



LA CONCEPTION RÉVERSIBLE

GUIDE PRATIQUE



ENVIRONNEMENT.BRUSSELS

Avant-propos

Ce guide pratique trouve ses origines dans le projet européen de recherche et d'innovation BAMB - « Buildings As Material Banks » (BAMB)¹. Coordonné par Bruxelles Environnement entre juillet 2015 et février 2019, ce projet a rassemblé quinze partenaires de sept pays européens autour du concept d'un bâtiment comme (future) source de matériaux.

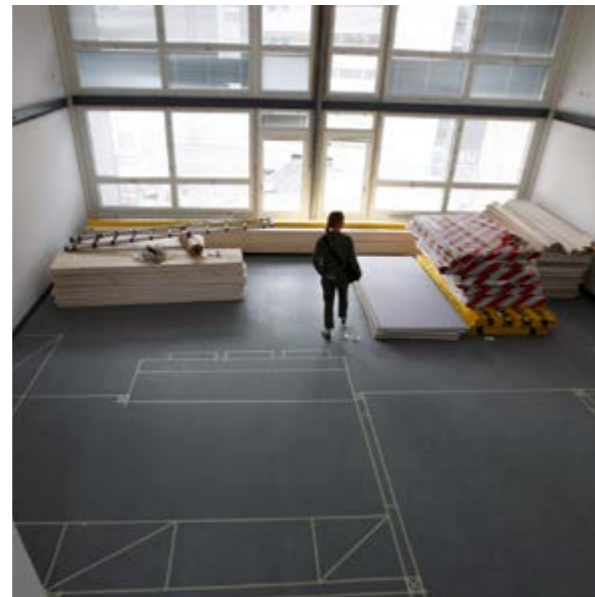
L'idée de base du projet BAMB est aussi simple que novatrice: au lieu de considérer les bâtiments comme des produits jetables qui seront démolis et réduits en déchets une fois qu'ils ne répondront plus à nos nouveaux besoins, les partenaires de BAMB ont étudié des stratégies de conception et des solutions techniques pour allonger leur durée de vie. L'un des principaux objectifs était de faciliter le désassemblage, le réemploi et le recyclage de qualité des produits de construction. Le projet BAMB s'inscrit donc parfaitement dans les principes de l'économie circulaire. En moins de quatre ans, les partenaires impliqués ont mis au point plusieurs outils pour faciliter la transition vers une économie circulaire, allant d'outils de conception circulaire, passeports de matériaux et modèles commerciaux circulaires à des recommandations politiques concrètes.

Dans le cadre du projet BAMB, une attention particulière a été accordée à la thématique de la « conception réversible ». Cela signifie que les bâtiments sont conçus de manière à pouvoir répondre à de multiples fonctions, à pouvoir être agencés de différentes manières et à être facilement démontables. La conception réversible vise, grâce à des interventions spatiales et structurelles réfléchies, à minimiser la production de déchets, lorsque les bâtiments se voient attribuer une nouvelle fonction et que les produits ou éléments de construction sont démontés pour être réutilisés.

Mais comment concevoir de manière réversible? Et quels sont les facteurs dont il faut tenir compte? Nous vous invitons à découvrir tout cela dans ce guide pratique. Dans le chapitre introductif, nous situons la conception réversible dans le contexte plus large de l'économie circulaire. Ensuite, dans le deuxième chapitre, nous examinons de plus près la définition de la conception réversible, en faisant une distinction entre la réversibilité spatiale et la réversibilité technique. Nous nous intéressons également à la capacité de transformation et au potentiel de réemploi des bâtiments et de leurs composants, deux concepts étroitement liés respectivement à la réversibilité spatiale et la réversibilité technique. Dans le troisième chapitre, nous examinons les indicateurs permettant de réaliser une réversibilité spatiale et réversibilité technique, avec des exemples concrets et un regard sur la chronologie (qu'est-ce qui est essentiel à quelle étape de la conception?). Au chapitre 4, nous mettons en lumière quelques études de cas intéressantes, qui démontrent chacune à leur manière que la conception réversible est une condition essentielle à la réalisation de projets de construction et de rénovation circulaires.

En résumé, quiconque souhaite en savoir plus sur la conception réversible est invité à consulter ce guide pratique. Il constitue un outil de conception utile pour la réalisation de bâtiments réversibles et par extension circulaires. Les points d'attention sont examinés en détail et, de plus, des principes concrets de conception sont formulés. De nombreuses illustrations, exemples et études de cas récents fournissent également l'inspiration nécessaire et montrent comment la théorie peut être mise en pratique. Lancez-vous!

¹www.bamb2020.eu. Le projet BAMB a été financé par le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne.



Sommaire

1. INTRODUCTION	6		
1.1 La conception réversible : un impératif social et écologique	6		
1.2 En route vers une économie circulaire	7		
1.3 Changement global des mentalités	8		
2. QU'EST-CE QUE LA CONCEPTION RÉVERSIBLE ?	10		
2.1 Réversibilité spatiale : concevoir pour une (plus) longue durée de vie	11		
2.2 Réversibilité technique : concevoir en vue du démontage et du réemploi	12		
2.3 Capacité de transformation et potentiel de réemploi	17		
3. PRINCIPES DE CONCEPTION	18		
3.1 Indicateurs de réversibilité spatiale	18		
3.1.1 Dimensions	18		
3.1.2 Position	24		
3.1.3 Capacité	27		
3.1.4 Potentiel de démontage et de réemploi	28		
3.2 Indicateurs pour une réversibilité technique	30		
3.2.1 Désassemblage fonctionnel	31		
3.2.1.1 Indépendance fonctionnelle	31		
3.2.1.2 Regroupement fonctionnel	36		
3.2.2 Désassemblage technique	37		
3.2.2.1 Élément de base	38		
3.2.2.2 Hiérarchie d'assemblage	40		
3.2.2.3 Coordination des cycles de vie	43		
3.2.3 Désassemblage physique	44		
3.2.3.1 Géométrie des connexions	44		
3.2.3.2 Séquence d'assemblage	46		
3.2.3.3 Types de connexions	48		
3.3 Profil global de potentiel de réemploi	53		
3.4 Etape par étape : l'essentiel dans chaque phase de conception	55		
3.4.1 Définition du programme	55		
3.4.2 Phase d'avant-projet	55		
3.4.3 Phase de conception définitive	56		
3.4.4 Exécution	56		
4. ÉTUDES DE CAS	58		
4.1 Build Reversible in Conception (BRIC), Bruxelles	58		
4.1.1 Réversibilité technique	58		
4.1.1.1 Indépendance fonctionnelle	58		
4.1.1.2 Élément de base	60		
4.1.1.3 Géométrie des bords de produit et des connexions	62		
4.1.1.4 Séquence d'assemblage	62		
4.1.1.5 Types de connexions	62		
4.1.1.6 Systématisation	64		
4.1.1.7 Coordination des cycles de vie	64		
4.2 Circular Retrofit Lab, Bruxelles			65
4.2.1 Réversibilité spatiale			65
4.2.1.1 Dimensions			66
4.2.1.2 Positionnement			66
4.2.1.3 Capacité			66
4.2.1.4 Potentiel de désassemblage et de réemploi			67
4.2.2 Réversibilité technique			68
4.2.2.1 Indépendance fonctionnelle			68
4.2.2.2 Regroupement fonctionnel			69
4.2.2.3 Élément de base			69
4.2.2.4 Coordination des cycles de vie			70
4.2.2.5 Géométrie des bords de produit et des connexions			71
4.2.2.6 Séquence d'assemblage			72
4.2.2.7 Types de connexions			72
4.3 Système de façade circulaire mur-rideau à la Gare Maritime, Bruxelles			73
4.3.1 Réversibilité spatiale			73
4.3.1.1 Dimensions			73
4.3.1.2 Positionnement			73
4.3.1.3 Capacité			73
4.3.1.4 Potentiel de désassemblage et de réemploi			73
4.3.2 Réversibilité technique			73
4.3.2.1 Indépendance fonctionnelle			78
4.3.2.2 Systématisation			80
4.3.2.3 Élément de base			82
4.3.2.4 Hiérarchie de (dé)montage et coordination du cycle de vie			83
4.3.2.5 Géométrie des bords de produit et des connexions			83
4.3.2.6 Séquence d'assemblage			83
4.3.2.7 Type de connexions			83
4.4 Hôpital Joseph Bracops, Anderlecht			86
4.4.1 Réversibilité spatiale			87
4.4.1.1 Dimensions			87
4.4.1.2 Positionnement			89
4.4.1.3 Capacité			91
4.4.1.4 Potentiel de désassemblage et de réemploi			92
4.4.2 Réversibilité technique			96
4.4.2.1 Indépendance fonctionnelle			96
4.4.2.2 Regroupement fonctionnel			96
4.4.2.3 Élément de base			98
4.4.2.4 Hiérarchie de (dé)montage			99
4.4.2.5 Géométrie des bords de produit et des connexions			99
4.4.2.6 Séquence d'assemblage			100
4.4.2.7 Types de connexions			100

1. Introduction

1.1 La conception réversible : un impératif social et écologique

En Europe, le secteur de la construction est responsable de 35,7 % de la production totale de déchets², de 40 % des émissions globales de CO₂ et de 50 % des ressources naturelles utilisées^{3,4}. Dans le même temps, de nombreux bâtiments existants ne répondent pas ou plus aux besoins, souhaits et exigences actuels. Par conséquent, près de la moitié des investissements des entreprises belges est consacrée à la démolition (partielle) et à l'adaptation de bâtiments existants⁵. En Flandre, 16 % de toutes les maisons nouvellement construites remplacent des maisons démolies qui n'ont pas pu avoir une seconde vie⁶. Et en Région de Bruxelles-Capitale, 32505 m² de bâtiments résidentiels et non résidentiels sont démolis chaque année⁷, ce qui contribue de manière significative aux 650 000 tonnes de déchets de construction et de démolition produits chaque année dans la région.

Les différentes parties qui composent les bâtiments sont physiquement reliées les uns aux autres et ce, dans un ordre précis. Il s'agit de composants qui ont chacun des utilisations et des durées de vie différentes. Si la structure porteuse d'un bâtiment a généralement une durée de vie d'au moins 75 ans, les installations techniques doivent être remplacées plus régulièrement et les finitions intérieures sont généralement remises à neuf tous les cinq ans. En d'autres termes, il existe un « paradoxe temporel » entre la durée de vie technique et

les différentes strates ou couches fonctionnelles du bâtiment. Comme ces strates (mobiliers, aménagement spatial, systèmes, enveloppe, structure, site) ont des durées de vie différentes, il est important de les identifier et les séparer pour pouvoir en modifier éventuellement une sans toucher aux autres. Par exemple, si les cloisons intérieures, qui déterminent l'aménagement spatial, ont une fonction porteuse, cet aménagement ne peut être modifié qu'au moyen de travaux structurels importants.

De nombreuses et précieuses matières premières présentes dans les bâtiments sont aujourd'hui encore condamnées à devenir des déchets parce que les bâtiments et leurs composants n'ont pas été pensés pour intégrer des adaptations futures et/ou une éventuelle réutilisation. À l'heure où les ressources se raréfient et où les problèmes environnementaux s'aggravent, la question clé est la suivante : comment passer de la conception de bâtiments selon une approche linéaire traditionnelle – de la construction à la démolition complète comme seule option enfin de vie – à une vision de conception circulaire rendant possibles de multiples options de récupération des composants et matériaux tant pendant qu'en fin du cycle de vie ? Comment pouvons-nous prolonger qualitativement le cycle de vie des bâtiments ? Et comment faire en sorte que les composants qui les constituent conservent leur valeur beaucoup plus longtemps ?



Figure 1

² En Belgique, on parle de 33,5 %.

³ <https://www.bamb2020.eu/wp-content/uploads/2019/05/Reversible-Building-Design-Strategies.pdf>.

⁴ Ces chiffres datent de 2018. Pour plus d'informations, voir : <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/11478276/KS-DK-20-001-EN-N.pdf/06ddaf8d-1745-76b5-838e-013524781340?t=1605526083000>.

⁵ Voir notamment : https://www.eib.org/attachments/efs/eibis_2020_belgium_en.pdf.

⁶ Chaque année, environ quatre mille maisons sur un total de 25 000. Pour plus d'informations, voir : https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/be_flanders_ltrs_2020.pdf.

⁷ <https://www.circulareconomy.brussels/vous-cherchez-des-chiffres-sur-le-secteur-de-la-construction-en-region-de-bruxelles-capitale-parcourez-le-tableau-de-bord/>.

1.2 En route vers une économie circulaire

Les concepteurs peuvent dès aujourd'hui anticiper des besoins futurs en séparant autant que possible les éléments de construction ayant une durée de vie différente. En outre, il est également conseillé de prévoir une séparation physique entre les différentes fonctions de ces éléments. Par exemple, une couche de finition démontable sur un mur intérieur permet d'éviter d'éventuels dommages lors de futures adaptations ou réparations.

En d'autres termes, chaque choix conceptuel a un impact significatif sur l'utilisation (future) des matériaux et la production associée de déchets de construction. Le 'downcycling' habituel des flux de déchets résultant de la rénovation ou de la démolition des bâtiments devrait céder la place à des applications à plus forte valeur ajoutée : réemploi, réparation, rénovation, refabrication, réaffectation et 'upcycling' (surcyclage). Le 'downcycling' (sous-cyclage) n'est une option qu'en dernier recours. De cette façon, les matériaux peuvent avoir une deuxième, troisième, voire quatrième et cinquième vie avant de perdre de leur valeur.

La conception réversible est l'un des moyens de réaliser des projets de construction circulaire⁸. Les bâtiments sont ainsi conçus de manière à pouvoir remplir de multiples fonctions, recevoir différents types d'occupation et être facilement démontables. Cela nécessite toutefois une approche de conception qui vise à minimiser la production de déchets, lorsque les bâtiments se voient attribuer une nouvelle fonction et que les produits ou éléments de construction sont démontés pour être réutilisés. Pour cela, l'approche statique classique, basée sur le court terme, qui ne se concentre que sur les besoins initiaux des utilisateurs, devrait faire place à une vision flexible à plus long terme. Cette dernière prend en compte, dès le départ, les adaptations et réutilisations futures sur base de différents scénarios d'utilisation. Dans cette optique, les bâtiments sont

considérés comme des entités changeantes et comme de précieuses banques de matériaux au potentiel illimité.

La conception réversible est un catalyseur important pour la réalisation d'une économie circulaire dans le secteur du bâtiment. En prenant le désassemblage, la transformation et le réemploi comme points de départ dès la phase de conception, les bâtiments et leurs composants peuvent rester en service plus longtemps. De cette façon, les cycles de matières premières peuvent être plus facilement bouclés, et de manière plus qualitative. Conformément aux principes de l'économie circulaire, cela contribue à la création d'un monde dans lequel les bâtiments et matériaux existants sont continuellement réutilisés et les déchets de construction éradiqués.

Cependant, la plupart des bâtiments existants sont conçus pour une seule fonction spécifique. Ils se prêtent à l'assemblage, mais pas au désassemblage, ni à la reconversion fonctionnelle et/ou au réemploi des composants et matériaux de construction. Les structures statiques ne permettent donc pas une modification ou un désassemblage aisé. Les inconvénients qui en découlent sont une consommation de matériaux plus élevée et une augmentation des déchets de construction, un manque de flexibilité spatiale, des bâtiments moins faciles à entretenir... La durabilité et la circularité des bâtiments dépendent donc non seulement des composants et des matériaux de construction utilisés, mais aussi et surtout de la manière dont ils sont mis en relation.

En d'autres termes, la conception réversible s'accompagne d'un nouvel état d'esprit. Il s'agit d'une philosophie qui considère la démolition et les déchets de construction qu'elle génère comme des erreurs de conception. La conception réversible est basée sur des cycles continus, dans lesquels les matériaux utilisés conservent leur valeur beaucoup plus longtemps.

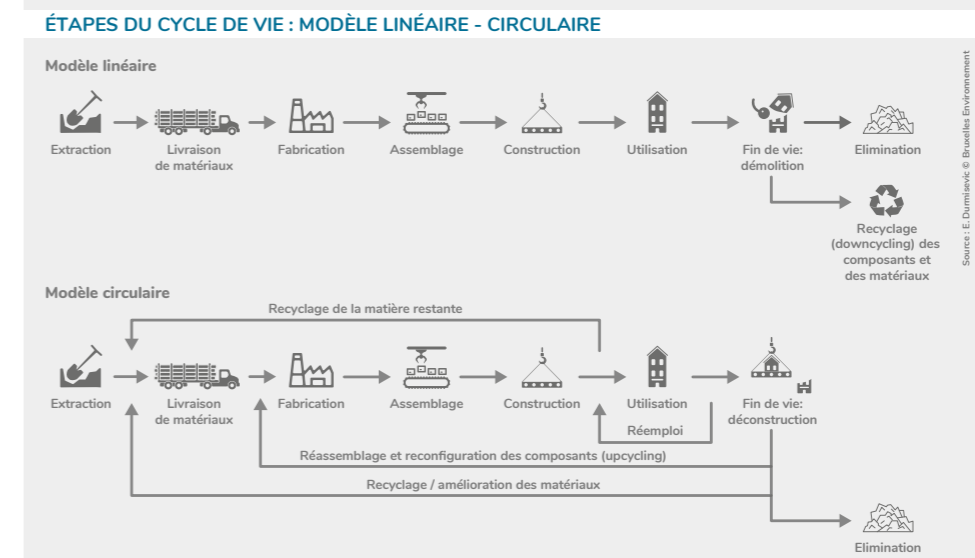


Figure 2 : L'approche linéaire traditionnelle devrait céder la place à une approche circulaire. (Source : E. Durmisevic)

⁸ La Fondation Ellen MacArthur utilise la définition suivante : 'A Circular Economy is regenerative by Design. A circular economy is based on the principles of designing out waste and pollution, keeping products and materials in use at their highest value for as long as possible.'

1.3 Changement global des mentalités

Maîtres d'ouvrage et concepteurs peuvent mettre différents moyens en œuvre pour évoluer vers des pratiques circulaires. Pour optimiser la réversibilité des bâtiments, ils peuvent tenir compte des points suivants :

1. Une approche conceptuelle⁹, fondée sur des scénarios qui tiennent compte des fonctions et/ou des utilisations futures dès la définition du programme architectural et les premières esquisses du projet, offre une énorme valeur ajoutée. Elle permet aux bâtiments d'être facilement transformés à l'avenir, sans qu'il soit nécessaire de procéder à des interventions de transformation trop importantes.

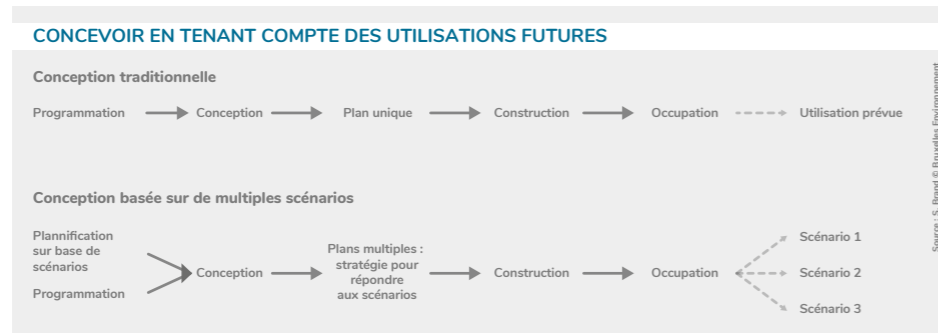


Figure 3 : Il est nécessaire d'adopter une approche conceptuelle fondée sur des scénarios qui tiennent compte des fonctions et/ou des utilisations futures dès la définition du programme de construction et les premières esquisses du projet. (Source : S. Brand)

2. La conception réversible, le réemploi et/ou la transformation future des bâtiments et de leurs composants, donnent lieu à des modèles économiques innovants et circulaires qui réduiront considérablement le risque d'inoccupation et de mauvaises performances techniques. La location de bâtiments entiers et d'espaces est déjà bien implantée dans le secteur de l'immobilier, mais grâce à la conception réversible, de nouveaux modèles économiques peuvent

apparaître, dont le leasing d'éléments de construction et de leurs performances¹⁰. Le rachat¹¹ après usage peut également offrir des opportunités intéressantes. Les modèles économiques circulaires faciliteront donc aussi le réemploi, la réparation, la rénovation, la refabrication, la réaffectation et l'upcycling (surcyclage) des éléments de construction.

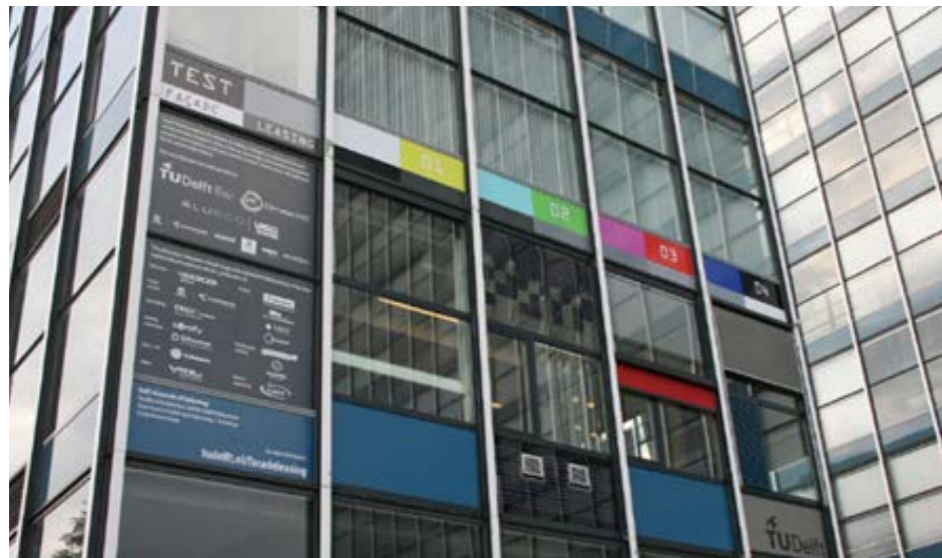


Figure 4 : La façade en tant que service, un bel exemple de modèle économique circulaire innovant. (Source : VMRG <https://vmrg.nl/>)

⁹ L'avenir est difficile à prévoir. Il est donc important de garder ouvert un large éventail de perspectives pendant l'élaboration d'un projet de construction. Cela peut se faire par le biais de la planification de scénarios. Si la conception répond à diverses orientations futures, il est fort probable qu'elle répondra également aux besoins réels à venir.

¹⁰ Pensons au concept de 'product as a service', take-back, aux formules de leasing...

¹¹ Le modèle dit de reprise, ou de 'take-back'.

3. Les concepteurs qui souhaitent réaliser des bâtiments réversibles sont encouragés à prendre en compte plusieurs configurations potentielles des composants du bâtiment au lieu de partir d'une unique disposition spatiale fixe ou d'une seule application de chaque composant. Ainsi, ils gardent les portes ouvertes pour l'avenir. Il en résulte une architecture qui permet une dynamique spatiale, technique et esthétique.

La façon dont la structure d'un bâtiment est conçue de façon intelligente, en prenant en compte les dimensions ainsi que le positionnement et la capacité des noyaux fixes tels que les éléments porteurs, les gaines techniques et les espaces de circulation, détermine dans quelle mesure différents scénarios d'utilisation sont possibles. En outre, les parties du bâtiment peuvent être prévues de manière à pouvoir être facilement déconnectées, retirées, ajoutées, déplacées, adaptées et/ou remplacées en fonction d'une transformation spatiale ou d'une réutilisation, sans causer trop de dommages ou générer des déchets de construction.

4. Pour la réalisation d'un bâtiment en tant que banque de matériaux, ce sont tous les acteurs qui ont un rôle important à jouer. Les concepteurs, mais aussi les autres parties concernées, peuvent au propre comme au figuré apporter leur pierre à l'édifice :

- Maîtres d'ouvrage : déterminer la valeur des biens sur la base de leur cycle de vie complet. En outre, il est utile d'intégrer déjà certaines exigences dans le cahier des charges en fonction de scénarios d'utilisation futurs bien pensés pour les bâtiments et les matériaux¹².
- Architectes et bureaux d'études : détecter, créer et maximiser la capacité de transformation et le potentiel de réemploi¹³.
- Fabricants : développer des produits réversibles et circulaires et établir des modèles d'affaires circulaires.
- Entrepreneurs : appliquer des méthodes de construction réversibles.
- Entreprises de démolition : mieux comprendre la composition des bâtiments et leur potentiel de réemploi¹⁴, refabrication, recyclage de haute qualité.

¹² Voir paragraphe 3.4.

¹³ Voir paragraphe 2.3.

¹⁴ Voir paragraphe 2.3.

2. Qu'est-ce que la conception réversible ?

La conception réversible est synonyme de construction et de rénovation orienté vers le futur. Les bâtiments sont conçus de sorte que les typologies spatiales puissent être facilement adaptées et que les parties du bâtiment puissent être désassemblées et réutilisées. Tout cela sans perte de valeur et de qualité, sans causer de dommages ni générer de déchets de construction. Cela signifie que les bâtiments peuvent facilement changer de fonction ou d'aménagement intérieur et que (la plupart) des interventions spatiales et structurelles sont réversibles à un stade ultérieur.

On peut distinguer deux formes de réversibilité dans un bâtiment :

- La **réversibilité spatiale**, qui vise à prolonger la durée de vie du bâtiment
- La **réversibilité technique**, qui vise le démontage et le réemploi des éléments, composant et matériaux.

Ces deux formes de réversibilité sont liées à des indicateurs spécifiques qui déterminent dans quelle mesure un bâtiment est spatialement ou techniquement réversible¹⁵.

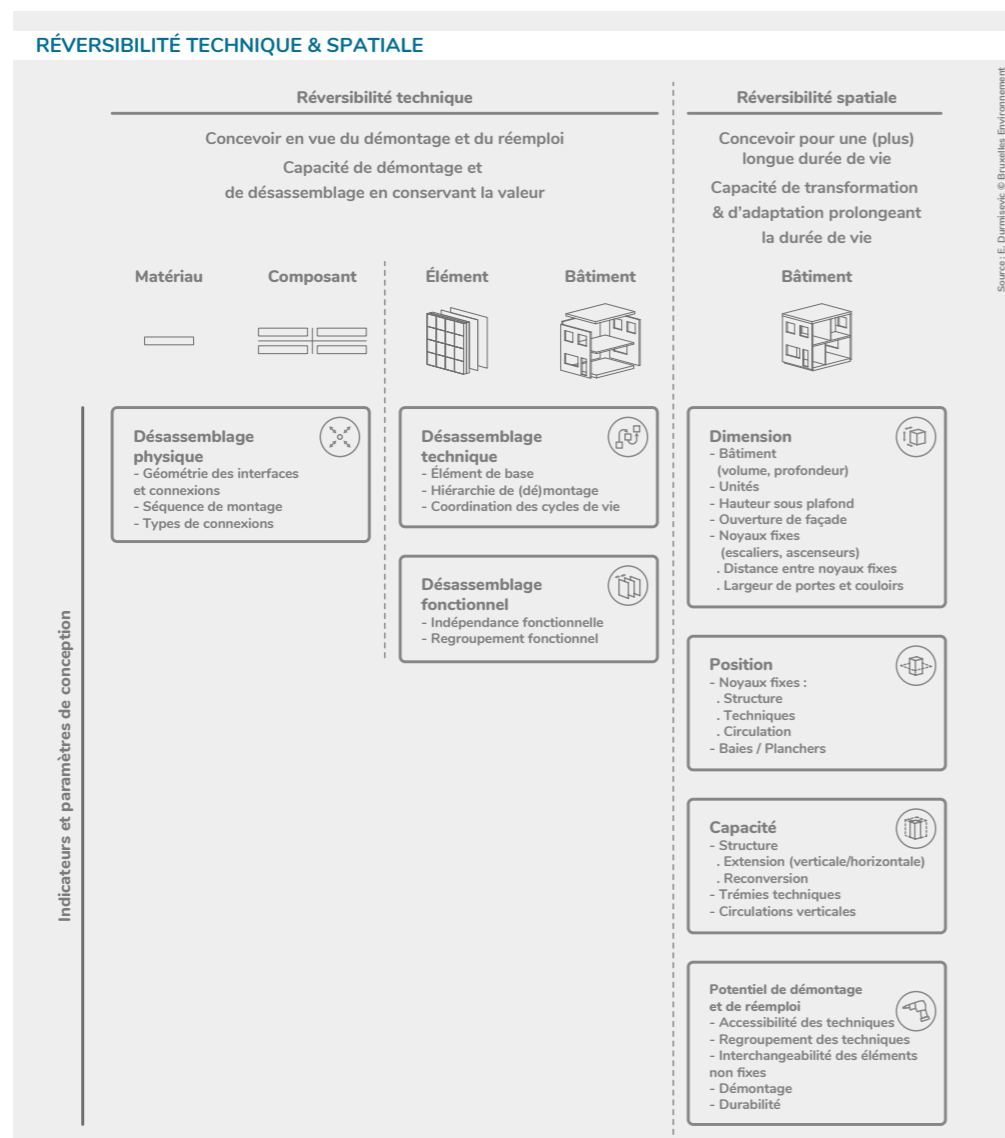


Figure 5 : Dans un bâtiment, on peut distinguer deux formes de réversibilité : la réversibilité spatiale et la réversibilité technique.

¹⁵Voir chapitre 3.

2.1 Réversibilité spatiale : concevoir pour une (plus) longue durée de vie

La réversibilité spatiale désigne la capacité d'un bâtiment ou d'une structure à remplir différentes fonctions sans nécessiter d'interventions structurelles majeures, de démolition ou de production de déchets de construction. Plus l'effort nécessaire à la transformation d'un bâtiment est faible et au plus de scénarios d'utilisation sont prévus pour le maintenir en service pendant une période prolongée, plus la **capacité de transformation**¹⁶ est élevée. Sur la base de cette capacité de transformation, nous pouvons distinguer trois types de constructions : les constructions monofonctionnelles, multifonctionnelles et transformables :

1. Les **constructions monofonctionnelles** permettent uniquement des adaptations spatiales limitées à une même fonction. Par exemple, une conception qui intègre un cloisonnement et l'usage multiple de l'espace, permettra de diviser un bureau paysager ou une grande salle de réunion en bureaux séparés. Un autre exemple est celui d'un immeuble d'appartements adapté pour devenir une résidence accessible aux fauteuils roulants avec des appartements-service. Tout cela, bien sûr, sans aucune intervention architecturale de grande envergure.

2. Dans le cas de **constructions multifonctionnelles**, les bâtiments et/ou les espaces peuvent recevoir une fonction différente grâce au cloisonnement, à l'usage multiple de l'espace et à l'adaptabilité fonctionnelle. C'est le cas, par exemple, d'un espace de bureaux qui peut être transformé en logements ou en salles de classes sans trop de travaux structurels.

