. Plus précisément, il est projeté d'accueillir un Bâtiment à Affectations Multiples (BAM), des crèches, un centre social et de santé intégré (CSSI) participant

à l'amélioration de l'offre de santé dans un quartier Bruxellois plus en difficulté.

9.1.2 CityGate II

Entre la rue des Deux Gares et la rue des Goujons, c'est dans une ancienne usine pharmaceutique du 19^{ème} désaffectée depuis une bonne dizaine d'année que se tiennent désormais différentes activités temporaires tels que des studios d'artiste, musiciens et plastiques, un fab lab, des ateliers participatifs et de découverte et un restaurant social. Ces différentes activités alternent sous la direction de la SPRL Entrakt ayant développé Studio CityGate dont les bureaux sont au sein même du bâtiment. Cette organisation constitue la deuxième plus grande occupation temporaire de Belgique.

Une des ailes du bâtiment datant elle du début des années '50 va être démolie dans le courant de l'année 2024, laissant place à l'ensemble de projets se déployant tout le long de l'ancienne friche, développés par un consortium international d'architectes poussant la mixité fonctionnelle des espaces mis en forme. L'activité économique et les commerces sont projetés à l'avant de la scène. Ce sont à la fois les activateurs de l'espace public, et les catalyseurs reliant les nouveaux arrivants aux riverains en les servant tout deux également et en leur proposant différentes activités. Parmi ces dernières, une grande école d'une capacité de 1.250 élèves de première année de primaire à troisième de secondaire proposant ainsi ses services également aux enfants riverains. De cette manière, le programme mixte comprenant 400 logements dont 277 sociaux, est composé d'une école francophone de pédagogie de l'ASBL "École de Tous" fonctionnant en tronc commun avec des regroupements de deux années dans une même classe.

15.000 m² seraient donc dédiés aux activités économiques et la mise en place d'un parking nécessaire est prévue afin d'accueillir tous les nouveaux véhicules utilitaires des commerces mais tout particulièrement des nouveaux habitants afin de limiter l'empreinte sur les stationnements en voirie. Les différents volumes que constituent le projet s'organisent autour

de deux places reliées par un axe végétalisé à circulation mixte. Le piéton occupe une place très importante et la mobilité douce est favorisée par le déploiement d'équipements dédiés ou encore l'installation d'un atelier de réparation de vélos.

Une stratégie de préservation et de favorisation de la biodiversité est également mise en œuvre et commence déjà à être appliquée avec un développement d'espaces verts, de biodiversité. D'autre part, un accent tout particulier sur la durabilité, l'utilisation de matériaux de préfabrication, la réutilisation et le recyclage, est également déjà d'actualité avec la mise en place de récupération des eaux de pluie pour les eaux sanitaires. Le chantier devrait débuter fin 2024 et se terminer 4 ans plus tard.

9.1.3 CityGate III

Cette dernière étape du projet de développement urbain CityGate se situe à l'angle des rues du Prévinnaire et des Bassins, où une Zone de Forte Mixité est en place. Un programme exemplaire dans son intégration urbaine et sa mixité des fonctions a pour objectif d'y être développé, comprenant 12.000 m² de logements, 500 m² de services et 2.500 m² d'espace public végétalisé participant aux liaisons piétonnes de Cureghem.

9.1.4 Critiques ou points d'attention

Ces grands changements dans un paysage urbain à l'identité et la population bien ancrées doivent s'effectuer dans leur respect et leur considération, elles ne peuvent être négligées. Les différentes installations doivent s'assurer de leur intégration dans un quartier à la population inévitablement plus pauvre que celle amenée par ces nouveaux projets. Ils devront constituer les catalyseurs d'interaction entre ces différentes populations, que ces programmes et volumes assurent certes une mixité d'activités mais également une mixité d'utilisateurs, qu'ils ne soient pas

générateurs de scissions et de marqueurs sociaux. L'espace investi par les parkings est un point sur lequel il est important d'être attentif vis-à-vis de la quantité de personnes que ce grand afflux de nouveaux logements va créer. Il en va de même pour un peu prêt tous les services mis en place : les architectes doivent s'assurer qu'ils sont capables de contenter tout le monde et que ce qui est mis en place serve effectivement aussi bien les nouveaux venus que les habitants déjà là. Les différents bureaux parlent en effet de s'implanter dans la continuité d'un site et de son histoire (notamment Noaarchitecten) mais il est tout aussi important de s'inscrire dans ce quartier en harmonie avec ses occupants.