3. Les **constructions transformables** ouvrent la porte à des configurations spatiales variées et permettent non seulement de donner aux bâtiments et/ou aux espaces une fonction différente, mais également d'agrandir, de réduire voire de déplacer ceux-ci. Ainsi, par exemple, un bâtiment transformable peut être rehaussé afin de faire de plusieurs petits bureaux de vastes logements.

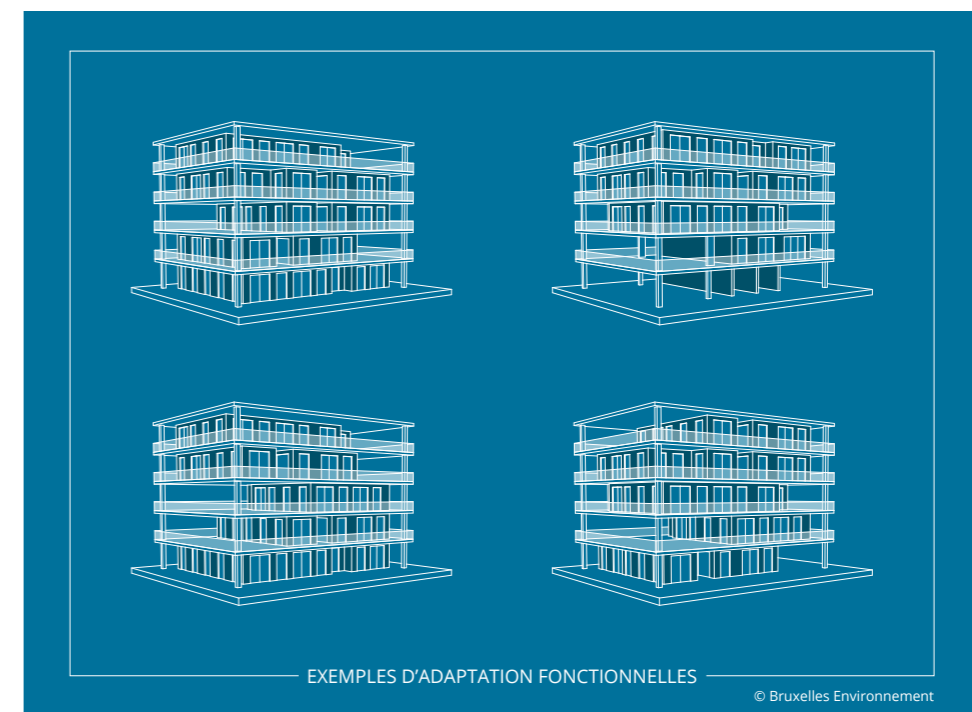


Figure 6

¹⁶Voir paragraphe 2.3.

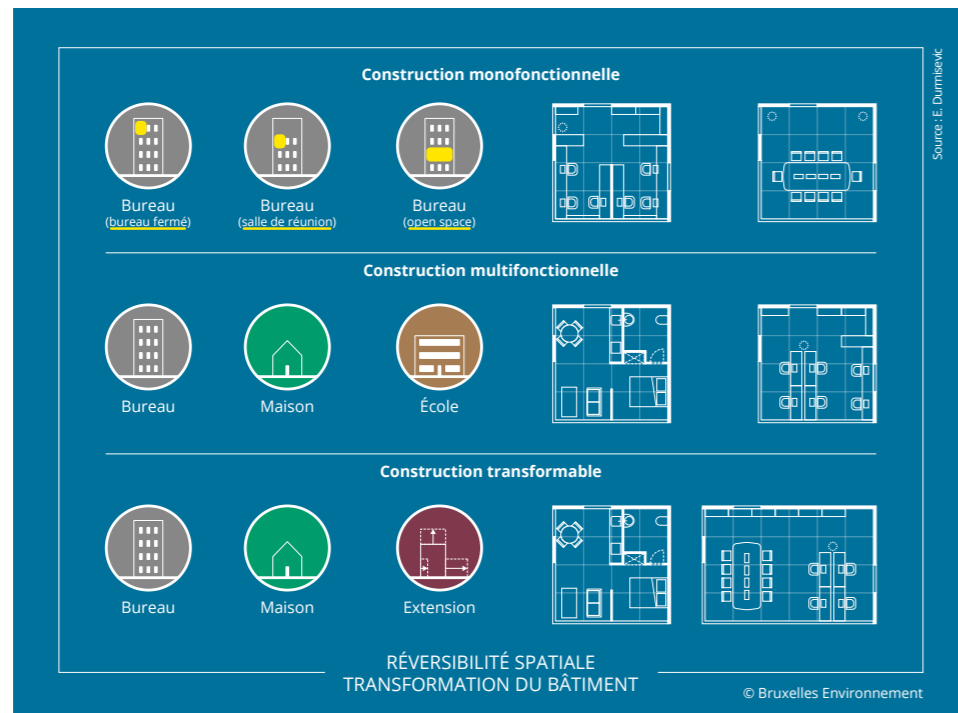


Figure 7 : La réversibilité spatiale implique une transformation au niveau du bâtiment, ce qui nous permet de distinguer trois types de constructions : les constructions monofonctionnelles, multifonctionnelles et transformables. (Source : E. Durmisevic)

Chacune de ces trois catégories de réversibilité spatiale a son propre potentiel, ses propres limites et ses propres caractéristiques spatiales. Cela détermine la mesure dans laquelle elles sont transformables et adaptées à différents scénarios d'utilisation.

De nombreux paramètres de conception ont une incidence sur la réversibilité spatiale : la typologie du bâtiment, ses dimensions, la position et l'espacement des noyaux fixes, le type de structure porteuse, le mode constructif, la hauteur de plancher à plafond, les ouvertures des fenêtres ...

La combinaison entre différents paramètres peut clairement jouer un rôle crucial, par exemple en ce qui concerne la proportion d'accès à la lumière naturelle qui est définie entre autres par la typologie, la profondeur du bâtiment, la hauteur d'étage et la dimension des ouvertures des fenêtres. Les paramètres de conception peuvent être regroupés en quatre indicateurs de réversibilité spatiale, qui sont expliqués plus en détail dans la [section 3.1](#).

1. Les dimensions
2. La position
3. La capacité
4. Le potentiel de désassemblage et de réemploi

2.2 Réversibilité technique : concevoir en vue du démontage et du réemploi

En complément à la réversibilité spatiale, il est aussi nécessaire de prévoir une réversibilité technique des éléments, composants, produits et matériaux qui sont mis en œuvre

dans le bâtiment. La réversibilité technique permet le désassemblage du bâtiment et des parties dont il est composé, tout en limitant les dégâts à celles-ci. Ainsi la conservation de leur valeur et leur valorisation en fin de vie (réemploi, réparation, rénovation, refabrication, réaffectation, surcyclage) sont anticipés dès la conception.

Afin de garantir la conservation de la valeur du bâtiment et de ses éléments, composants, produits et matériaux, les maîtres d'ouvrage et concepteurs peuvent définir différents types d'exigences. La conception réversible peut par exemple permettre un démontage pour faciliter :

- **l'entretien** : par exemple, le démontage aisé et sans production de déchet permettant l'accès aux systèmes et composants nécessitant un entretien régulier
- **le réemploi** : par exemple, le démontage sans dommage d'éléments et de composants permettant leur réemploi direct
- **la réparation** : par exemple, le démontage d'éléments, de composants et de matériaux, en limitant les dommages, permettant leur réemploi après réparation
- **la reconfiguration** : par exemple, le démontage d'éléments, de composants et de matériaux, permettant leur réemploi en les réorganisant dans une nouvelle configuration
- **le recyclage** : par exemple, le démontage de matériaux en fractions propres permettant un recyclage de qualité et/ou un surcyclage (upcycling).

- Bien que les assemblages et les connexions réversibles jouent un rôle important par rapport au démontage, la réversibilité technique inclut également des aspects concernant la façon dont les différentes parties du bâtiment sont organisées et reliées. Pour pouvoir réaliser les exigences présentées ci-dessus, ces aspects sont essentiels afin de ne pas affecter, ni endommager, les parties adjacentes lors du démontage.

Deux paramètres de conception jouent ici un rôle important : **L'indépendance** : concevoir les différentes parties du bâtiment de manière à pouvoir retirer ou mettre à jour certaines parties sans affecter les performances des autres parties connectées.

L'interchangeabilité : concevoir les différentes parties du bâtiment de manière à pouvoir les remplacer par d'autres éléments, composants ou matériaux, tout en permettant le réemploi des parties démontées.



Figure 8 : Ces dalles de plafond peuvent être démontées de manière indépendante, sans avoir à retirer ou à endommager les composants adjacents.

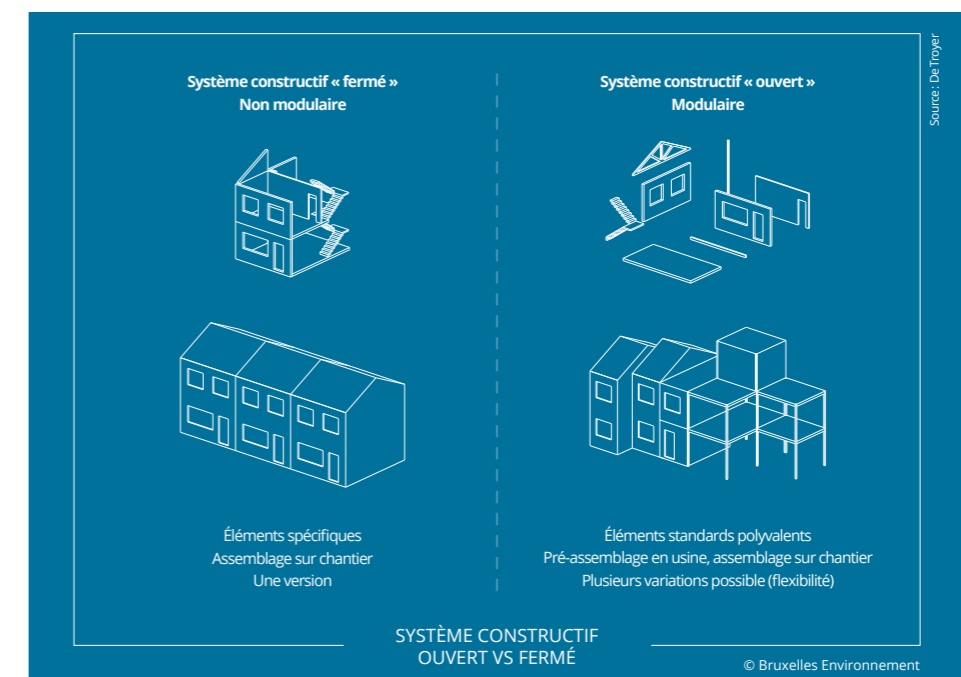


Figure 9 : La partie droite de l'image montre un système de construction ouvert avec des composants compatibles, permettant de nombreuses configurations différentes. (Source : De Troyer)

L'indépendance et l'interchangeabilité peuvent être définies à plusieurs niveaux.

- Le **niveau du bâtiment** fait référence à la disposition des différents systèmes et éléments dont le bâtiment est constitué (structure porteuse, enveloppe, cloisons, techniques, etc.)
- Le **niveau de l'élément** fait référence à la disposition des différents composants dont l'élément est composé. Par exemple, une cloison (même non-porteuse)

est constituée d'une structure porteuse, de finitions, de systèmes techniques (électricité, sanitaire, etc.), d'isolation acoustique, etc.

- Le **niveau du composant** fait référence à la disposition des sous-composants et des matériaux dont le composant est constitué. Par exemple, une poutre en treillis peut être constituée de différents sous-composants et matériaux.

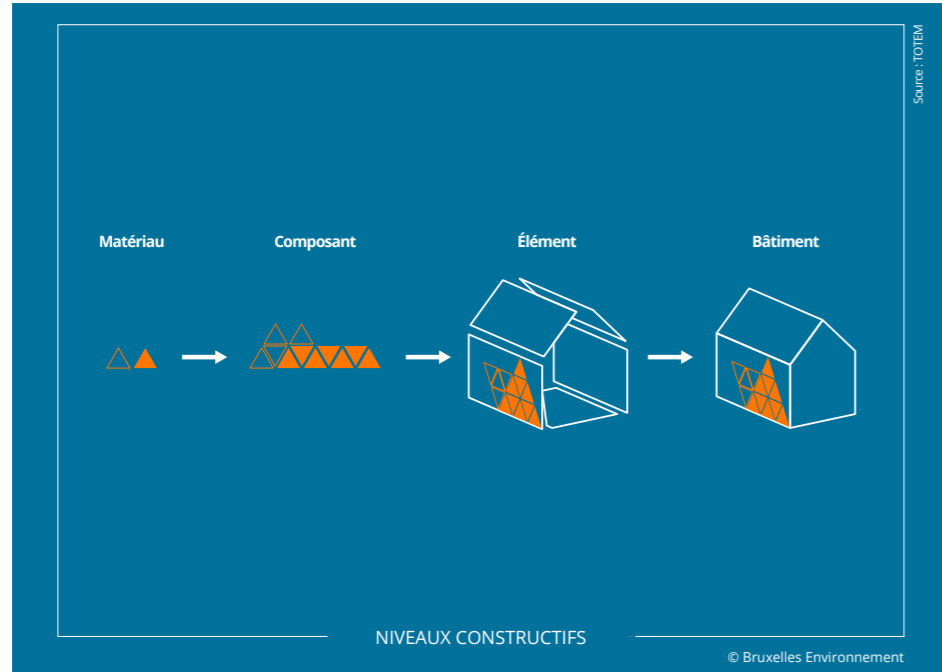


Figure 10

Que ce soit au niveau du bâtiment, de l'élément ou du composant, les différentes parties dont ceux-ci sont composés sont caractérisées par une ou plusieurs fonctions. Ces fonctions peuvent avoir des durées de vie différentes ou être

soumises à différents rythmes de remplacement. C'est sur cette base que Stuart Brand a défini le concept des couches fonctionnelles d'un bâtiment.

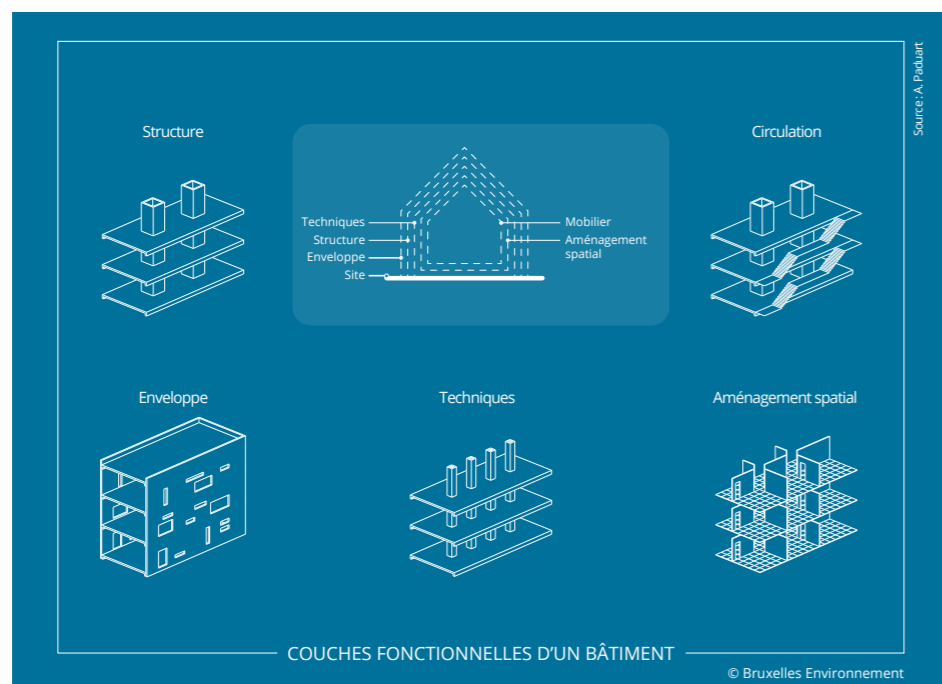


Figure 11

L'approche des couches fonctionnelles peut également être appliquée au niveau d'un élément comme par exemple un plancher. Celui-ci est constitué d'une structure porteuse,

de finitions, de systèmes techniques (électricité, sanitaire, etc.), d'isolation acoustique, etc.

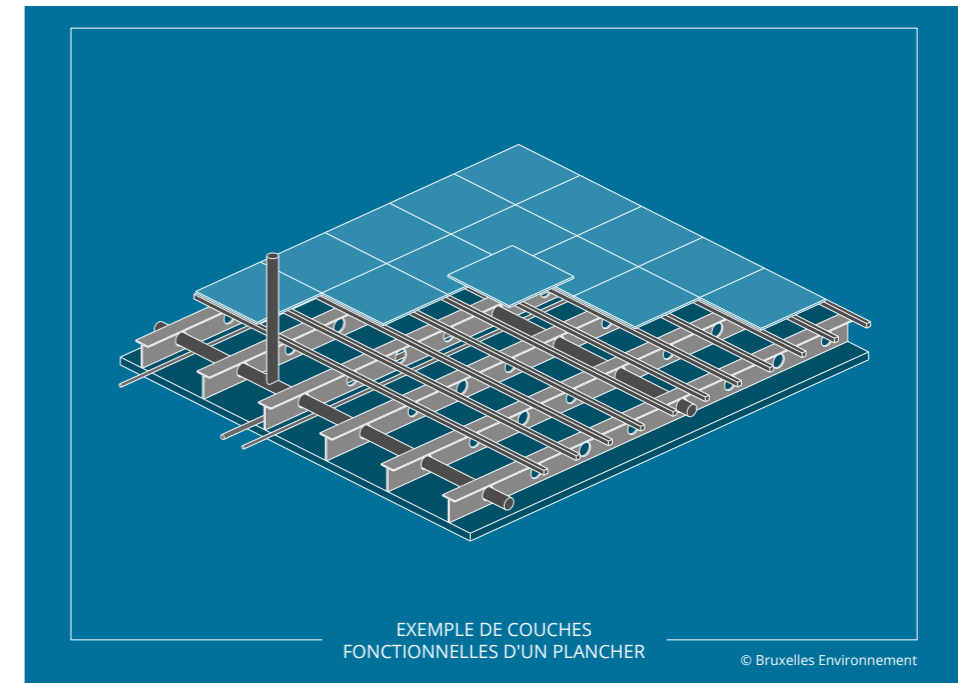


Figure 12

Une construction statique dans laquelle les différentes couches fonctionnelles sont fortement imbriquées permet peu ou pas de modification ou de désassemblage. C'est pourquoi il est important de concevoir le bâtiment et les parties dont il est constitué de façon à permettre à ces différentes fonctions d'être adaptées, démontées et remplacées de façon indépendante afin que leurs adaptations, démontages et remplacements puissent se faire

de façon aisée. En limitant la dépendance par rapport aux fonctions adjacentes, il est non seulement possible de réduire la détérioration de ces parties lors d'adaptations et démontages mais également de rendre le processus de démontage plus aisé et rapide, et donc plus économiquement rentable.

Ce type de désassemblage est appelé le désassemblage fonctionnel.

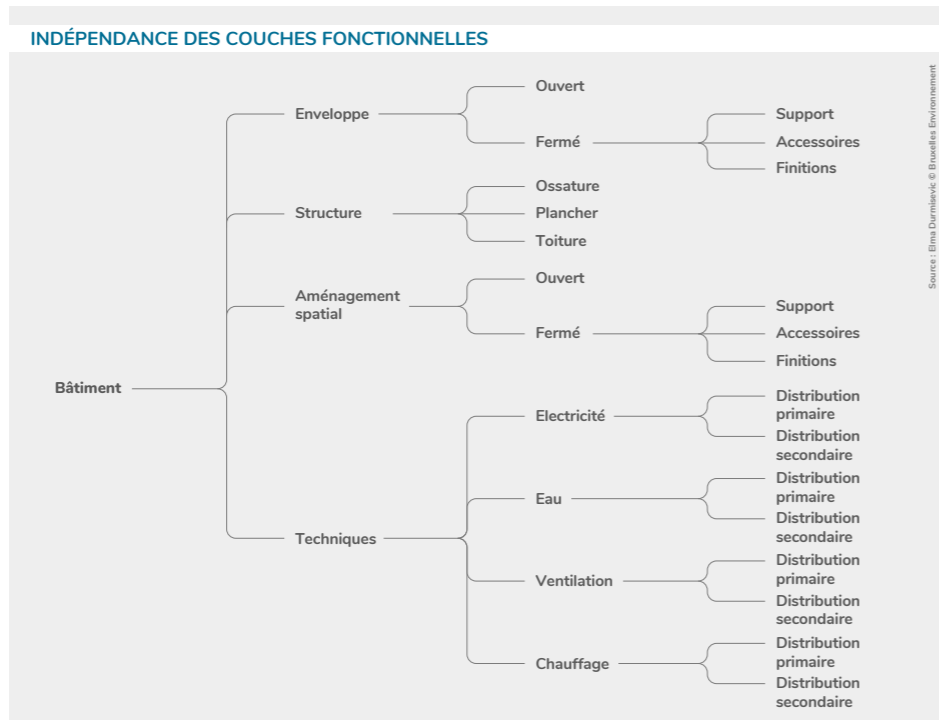


Figure 13 : En vue de la réversibilité technique, il est important de garantir un certain degré d'indépendance des différentes couches fonctionnelles. (Source : E. Durmisevic)

Afin de faciliter le démontage et d'augmenter la valeur et valorisation des différentes parties du bâtiment, il est également important d'organiser l'ordre de montage et de démontage de ces différentes parties sur base de leurs fonctions et de leurs durées de vie. Et ce afin d'éviter le démontage inutile de parties adjacentes avant de pouvoir démonter la partie en question. Ceci permet de limiter les dégâts et le temps de démontage lors de réparations, remplacements, enlèvements, etc.

Ce type de démontage est appelé le désassemblage technique.

Enfin, la géométrie et le type de connexion ainsi que l'ordre de (dé)montage qui en résulte sont également cruciaux pour assurer le démontage des différentes parties du bâtiment.

Ce type de démontage est appelé le désassemblage physique.

L'approche de conception pour la réversibilité technique décrite ci-dessus est synthétisée dans le schéma suivant.

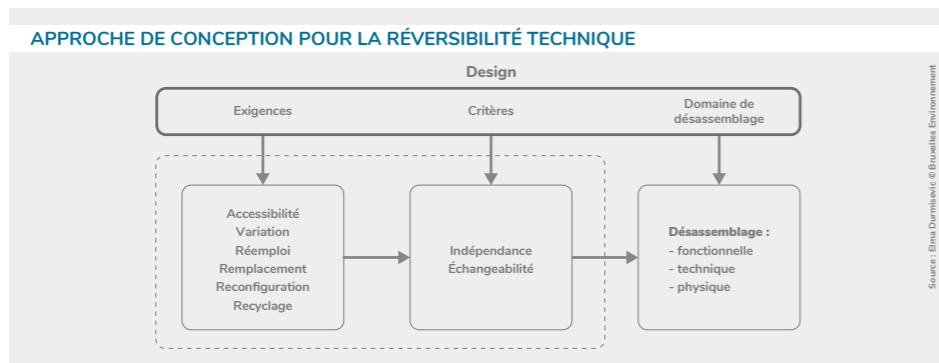


Figure 14

2.3 Capacité de transformation et potentiel de réemploi

Comme évoqué ci-dessus, dans le contexte de la conception réversible, il existe deux concepts clés qui sont étroitement liés à la réversibilité spatiale et technique. Il s'agit, respectivement, de la **capacité de transformation** et du **potentiel de réemploi** d'un bâtiment et des éléments, composants et matériaux qui le composent.

La réversibilité est déterminée non seulement par les qualités intrinsèques de conception du bâtiment et de ses parties, mais aussi par la possibilité de les démonter et de les enlever, de les ajouter, de les déplacer et de les remplacer sans générer de déchets. La conception en vue du désassemblage ('design for disassembly') joue ici un rôle crucial. Comme le montre la figure ci-dessous, la démontabilité, l'adaptabilité et le réemploi sont au cœur de la conception réversible.

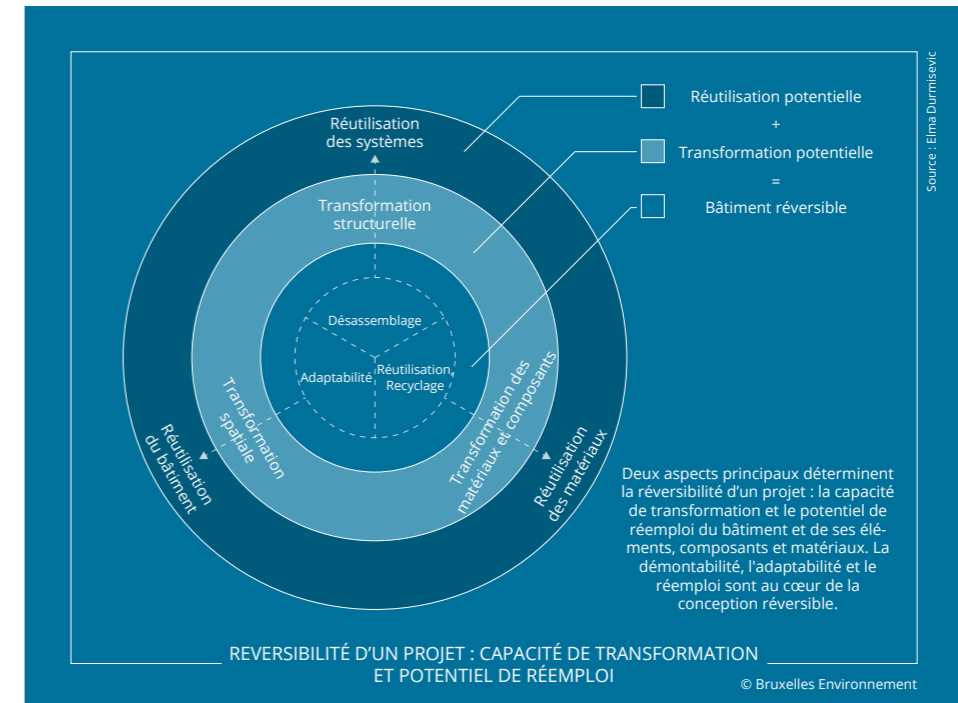


Figure 15 : Deux aspects principaux déterminent la réversibilité d'un projet : la capacité de transformation et le potentiel de réemploi du bâtiment et de ses éléments, composants et matériaux. La démontabilité, l'adaptabilité et le réemploi sont au cœur de la conception réversible. (Source : E. Durmisevic)

1. La **capacité de transformation** indique dans quelle mesure les caractéristiques fonctionnelles, techniques et physiques d'un bâtiment et de ses parties peuvent être modifiées. Et ce, bien sûr, sans causer trop de dommages ni générer de déchets de construction. En outre, la capacité de transformation désigne également l'aptitude d'un bâtiment à remplir différentes fonctions.

Au niveau du bâtiment, la capacité de transformation est déterminée par les caractéristiques spatiales et techniques qui permettent une reconversion vers de nouvelles utilisations ou fonctions. Ces caractéristiques sont expliquées plus en détail dans la [section 3.1](#), où elles sont traduites en principes concrets sur la base de **quatre indicateurs**. Les caractéristiques spatiales concernent les dimensions du bâtiment et la position de ses noyaux fixes. Quant aux caractéristiques techniques, nous distinguons le potentiel de démantèlement et de réemploi, d'une part, et la capacité de la structure, des noyaux de circulation et des installations techniques à répondre à différents scénarios d'utilisation et/ou fonctions, d'autre part.

Au niveau des composants, la **capacité de transformation** fait référence à la capacité de répondre à de nouvelles normes, besoins ou exigences par le biais d'une reconfiguration. Pensons par exemple au démontage et à la reconfiguration d'une façade, qui modifie la position des ouvertures de fenêtre et ouvre de nouvelles possibilités à l'intérieur du bâtiment. En faisant ainsi pénétrer plus de lumière naturelle, un atelier sombre peut par exemple être transformé en appartement.

2. Le potentiel de réemploi fait référence à la mesure dans laquelle les éléments, les composants et les matériaux peuvent être démontés et réutilisés – aisément et sans dommages important. Cette notion peut s'appliquer aussi bien aux différentes parties du bâtiment qu'à l'ensemble du bâtiment. Les paramètres de conception 'indépendance' et 'interchangeabilité' jouent ici un rôle important.

Prenons un exemple : les poutres en acier qui ne sont pas soudées entre elles, mais boulonnées, ont un potentiel de réemploi élevé (bien que la réversibilité technique aille évidemment bien au-delà du type de connexion). Comme il est expliqué dans la [section 3.2](#), la réversibilité technique, qui soutient le potentiel de réemploi, comprend huit indicateurs.

3. Principes de conception

3.1 Indicateurs de réversibilité spatiale

Comme indiqué dans la [section 2.1](#), différents paramètres de conception ont un impact sur la réversibilité spatiale d'un bâtiment : la typologie du bâtiment, ses dimensions, la position et l'espacement des noyaux fixes, le type de structure porteuse, le mode constructif, la hauteur de plancher à plafond, les ouvertures des fenêtres ... Nous pouvons distinguer quatre indicateurs de réversibilité spatiale, chacun regroupant des paramètres de conception différents :

1. Dimensions : des mesures et un dimensionnement du bâtiment compatibles avec les scénarios d'utilisation prévus et les changements de fonction futurs (par exemple, la hauteur de plancher à plafond).

- Dimensions du volume bâti
- Dimensions des unités du bâtiment
- Profondeur du volume bâti
- Taille des baies par rapport à la lumière naturelle
- Hauteur sous plafond
- L'espacement entre les éléments porteurs et la manière dont il permet la structure porteuse et la généralité de l'espace.
- Dimensions des zones de circulation
- Dimensions des cages d'escalier et d'ascenseur

2. Position : des noyaux fixes positionnés de manière à permettre différentes utilisations (par exemple, gaines techniques, escaliers, etc.).

- Position des noyaux de circulation (escaliers centraux, couloirs ou passages extérieur)
- Position des éléments porteurs par rapport à la circulation horizontale
- Position des éléments porteurs par rapport à la circulation verticale
- Position des gaines techniques
- Position des murs porteurs par rapport aux baies
- Position des éléments porteurs dans la façade
- Position des baies par rapport au plancher

3. Capacité : la capacité de la structure porteuse, des noyaux de circulation et des installations techniques, afin d'adapter et/ou d'agrandir le bâtiment dans le futur.

- Capacité de la structure porteuse à accueillir une extension horizontale
- Capacité de la structure porteuse à accueillir une extension verticale
- Capacité de la structure porteuse à permettre une reconfiguration spatiale interne
- Capacité des gaines techniques verticales
- Capacité des circulations verticales

4. Potentiel de désassemblage et de réemploi : possibilité de séparer les principales fonctions du bâtiment pour un désassemblage ultérieur (en vue d'éventuelles modifications).

- Accessibilité des techniques
- Regroupement des techniques
- Interchangeabilité des éléments non fixes
- Démontage
- Durabilité

3.1.1 Dimensions

La conception d'un bâtiment ayant une grande capacité de transformation et de réversibilité spatiale commence par le choix de dimensions compatibles avec les scénarios d'utilisation prédéfinis.

Dimension du volume bâti : Les dimensions du bâtiment (hauteur, profondeur, largeur), ainsi que la typologie du bâtiment. Celles-ci doivent être suffisamment importantes et prendre en compte le confort visuel au moyen de la lumière naturelle pour permettre des utilisations différentes de l'espace à l'avenir. Les dimensions d'un bâtiment sont déterminantes pour les **dimensions des unités** dont il est composé ainsi que pour la qualité spatiale par rapport aux fonctions initiales et futures.

Profondeur du bâtiment et rapport avec la hauteur sous plafond et la taille des baies : ce point est important pour l'apport de lumière naturelle. Plus le bâtiment est profond et plus les ouvertures des fenêtres et la hauteur sous plafond sont réduites, plus petite est la proportion de surfaces au sol est éclairée naturellement. Bien entendu, cela réduit également les possibilités fonctionnelles et le potentiel de transformation. Les concepteurs peuvent donc optimiser l'organisation des espaces et l'apport de lumière naturelle en prenant en compte la profondeur du bâtiment, la hauteur sous plafond et la taille des baies. Voir l'encadré ci-dessous.

Aménagement de l'espace en fonction de l'incidence de la lumière naturelle : pour les concepteurs, l'optimisation de l'apport de lumière naturelle dépend de l'organisation de l'espace et des dimensions (profondeur, hauteur sous-plafond, taille des baies) . Par exemple, une hauteur de fenêtre moyenne de 2,5 mètres (en fonction de la saison et de la position du soleil), permet d'obtenir une lumière naturelle qui pénètre sur plus ou moins 5 mètres de profondeur. En d'autres termes, la portée de la lumière naturelle est plus ou moins égale à deux fois la hauteur de la surface vitrée. Afin d'éviter la surchauffe tout en favorisant un apport de lumière naturelle suffisant, un ratio fenêtre/mur de 30 à 40 % est indiqué. Les concepteurs disposent ainsi des indications nécessaires pour aménager les espaces les plus éloignés de la façade. Ils savent que les espaces les plus

utilisés (espaces de vie, bureaux, salles de classe, etc.) ne doivent pas se trouver à plus de 5 mètres de la façade. Les pièces humides et espaces de circulation nécessitent un apport de lumière naturelle moins importants et peuvent donc, éventuellement, se trouver en dehors de ce périmètre. Les locaux techniques ne nécessitent quant à eux normalement pas d'éclairage naturel.

En outre, les concepteurs peuvent également augmenter considérablement les possibilités spatiales et fonctionnelles futures en intégrant la flexibilité requise dès la conception, par exemple sous la forme d'éléments de plancher et de plafond amovibles.

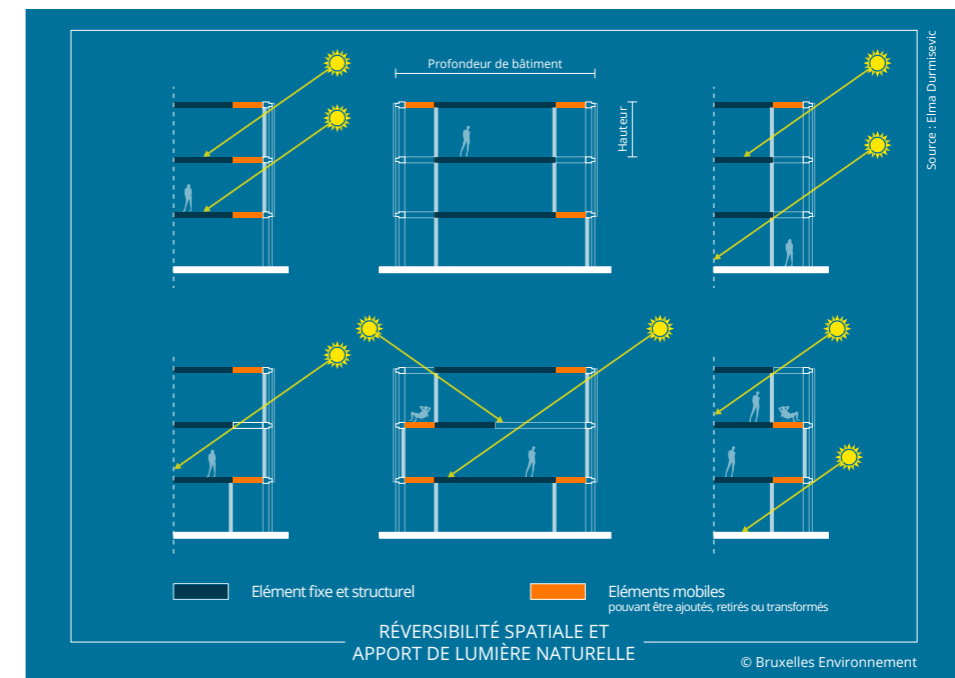


Figure 16 : Les parties en bleu représentent les éléments structurels fixes, tandis que celles marquées en orange peuvent être ajoutées, retirées ou adaptées de manière flexible lors d'éventuelles transformations spatiales et fonctionnelles.

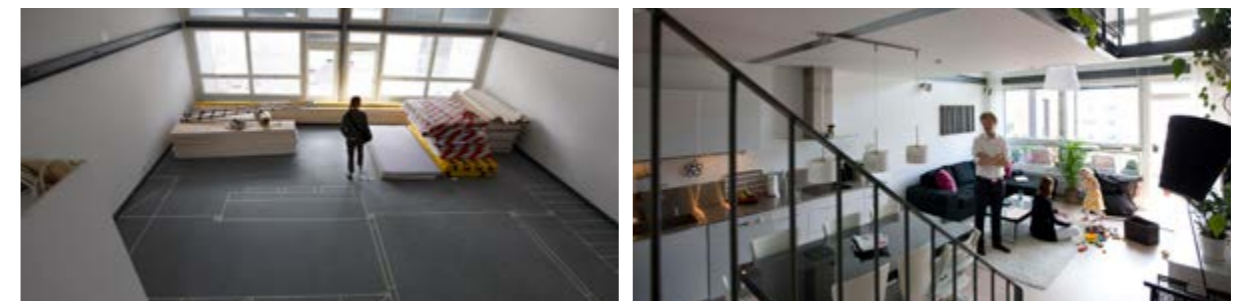


Figure 17 : Tila Housing Block, Talli Architecture & Design, Helsinki. La hauteur libre peut (partiellement) être divisée en deux niveaux au moyen de sections de plancher amovibles. (Source : Architect : Pia Ilonen, Ilo arkkitehdit Oy www.iloark.fi. Photos : Stefan Bremer)

L'importance de la lumière naturelle.

La lumière naturelle a un impact très important sur notre bien-être. En optimisant les dimensions des bâtiments dès le départ, les concepteurs peuvent anticiper d'éventuelles transformations futures. Par exemple, un bâtiment rectangulaire fermé d'une profondeur de 25 mètres ne pourra jamais devenir une habitation agréable et confortable, car 65 % de la surface au sol est privée de lumière naturelle. Sauf, bien sûr, si l'on opte pour l'intégration de patios ou d'un couloir central éclairé par un puits de lumière. Dans ce cas, la flexibilité spatiale et fonctionnelle augmente

considérablement et le bâtiment en question pourra plus facilement répondre aux besoins d'autres fonctions.

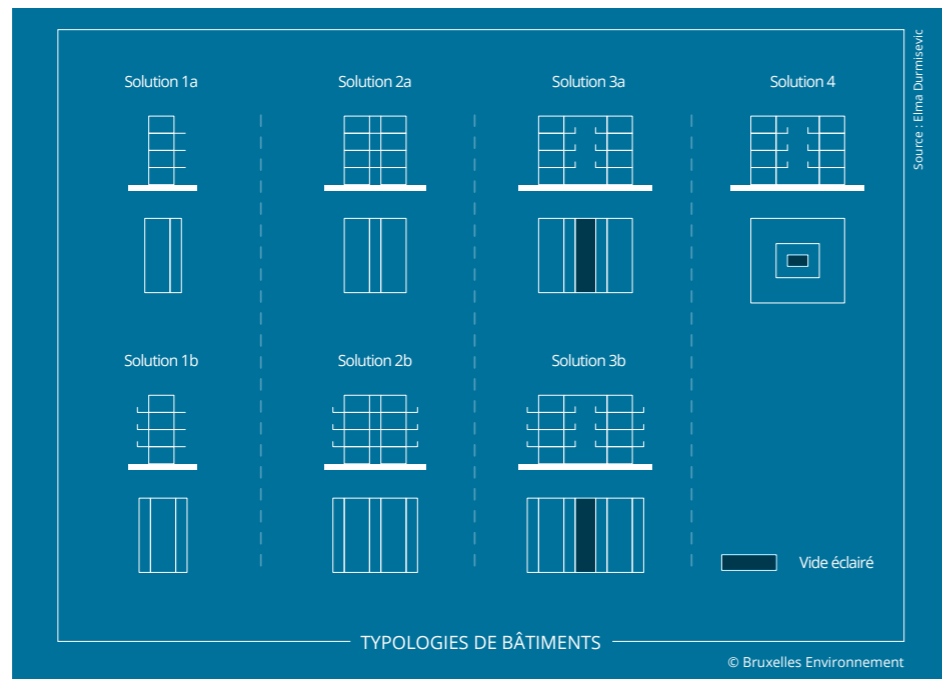


Figure 18 : Illustration de différentes typologies de bâtiments et de leurs dimensions.

Hauteur sous-plafond : un paramètre important ayant un impact, entre autres, sur la qualité de l'espace, l'apport de lumière naturelle et la flexibilité spatiale et fonctionnelle. Dans les logements, la hauteur sous-plafond est généralement plus faible que dans les bureaux ou les écoles, où un

espace plus important est nécessaire pour les techniques HVAC (par exemple, les gaines de ventilation). La hauteur sous-plafond dépend donc également de la hauteur de plancher à plancher.

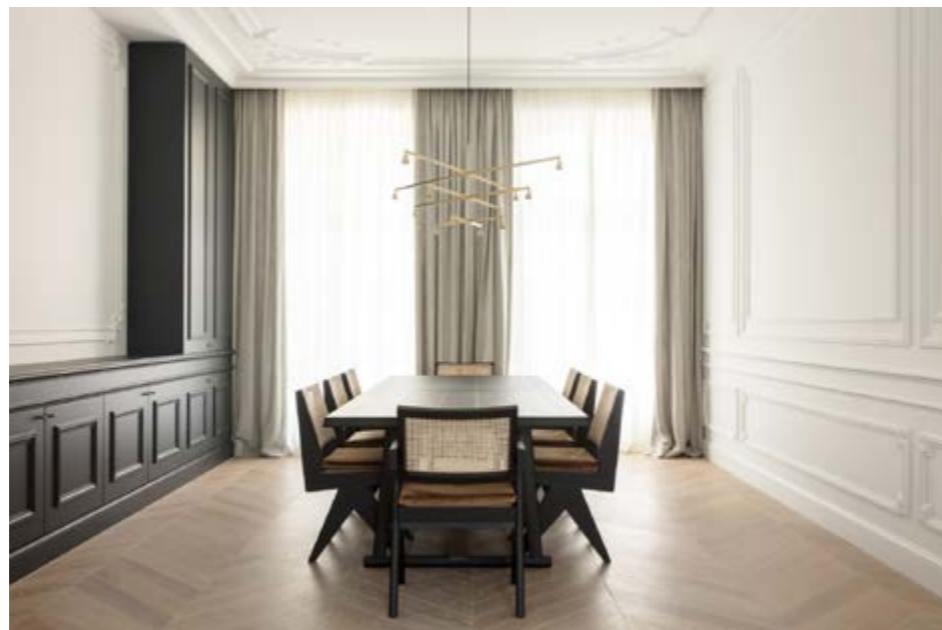


Figure 19 : Au fil des ans, de nombreuses maisons de maître ont servi non seulement de logement, mais aussi d'étude de notaires, de restaurant, de boutique de vêtements, etc. Et ce grâce à la grande hauteur du plancher au plafond. (Source : Annick Verminnen)

La hauteur de plancher à plancher tient compte non seulement de la hauteur sous-plafond, mais aussi de l'épaisseur du plancher et de l'espace nécessaire aux techniques. Ces dernières peuvent être intégrées dans des faux plafonds ou des planchers surélevés, de sorte qu'elles restent facilement accessibles et peuvent être étendues, adaptées ou remplacées. Le mode constructif joue également un rôle important.

Dans le cas d'une structure poteaux-poutres, par exemple, les techniques peuvent également être intégrées dans des espaces spécifiques entre les poutres structurelles. De cette manière, la hauteur entre plancher peut être réduite, pour une même hauteur sous plafond. Dans les bâtiments à forte capacité de transformation, la hauteur entre planchers doit être suffisamment importante.

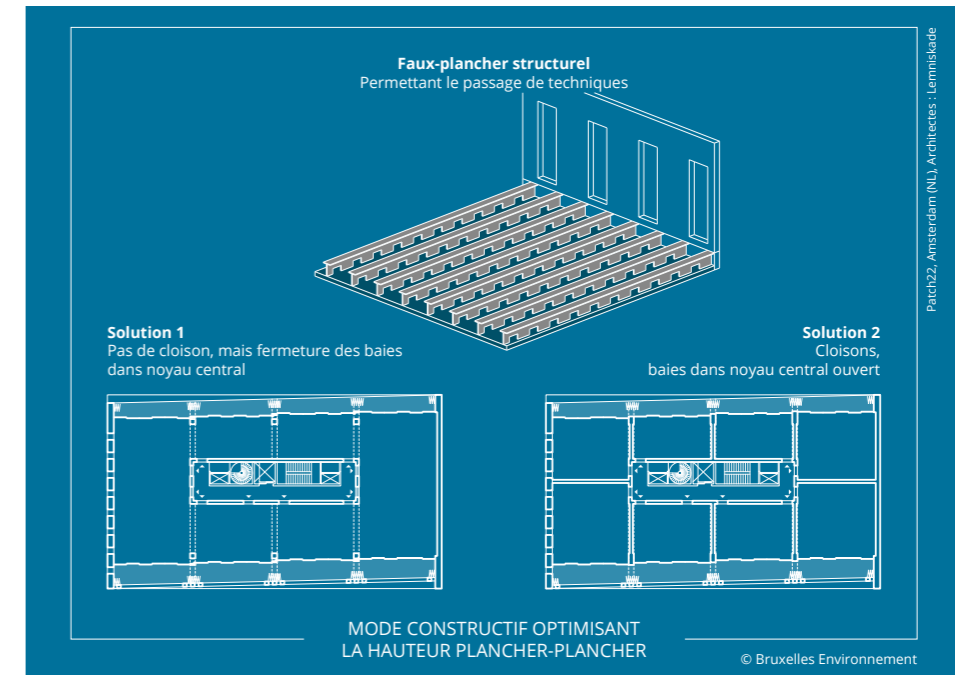


Figure 20



Figure 21 & Figure 22 : Optimisation de la hauteur de plancher à plancher en travaillant sur la hauteur sous-plafond, l'épaisseur du plancher et le mode constructif. (Projet : Patch22 à Amsterdam par Lemniskade, Photo : Luuk Kramer).

Distance maximale par rapport aux noyaux fixes : la distance maximale aux noyaux fixes, tels que les colonnes, les escaliers, les cages d'ascenseur et les gaines techniques, a également un impact sur les dimensions des espaces et donc sur la réversibilité spatiale et la capacité de transformation. De plus, selon la fonction et le nombre d'utilisateurs, les normes varient en ce qui concerne le nombre de points de circulation. Pour satisfaire aux normes de sécurité incendie, il est également important de respecter la distance maximale à parcourir par rapport aux voies d'évacuation.

Dimensions des zones de circulation : les dimensions des portes, les couloirs, cages d'escalier, cages d'ascenseur doivent être suffisantes pour augmenter la qualité spatiale et les changements de fonctions futures. Il est important de faire correspondre ces dimensions aux exigences de chaque fonction et utilisation anticipée. Par exemple, il peut être

intéressant de rendre dès le départ un logement accessible aux fauteuils roulants, en prévoyant une largeur de porte et de couloir suffisante.

En optimisant les dimensions et la structure du bâtiment, les concepteurs peuvent augmenter considérablement la capacité de transformation des bâtiments. C'est également ce qui ressort des résultats ci-dessous, qui sont le fruit d'une recherche basée sur des scénarios menée par des étudiants lors d'ateliers de conception organisés par l'Université de Twente, en collaboration avec l'Université Technique d'Istanbul et l'Université de Sarajevo dans le cadre du projet BAMB¹⁷. Ils ont analysé la capacité de transformation d'un bâtiment et ont cherché à savoir quelles seraient les dimensions idéales pour les fonctions étudiées (habitation, bureau et école). Leur conclusion : un bâtiment de 12 x 12 mètres peut accueillir à la fois différentes fonctions et différents aménagements.

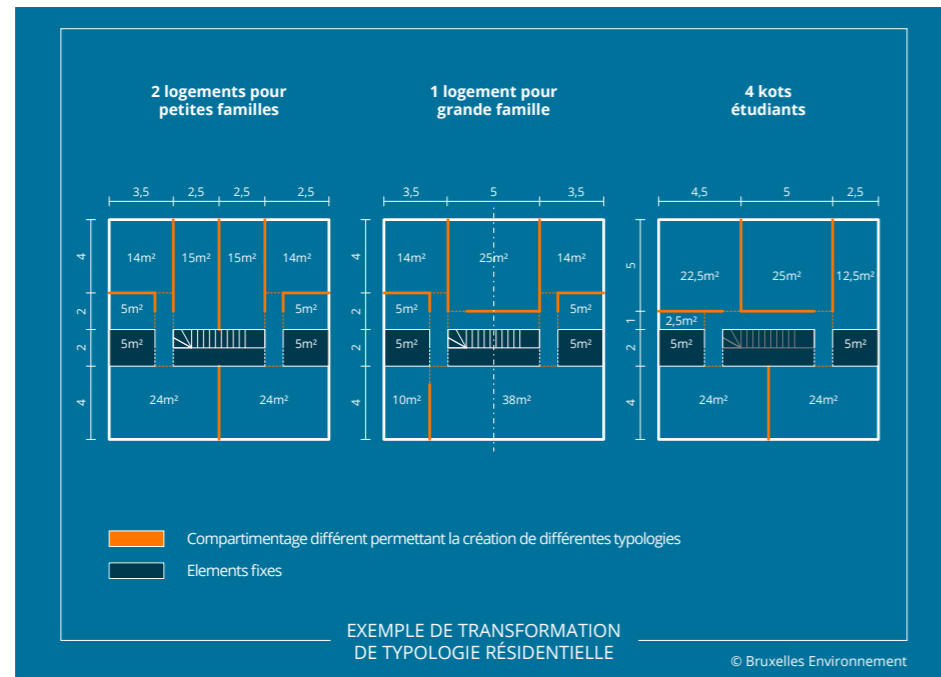


Figure 23 : Un bâtiment de 12 x 12 mètres avec un couloir central peut accueillir différentes typologies résidentielles : deux logements pour petites familles, un logement pour une famille nombreuse et quatre kots pour étudiants.

¹⁷<https://www.bamb2020.eu/wp-content/uploads/2019/05/RBD-Exploration.pdf>.

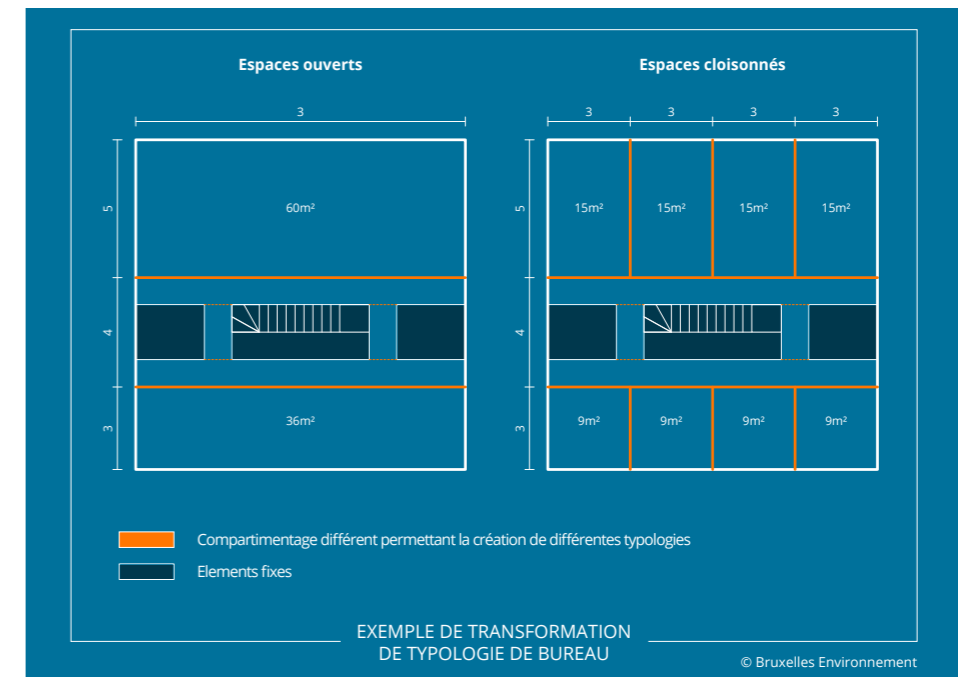


Figure 24 : Un bâtiment de 12x12 mètres avec un couloir central peut accueillir non seulement un bureau paysager ouvert mais aussi une série de bureaux individuels.

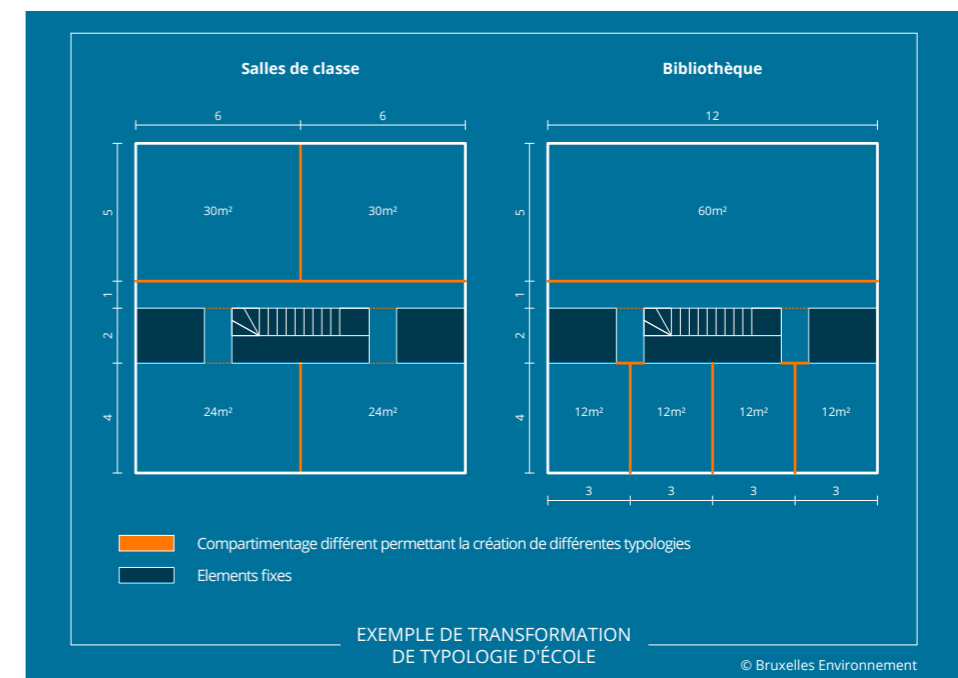


Figure 25 : Un bâtiment de 12 x 12 mètres avec un couloir central peut accueillir non seulement quatre salles de classe, mais aussi un grand local de travaux pratiques ou même une bibliothèque.

3.1.2 Position

Ce deuxième indicateur de la réversibilité spatiale d'un bâtiment concerne le **type** et la **position** des noyaux fixes. Ceux-ci sont constitué des éléments suivants :

- la structure porteuse
- les techniques (aussi bien les locaux techniques que les gaines techniques verticales : la distribution de l'électricité, l'éclairage, la ventilation...)
- les zones de circulation (escaliers, cages d'ascenseur, etc.).

Le concepteur veillera autant que possible à positionner les noyaux fixes de manière à permettre une utilisation flexible de l'espace. Par exemple, une structure de poteaux-poutres offre beaucoup plus de flexibilité spatiale que des murs intérieurs structurels, qui rendent la réalisation de grands espaces ouverts presque impossible.

En outre, il est important de **regrouper autant que possible les éléments fixes sur la base d'une trame**. Plus ils sont regroupés, moins ils sont susceptibles d'entraver toute transformation. De cette façon, les concepteurs peuvent limiter le nombre de noyaux fixes et favoriser davantage la flexibilité spatiale. La conception de l'immeuble Solid 1 & 2 à Amsterdam, par exemple, permet grâce à la position de noyaux fixes une flexibilité des espaces intérieurs. Les cages d'escaliers et d'ascenseurs ainsi que les gaines techniques sont regroupées et les murs intérieurs ne sont pas porteurs, de sorte que les unités peuvent être combinées et subdivisées librement. Les unités sont vendues vides et l'acheteur peut transformer l'espace en appartement, en chambre d'hôtel, en bureau ou autre.

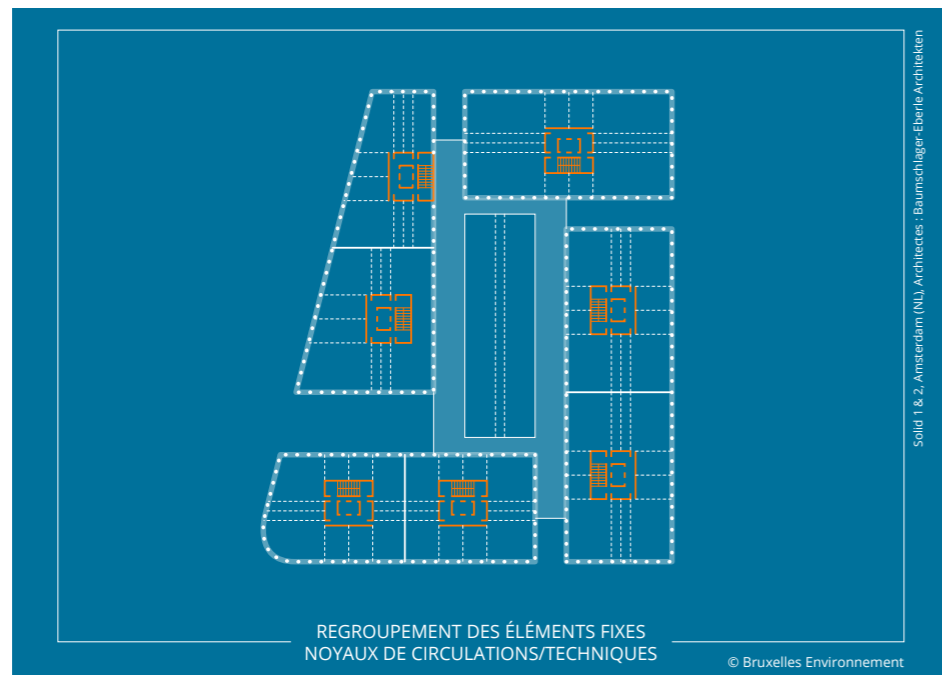


Figure 26

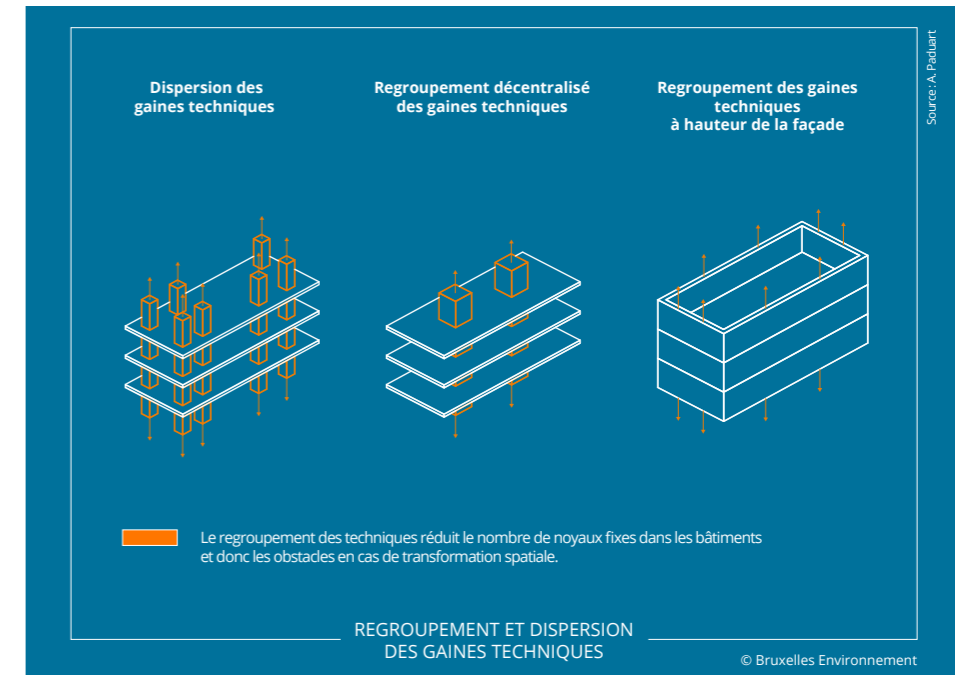


Figure 27 : Le regroupement des techniques réduit le nombre de noyaux fixes dans les bâtiments et donc les obstacles en cas de transformation spatiale. (Source : Anne Paduart)

Différents positionnements des noyaux fixes sont envisageables. Il est important de définir la position qui permet la plus grande réversibilité spatiale en fonction des scénarios d'utilisation et de la conception structurelle.