La porosité de l'ensemble des nouveaux bâtiments est une clé essentielle à l'invitation du voisinage à utiliser les nouveaux équipements. L'espace entre les bâtiments doit prendre une importance aussi grande que les bâtiments eux-mêmes. Un autre élément apparaissant important à noter, est la grande quantité d'activités temporaires prenant pour le moment place dans le bâtiment de Citygate II que de nombreux habitants se sont appropriés. Ces activités ne doivent pas laisser place à d'autres mais perdurer. Ce projet ne doit pas en signer la fin mais leur proposer une pérennité, tout cela en dialogue avec leurs responsables, les habitants et, bien entendu, les décisionnaires.

Tout autant de points d'attention qu'il est beau d'écrire sur papier mais que les différents bureaux d'architecture se doivent de mettre en pratique dans ce qui est mis en œuvre. Il en va de même pour les différents étudiants qui travaillent dans cette partie de Bruxelles exigeant une attention toute particulière à l'intégration dans un paysage urbain d'une nature et d'une qualité différentes, impliquant une population qu'il nous faut connaître, apprécier et comprendre.

Les différents projets déjà présentés offrent une mixité très intéressante au demeurant. Ils ne doivent cependant pas être à seule destination des nouveaux arrivants mais également de la population riveraine déjà en place, partage qui permettrait une intégration et un échange entre les habitants de ce même quartier de Biestebroek.

Que tout le monde puisse à la fois y habiter, se divertir, apprendre, travailler et commercer en un même endroit, ensemble.

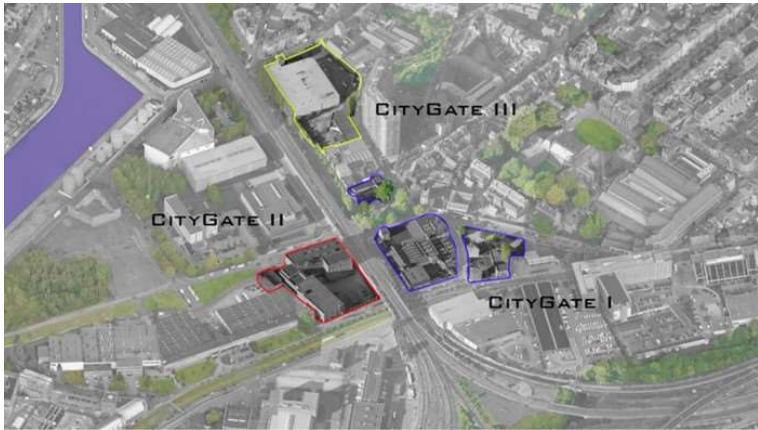


Fig. 39 - Photographie aérienne du projet CityGate



Fig. 40 - Plan d'implantation du projet CityGate II

10. Bibliographie

Corentin Fivet, Jan Brütting, 2 janvier 2020. « Nothing is lost, nothing is created, everything is reused : structural design for a circular economy » revue *TheStructuralEngineer*, vol. 98, p.74-81.

Küpfer Célia, Corentin Fivet, 1 février 2021. « Déconstruction sélective - Construction Réversible: recueil pour diminuer les déchets et favoriser le réemploi dans la construction » EPFL, SXL.

<https://infoscience.epfl.ch/record/288678?ln=fr>

Favre V., Gonçalves M., 2020. « Deux projets pour la ville de Meyrin ». Entretien par Küpfer C.

Ellis, L. D., Badel, A. F., Chiang, M. L., Park, R. J.-Y. & Chiang, Y.-M. Proc. Natl Acad. Sci. USA 117, 12584–12591 (2020). « Toward electrochemical synthesis of cement—Anelectrolyzer-based process for decarbonating CaCO₃ while producing useful gas streams ».

<https://www.pnas.org/doi/epdf/10.1073/pnas.1821673116>

Worrell E., Price L., Martin N., Hendriks C., Ozawa Meida L. (2001). « Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry ». *Annu. Rev. Energy Environ.* 26 : 303-329.