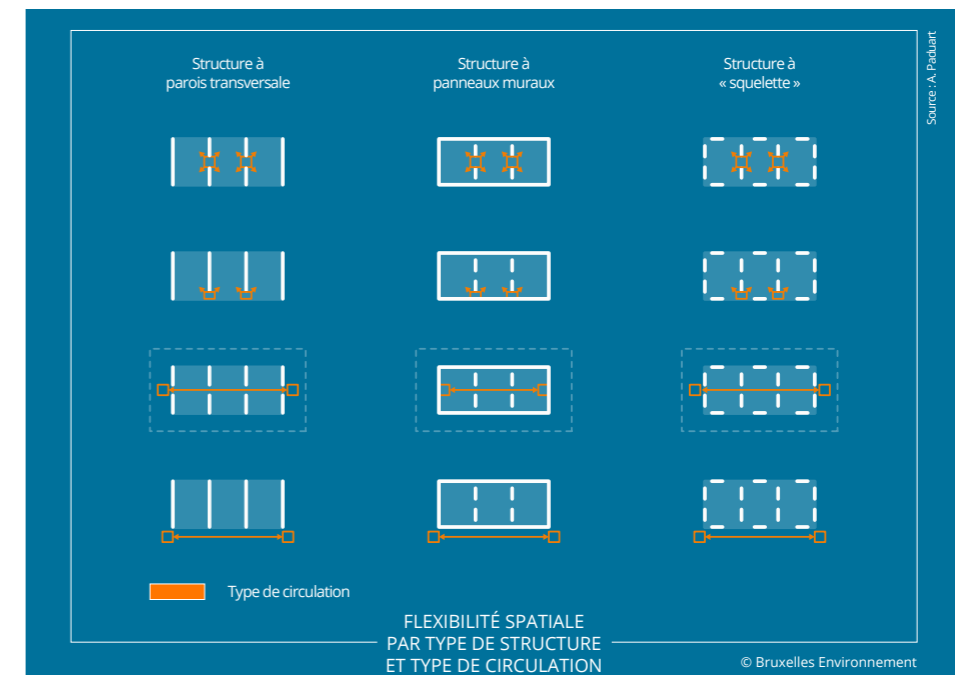


Figure 28 : Décentralisés, les noyaux fixes offrent une plus grande flexibilité spatiale. (Source: Anne Paduart)



Figure 29 : Positionnement réfléchi des techniques horizontales et des cellules techniques et sanitaires dans le Circular Retrofit Lab.

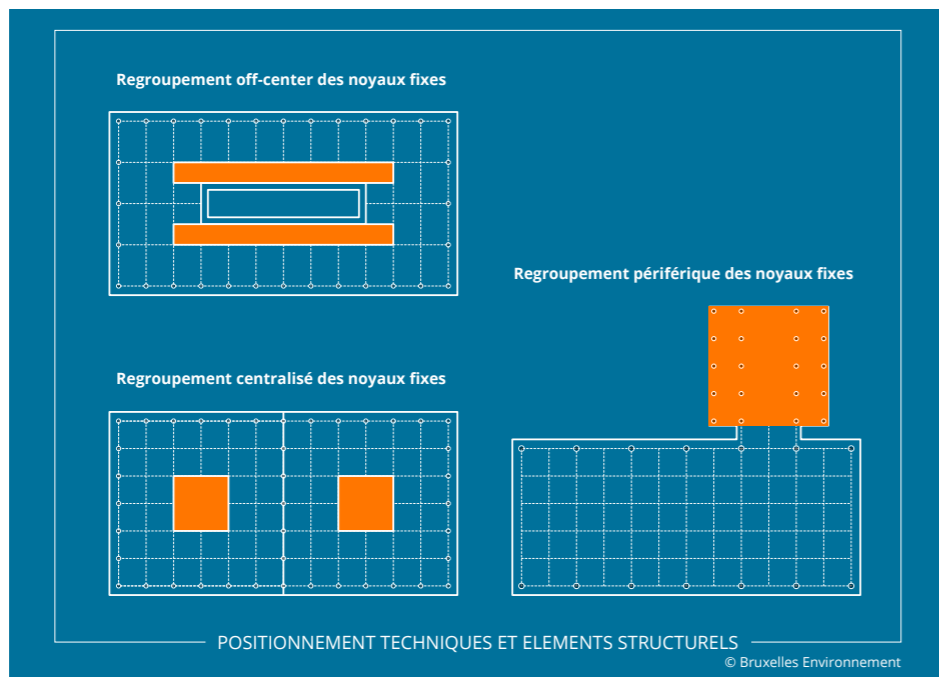


Figure 30

3.1.3 Capacité

Enfin, la réversibilité spatiale et la capacité de transformation d'un bâtiment dépendent également de la capacité de sa structure, de ses noyaux de circulation et de ses installations techniques à répondre à des scénarios d'utilisation changeants.

En ce qui concerne la capacité de la **structure porteuse**, celle-ci peut être conçue pour permettre dans le futur une **extension verticale** ou **horizontale** mais également une **reconversion** vers une fonction nécessitant une résistance structurelle plus élevée.

Bon à savoir : la capacité portante des planchers est de 2 kN/m² dans les logements, de 3 kN/m² dans les bureaux et de 5 kN/m² dans les bâtiments publics. Les éléments porteurs verticaux et les noyaux de circulation peuvent également être prévus pour s'adapter à d'éventuelles extensions horizontales ou verticales et à des changements de forme. Autrement dit : si l'on veut augmenter la capacité de transformation d'un bâtiment, il peut être intéressant de surdimensionner la structure porteuse et les noyaux de circulation sur base des scénarios d'utilisation.

Un autre paramètre important concerne la **distribution verticale des techniques**. Dans une conception réversible, il est important de prévoir l'espace nécessaire à l'intégration de nouvelles techniques. Les gaines techniques peuvent par exemple, être conçue en prévoyant suffisamment de capacité en termes d'espace pour, dans le futur, augmenter la section des conduits, ajouter des installations supplémentaires ou permettre des solutions techniques innovantes. Il est néanmoins important de nuancer : le surdimensionnement des installations techniques elles-mêmes en vue d'une éventuelle transformation future n'est pas encouragée. Il est préférable de procéder à des ajouts ultérieurs à l'aide de modules, de conduites d'attente ou de gaines surdimensionnées.

En lien avec le dimensionnement des noyaux fixes, la **capacité des circulations verticales** comme les cages d'escalier et d'ascenseur doit être dimensionnée pour permettre de répondre aux exigences correspondant aux différentes fonctions envisagées dans les scénarios d'utilisation.

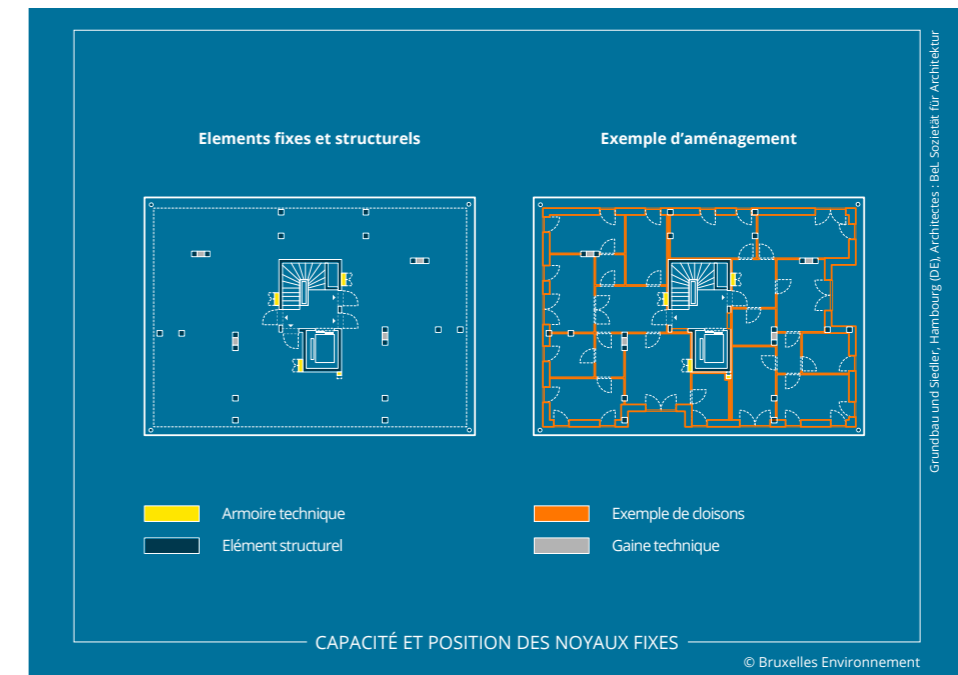


Figure 31

La structure porteuse de ce bâtiment est conçue pour permettre différentes typologies résidentielles et différentes fonctions. Les parties structurelles fixes sont réduites au minimum. En plus de la gaine technique regroupée avec les circulations dans un noyau fixe central, un espace est prévu pour les conduites entre les doubles colonnes afin

de permettre différentes compositions de plan. Les traits en rouge sur le second plan d'étage symbolisent les parois de séparation possibles. Cet exemple illustre donc bien à la fois la réflexion sur la capacité, mais également celle sur le positionnement des noyaux fixes.

3.1.4 Potentiel de démontage et de réemploi

Cet indicateur détermine dans quelle mesure il est possible de démonter ou d'adapter les éléments et composants dont est composé un bâtiment (techniques, parois intérieures, façades, planchers, ...) sans affecter les parties adjacentes. Au niveau de la réversibilité spatiale, le concept de stratification joue un rôle primordial : il convient d'**organiser les éléments et composants d'un bâtiment** en fonction de leur fin de vie en « couches » soumises à différents rythmes de changement. L'application de ce concept fait en sorte qu'un ensemble de composants ayant une durée de vie plus courte soit **indépendant et plus accessible** qu'une couche avec des composants ayant une durée de vie plus longue. Ceci permet entre autres de pouvoir entretenir, réparer, remplacer, adapter les couches ayant une durée de vie plus courte ou étant plus rapidement soumises à une adaptation lors de changements d'utilisation ou de fonction.

Comme repris dans l'illustration de Brand, les aménagements spatiaux et les techniques sont les plus susceptibles d'être

modifiés. Il est donc d'une part nécessaire de faciliter l'**accessibilité aux techniques** afin de permettre leurs entretiens et adaptations sans créer de déchets suite à l'endommagement d'éléments ou composants adjacents. Le **regroupement des techniques** est également important pour faciliter cette accessibilité et limiter les démontages.

D'autre part, la possibilité de démontage et déplacement de parois intérieures joue également un rôle important pour faciliter l'adaptation de l'aménagement intérieur.

Comme repris au [paragraphe 2.2](#) ci-dessus, l'**interchangeabilité des éléments et composants** ainsi que leur démontage sont des paramètres de conception cruciaux pour soutenir l'adaptation des techniques et de l'aménagement spatial.

Les différents aspects qui permettent d'augmenter le potentiel de démontage et de réemploi au niveau de la réversibilité technique sont développés dans le [paragraphe 3.2](#).

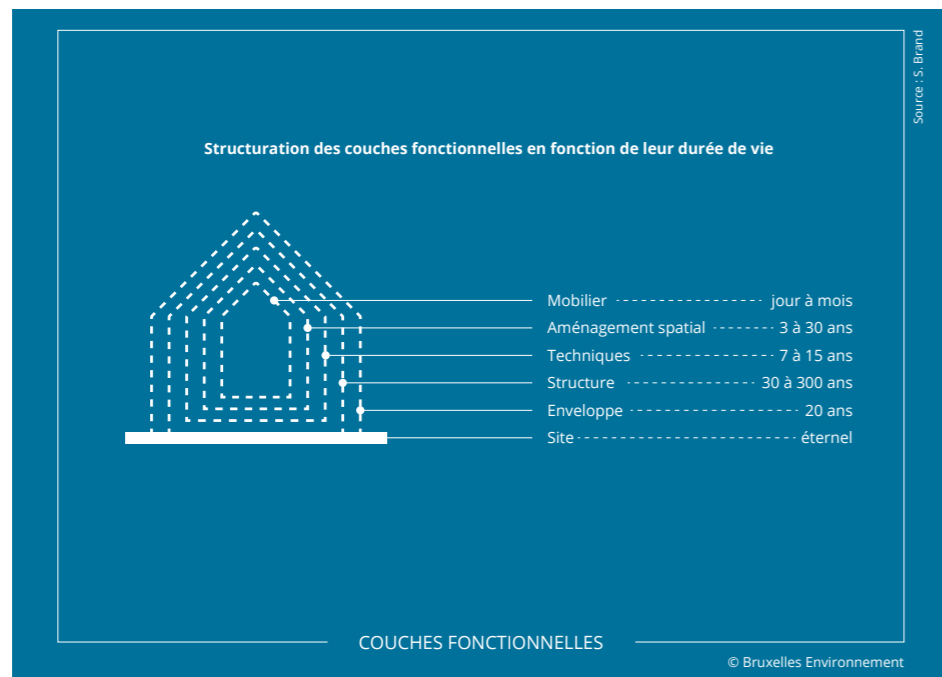


Figure 32: Vue d'ensemble des principales 'couches' fonctionnelles d'un bâtiment, dont chacune a une durée de vie différente. Il est important de les organiser de façon indépendante, afin qu'elles puissent être démontées à l'avenir sans affecter les autres 'couches' fonctionnelles du bâtiment. (Source : S. Brand)

En ce qui concerne l'indépendance des 'couches' fonctionnelles, il est par exemple avantageux de pouvoir démonter et déplacer des cloisons sans devoir remplacer les techniques. Pensons par exemple à l'agrandissement d'une salle de bain pour la rendre accessible aux personnes en fauteuil roulant.

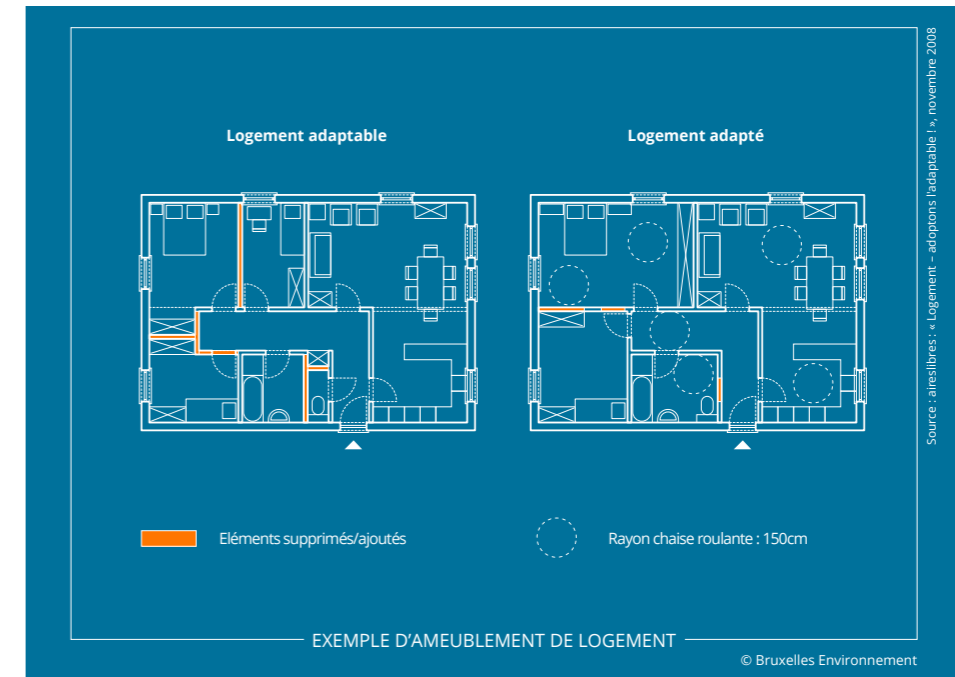


Figure 33

En ce qui concerne l'accessibilité, par exemple, les câbles électriques qui sont disqués et bétonnés dans la maçonnerie permettent moins facilement de déplacer câbles, prises et interrupteurs qu'un système de parois démontables créant une gaine technique. Ces derniers sont plus facilement ac-

cessibles en retirant un ou plusieurs panneaux de finition. C'est aussi vrai pour un plafond suspendu, dont les panneaux peuvent être facilement retirés pour nettoyer les gaines de ventilation, ou pour une trappe de visite sous une baignoire.

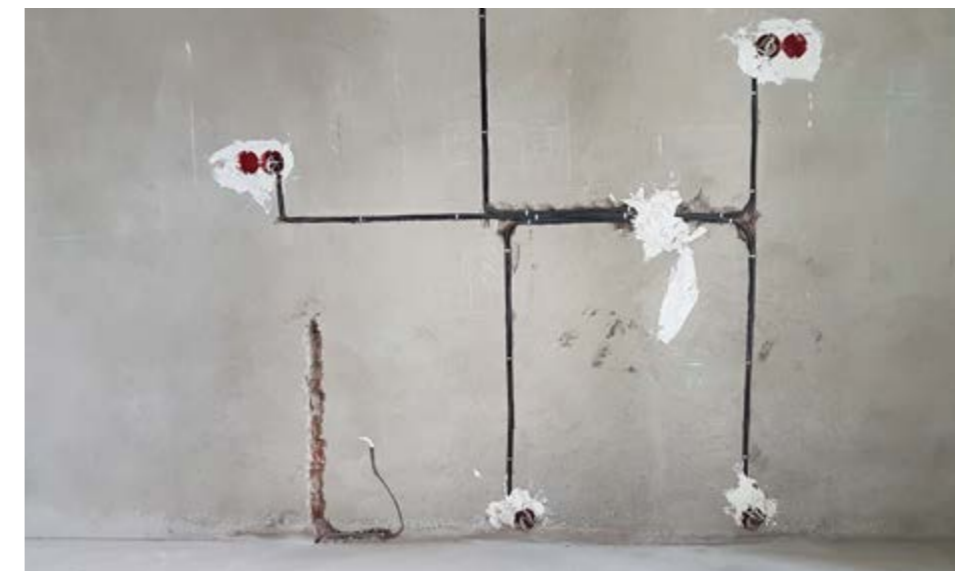


Figure 34



Figure 35: (Source: Systimber)

3.2 Indicateurs pour une réversibilité technique

Un bâtiment est constitué d'éléments, de composants et de matériaux qui peuvent être reliés de façons différentes les uns aux autres. La réversibilité technique a pour objectif de faciliter le démontage d'un bâtiment et des parties dont il est constitué en limitant la détérioration des parties démontées et des parties adjacentes tout en limitant le temps de démontage. C'est pourquoi, comme développé au point 2.2, la réversibilité technique comprend bien plus que l'utilisation de connexions réversibles et tient compte de trois niveaux de désassemblage : le désassemblage fonctionnel, le désassemblage technique et le désassemblage physique.

Plusieurs aspects de conception ont un impact crucial sur la réversibilité technique des bâtiments. On peut ainsi distinguer huit indicateurs :

Désassemblage fonctionnel

1. Indépendance fonctionnelle
2. Regroupement fonctionnel

Désassemblage technique

3. Élément de base
4. Hiérarchie de (dé)montage
5. Coordination des cycles de vie

Désassemblage physique

6. Géométrie des connexions
7. Séquence de montage
8. Types de connexions

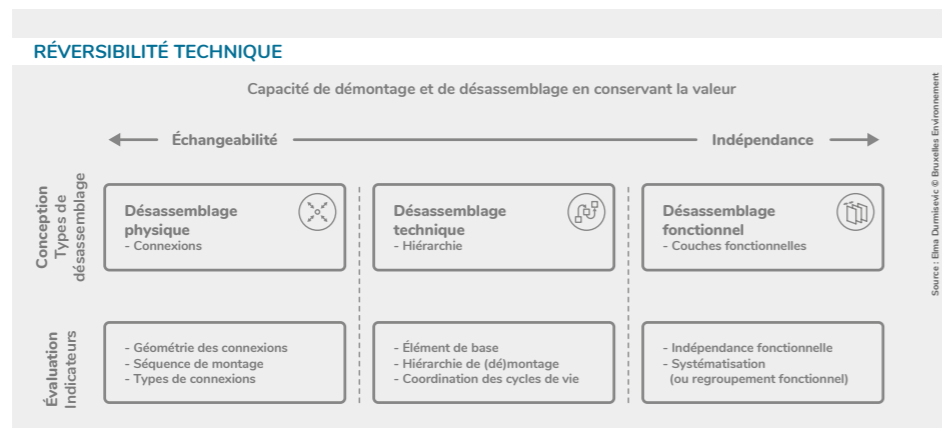


Figure 36: Aperçu schématique de la réversibilité technique et des types de désassemblage correspondants (fonctionnel, technique et physique), paramètres de conception et indicateurs.

3.2.1 Désassemblage fonctionnel

Une construction statique dans laquelle les différentes couches fonctionnelles sont fortement imbriquées permet peu ou pas de modification ou de désassemblage. C'est pourquoi il est important de concevoir le bâtiment et ses éléments sur base d'une approche en strates de façon à permettre à ses différentes fonctions d'être adaptées, démontées et remplacées de façon indépendante. En limitant la dépendance aux fonctions adjacentes, il est non seulement possible de réduire la détérioration de ces parties lors d'adaptations et de démontages mais également de rendre le processus de démontage plus aisé et rapide, et donc plus économiquement intéressant.

L'indépendance fonctionnelle et le regroupement fonctionnel sont deux indicateurs permettant d'améliorer le désassemblage fonctionnel.

3.2.1.1 Indépendance fonctionnelle

L'indépendance fonctionnelle est un point essentiel lors de la conception de bâtiments réversibles. Comme développé au point 2.2, tant le bâtiment que ses éléments sont constitués de différentes 'couches' fonctionnelles. Dans une approche de conception statique, un même élément peut avoir différentes fonctions. Une façade peut par exemple avoir une fonction de structure porteuse et d'enveloppe. Dans une intention de réversibilité technique, il est néanmoins important de séparer ces fonctions afin de pouvoir, par exemple, adapter l'enveloppe sans affecter la structure porteuse du

bâtiment. Il en est de même au sein d'un élément, où l'on peut également distinguer différentes fonctions. Par exemple, un plancher est constitué d'une structure porteuse (qui peut elle-même être éventuellement subdivisée par exemple en poutre et plancher porteur), d'une enveloppe sous forme de revêtements de sol et de plafond, et comprend généralement aussi des techniques... Toutes ces fonctions ont leurs propres caractéristiques et souvent des cycles de vie différents, de sorte que l'intégration de deux ou plusieurs fonctions dans un seul composant peut entraver leur indépendance, et compliquer leur désassemblage et leur réemploi.

Les éléments, composants ou matériaux peuvent être démontés s'ils constituent une partie indépendante du bâtiment. Il est donc conseillé de concevoir un bâtiment en séparant ses différentes fonctions en 'couches' fonctionnelles indépendantes. Les principales couches fonctionnelles d'un bâtiment sont : la structure porteuse, l'enveloppe (étanchéité au vent et à l'eau, isolation, finition...), les techniques et l'aménagement intérieur (cloisons). Chacune de ces fonctions peut être subdivisée en sous-fonctions. Une structure porteuse, par exemple, peut être subdivisée en fondation, colonnes, mur porteurs, poutre, plancher, etc.

Il existe différents degrés d'indépendance fonctionnelle, allant de l'indépendance complète, soutenant une plus grande réversibilité technique, à l'intégration complète, qui entrave la réversibilité technique.

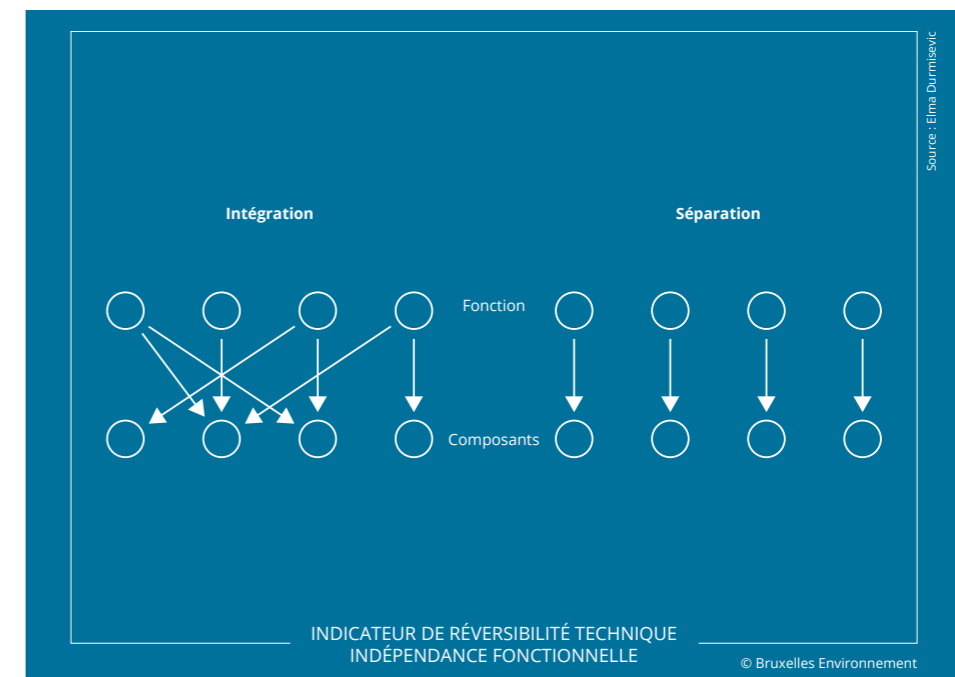


Figure 37

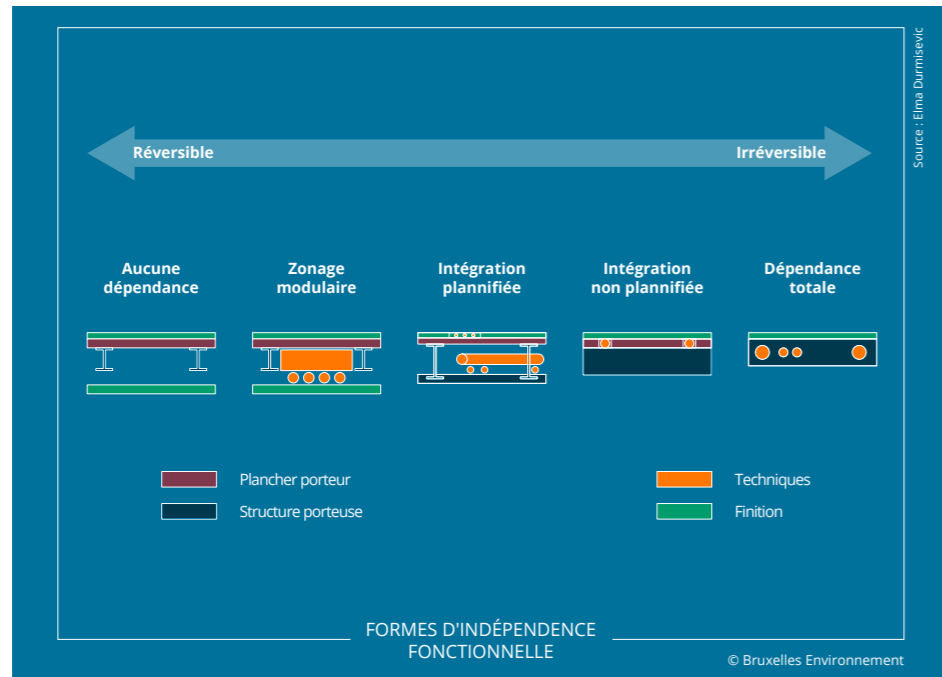


Figure 38 : Représentation schématique des cinq formes d'intégration.

Comme repris dans le schéma ci-dessus, nous pouvons distinguer cinq formes d'indépendance / intégration :

- **Indépendance totale** : les différentes fonctions telles que les techniques, la structure porteuse, les finitions,

etc. ne présentent aucune 'intersection'. Elles sont totalement indépendantes les unes des autres et peuvent être adaptées ou désassemblées sans s'entraver mutuellement. Pensons aux systèmes de planchers 'techniques' démontables (voir l'exemple ci-dessous).



Figure 39 : (Source : <https://pbsholland.com/toepassingsgebieden/kantoren/>)

- **Zonage modulaire** avec croisement et regroupement réfléchis des techniques, par exemple, en fonction de la facilité d'accès ou d'adaptation. L'impact sur la structure

est faible. Pensez à une structure poteaux-poutres dans laquelle les techniques sont intégrées dans des espaces spécifiques entre les poutres structurelles.



Figure 40 : Ductwork. (Source : Crowl Marketing + creative courtesy Pro Builder Media <https://www.probuilder.com/>)

- **Dépendance complète (Intégration planifiée)** des techniques et des éléments structurels. Une zone spécifique est réservée aux techniques et des ajustements ou ajouts sont possibles. Par exemple, des percements

et passages positionnés de façon systématique, notamment dans des poutres, et destinés aux techniques afin de permettre différents utilisations et intégrations.



Figure 41 : (Source : www.steelconstruction.info)

- **Intégration non planifiée** de techniques et d'éléments structurels. De ce fait, les techniques interfèrent avec d'autres fonctions et ne laissent que peu ou pas de place pour des adaptations ou des ajouts futurs. Pensons ici au

perçage d'une poutre, sur chantier, pour permettre le passage d'un tuyau spécifique. La position spécifique du perçage limite sa réutilisation ultérieure.



Figure 42 : (Source : <https://www.bouwwereld.nl/>)

- **Intégration complète** : dans ce cas, les différentes fonctions telles que la finition, la structure porteuse, les techniques, etc. sont complètement fusionnées avec les autres fonctions et ne sont accessibles que par la

démolition ou d'autres interventions destructives. C'est par exemple le cas de techniques qui sont coulées dans un plancher en béton.

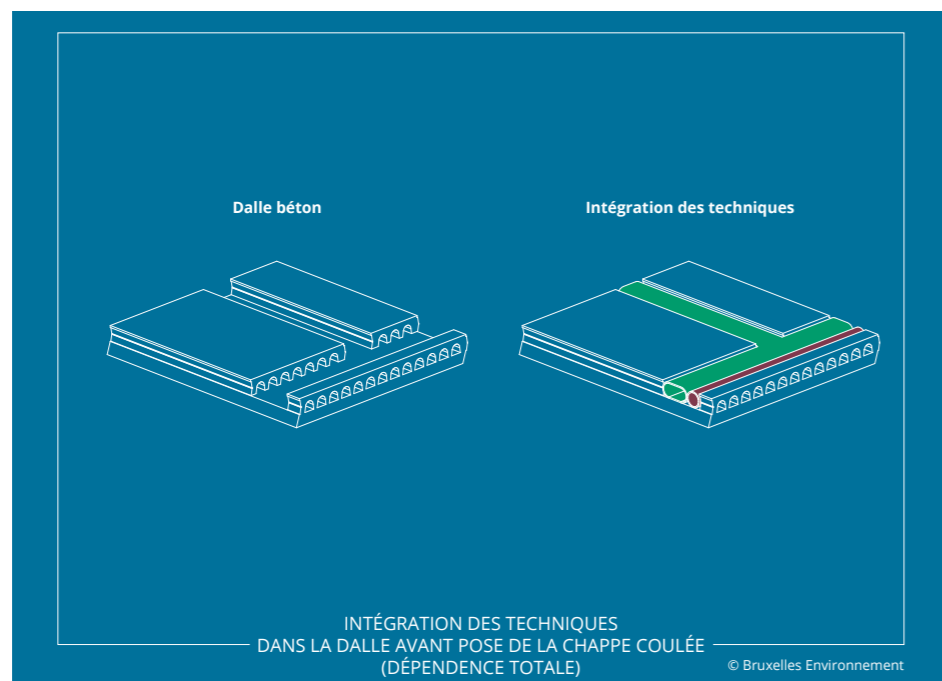


Figure 43

Dans une approche de conception linéaire, les éléments structurels peuvent avoir une fonction de structure porteuse tout en faisant partie des techniques du bâtiment : l'inertie thermique d'un mur en béton peut par exemple être utilisée pour stocker la chaleur, la structure porteuse peut réfléchir ou absorber le son, certaines parties de la structure peuvent être remplies d'eau pour assurer une forme active de sécurité incendie...