<https://www.annualreviews.org/doi/full/10.1146/annurev.energy.26.1.303>

Kristinsson J., Hendriks Ch. F., Kowalczyk T., te Dorsthorst B.J.H., 2001. « Reuse of Secondary Elements : Utopia or Reality ». CIB World Building Congress, Wellington.

<https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB3125.pdf>

Coenen M., Lentz G., Prak N., 1990. « De Kop is Era: Evaluatie van de aftopping van een flat in Middelburg ». Delft University Press, Delft. La publication est disponible chez IOS Press ici:

<http://resolver.tudelft.nl/uuid:d35bc47b38fe-4bcf-bc7f-1199dbcef1cc>

Opalis, entre 2019 et 2021. « Fiche-matériau : Briques pleines en terre cuite ».

https://opalis.eu/sites/default/files/2022-01/2.40_fr_-_brique_pleine_en_terre_cuite_v01_0.pdf

Sites Internet

Groupe Holcim. « ECOPlanet Green Cement ». Consulté le 9 mai 2021.

<https://www.holcim.com/what-we-do/cement/ecoplanet-green-cement>

Groupe Hoffmann Green Cement. « Solutions - Des technologies pour des projets bas carbone ». Consulté le 12 février 2021.

<https://www.ciments-hoffmann.fr/technologies/solutions/>

Schneider M. (2019). « The cement industry on the way to a low-carbon future ». Cement and Concrete Research 124 : 105792, consulté le 7 décembre 2020

<https://www.sciencedirect.com/journal/cement-and-concrete-research/vol/124/suppl/C>

Sustainable Development Goals Belgium. « Les SDGs ». Consulté le 20 mai 2022.

<https://www.sdgs.be/fr/sdgs>

ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), Base carbone des bilans de gaz à effet de serre, consulté le 7 avril 2022

https://bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?ciments__chaux__platres__bet.htm

Nature, 28 septembre 2021. « Concrete needs to lose its colossal carbon footprint » revue Nature, Vol. 597, p. 593, consulté le 4 avril 2022.

<https://www.nature.com/articles/d41586-021-02612-5>

International Energy Agency, mars 2019. « Material efficiency in clean energy transitions » IEA technology report, consulté le 4 avril 2022.

<https://www.iea.org/reports/material-efficiency-in-clean-energy-transitions>

Data commons de la Banque Mondiale pour la Belgique. « Environment, Air, Carbon Dioxide emissions per capita ». Consulté le 27 mai 2022.

https://datacommons.org/place/country/BEL?utm_medium=explore&mprop=amount&popt=Emissions&cpv=emittedThing%2CCarbonDioxide&hl=fr

Earthsight.org, 25 octobre 2021. « FSC hall of shame : The ethical wood label's long line of scandals ». Consulté le 20 mai 2022.

<https://www.earthsight.org.uk/news/blog-fsc-hall-of-shame-the-ethical-wood-label-long-list-of-scandals>

Page Wikipédia des grues de chantier, portail du bâtiment et des travaux publics. Consulté le 29 novembre 2021.

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Grue_\(chantier\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Grue_(chantier))

citydev.brussels. « CityGate ». Consulté le 28 octobre 2021.

<https://www.citydev.brussels/fr/projets/citygate>

<https://activityreport2017.citydev.brussels/fr/project/citygate>

consult.citydev. « CityGate II » Consulté le 28 octobre 2021.

<https://consult.citydev.brussels/fr/citygateII>

NoArchitecten. « 115 Citygate II / Petite île ». Consulté le 1 novembre 2021.

<https://noarchitecten.net/projects/109/115-citygate-ii-petite-ile>

École de Tous, 16 décembre 2020 « Approbation de l'avant-projet « Petite île - CityGate II » ». Consulté le 15 février 2022.

<https://ecoledetous.be/actualites/approbation-de-lavant-projet-petite-ile-citygate-ii/>

École de Tous. « Les classes de degré ». Consulté le 15 février 2022.