Cependant, il est important d'examiner comment ces exigences et fonctions peuvent être intégrées dans la conception sans limiter l'indépendance fonctionnelle. Le plancher réversible conçu pour Project XX à Delft en est un bon exemple. Le plancher du premier étage est conçu comme une boîte creuse séparée de la structure porteuse en bois et qui peut être remplie de sable pour créer une inertie thermique et offrir une meilleure isolation acoustique.



Figure 44 : Un plancher réversible a été conçu pour Project XX à Delft (Source : Project XX, architecte Jouke Post XXarchitecten)

En rénovation également, il est possible de réaliser une indépendance entre les couches fonctionnelles d'éléments. Prenons l'exemple d'un mur intérieur composé d'une partie porteuse et d'une isolation, avec une gaine technique insérée d'un côté avant la finition du mur. Cela crée un espace

intermédiaire pour les installations techniques (électricité, conduites, etc.), qui peuvent alors être adaptées sans affecter les caractéristiques structurelles, acoustiques ou autres du mur. Une telle solution a été présentée pour la rénovation du Clos des Mariés à Ixelles, dans le cadre du projet Usquare.

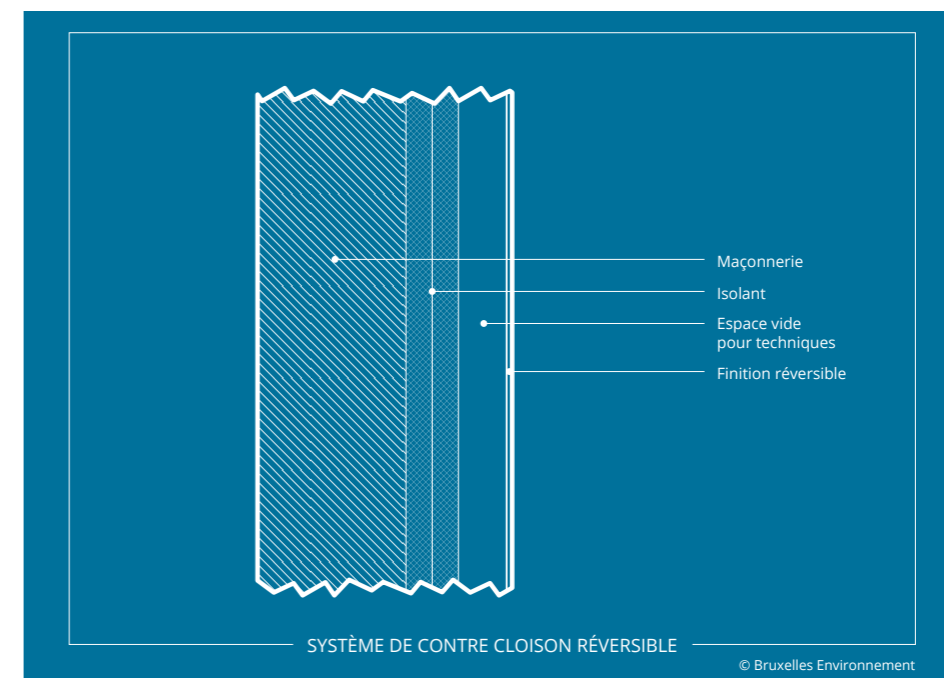


Figure 45

Bloc sanitaire démontable

L'exemple ci-dessous d'un bloc sanitaire démontable illustre comment l'indépendance fonctionnelle contribue à la réversibilité technique d'un élément de construction. Les fonctions principales telles que la structure (auto)porteuse de la paroi du bloc sanitaire, les installations techniques, les finitions et les accessoires sanitaires sont conçues comme des éléments fonctionnels indépendants et ne sont reliées entre elles que par des connexions en acier (réversibles).

En outre, les connexions en acier garantissent également la liaison entre la structure porteuse (permanente) du bâtiment et la structure porteuse de parois (éléments variables) de l'unité sanitaire. L'indépendance fonctionnelle entre les différentes couches de la paroi sanitaire permet, entre autres, de renouveler la finition sans affecter les techniques ou la structure porteuse du bloc sanitaire, ou 'd'interchanger' des éléments sanitaires (par exemple lavabo et toilette) sans affecter les autres éléments.

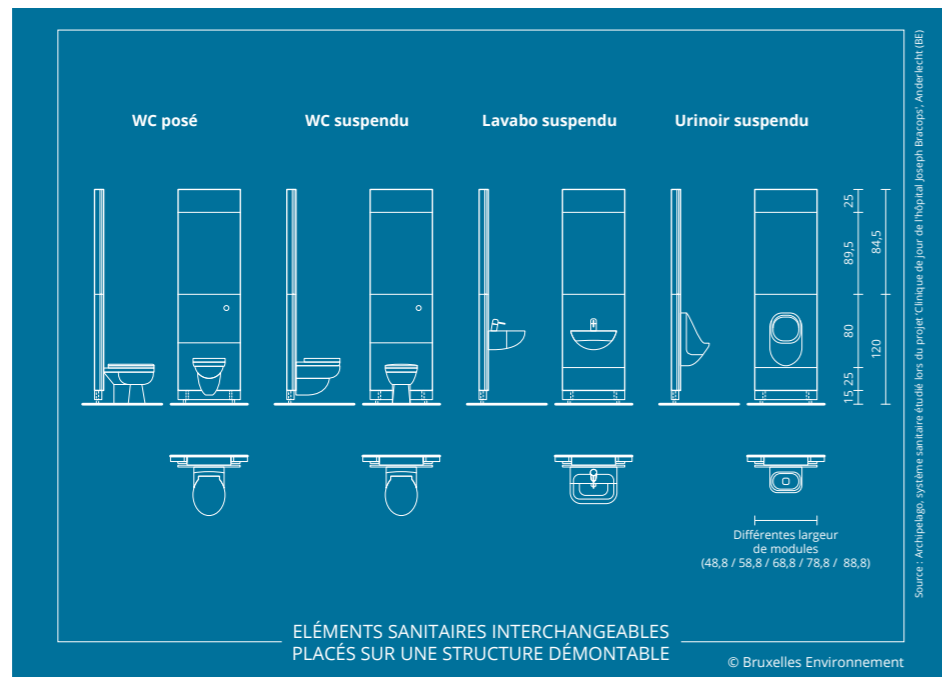


Figure 46 : Ce système sanitaire réversible fait partie de la conception circulaire de la clinique de jour de l'hôpital Joseph Bracops à Anderlecht. (Source : archipelago)

3.2.1.2 Regroupement fonctionnel

Le (dé)montage d'un bâtiment consiste en une succession d'opérations. Plus il y a d'opérations successives, plus le démontage du bâtiment sera complexe et prendra du temps. Le risque encouru est que le choix se porte sur une démolition plutôt que sur une déconstruction, et ce, pour des raisons financières (multiplication des étapes intermédiaires de démontage entraînant un coût supplémentaire de main d'œuvre) ou techniques. Le démontage peut être facilité en regroupant les différentes parties ayant une même fonction et en limitant les connexions avec des parties ayant une autre fonction. Cela permet de limiter le nombre de connexions à démonter lors du désassemblage et donc de gagner du temps et d'augmenter la faisabilité financière.

Il est à noter que la préfabrication peut jouer un rôle important à cet égard pour autant que cette préfabrication soit réversible. Dans une approche de conception réversible, le

démontage peut alors être envisagé en deux étapes : d'abord, un démontage des éléments et des composants sur site, en vue d'une réutilisation ou d'une reconfiguration. Ensuite, un désassemblage peut se poursuivre en atelier, où les composants et les matériaux sont démontés en vue d'être remplacés, réparés, réemployés ou recyclés. Un haut niveau de préfabrication peut ainsi réduire le nombre d'étapes intermédiaires pour démonter rapidement un bâtiment et permettre de réaliser un grand nombre d'opérations de désassemblage en atelier. Cette approche permet de réduire les coûts et de limiter les dommages potentiels grâce à l'environnement protégé offert par le désassemblage en atelier.

Il est également important de relever que cette approche de regroupement facilite également le démontage sur site, par exemple des techniques, en vue de réparation ou de remplacement.

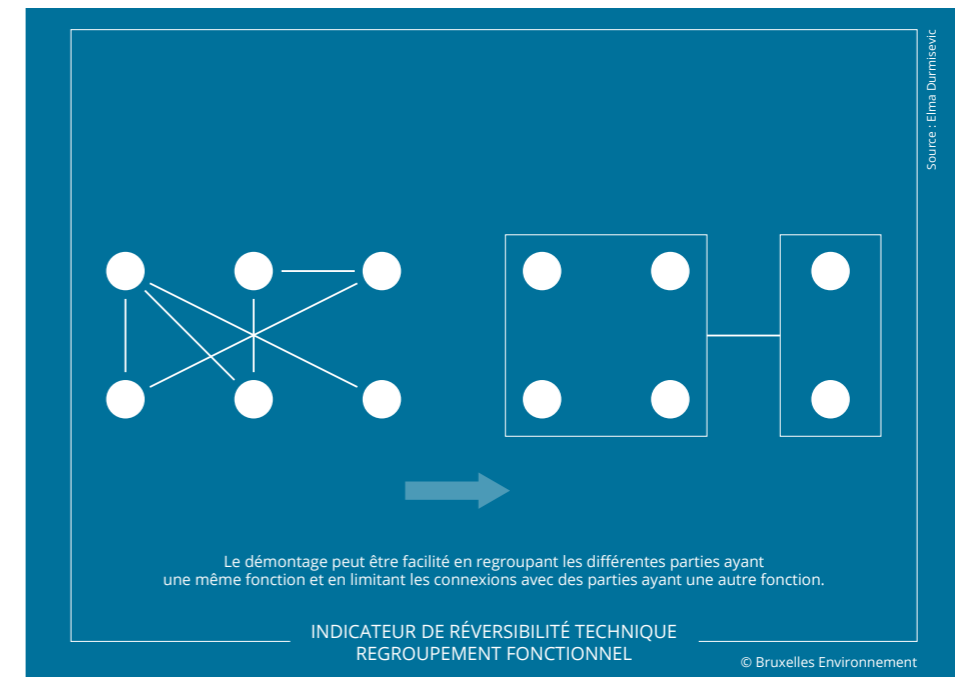


Figure 47

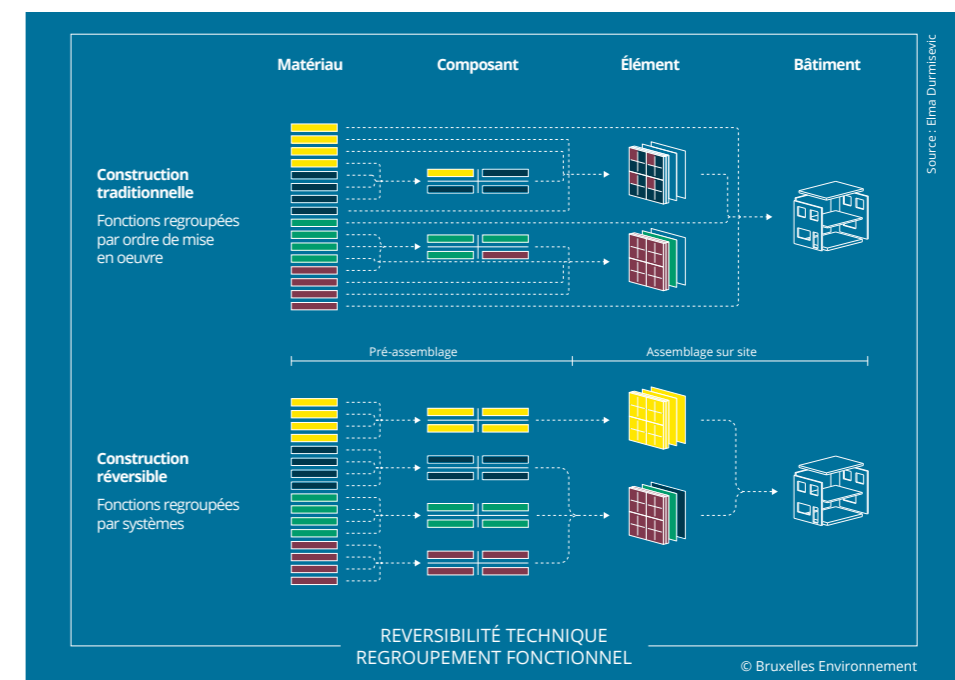


Figure 48 : Si vous voulez accroître la réversibilité technique, il est important de regrouper les composants et les matériaux de manière réfléchie aux différents niveaux. Plus c'est le cas, moins il faut d'étapes intermédiaires pour démanteler les bâtiments.

3.2.2 Désassemblage technique

Afin de faciliter le démontage et d'augmenter la valeur et la valorisation des différentes parties du bâtiment, il est également important d'organiser le montage et le démontage de ces différentes parties sur base de leurs fonctions et durées de vie associées. Cette organisation doit prendre en compte l'ordre de montage et de démontage afin d'éviter le démontage inutile de parties adjacentes pour pouvoir démonter la partie en question. Ceci permet de limiter les dégâts et le

temps de démontage lors de réparations, remplacements, enlèvements, etc.

L'utilisation d'éléments de base, la hiérarchie de (dé)montage et la coordination du cycle de vie permettent d'augmenter le désassemblage technique.

3.2.2.1 Élément de base

Afin d'augmenter la réversibilité technique, un élément de connexion également appelé 'élément de base' peut servir de liaison entre les différents éléments ou composants. Au plus cet élément de base est indépendant, au plus les éléments et composants pourront être désassemblés indépendamment les uns des autres. Un exemple est la structure porteuse d'un bâtiment, qui fait office d'élément de base auquel sont ancrés la façade, le toit, etc. Un élément de base

peut se trouver à n'importe quel niveau micro ou macro d'un bâtiment. Afin de maximiser la réversibilité technique des bâtiments, il est important que les éléments de base soient facilement accessibles et démontables. Les principes repris ci-dessous décrivent les solutions de conception du moins au plus réversible.

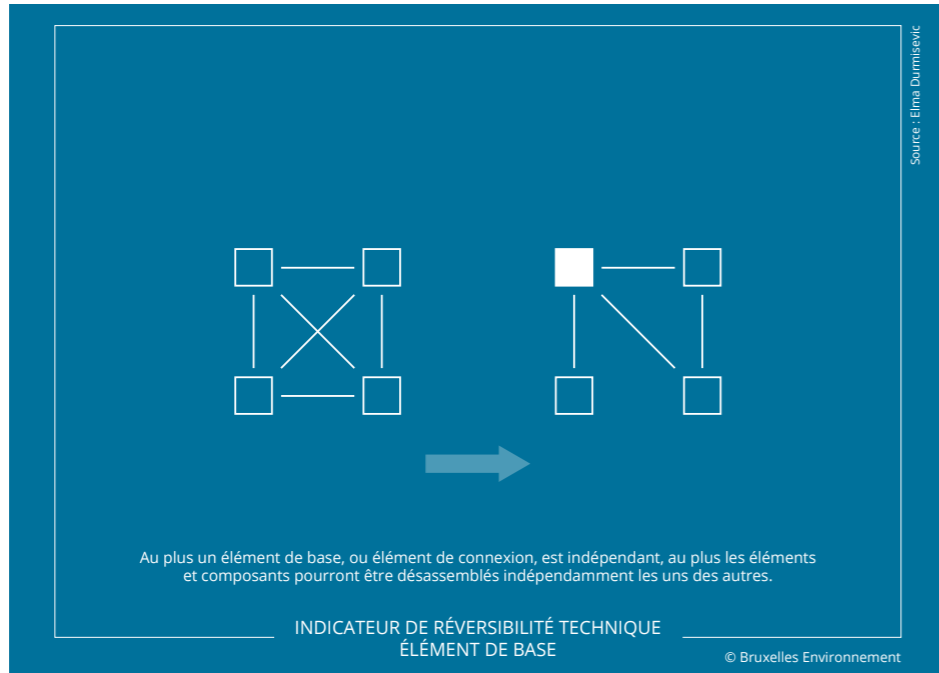


Figure 49

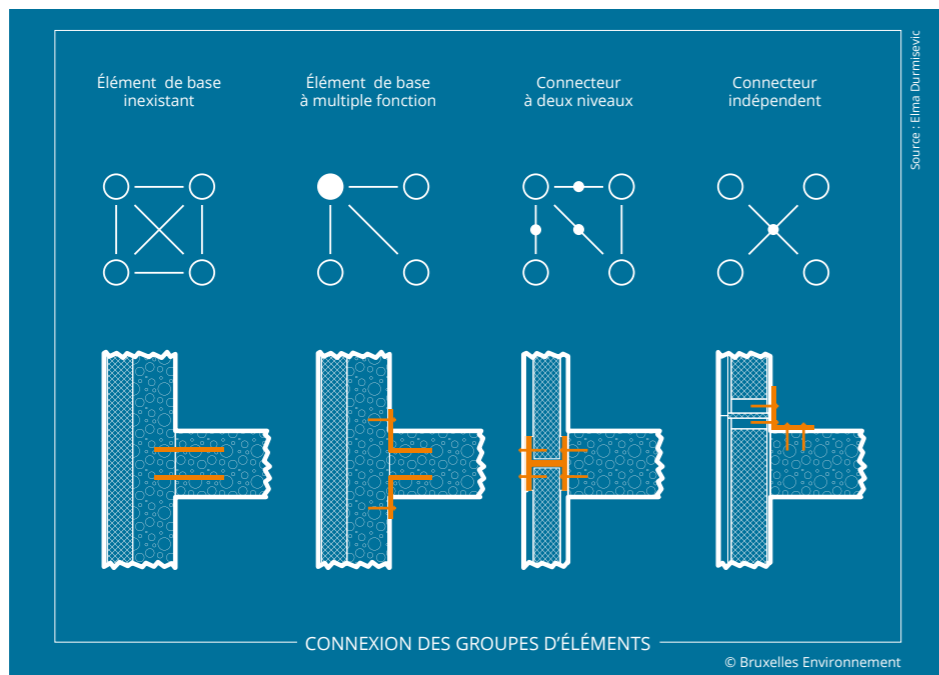


Figure 50 : L'élément de base spécifie la manière dont les différents groupes d'éléments sont connectés. L'élément de connexion indépendant peut être inexistant.

Principe 1 : élément de base inexistant

L'élément de base peut être entièrement intégré et 'fusionner' les parties connectées. Le connecteur indépendant est alors inexistant. Le démontage d'une partie du bâtiment, par exemple la façade, impactera alors l'intégrité des parties adjacentes comme par exemple le plancher avec lequel la façade est liée. Ceci résultera en un endommagement des différentes parties.

connexion entre les composants d'un élément, par exemple entre les panneaux de façade de l'enveloppe. D'autre part, ce même élément réalise également la connexion entre deux éléments différents, par exemple entre la façade et le plancher.

L'élément de base remplit alors simultanément une fonction de connecteur à deux niveaux différents à savoir : 1) entre les composants dans un élément et 2) entre différents éléments.

Principe 2 : élément de base à multiples fonctions

Lors de la jonction de deux éléments différents, par exemple une façade et un plancher, l'élément de base peut également être intégré dans un des éléments connectés, par exemple dans le plancher. Le plancher a alors 2 fonctions : plancher et connecteur. L'élément de base fait alors partie intégrante de cet élément (plancher), ce qui réduit son indépendance.

Principe 4 : connecteur indépendant

Enfin, un élément de base peut aussi être un élément de connexion indépendant à un seul niveau. L'élément de connexion est utilisé comme un connecteur indépendant pour relier deux composants, par exemple le parement à la structure du panneau de façade. L'élément de base peut être utilisé comme connecteur indépendant pour relier deux éléments, par exemple la façade au plancher.

Principe 3 : connecteur à deux niveaux

Un élément de base peut figurer simultanément comme connecteur à deux niveaux. Il réalise alors, d'une part, la

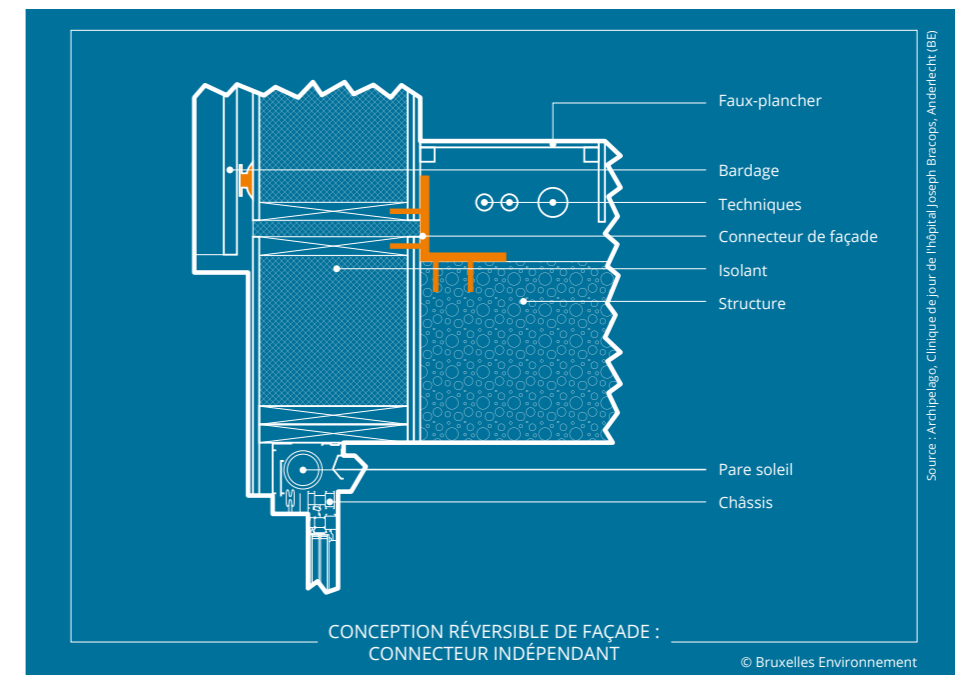


Figure 51 La conception réversible de la façade de la polyclinique Bracops intègre des connecteurs indépendants comme éléments de base. L'élément de base indiqué par le nr 1.11 assure la liaison entre la dalle de plancher et les panneaux de façade. L'élément de base indiqué par le nr 2.21 assure la liaison entre la structure porteuse des caissons de façade et les panneaux de finition de façade, afin que ces derniers puissent être facilement démontés. (Source : archipelago)

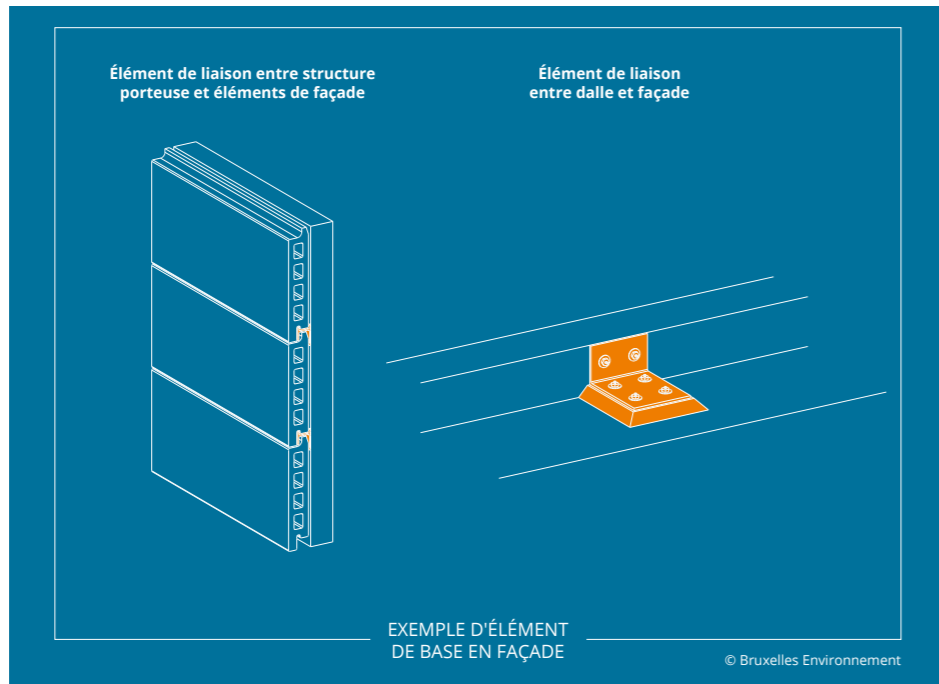


Figure 52

3.2.2.2 Hiérarchie d'assemblage

La hiérarchie d'assemblage couvre deux aspects : Dans une approche de conception en strates, il est important de concevoir les différentes 'couches' fonctionnelles comme indépendantes les unes des autres et de regrouper les parties ayant une même fonction afin de faciliter le montage et le démontage de ces différentes fonctions. Le nombre de connexions entre les différentes 'couches' et 'regroupements' fonctionnels doit également être limité afin de réduire leurs dépendances lors du (dé)montage. Ces dépendances de (dé)montage peuvent être représentées dans un diagramme relationnel. Celui-ci représente sur l'axe horizontal les différentes couches fonctionnelles et sur l'axe vertical le séquençage d'assemblage (et de désassemblage).

Pour illustrer cela, le diagramme relationnel repris ci-dessous analyse la conception réversible de la façade de la Polyclinique Bracops et décrit la composition des différentes couches fonctionnelles et les relations (connexions) entre ces différentes 'couches'. Ces relations sont représentées par un trait, le pictogramme sur le trait représente le type de connexion. Les éléments de base décrits ci-dessus (3.2.2.1) sont représentés par un losange vert.

Les couches fonctionnelles représentées dans le diagramme sont : la structure porteuse du plancher, les techniques, les cloisons intérieures et la façade. Le cercle en pointillés regroupe les composants et matériaux dont est composé l'élément de façade.

En ce qui concerne l'ordre d'assemblage, les composants assemblés en premier et désassemblés en dernier sont positionnés dans le haut du diagramme. Les composants et matériaux assemblés en dernier et les plus accessibles pour le désassemblage sont positionnés dans le bas du diagramme.

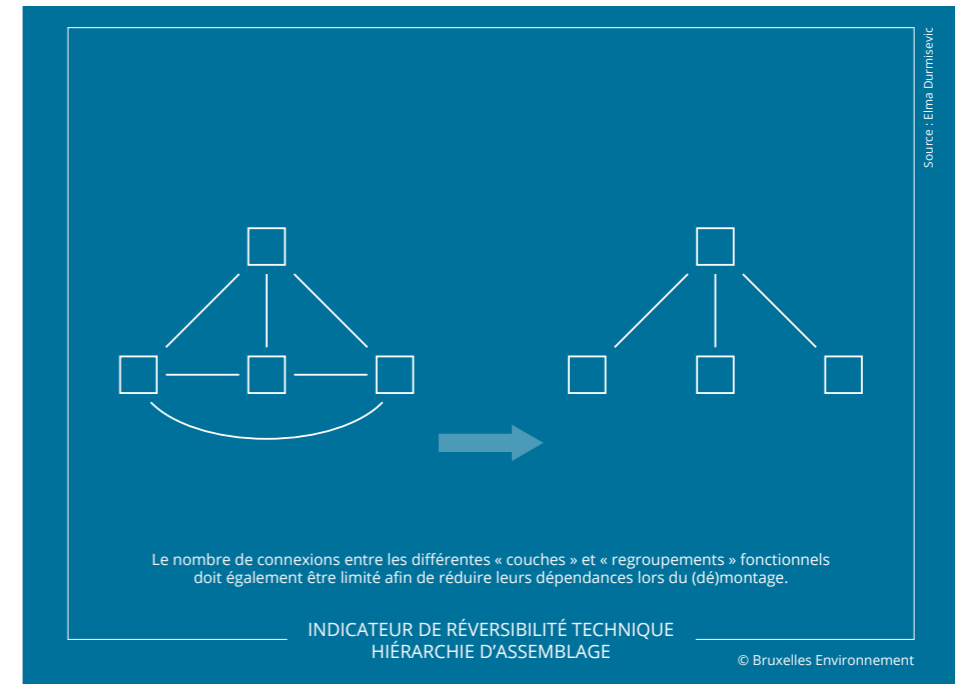


Figure 53

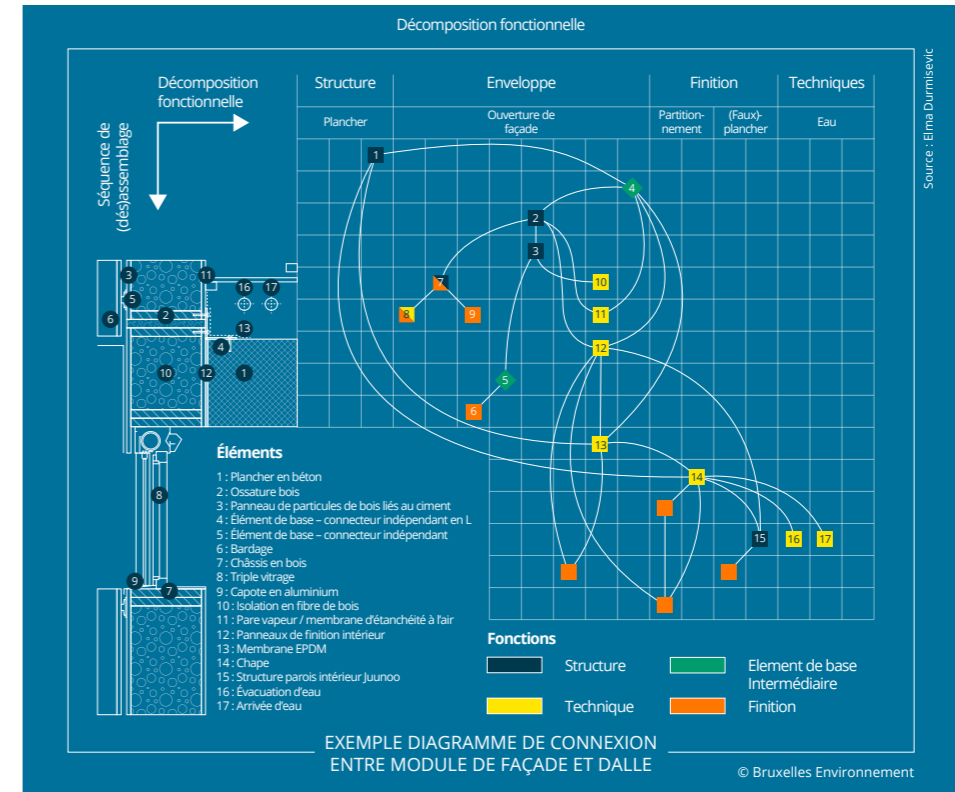


Figure 54 : Diagramme montrant comment le module de façade est relié à la dalle de plancher par un élément de base. Un élément de base est également utilisé pour relier les panneaux de façade.

Afin d'augmenter le degré de désassemblage technique, il est important de prendre en compte :

1. le type et le nombre de relations entre les éléments et composants (voir 'composition' ci-dessous)
2. la position des différentes relations dans un diagramme relationnel.

Composition

La facilité de démontage et le potentiel de réemploi sont déterminés par le type et le nombre de relations entre les différentes parties. Afin d'accroître la réversibilité technique, il convient de limiter les relations d'un composant/élément avec ses composants/éléments adjacents à une relation avec seulement un composant/élément adjacent.

Dans un diagramme relationnel, nous pouvons, sur base du nombre de relations, distinguer cinq types d'assemblage :

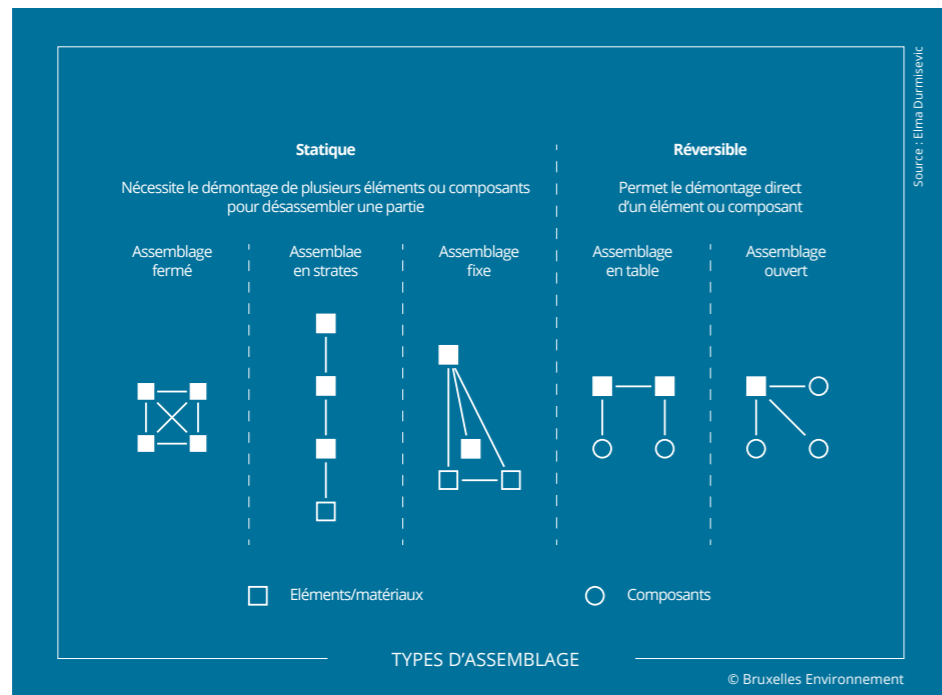


Figure 55 : Les cinq différents types d'assemblage, de la composition fermée à la composition ouverte.

Une conception statique, et donc moins réversible, est caractérisée par des assemblages 'fermés', superposés ou fixes. Ceux-ci nécessitent le démontage de plusieurs connexions et de plusieurs éléments ou composants pour pouvoir désassembler une partie. La conception plus réversible est caractérisée par un assemblage 'en table' ou 'ouvert'. Les assemblages ouverts sont constitués de parties qui sont indépendantes, qui n'ont qu'une seule relation avec une partie adjacente, car elles ne sont liées qu'à l'élément de base qui les connecte à la configuration en question.

Position

Les relations entre les différentes parties peuvent être représentées dans un diagramme relationnel. Les relations entre les différentes parties d'une même fonction ou sous-fonctions sont définies comme 'verticales'. Les relations entre différentes fonctions sont définies comme 'horizontales'.

Pour un mur classique, les relations mutuelles entre les différentes parties sont plutôt multiples et horizontales. Cela signifie que les différentes parties (et différentes fonctions) ayant une relation horizontale doivent être assemblées et désassemblées ensemble. Avec un système de cloison modulaire et démontable, les relations sont plutôt verticales.

En vue d'une haute réversibilité technique, les relations horizontales doivent être limitées autant que possible, car elles impliquent que les parties ayant des fonctions différentes qui sont liées horizontalement doivent être démontées ensemble. Quand des relations horizontales sont nécessaires, il est préférable que celles-ci soient positionnées dans la partie inférieure du diagramme relationnel, afin d'être parmi les premières relations à désassembler lors du démontage.

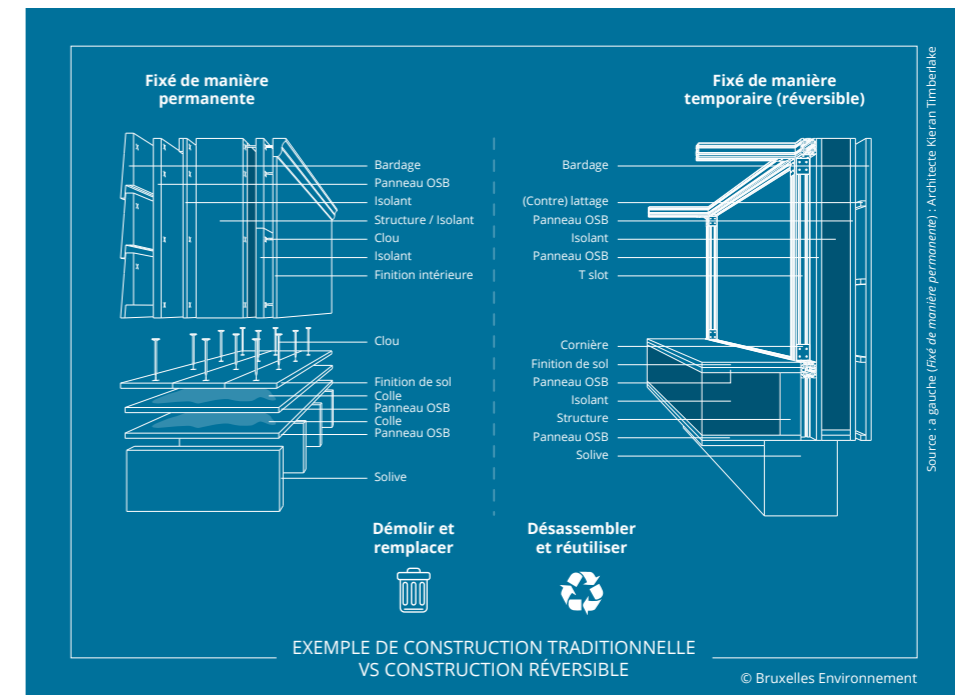


Figure 56 : Planchers et murs non réversibles par rapport à des planchers et murs réversibles, dans lesquels la composition est fortement simplifiée et les relations entre les différents composants des éléments sont considérablement réduites.

3.2.2.3 Coordination des cycles de vie

Afin de faciliter le désassemblage technique, il est également important de prendre en compte le cycle de vie et la durée de vie des matériaux, des composants et des éléments et ce, afin de contrer le 'paradoxe du temps'. Selon leur nature et leur fonction, les matériaux de construction ont une durée de vie de 5 à 75 ans. Bien que les matériaux présentent des différences de durée de vie importantes, ce type d'information n'est que peu (voire pas) pris en compte lors du choix

de séquençage de la mise en œuvre (assemblages).

Ainsi, il n'est pas rare d'observer que des composants ayant une durée de vie plus longue doivent être démontés pour pouvoir accéder au matériaux et composants ayant une durée de vie plus courte.

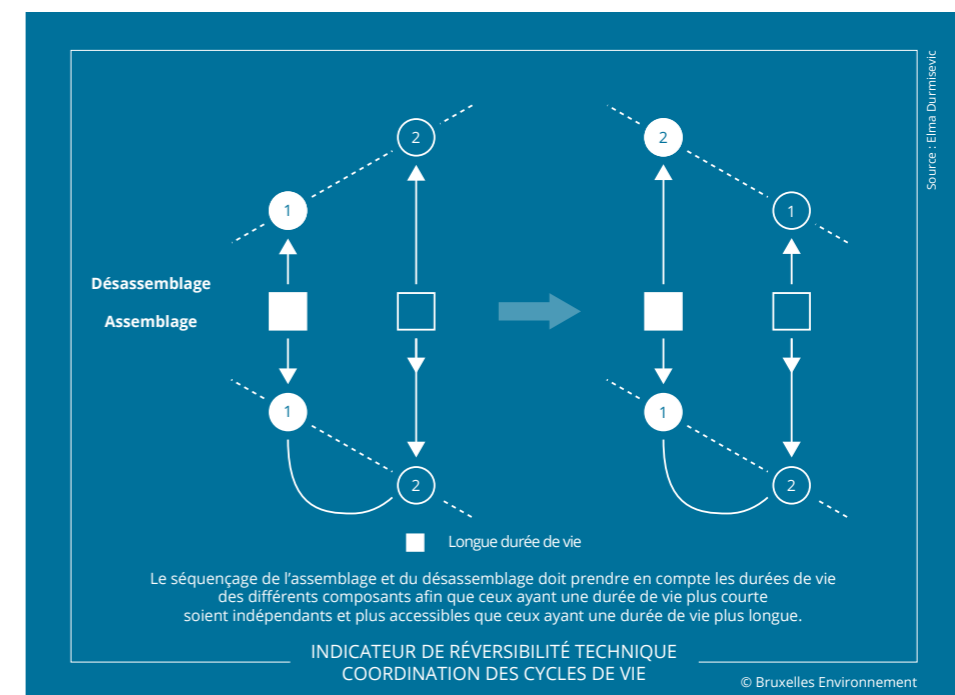


Figure 57

Le séquençage de l'assemblage et du désassemblage doit donc prendre en compte les durées de vie des différents composants afin que ceux ayant une durée de vie plus courte soit **indépendants et plus accessibles** que ceux ayant une durée de vie plus longue.

En bref : les durées de vie et les fonctions des éléments, composants et matériaux utilisés peuvent varier considérablement et ne sont souvent pas prises en compte lors

de la conception, ce qui crée inutilement des difficultés par rapport au maintien de la valeur et la valorisation des éléments et composants. Les concepteurs peuvent éviter celles-ci en appliquant deux principes :

- séparer autant que possible les éléments de construction ayant des durées de vie plus ou moins longues et des fonctions différentes.
- organiser l'ordre d'assemblage et de désassemblage en fonction de leur cycle de vie.

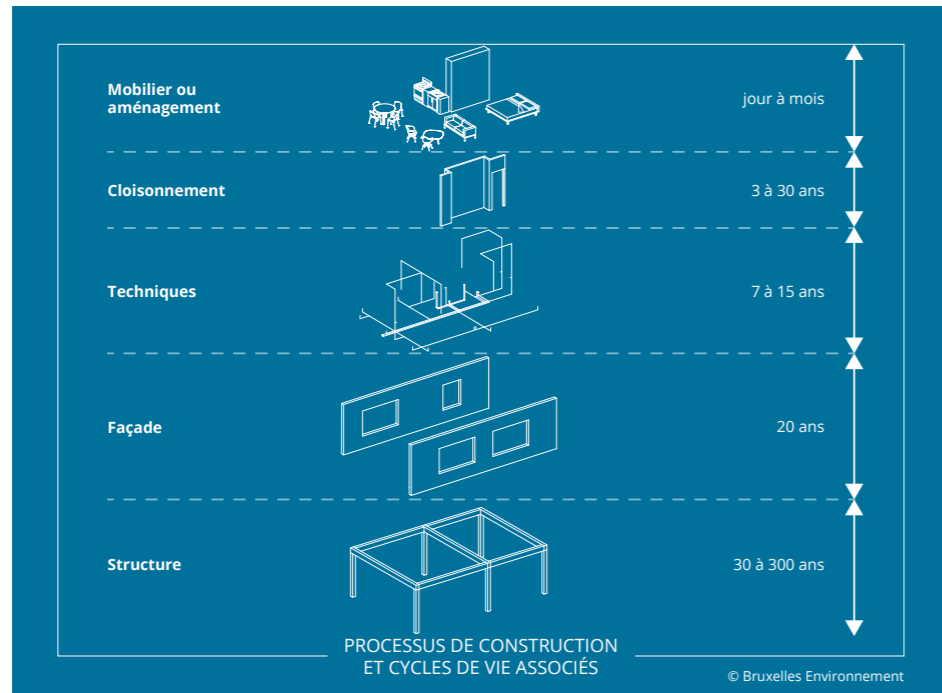


Figure 58 : Illustration d'un processus de construction sur base d'une coordination des cycles de vie : les éléments ayant un cycle de vie plus long (comme la structure porteuse et la façade) sont montés en premier et démontés en dernier. Les éléments ayant un cycle de vie plus court (les cloisons et les finitions) sont les derniers à être mis en œuvre dans le bâtiment et seront les premiers à être démontés lors d'une éventuelle transformation.

3.2.3 Désassemblage physique

Outre l'indépendance des couches fonctionnelles, et l'organisation du montage et du démontage, la géométrie et le type de connexion vont également impacter la facilité de démontage des différentes parties du bâtiment.

3.2.3.1 Géométrie des connexions

La géométrie des connexions entre les différents composants et matériaux a également un impact sur le séquençage d'assemblage et de désassemblage de ceux-ci. En fonction de la géométrie, le démontage d'un composant peut être réalisé indépendamment des composants adjacents ou peut être entravé par ceux-ci. Nous pouvons distinguer six types de géométrie qui déterminent si les éléments de construction peuvent être démontés plus ou moins indépendamment :

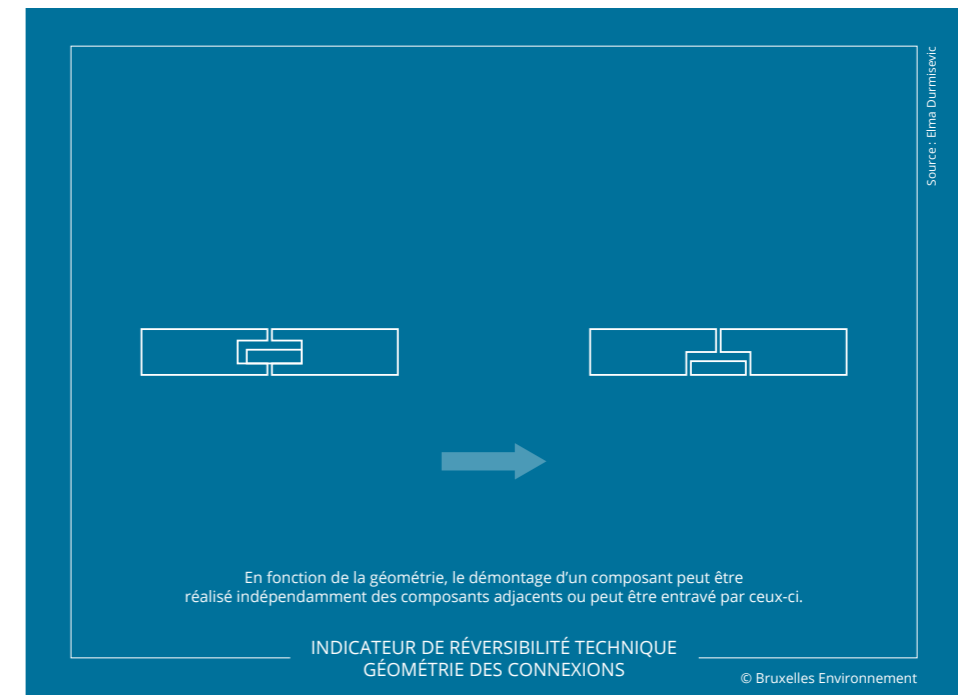


Figure 59

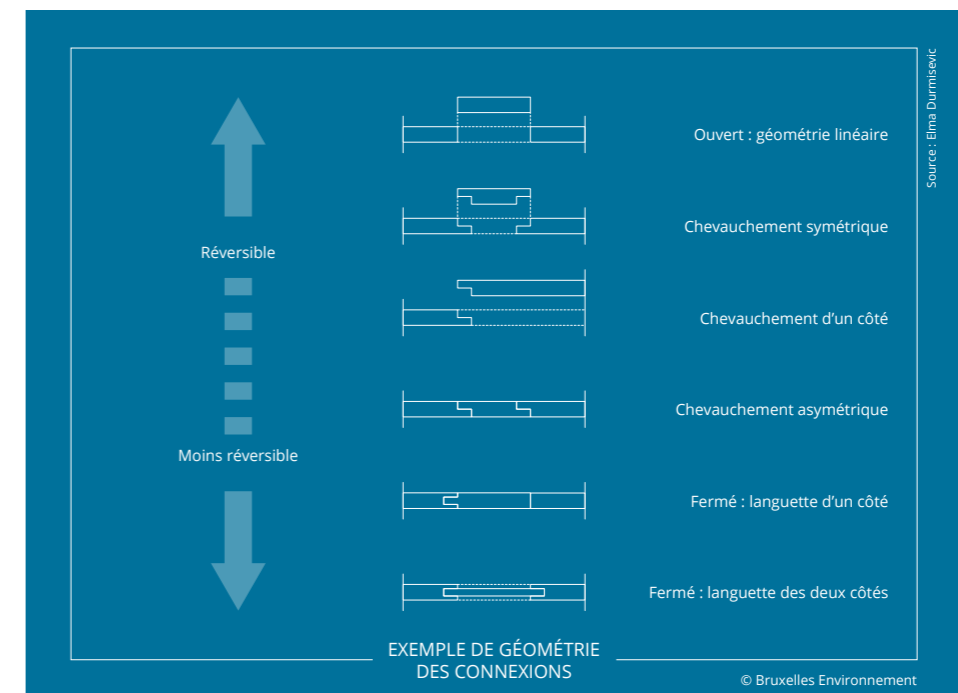


Figure 60 : Aperçu des six types de géométrie des connexions : de la connexion indépendante (en haut) à la dépendante (en bas). L'objectif est de pouvoir désassembler des composants sans avoir à démonter également les composants adjacents. (Source : E. Durmisevic)

3.2.3.2 Séquence d'assemblage

Les paragraphes précédents ont montré que différents aspects sont à prendre en compte en ce qui concerne l'ordre d'assemblage comme les durées de vie des matériaux assemblés, le type de matériaux, la géométrie des connexions et le type de connexions. L'ordre d'assemblage détermine à son tour la complexité d'une structure et l'(in)dépendance des éléments de construction. Autrement dit : la façon dont un bâtiment est assemblé donne le ton pour toute transformation ou déconstruction future.

De manière générale, on peut distinguer deux types de séquences d'assemblage : l'assemblage parallèle et l'assemblage séquentiel. Dans un assemblage parallèle, l'ordre de démontage est indépendant de l'ordre de montage. Ceci peut accélérer le processus de (dé)montage par exemple pour une réparation ou un remplacement partiel. C'est par exemple le cas pour un plancher en arêtes sans languette-rainure (géométrie de connexion mâle-femelle) ou une planche peut être démontée et remplacée sans devoir démonter les planches adjacentes.

Un assemblage séquentiel crée des relations directes entre les éléments assemblés et une dépendance de séquençage de démontage. Ceci rend donc plus complexe et plus long l'adaptation ou le remplacement des éléments assemblés au début de la séquence d'assemblage. C'est par exemple le cas d'un plancher à rainure.

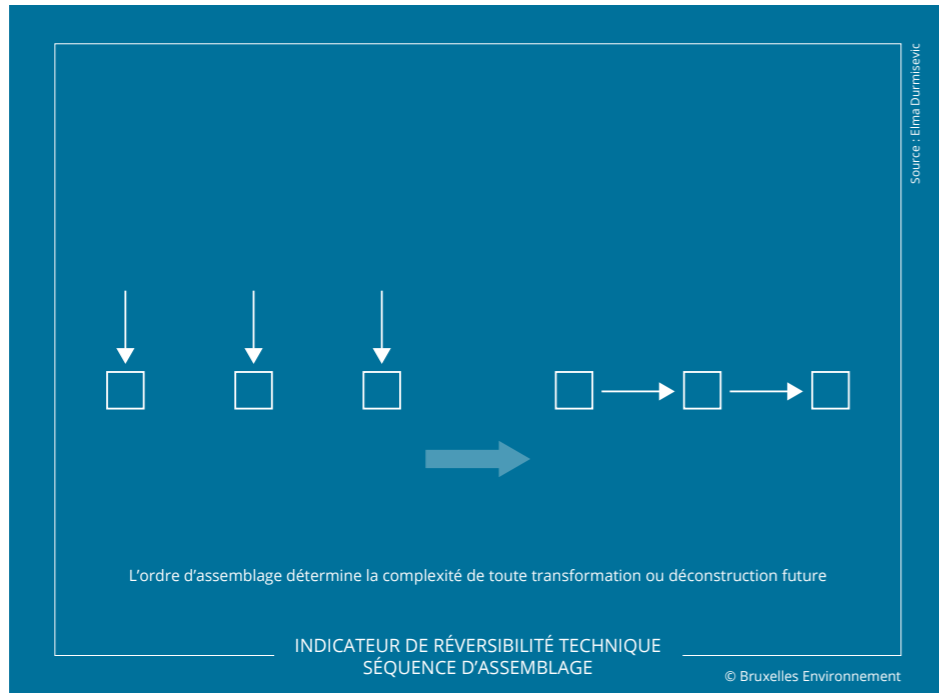


Figure 61



Figure 62 : (Source : Guide Bâtiment Durable)



Figure 63

En combinant l'assemblage parallèle et séquentiel, cinq principes d'assemblage peuvent être définis :

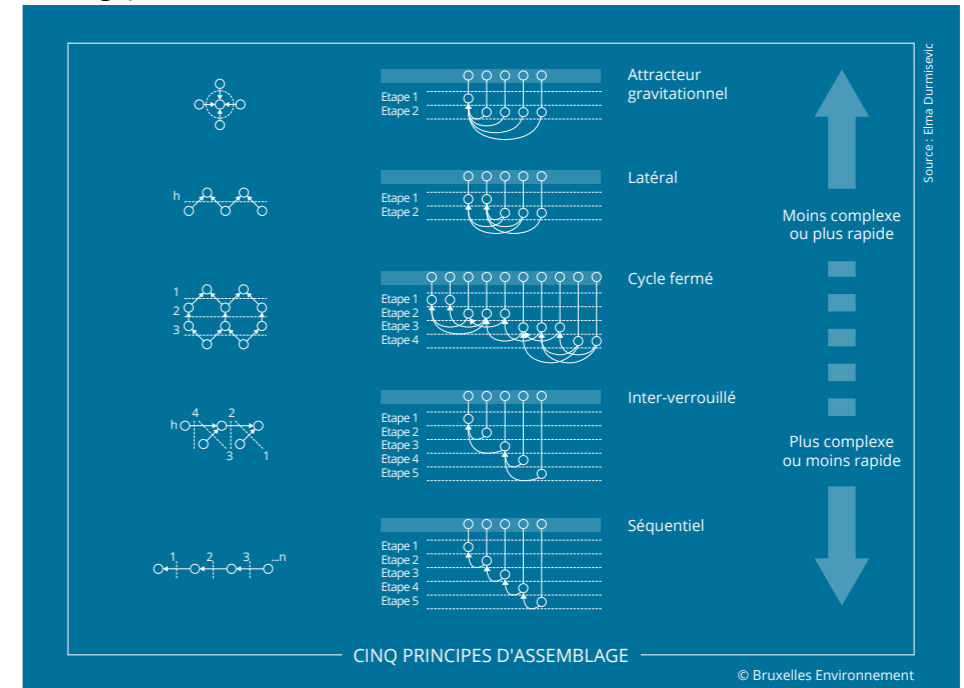


Figure 64 : Cinq principes d'assemblage, allant d'une réversibilité totale (gravité) à un assemblage plus complexe et plus long (séquentiel).

3.2.3.3 Types de connexions

Les connexions définissent l'(in)dépendance des éléments de construction assemblés. En général, on peut distin-

guer deux grands types : les connexions chimiques et les connexions sèches.

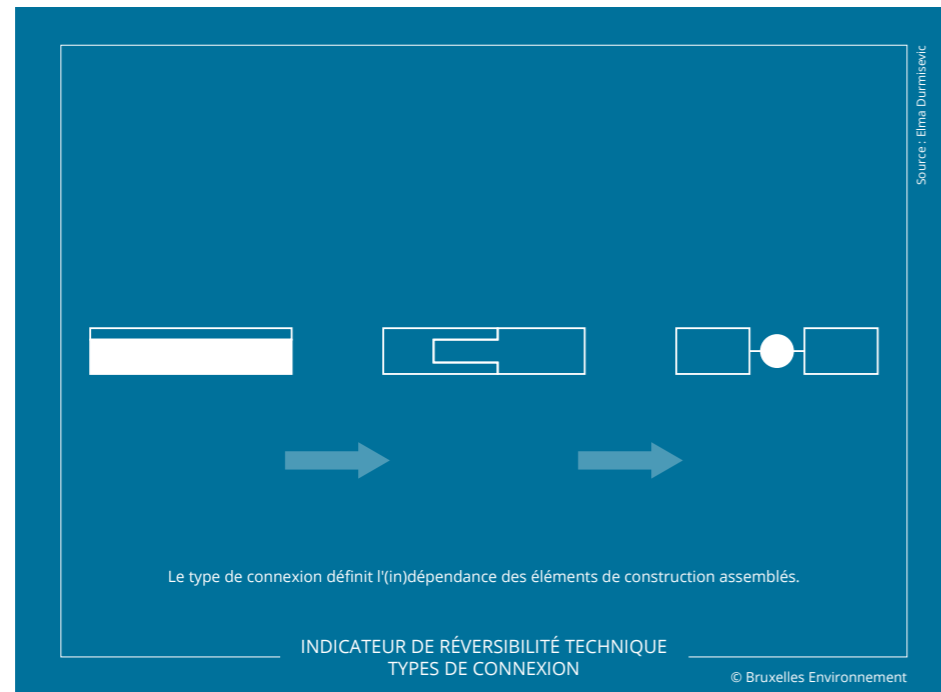


Figure 65

- **Connexions chimiques (également appelé connexions humides) :** les connexions chimiques sont des connexions qui sont réalisées à la suite d'une liaison chimique des matériaux. Pensons par exemple aux connexions soudées entre les plaques ou les poutres et les colonnes en acier, à la maçonnerie, aux poutres

en bois lamellé collé, etc. Il s'agit d'une solution à forte intensité de main-d'œuvre, où il est généralement presque impossible de défaire la connexion sans causer de dommages, sauf avec des technologies spéciales telles que des systèmes laser sophistiqués.



Figure 66 : (Source: vloerbekleding.net)

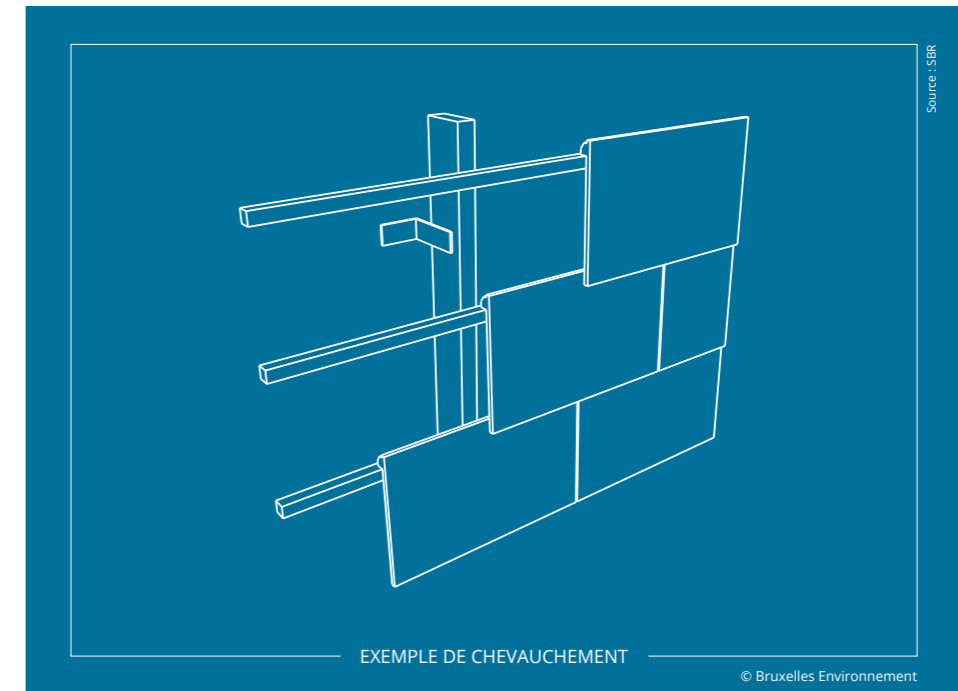


Figure 67



Figure 68 : Exemples de connexions par emboîtement. (Source : E. Durmisevic)

- **Connexion sèche indirecte :** dans le cas de connexions indirectes, la connexion effective est réalisée via des pièces supplémentaires. Les connexions indirectes peuvent être de type interne ou externe. Dans le premier cas, la pièce supplémentaire est intégrée aux composants, ce qui offre l'avantage que les interfaces des éléments ont toutes une forme identique. L'inconvénient,

cependant, est que le démontage est plus difficile en raison de l'assemblage séquentiel. Une connexion externe, en revanche, facilite grandement le démontage. C'est par exemple le cas avec l'élément de liaison dans la façade de la polyclinique de l'hôpital Joseph Bracops à Anderlecht, qui relie les panneaux de façade à la structure porteuse de la façade.



Figure 69 : (Source : E. Durmisevic)



Figure 70 : Exemples de connexions indirectes. (Source : E. Durmisevic)

Si vous souhaitez réaliser un bâtiment aussi réversible que possible, il vous faudra utiliser au maximum des connexions démontables et garder à l'esprit les trois recommandations suivantes :

1. Privilégier les connexions sèches par rapport aux liaisons chimiques.
2. Tenir compte au préalable de la dégradation éventuelle des composants afin d'optimiser la réversibilité technique et de favoriser le réemploi¹⁸. Certaines connexions sèches comme par exemple les connexions clouées, résultent en un endommagement des composants et réduisent le potentiel de réemploi.



Figure 71 : Dépose de l'enduit d'argile dans le projet BRIC. (Source : Caroline Morizur, efp)

Remarque : certaines liaisons chimiques sont malgré tout réversibles, mais cela demande généralement beaucoup de travail. Pensons par exemple à l'enduit d'argile, qu'il est possible de faire tomber en donnant des coups et de réutiliser après l'avoir mélangé avec de l'eau. Toutefois, cette opération doit être effectuée avec beaucoup de précautions afin de ne pas introduire trop d'impuretés dans l'argile, ce qui mettrait à mal sa remise en œuvre ultérieure. Ce procédé de démontage prend beaucoup de temps. Il est donc important d'en tenir compte dans l'estimation financière et la planification de la déconstruction.