<https://ecoledetous.be/comprendre-l-ecole-de-tous/lorganisation-de-lenseignement/les-classes-de-degre/>

École de Tous, 10 novembre 2020. « Nouvelle note EDT disponible : Infrastructure d'une école de tronc commun École de Tous ». Consulté le 15 février 2022.

<https://ecoledetous.be/actualites/nouvelle-note-edt-disponible-les-infrastructures-dune-ecole-de-tronc-commun-ecole-de-tous/>

Bibliographie des illustrations

Fig. de page de garde - Axonométrie d'assemblage du système constructif développé dans ce mémoire. Document personnel.

Fig.1 - Photographie des archives cantonales de la conservation des monuments de Zürich « Photographie du pont en bois à Eglisau ».

Fig.2 - Photographie des archives cantonales de la conservation des monuments de Zürich « Photographie de la charpente de la ferme à Rheinau ».

Fig.3 à - Images issues de l'ouvrage de Kùpfer Célia, Corentin Fivet, 1 février 2021. « Déconstruction sélective - Construction Réversible: recueil pour diminuer les déchets et favoriser le réemploi dans la construction » EPFL, SXL.

<https://infoscience.epfl.ch/record/288678?ln=fr>

Fig. 8 et 9 - Photographies du projet RE:CRETE issues du site de l'EPFL, prises par le SXL.

<https://www.epfl.ch/labs/sxl/index-html/research/reuse-of-concrete/>

Fig.10 à 12 - Photographies personnelles du pont RE:CRETE réalisé par le SXL, EPFL, dans l'atelier de la Halle Bleue, à Fribourg, Suisse.

Fig.13 et 14 - Photographies personnelles du pavillon TRC réalisé par des chercheurs et chercheuses de l'EPFL, Halle Bleue, Fribourg, Suisse.

Fig.15 – Étapes du système Peikko issu du « Peikko Circular White Paper ».

<https://d76yt12idvq5b.cloudfront.net/file/dl/i/tFlmyg/vM6Il-V7Cy8S1tL6OAPzDO/PeikkoWhitePaperCircularFuture2018.pdf>

Fig. 16 et 17 – Dessins Autocad personnels de sabots.

Fig.18 et 25 – Plan du rez-de-chaussée du 152 rue des Goujons, Anderlecht fourni par citydev.brussels et utilisé avec leur accord.

Fig. 19 et 20 – Photographies personnelles de l'ancienne usine pharmaceutique.

Fig. 21, 24 et 29 – Dessins Autocad personnels du plan du rez de chaussée du site et de l'école dessinés par les architectes du projet CityGate II.

Fig. 22 et 23 – Illustrations tirées de la présentation du projet Citygate II réalisée par l'équipe d'architecte composée de noAarchitecten, Aurélie Hachez + Elseline Bazin, Korteknie Sruhlmacher architecten, Sergison Bates architects et Boom Landscape.

https://consult.citydev.brussels/sites/default/files/19%2009%2018%20Pr%C3%A9sentation%20riverain_compressed.pdf

Fig. 26 - Photographie personnelle du rez de chaussée du bâtiment B du studio CityGate actuellement occupé par un skate-park temporaire.

Fig. 27, 28 et 33 – Photographies personnelles.

Fig. 30 et 37 - Image issue d'une modélisation 3D personnelle.

Fig. 31 et 35 - Rendu d'une modélisation 3D personnelle.

Fig. 32 - Dessins Autocad personnels des élévations du projet développé dans ce mémoire.

Fig. 34 - Dessin Autocad personnel du schéma typologique du projet.

Fig. 36 - Tableau personnel.

Fig. 38 - Axonométrie du système structurel. Document personnel.

Fig. 39 - Image d'une photographie aérienne légendée reprise du site de citydev.brussels sur la page de la présentation du projet CityGate.

<https://activityreport2017.citydev.brussels/fr/project/citygate>

Fig. 40 et 41 - Documents graphiques repris du site internet de l'un des bureaux désignés pour CityGate II : noaArchitecten.

<https://noaarchitecten.net/projects/109/115-citygate-ii-petite-ile>

Fig. 42 - Image reprise du site internet de l'Ecole de Tous, réalisée par les équipes d'architecte désignées pour CityGate II.

<https://ecoledetous.be/actualites/approbation-de-lavant-projet-petite-ile-citygate-ii/>