De plus réversible à irréversible, on peut distinguer au total **neuf types de connexion** :

CONNEXIONS SÈCHES

Connexion via accessoire : deux éléments sont reliés au moyen d'un troisième élément, dans une liaison sèche ou mécanique. Le démontage d'un élément n'a aucun impact sur l'autre (réemploi immédiat et reconfiguration/adaptation possibles).



Figure 72 : (Source : Elma Durmisevic)



Figure 73 : Le système CIMEDE (Source : l'Atelier de l'Avenir)



Figure 74 : (Source : Elma Durmisevic)

Connexion par gravité : deux éléments sont reliés l'un à l'autre uniquement par gravité. Aucune connexion physique supplémentaire n'est nécessaire. C'est par exemple le cas des blocs de béton empilables.



Figure 75 : (Source : Elma Durmisevic)

Connexion par pinçage : deux éléments sont reliés entre eux sans aucun dommage causé par les connecteurs (réutilisation directe et reconfiguration/adaptation possibles). Par exemple, dans le cadre du projet BAMB, un système de châssis a été développé dans lequel les panneaux de verre sont pincés entre des profils métalliques reliés mécaniquement entre eux par une connexion sèche

¹⁸ Considérons, par exemple, les tôles boulonnées. Si vous ne réalisez pas systématiquement les perforations pour les vissages, vous risquez d'endommager la plaque lors de son démontage ou, en raison de ce dommage, elle sera moins ou pas du tout réutilisable dans un projet ultérieur.



Figure 76 : (Source : Elma Durmisevic)

Connexion par l'intermédiaire d'un troisième composant, avec toutefois une certaine dépendance au niveau de l'assemblage (une réutilisation directe est possible).



Figure 77 : (Source : Elma Durmisevic)

Connexion par connecteurs mécaniques, qui peuvent être retirés sans endommager les éléments (réutilisation et reconfiguration/adaptation possibles). Le pré-perçage des pièces à assembler permet, par exemple, de désolidariser les pièces sans les endommager lors du retrait de l'assemblage boulonné. Les pré-perçements permettent également différents types de connexions avec d'autres pièces, ce qui favorise la réutilisation.

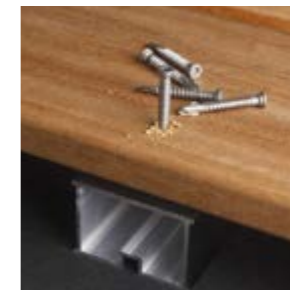


Figure 78 : (Source : www.felixwood.com)

Connexion par ancrage mécanique : deux éléments sont reliés par l'intermédiaire d'ancrages mécaniques, tels que des vis ou des clous (les éléments sont endommagés après le démontage).

CONNEXIONS CHIMIQUES

Connexion directe avec liaison chimique réversible : deux éléments sont assemblés à l'aide de substances chimiques souples, rendant la liaison plus faible que les matériaux à assembler, de sorte que ces derniers peuvent être retirés ou délamés par la suite (la réutilisation par réparation est possible). Exemple : le carrelage mis en œuvre avec du mortier de chaux.



Figure 79 : (Source : Rotor)

Connexion indirecte avec une liaison chimique irréversible qui est plus forte que les éléments/composants/matériaux connectés. Exemple : le mortier de ciment.

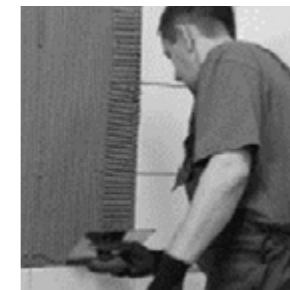


Figure 80 : (Source : Elma Durmisevic)

Liaison chimique directe : deux matériaux sont liés de façon permanente par une liaison chimique (pas de réutilisation possible). C'est par exemple le cas avec une chape sur un sol en béton ou à une dalle de plancher en béton armé coulé.

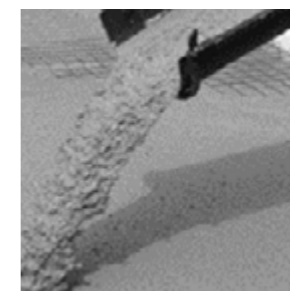


Figure 81 : (Source : Elma Durmisevic)

TYPES DE CONNEXIONS

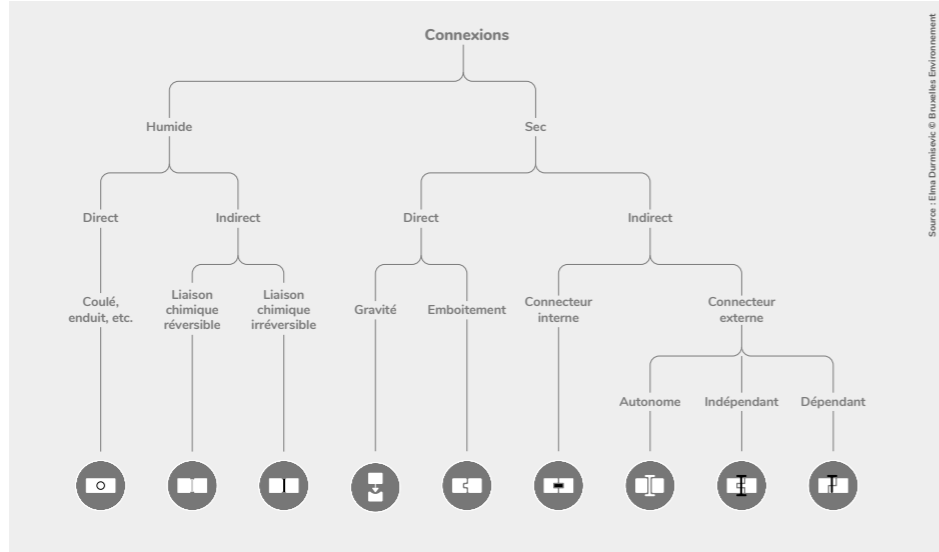


Figure 82 : Classement des neuf types de connexions

Exemple de planchers démontables



Figure 83 : La Cour de Justice temporaire d'Amsterdam (Source : Leon van Woerkom | cepezed)

La Cour de Justice temporaire d'Amsterdam, l'un des premiers exemples pratiques de construction circulaire aux Pays-Bas, a été construite, entre autres, à partir de dalles alvéolaires démontables. Celles-ci combinent quatre aspects importants de la réversibilité technique et donc de la démontabilité :

- Géométrie des connexions : pas d'emboîtement dans les éléments adjacents.
- Indépendance fonctionnelle : aucune interférence d'autres éléments.

- Type de connexion : assemblage boulonné entre la dalle alvéolaire et la poutre en acier.
- Accessibilité de la connexion : la connexion est accessible moyennant des interventions occasionnant des dommages réparables.

Le bâtiment a depuis lors été démantelé et se trouve depuis début 2022 à Enschede, où il remplit une autre fonction.

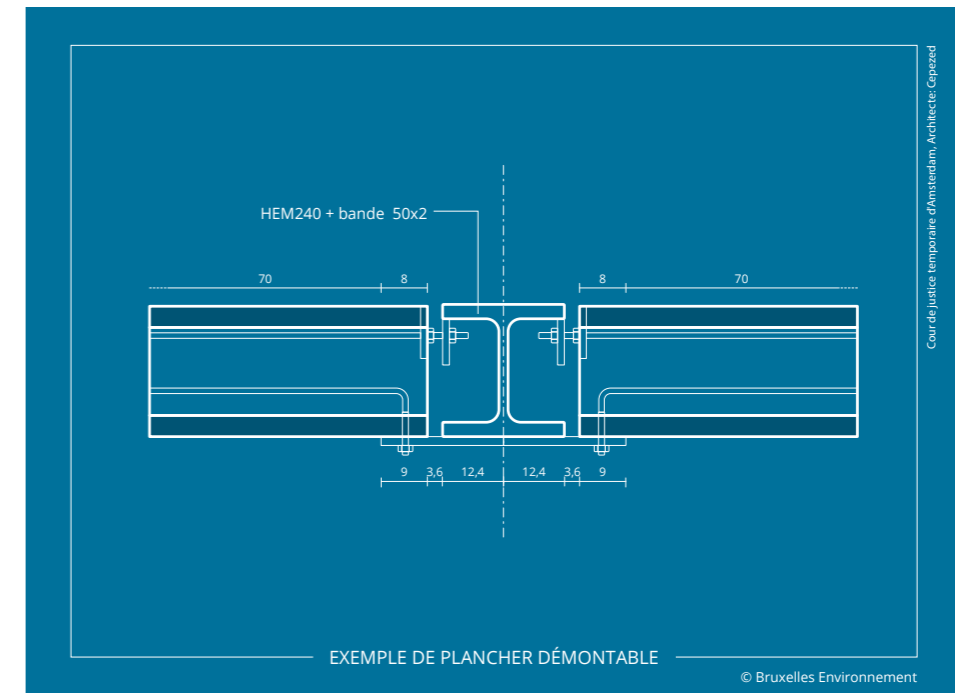


Figure 84

3.3 Profil global de potentiel de réemploi

En analysant les huit indicateurs de conception de la réversibilité technique et leurs aspects déterminants, il est possible d'établir un profil global du potentiel de réemploi d'un élément ou d'un composant. Cela donne une première indication du degré de réversibilité en vue du réemploi et d'éventuelles optimisations qui peuvent amener la conception à un niveau de réversibilité (encore) plus élevé. Sur base d'une évaluation de chaque indicateur, l'équipe de conception peut identifier les aspects dans lesquels la réversibilité technique peut être améliorée. Le potentiel de réemploi des différents éléments peut être agrégé pour définir le potentiel de réemploi au niveau d'un bâtiment.

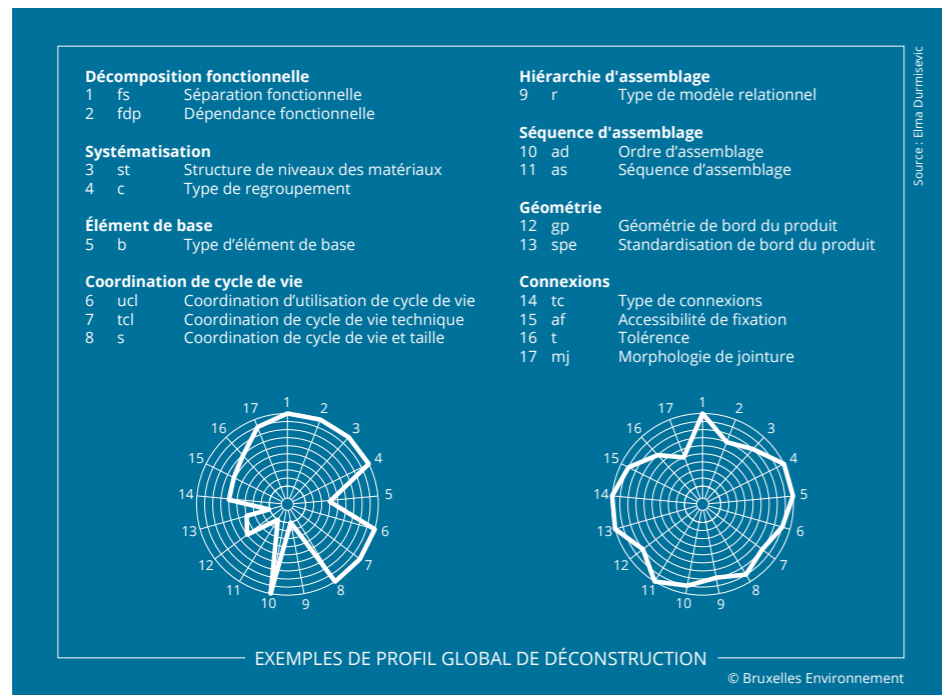


Figure 85 : Exemple de profil global de déconstruction d'un bâtiment.

Comme expliqué plus haut, la réversibilité technique d'un bâtiment résulte de sa capacité de désassemblage fonctionnel, technique et physique. L'indépendance fonctionnelle et le regroupement fonctionnel sont les indicateurs liés au désassemblage fonctionnel. L'élément de base, la hiérarchie d'assemblage et la coordination des différents cycles de vie sont les indicateurs liés au désassemblage technique. Enfin, la géométrie des connexions, la séquence d'assemblage et les types de connexion sont les indicateurs liés au désassemblage physique.

Bien entendu, les priorités relatives à la réversibilité technique dans un projet de construction peuvent différer. Si le choix du maître d'ouvrage est mis principalement sur la capacité de transformation du bâtiment, le désassemblage fonctionnel aura un rôle plus important. Si au contraire le démontage et la préservation de la valeur ainsi que le réemploi futur des éléments, composants et matériaux individuels sont prioritaires, le désassemblage physique et technique auront plus de poids. Mais quelles que soient les priorités, dans le contexte de la conception réversible, le désassemblage tant fonctionnel que technique et physique sont importants !

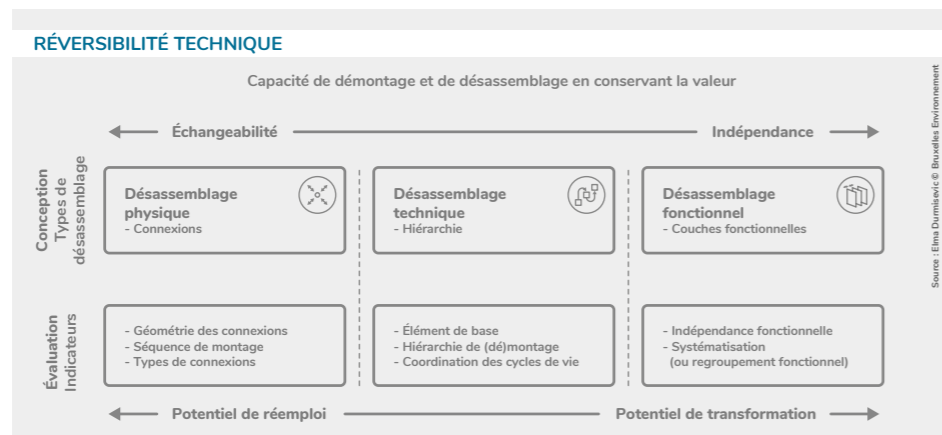


Figure 86 : Illustration résumant la réversibilité technique des bâtiments.

3.4 Etape par étape : l'essentiel dans chaque phase de conception

3.4.1 Définition du programme

1. Avant que ne débute la mission de conception, les maîtres d'ouvrage définissent l'utilisation du bâtiment et les fonctions qu'il doit pouvoir remplir (logement, bureau, crèche, etc.) à court et à long terme. Afin de se faire une idée des possibilités d'agencement à long terme, ils peuvent envisager des scénarios d'utilisation pertinents, par exemple en fonction des évolutions démographiques dans le quartier. L'objectif n'est pas de prédire l'avenir, mais de l'anticiper. L'agencement réel se situera probablement quelque part entre ces différents scénarios d'utilisation. L'objectif est de tenir compte dès le départ des éventuelles adaptations futures, afin que les caractéristiques spatiales du bâtiment les favorisent au mieux. Mieux cela est fait, plus longtemps le bâtiment pourra être utilisé qualitativement sans générer de déchets inutiles.

2. L'utilisation d'un bâtiment peut également évoluer sans changement de fonction. Pensons par exemple aux structures monofonctionnelles. Pour la conception du nouveau bâtiment Greenbizz II, le maître d'ouvrage anticipe déjà ce cas de figure, en prévoyant dans les clauses techniques du cahier des charges des ateliers qui permettent différentes formes d'utilisation (y compris des changements de dimensions).

3. Les maîtres d'ouvrage peuvent également baser l'utilisation future et les possibilités de transformation sur la situation géographique et les prévisions de croissance économique, les tendances en matière d'habitat et de travail (familles moins nombreuses, percée du travail flexible, logements évolutifs au fil de la vie, etc.). Ces évolutions ont un impact direct sur la volumétrie et la hauteur des bâtiments, la conception des noyaux structurels, les installations techniques et les possibilités fonctionnelles et techniques de déconstruction. Les exigences relatives à l'utilisation du bâtiment et les exigences techniques qui en découlent constituent une partie essentielle de la mission de conception.

4. Il est important de **déterminer les ambitions et les orientations du projet en fonction du contexte** (rénovation, nouvelle construction, fonctions, etc.). Par exemple, un bâtiment pop-up sera principalement axé sur la réversibilité technique, afin qu'il puisse être facilement démonté et que les éléments soient réutilisés ailleurs dans une configuration identique ou différente. Le projet BRIC¹⁹ en est un bon exemple. De même, les parkings à étages pourraient être conçus pour pouvoir remplir une fonction différente à l'avenir, car la mobilité pourrait évoluer vers une diminution de l'utilisation de la voiture. Leur structure pourrait être conçue pour accueillir ultérieurement des logements ou des bureaux. Ce qui aura évidemment un impact sur la réversibilité spatiale.

¹⁹ <https://www.bamb2020.eu/topics/pilot-cases-in-bamb/bric/>.

3.4.2 Phase d'avant-projet

5. Dans la phase d'avant-projet – et ce contrairement aux projets classiques – il est important d'impliquer tous les acteurs dès le début du processus et de travailler en **équipe de construction**. Par exemple, les bureaux d'études devraient déjà travailler sur les concepts structurels et techniques (énergie, ventilation, etc.) lors de la préparation de l'esquisse et de l'avant-projet, car le positionnement des noyaux fixes et la capacité portante sont des aspects importants qui déterminent l'utilisation future. Important : la réversibilité du concept – compte tenu des différents scénarios – doit être testée et affinée à chaque phase du projet, en concertation avec toutes les parties concernées. Cela nécessite donc une approche proactive intégrant des boucles rétroactives.

6. Il s'agit de **faire correspondre l'avant-projet avec les différents scénarios d'utilisation** afin que le bâtiment puisse effectivement remplir différentes fonctions – tant sur le plan spatial que technique. De petits ajustements dans l'avant-projet peuvent suffire pour que les différents scénarios d'utilisation puissent être appliqués à l'avenir.

7. Dans la phase d'avant-projet, l'accent est mis principalement sur la **réversibilité spatiale**. Par exemple, pour la position des **noyaux fixes**, voici les questions cruciales que les concepteurs peuvent se poser : avec quel nombre minimum de noyaux fixes et quelles dimensions peut-on garantir le plus grand nombre possible de transformations spatiales dans un bâtiment réversible ? Et comment ces noyaux fixes peuvent-ils être construits de manière à garantir la stabilité structurelle ainsi que le confort des utilisateurs et les performances écologiques et énergétiques dans le cadre de différents scénarios d'utilisation ?

8. La réversibilité technique est moins abordée dans cette phase. L'accent est mis ici principalement sur la **composition et la décomposition fonctionnelles**, l'indépendance fonctionnelle et la systématisation étant des indicateurs cruciaux. En d'autres mots : éviter l'intégration de deux ou plusieurs fonctions dans un même élément de construction et regrouper les parties ayant les mêmes fonctions.

9. A ce stade, il est souvent important de déjà prendre en compte le choix des matériaux. L'outil TOTEM est à votre disposition pour calculer l'impact environnemental au niveau des éléments de construction.

10. Enfin, en fonction du budget, on peut estimer l'investissement nécessaire et les coûts d'exploitation et de maintenance sur **l'ensemble du cycle de vie** du bâtiment. L'objectif de la construction circulaire étant de réduire l'impact environnemental du secteur du bâtiment, un inventaire des mesures de durabilité envisagées et de leurs effets peut également s'avérer utile.

3.4.3 Phase de conception définitive

11. En phase de conception définitive, on passe logiquement à la vitesse supérieure. En ce qui concerne la **réversibilité spatiale**, les détails sont essentiels : les techniques sont-elles effectivement **accessibles** ? Peut-on passer facilement d'un **scénario à l'autre** ?
12. Dans cette phase, c'est la **réversibilité technique** qui prime. La composition et la décomposition techniques sont analysées. Il s'agit d'aligner entre elles la **hiérarchie** et l'**(in)dépendance** des éléments de construction et de réduire le **nombre d'opérations de (dé)montage** pour rendre possible le remplacement ou la transformation. C'est pourquoi – outre les activités habituelles de la phase de conception – il est également important d'élaborer les détails d'assemblage des éléments architecturaux et techniques.
13. Une différence importante par rapport aux projets classiques est qu'il est crucial de bien régler tous les détails à l'avance, en **étroite concertation** avec les différents acteurs impliqués dans l'équipe de construction, afin que ces détails puissent être effectivement mis en œuvre de la manière prévue.
14. En ce qui concerne les coûts de construction, une distinction est faite entre les coûts d'achat de la parcelle, les coûts de construction proprement dits et les coûts supplémentaires, et en ce qui concerne les coûts d'exploitation, entre les coûts fixes et variables (énergie, entretien, réparation, etc.) tout comme les coûts et gains relatifs à la rénovation, au démontage et au réemploi. Il s'agit d'une différence importante par rapport aux projets classiques, où seuls les coûts de construction initiaux sont généralement pris en compte. **Les coûts de fonctionnement et les éventuels coûts de démolition** sont donc largement négligés. Néanmoins, il est important de les inclure dans le calcul. Il est clair que lorsqu'un bâtiment est facilement adaptable, le coût du cycle de vie (y compris une estimation des travaux de rénovation potentiels en raison de l'évolution des besoins) donne une image de la réalité financière globale complètement différente que le seul coût de construction initial. En prenant également en compte les coûts futurs (estimés), il est possible d'établir une comparaison objective avec un bâtiment classique.
15. Une liste des **risques potentiels pour la santé et la sécurité** est également à prévoir. Pour pouvoir construire de manière circulaire, il faut opter pour des matériaux sains qui peuvent être réutilisés ou recyclés en toute sécurité. Les plaques d'amiante ou les vieux revêtements de sol en vinyle sont parfaitement démontables, mais ils ne peuvent pas être réutilisés en raison de leur impact négatif sur notre

santé. Il est donc important d'utiliser des matériaux à faible teneur en COV et exempts de métaux lourds, non seulement pour des raisons de santé et de sécurité, mais aussi pour maximiser les chances de réemploi.

16. Afin de mieux comprendre l'impact environnemental de la conception et des choix de matériaux, ceux-ci sont évalués dès la phase de l'avant-projet au moyen d'une **analyse du cycle de vie (ACV)**, par exemple en comparant les choix de matériaux d'un élément de construction à plusieurs alternatives dans TOTEM, l'outil en ligne permettant de calculer l'impact environnemental. Au stade de la conception définitive, l'ensemble du bâtiment peut être évalué et encore optimisé.
17. En prélude à la phase d'exécution, l'accent est mis sur la **composition et la décomposition physiques**. Il s'agit ici d'affiner la géométrie des interfaces de produit et des connexions, la séquence d'assemblage et les types de connexion pour éviter ou réduire les dommages lors du démontage. Tout cela se traduit par des dessins d'exécution et des visualisations détaillées : plans d'étage, détails structurels, détails architecturaux, détails d'assemblage de l'architecture, de la structure et des techniques ...

3.4.4 Exécution

18. Important : il est recommandé de collecter et de mettre à jour toutes les informations pertinentes, de manière à obtenir une sorte de **manuel** pour l'utilisation du bâtiment et sa déconstruction ultérieure. Quels matériaux sont contenus dans le bâtiment et en quelles quantités, quelles sont les possibilités de désassemblage, comment entretenir le bâtiment... ? Les informations techniques relatives aux matériaux utilisés et les effets sur la santé peuvent également être cartographiés.
19. Lors de cette phase, une estimation des coûts totaux de construction doit également être faite. Ces données sont ensuite utilisées comme base pour le contrôle des dépenses.



²⁰ Voir le vademecum Bâtiment Circulaire : https://www.guidebatimentdurable.brussels/sites/default/files/documents/2022-03/32845-vademecum-batiment_circulaire.pdf.

4. Études de cas

4.1 Build Reversible in Conception (BRIC), Bruxelles

Avec le **Circular Retrofit Lab (CRL)**, **Building Reversible in Conception (BRIC)** est le deuxième des six projets pilotes du projet d'innovation européen **Building as Material Banks (BAMB)** situé à Bruxelles. Alors que le projet du CRL était axé sur la rénovation, BRIC s'est concentré sur la construction neuve. Le bâtiment BRIC a été conçu pour être démonté et remonté deux fois, ce qui lui confère naturellement une bonne note pour de nombreux indicateurs de réversibilité technique.

Le projet BRIC a servi d'outil pédagogique pour sensibiliser et informer les enseignants, le secteur de la construction et l'enseignement sur la construction circulaire. Le projet, mis en œuvre par l'efp, un centre de formation en alternance pour les PME à Bruxelles, était évolutif et transversal, impliquant la collaboration de différents métiers du bâtiment : menuisier, chauffagiste, jardinier, électricien, architecte d'intérieur, courtier d'assurance, installateur de chauffage central, frigoriste, peintre, ébéniste et agent immobilier.

Le projet visait la réalisation d'un bâtiment qui serait démonté puis remonté à deux reprises, chaque fois pour un usage différent. Par conséquent, la conception du BRIC a accordé peu d'attention à la réversibilité spatiale et s'est principalement concentrée sur la réversibilité technique.

Le scénario de transformation visant à convertir le BRIC 1 en BRIC 2 était déjà sur la table lorsque le BRIC 1 a été réalisé, à l'hiver 2018. Ce à quoi ressemblerait le BRIC 3 n'était pas encore clair à l'époque. Cependant, une fonction à laquelle la troisième version devait répondre avait déjà été définie : un laboratoire acoustique.

Des critères stratégiques importants avaient été établis dès le début du projet :

- chacune des trois constructions devait avoir un volume et une fonction différents ;
- les trois bâtiments utiliseraient les mêmes matériaux et le potentiel de réemploi de ces éléments de construction serait maximisé ;
- des connexions réversibles seraient utilisées pour permettre la récupération, la réutilisation et la vente des matériaux utilisés à la fin du projet.

Le projet BRIC a eu recours à des matériaux biosourcés et renouvelables, en mettant l'accent sur le bois et ses dérivés. En effet, en raison de sa texture, de sa structure, de sa flexibilité et d'autres caractéristiques techniques, le bois peut prendre de nombreuses formes différentes. Les matériaux de construction en bois peuvent également être appliqués

de telle sorte qu'ils soient réutilisables ou revalorisables. Dans le cadre du projet BRIC, le plus grand nombre possible de matériaux de construction minéraux et pétrochimiques ont été remplacés par des matériaux à base de bois.

Au cours de l'année académique 2017-2018, la première version du BRIC a été achevée, sous la forme d'un espace de bureaux. En 2019, les composants ont été employés dans une configuration et une fonction différentes pour constituer un magasin. En 2020, la transformation en BRIC 3, c'est-à-dire en laboratoire acoustique, a finalement eu lieu.

Les trois bâtiments reposaient sur la même fondation amovible – des pieux vissés dans le sol – et étaient constitués de blocs structurels creux dans lesquels était soufflée de la cellulose, qui pouvait ensuite être aspirée. À l'intérieur, l'ensemble a été fini avec un plafonnage d'argile. Les trois bâtiments présentaient une bonne performance énergétique et une bonne étanchéité à l'air. Lors des deux opérations de désassemblage, les matériaux récupérés ont chaque fois été répertoriés, marqués et quantifiés. Les techniques et les matériaux de finition se sont avérés facilement récupérables. Plus de 180 étudiants de l'efp ont participé au montage et au démontage du premier bâtiment du BRIC. Ces futurs professionnels et entrepreneurs de la construction ont été guidés par des professionnels plus expérimentés.

Nous parcourons ci-après les indicateurs de réversibilité technique du BRIC 1, qui a été démantelé à l'hiver 2018.

4.1.1 Réversibilité technique

Le bâtiment BRIC 1 a été conçu en vue d'un changement de fonction mais aussi de forme et de dimensions. Par conséquent, l'accent a été mis sur la réversibilité technique et le potentiel de désassemblage des matériaux et des éléments, ainsi que sur leur capacité à être reconfigurés pour créer de nouveaux espaces et un bâtiment entièrement nouveau.

4.1.1.1 Indépendance fonctionnelle

Dans la conception du BRIC 1 – et des deux autres bâtiments du BRIC – les couches fonctionnelles ont été séparées autant que possible. L'ossature bois forme une structure stable, les matériaux qui l'entourent constituent la finition.

• Structure - enveloppe extérieure

La façade est constituée de 117 cassettes en bois interchangeables et autoportantes. Ce système modulaire permet différentes configurations du bâtiment et des façades. La structure et les modules de façade sont indépendants les uns des autres et peuvent également être démontés indépendamment.



Figure 87 : La structure et l'enveloppe sont indépendante (Source : Caroline Morizur, efp)

• Finition à l'argile et enveloppe extérieure en cassettes en bois

Trois couches d'enduit à l'argile ont été appliquées sur une natte de roseaux vissée au mur. La natte de roseaux permet d'appliquer l'enduit de manière uniforme. La natte de roseaux, fixée mécaniquement aux modules de façade en bois et aux

parois intérieures, découple l'argile de la structure du mur. Le système a été partiellement réutilisé pour BRIC 2 : l'argile a été réutilisée comme finition dans BRIC 2, et la natte de roseaux a été compostée et remplacée par une nouvelle.



Figure 88 : Finition à l'argile sur une natte de roseaux vissée (Source : Caroline Morizur, efp)

- **Finition de la façade: panneaux**

Le revêtement de façade est constitué de panneaux recyclés fixés aux modules de façade par l'intermédiaire d'un lattis. Par conséquent, le revêtement est indépendant de la structure de la façade.



Figure 89 : Démontage des panneaux de parement (Source : Caroline Morizur, efp)

4.1.1.2 Élément de base

Les colonnes utilisées sont constituées de quatre sections reliées entre elles par un connecteur en bois. Ce connecteur fonctionne comme un élément de base indépendant.

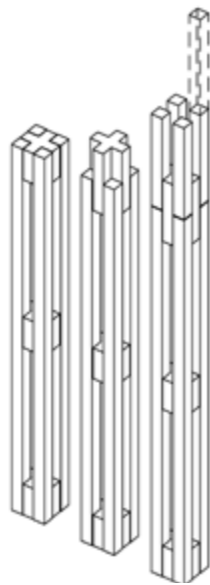


Figure 90 : La conception des colonnes permet d'adapter leur longueur aisément (Source : KARBON' architecture et urbanisme)

Les poutres de la structure du toit ont été fixées entre les sections en bois des colonnes. La colonne agit alors comme un élément de base aux multiples fonctions.



Figure 91 : Détails d'une colonne et de la connexion entre la colonne et une poutre (Source : Caroline Morizur, efp)

Le plancher est également connecté aux fondations par un élément de base indépendant.



Figure 92 : Détail de la connexion du plancher et fondation (Source : Caroline Morizur, efp)

4.1.1.3 Géométrie des bords de produit et des connexions

Il est principalement question d'une géométrie fermée des bords de produit. Le choix de cette géométrie moins réversible a été motivé par le caractère temporaire des constructions, impliquant des remplacements ou réparations ponctuels réduits, ainsi que par la rapidité d'assemblage. Le

système de parois en bois isolées, par exemple, est facile à monter et à démonter grâce à son chevauchement symétrique. Grâce à la géométrie des connexions, les modules en bois s'emboîtent parfaitement (gravité) et les connexions mécaniques supplémentaires sont réduites au minimum.



Figure 93 : Assemblage des éléments de parois (Source : Caroline Morizur, efp)

4.1.1.4 Séquence d'assemblage

Le chevauchement symétrique qui caractérise les modules de façade en bois résulte en un assemblage séquentiel de la façade. S'agissant d'un module temporaire dont le but est d'être démonté et remonté à court terme, la rapidité d'assemblage résultant de la géométrie des bords a été privilégiée. En effet, il est très improbable qu'il faille retirer un module en particulier pour l'entretien ou la réparation, opération compliquée par l'assemblage séquentiel.

4.1.1.5 Types de connexions

Des connexions mécaniques ont été utilisées dans le projet BRIC à des fins de désassemblage et de récupération. Clous et colle ont été exclus.

- Colonnes : connexion vissée entre les éléments en bois qui composent la colonne ;
- poutres – structure du toit : les poutres sont reliées aux colonnes par des connexions vissées ;
- plancher : connexions mécaniques tels qu'étriers métalliques, vis et connexions boulonnées, mais aussi connexions sèches en bois tels que tenons et mortaises, connexions à mi-bois, connexion à trait de Jupiter et connexion par rainures-languettes.



Figure 94 : Assemblage à sifflet. (Source : Caroline Morizur, efp)



Figure 95 : Eléments de poutre à connexion tenons et mortaises. (Source : Caroline Morizur, efp)

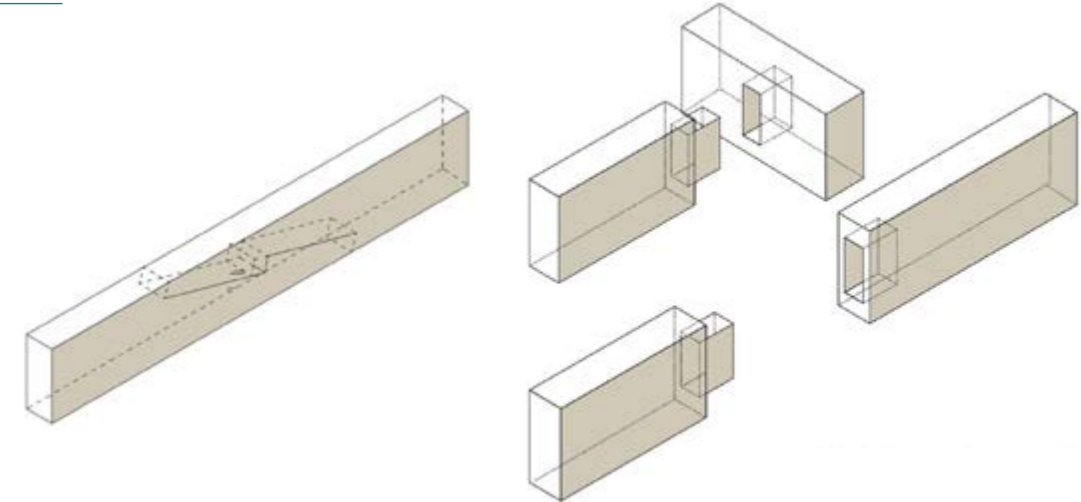


Figure 96 : Assemblage à sifflet et désaboté avec crochet (gauche) ; Assemblage tenons et mortaises (droite)

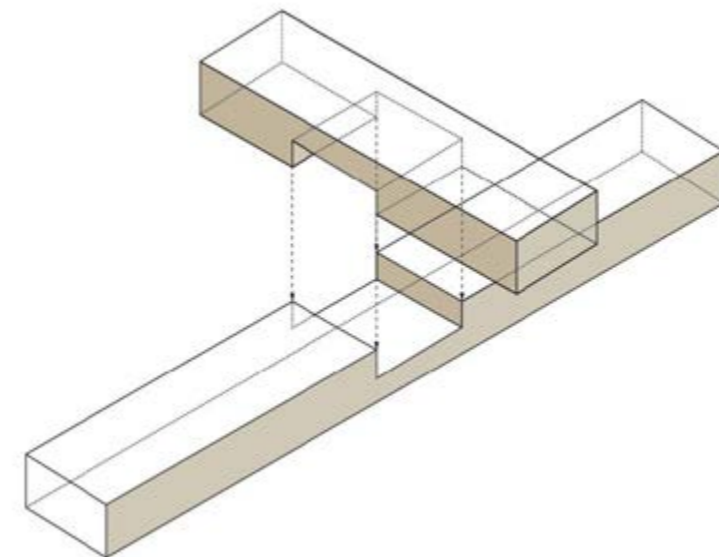


Figure 97 : Assemblage à mi-bois

- isolation des parois : gravité. Les modules en bois sont remplis d'une isolation en cellulose. L'isolant libre est aspiré pour vider les modules en vue de leur transformation ;
- finitions extérieures : connexions vissées (voir ci-dessus) ;
- fondations : pieux vissés. Les pieux vissés, en acier galvanisé, sont adaptés aux conditions du site – sol meuble, pente et contraintes spatiales – tout en offrant une solution entièrement réversible. L'ailette hélicoïdale permet d'ancrer facilement les pieux vissés dans le sol. Leur retrait peut être effectué rapidement, sans générer de déchets et avec un impact limité sur le sol, puisqu'aucune excavation ni aucun déblai n'est nécessaire. Dans la pratique quotidienne, ces fondations à vis sont surtout utilisées pour des structures temporaires et/ou saisonnières.

Pour fixer les tôles de toiture les unes aux autres afin qu'elles puissent couvrir de grandes portées, des connexions soudées ont été utilisées. Mais les tôles sont bien connectées mécaniquement à sec à la structure du toit.



Figure 98 : Fondation réversible (Source : Caroline Morizur, efp)

4.1.1.6 Systématisation

La séquence d'assemblage était telle que le désassemblage du BRIC 1 a pu être effectué de manière logique, sur base de la durée de vie fonctionnelle prévue des éléments. Il n'y a pas eu de nombreuses étapes à suivre pour récupérer les matériaux et les composants du bâtiment.

Le démontage a commencé par les équipements électriques – prises et boîtiers. Puis le revêtement de façade a été dévissé – chaque vis a été récupérée et chaque panneau étiqueté. À l'intérieur, on a déjà pu commencer à enlever l'enduit d'argile des panneaux d'OSB à l'aide d'un marteau – l'argile a été stocké dans des sacs pour être réutilisé. Les matelas de laine de bois ont ensuite été dévissés, l'OSB retiré, les flocons de cellulose aspirés hors de la structure, les fenêtres et les châssis retirés des façades sans les endommager ...

4.1.1.7 Coordination des cycles de vie

Le projet a fonctionné avec un système interne de passeport de matériaux. Cela a contribué à déterminer la hiérarchie de (dé)montage en fonction de la durée de vie des matériaux et composants utilisés.

FICHE TECHNIQUE

- Maître d'ouvrage : efp
- Architecte : Map Architecture, Karbon
- Études : Vrije Universiteit Brussel, Pierre Berger
- Calendrier : 2017-2019

4.2 Circular Retrofit Lab, Bruxelles

Le Circular Retrofit Lab, CRL en abrégé, est un projet de rénovation expérimental de la Vrije Universiteit Brussel, conçu par le département Architectural Engineering de la VUB en collaboration avec le bureau d'architecture Kaderstudio. Le bâtiment se veut un modèle de stratégies de conception circulaire et illustre l'utilisation de différents systèmes constructifs axés sur le changement. Le résultat innovant témoigne d'une collaboration intense entre la recherche et la pratique, et a été rendu possible grâce au soutien de la Commission européenne au projet d'innovation Buildings as Material Banks, BAMB.

Avec le CRL, inauguré de manière festive en mai 2019, la Vrije Universiteit Brussel a réalisé une première européenne : un projet de rénovation circulaire et surtout réversible était mis en œuvre avec succès. En collaboration avec Kaderstudio, l'équipe Transform a appliqué son expertise en matière de recherche sur la conception réversible à la rénovation d'un bloc composé de huit anciens kots d'étudiants – les emblématiques kot d'étudiants préfabriqués de Willy Van Der Meeren datant des années 1970 – sur le campus d'Etterbeek. L'ensemble du bâtiment a été mis à nu, seule la structure porteuse en béton ayant été conservée.

Une conception basée sur des scénarios d'utilisation a constitué le point de départ de la rénovation, avec des matériaux démontables et réutilisables et des connexions réversibles. Le CRL combine deux stratégies de conception circulaire : concevoir pour une (plus) longue durée de vie et concevoir en vue du désassemblage et du réemploi.

Le CRL, composé de deux niveaux, sert aujourd'hui de vitrine à la construction circulaire. Le CRL est également utilisé comme espace événementiel et lieu de travail flexible, respectivement au rez-de-chaussée et au premier étage. Lors de la conception du CRL, il a été tenu compte au maximum de tous les indicateurs de réversibilité spatiale et technique. Même si, compte tenu du contexte de la rénovation, il n'a pas été possible d'optimiser tous les indicateurs. Par exemple, les dimensions du bâtiment et les hauteurs d'étage étaient déjà fixées, et les architectes pouvaient tout au plus vérifier dans quelle mesure elles permettaient certaines fonctions. Il n'y avait pas non plus d'accent spécifique mis sur la hiérarchie de désassemblage.

4.2.1 Réversibilité spatiale

Pour choisir les différentes fonctions allouées au CRL, une méthode de recherche soutenue par la conception (research by design) a été appliquée pour la configuration interne du bâtiment sur la base des caractéristiques existantes telles que les dimensions du bâtiment, la hauteur d'étage, la typologie structurelle, etc. Différentes fonctions, qui soutiennent la vie (estudiantine) sur le campus universitaire, ont été étudiées. Parmi les exemples de fonctions possibles, citons un espace de dissémination, une eco-guesthouse, un atelier de réparation de vélos, un point d'information pour les étudiants, un espace de co-working et un café. Divers scénarios d'utilisation ont ainsi été définis, sur lesquels repose la réversibilité spatiale du projet.



Figure 99 : Plans relatifs aux différents scénarios d'utilisation (Source : Architectural Engineering, VUB)

4.2.1.1 Dimensions

La rénovation du CRL maintient la structure porteuse d'origine. Le système de construction en béton Variel, développé autrefois par l'architecte suisse Fritz Stucky, est modulaire. Deux fois quatre modules ont été empilés. Par conséquent, tous les espaces ainsi que les grandes ouvertures dans la façade suivent un seul et même canevas.

La hauteur d'un module – du plancher du rez-de-chaussée à celui du premier étage – est d'environ 305 cm. Ce n'est pas beaucoup et cela limite donc un peu la configuration. Comme la hauteur est réduite, il ne serait pas approprié, par exemple, d'abaisser le plafond pour y cacher la ventilation.

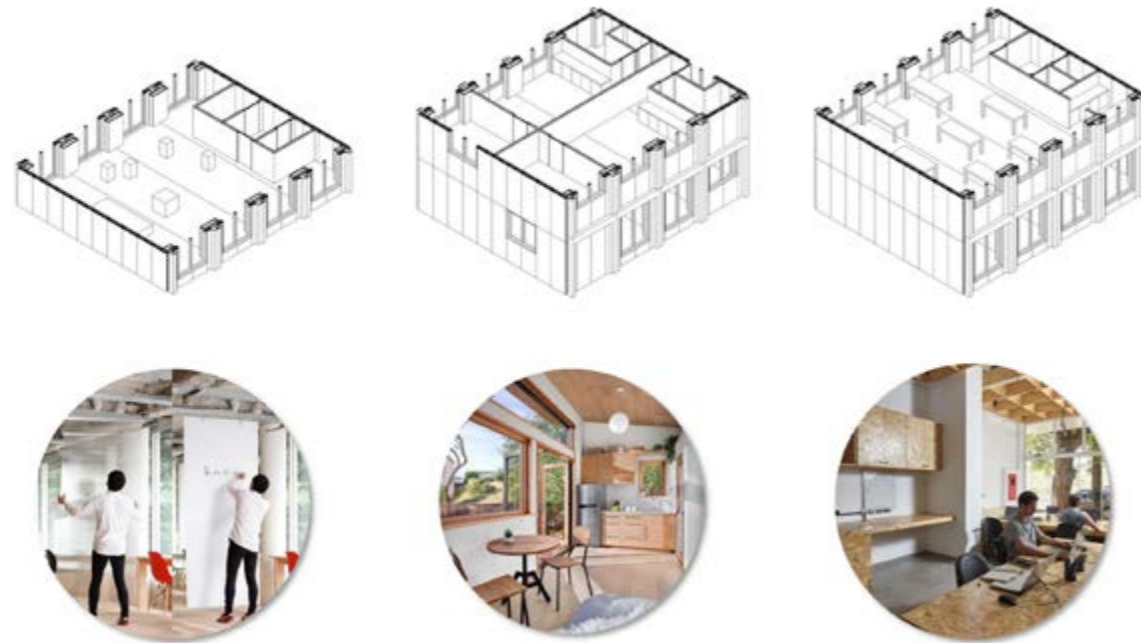


Figure 100 : Positionnement des éléments fixes (Source : Architectural Engineering, VUB)

4.2.1.3 Capacité

Il est sans doute envisageable d'encore ajouter un étage. En tout cas, il est possible d'agrandir l'espace en ajoutant des modules supplémentaires à l'horizontale. Cela est possible grâce à la nature modulaire des modules en béton, qui sont également déplaçables. Une connexion horizontale peut être réalisée par les façades latérales. Il s'agit principalement de façades aveugles démontables. Une grande fenêtre dans la façade latérale devra donc être sacrifiée. Cependant, il y a suffisamment de lumière naturelle qui pénètre par les autres façades. Grâce au caractère ouvert des modules en béton, de nouvelles entrées peuvent facilement être créées au rez-de-chaussée. La circulation verticale extérieure peut donc être étendue pour augmenter la capacité. Derrière la contre-cloison technique, il y a en principe de la place pour loger des techniques supplémentaires. Le plancher surélevé le permet également.

4.2.1.2 Positionnement

Le positionnement des éléments fixes, y compris les conduites, a été déterminé sur la base des scénarios d'utilisation future. Le bâtiment a un plan ouvert, les éléments porteurs sont en façade. Les techniques ont été regroupées en deux modules jaunes au premier étage (voir image ci-dessous), afin que l'espace puisse être aménagé librement ou même divisé à l'avenir. Les zones où l'incidence de la lumière du jour est maximale sont aménagées en espaces de vie, tandis que tous les équipements sanitaires et techniques sont regroupés dans les zones sombres, là où le bâtiment est relié à autre bâtiment. La circulation verticale est extérieure, elle pourrait donc en principe être déplacée.



Figure 101 : Illustration de division future de l'espace bureau du CRL en deux logements (Source : Architectural Engineering, VUB)

Afin que les deux étages, qui sont accessibles séparément, puissent également fonctionner indépendamment l'un de l'autre sur le plan technique, ils ont reçu chacun leur propre groupe de ventilation.

Le changement de fonction des bureaux en studios modifie le compartimentage incendie. Par conséquent, des parois coupe-feu ont déjà été prévues aux endroits appropriés, par exemple entre le hall d'entrée et les locaux humides. Pour la même raison, les gaines de ventilation ont déjà été équipées chacune d'un clapet coupe-feu à l'endroit où elles traversent le futur compartimentage coupe-feu (sur la photo, il s'agit du passage dans les blocs jaunes). Seul la commande/le contrôle de l'unité de ventilation doit encore être adapté lors du changement de fonction. Un espace a également été prévu pour installer des amortisseurs acoustiques à

ce moment-là afin d'éviter la diaphonie entre les studios.

Deux thermostats ont également déjà été installés, chacun avec son propre circuit de distribution, reliés à des convecteurs dans le périmètre du plancher technique. De cette manière, les studios prévus pourront également être chauffés séparément.

4.2.1.4 Potentiel de désassemblage et de réemploi

Les parois intérieures sont démontables. En fonction de la quantité et de la rapidité des changements futurs attendus, trois systèmes de cloisons différents ont été utilisés : un système à profilé, un système kit-of-parts, et un système à connexion velcro. Les modules de façade sont également entièrement démontables. Ainsi, les parties vitrées et non vitrées de la façade pourront être permutées dans le futur.



Figure 102 : De gauche à droite : un système à connexion velcro (Source : Architectural Engineering, VUB ; Juunoo), un système kit-of-parts (Source : Geberit) et un système à profilé (Source : Architectural Engineering, VUB ; Saint-Gobain)

4.2.2 Réversibilité technique

4.2.2.1 Indépendance fonctionnelle

Dans ce projet les couches fonctionnelles sont séparées autant que possible les unes des autres. Les parois intérieures démontables sont constituées d'une structure de support revêtue de plaques. La finition peut être ajustée indépendamment de la structure.

Les techniques peuvent être adaptées indépendamment des autres couches. Au lieu d'intégrer les techniques en les noyant dans le matériau de support ou par meulage, celles-ci restent accessibles selon la solution déployée, soit dans une gaine technique derrière une contre-cloison démontable de type 'kit-of-parts' (indépendance totale) ou sous le plancher surélevé (indépendance totale). Les plinthes amovibles sous

les parois à profilé (intégration planifiée) permettent également de prévoir des prises de courant éloignées du noyau technique. Grâce à cette plinthe technique, les techniques peuvent être adaptées sans enlever la paroi et sa finition.

Les techniques ont été regroupées autant que possible. Au rez-de-chaussée, elles ont été rassemblées dans les parois techniques de type 'kit-of-parts'. Au premier étage se trouvent deux modules adaptables et intelligents offrant une solution flexible et modulaire. Ils comprennent la cuisine, la salle de bains, les toilettes, le local technique et l'espace de rangement. La paroi technique et les modules sont également regroupés verticalement. De là, les techniques partent vers le plafond et le plancher surélevé.

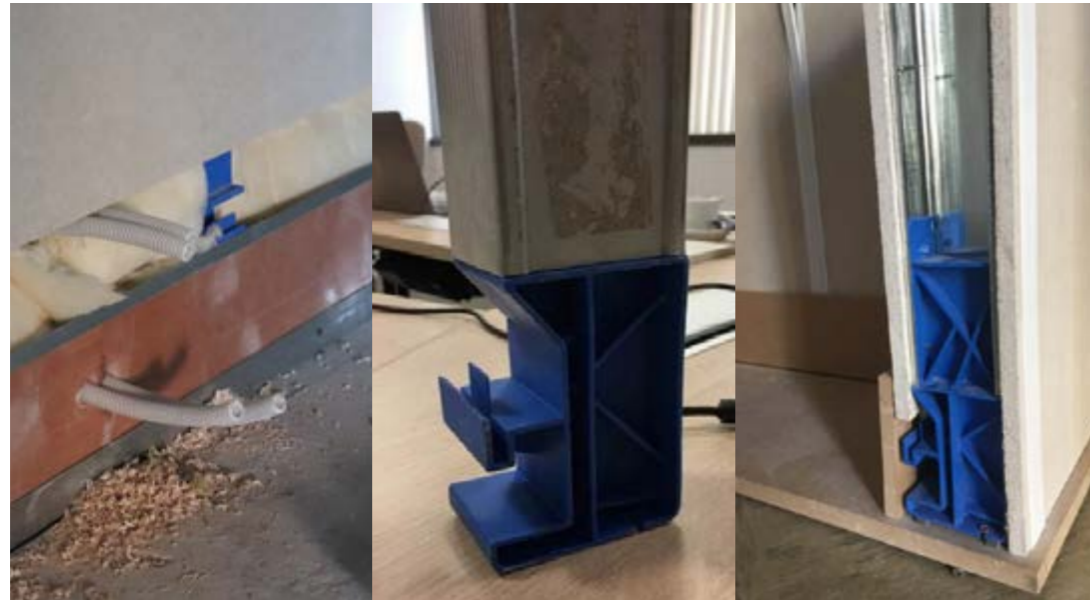


Figure 103: Intégration planifiée: plinthes amovibles sous les parois à profilé (Source: Architectural Engineering, VUB)



Figure 104: Indépendance totale: plancher surélevé démontable (Source: Architectural Engineering, VUB)

Les blocs sanitaires sont également construits dans un souci d'indépendance fonctionnelle et peuvent donc être modifiés ou démontés sans affecter les autres éléments.

Les éléments de façade sont non porteurs et peuvent être enlevés, remplacés ou modifiés de manière totalement indépendante des éléments porteurs.



Figure 105: Eléments de façade non porteurs (Source: Architectural Engineering, VUB)

4.2.2.2 Regroupement fonctionnel

Un système de façade composé de cassettes préfabriquées pouvant être insérées dans les ouvertures de la façade a été développé pour le projet (voir image ci-dessus).

4.2.2.3 Élément de base

Des profilés d'angle ont été utilisés comme éléments de base indépendants pour fixer les panneaux de façade à la structure.



Figure 106: Les panneaux de façade sont connectés à la structure par le biais d'éléments de base indépendants (Source: Architectural Engineering, VUB)

A plus petite échelle, le système de cloison de type 'kit-of-parts' utilisé pour les parois techniques a également recours à un élément de base (principe 4). Cette solution crée une

connexion indépendante entre les éléments de support en acier permettant d'assembler les cloisons selon différentes configurations.



Figure 107 : Système de cloison de type 'kit-of-parts' : élément de base indépendant (Source : Geberit)

4.2.2.4 Coordination des cycles de vie

Différents systèmes de parois intérieures ont été utilisés dans le CRL. Ces systèmes de parois ont été choisis en fonction des futurs scénarios développés et du cycle de vie prévu des parois. Différents types de parois ont ainsi été identifiés dans le projet, chacun ayant son propre « rythme ». Sur la contre-cloison du côté intérieur des façades, le maître d'ouvrage du CRL ne s'attend pas à devoir procéder à des adaptations de sitôt. En revanche, les parois techniques doivent permettre d'accéder plus rapidement aux techniques qui nécessitent des mises à niveau ou un entretien. La paroi qui divisera à terme le premier étage en deux studios doit être amovible, mais ne sera pas remplacée tous les cinq ans. Une analyse du cycle de vie a comparé le coût écologique et financier de différents systèmes de parois pour les dif-

férents scénarios. Elle a montré que les parois dont le coût initial est plus élevé, comme le système de type 'kit-of-parts' s'avèrent avantageuses sur l'ensemble du cycle de vie lorsqu'elles sont utilisées dans un scénario où les adaptations sont nécessaires à un rythme plus rapide. Sur la base de ces études, le système 'kit-of-parts', qui peut être rapidement et facilement démonté, a été sélectionné pour les parois techniques du projet. Ainsi, en tenant compte du cycle de vie des techniques, grâce au démontage et au remontage des panneaux de finition, aucun déchet n'est généré lors de l'entretien ou des éventuels remplacements. Les parois à profilé sont quant à elles entièrement démontables, mais ne permettent pas d'apporter des adaptations mineures aussi facilement. Elles conviennent cependant parfaitement pour les autres contre-cloisons.

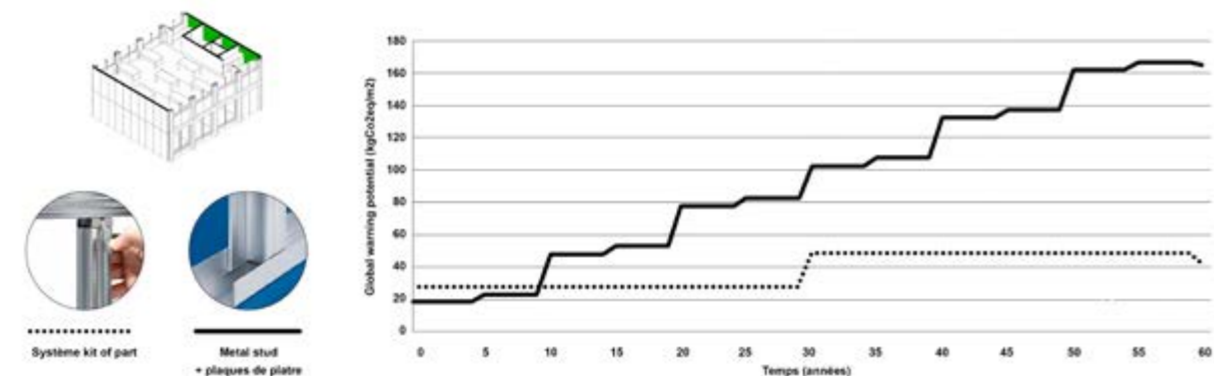


Figure 108 : ACV de l'impact environnemental du système kit-of-parts par rapport à un mur conventionnel non réversible en cas de mise en œuvre dans un mur technique. (Source : Architectural Engineering, VUB)

4.2.2.5 Géométrie des bords de produit et des connexions

Le système de parois à profilé est doté d'un profilé omega amovible entre les panneaux de finition.



Figure 109 : Détail système de parois à profilé (Source : Architectural Engineering, VUB ; Saint-Gobain)



Figure 110 : Système de parois à profilé (Source : Architectural Engineering, VUB)

Cela permet de retirer une plaque sans avoir à retirer les plaques adjacentes. Ce système de fixation permet de laisser les plaques de plâtre non traitées (aucune couche de plafonnage n'a été ajoutée) et de les fixer de manière réversible. Le système 'kit-of-parts' permet également de démonter les

plaques en parallèle. Dans ce système, toutes les plaques sont fixées individuellement aux éléments de base – les profilés en acier. Le système à connexion velcro fonctionne avec un léger chevauchement. Il est donc préférable d'en retirer les plaques dans le bon ordre.

4.2.2.6 Séquence d'assemblage

Des techniques d'assemblage parallèle et séquentiel ont été utilisées dans ce projet. Le type de séquence dépend de la rapidité et du nombre de changements prévu. Pour la façade, par exemple, il est important d'enlever soigneusement la couche extérieure avant de commencer à enlever les modules. Entre-temps, vous pouvez déjà commencer à démonter la finition intérieure.

4.2.2.7 Types de connexions

Des connexions sèches ont été utilisées dans le projet. Les systèmes de parois utilisés pour le CRL recourent à différents types de connexions réversibles. Le système à profilé utilise un profilé en forme de U, fixé aux montants métalliques à l'aide de vis, ce qui permet d'enserrer les

plaques de plâtre. L'avantage est que les plaques ne peuvent pas être endommagées par des vissages répétés. Le système 'kit-of-parts' est basé sur une connexion par pince métallique. Cela permet de connecter les barres métalliques dans n'importe quelle position suivant un angle de 90°. Le système peut être complété par d'autres éléments de fixation différents, tels que des crochets mais aussi des boulons pour fixer les plaques. Cela peut donner des connexions visibles ou invisibles. Dans le CRL, la finition en bois a été fixée par des assemblages boulonnés visibles. Les parois à connexion velcro, quant à elles, utilisent une connexion de type Velcro. Celle-ci assure la connexion avec le plancher et le plafond, entre lesquels les profilés sont tendus, et entre les profilés et les panneaux de finition.

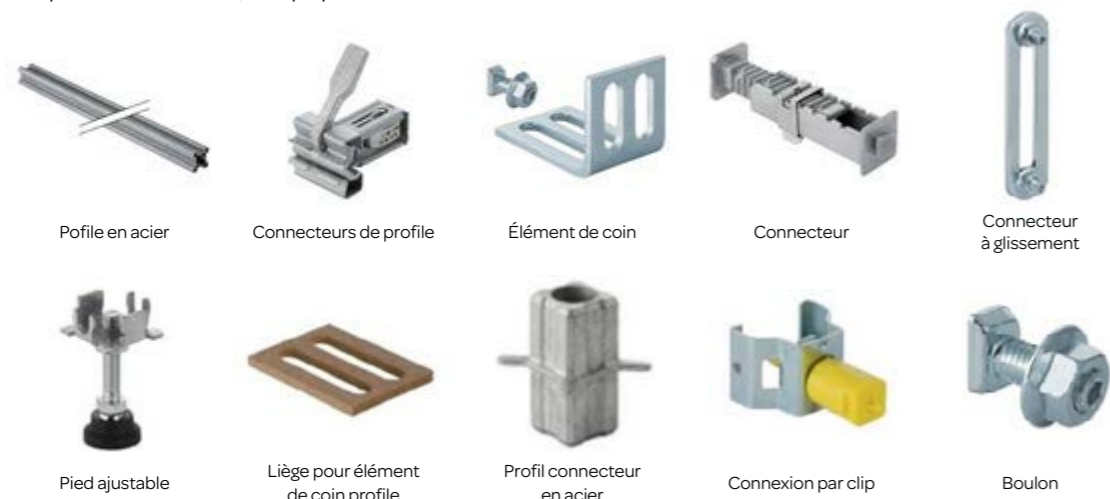


Figure 111: Catalogue des éléments GIS kit of parts de Geberit © (Source : Geberit)

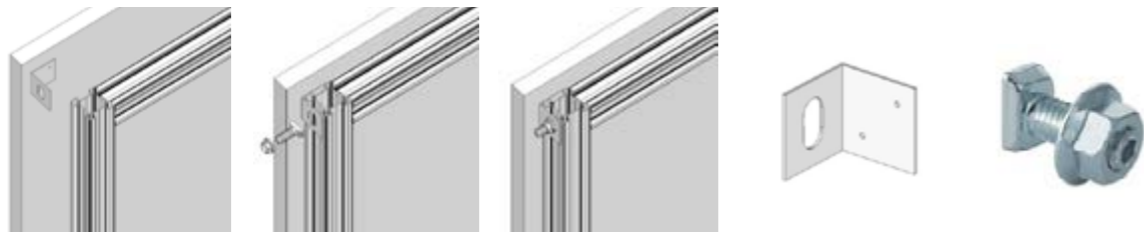


Figure 112: Raccordement latéral des panneaux de finition sur la structure en acier du système kit-of-parts GIS, au moyen d'éléments d'angle adaptés et de boulons GIS (Source : Architectural Engineering, VUB; Geberit)



Fig 113: Parois à velcro (Source: JUUNOO)

FICHE TECHNIQUE

- Maître d'ouvrage: Vrije Universiteit Brussel, VUB Architectural Engineering
- Architecte: KADERSTUDIO
- Partenaires: MK Engineering, Groupe Van Roey, Geberit, Reynaers Aluminium, Beneens Alucon, Saint-Gobain, Jaga, Jonckheere Projects, Bao Living, JUUNOO, Lumency, Tarkett et Zehnder Group.
- Calendrier: 2018 - 2019

4.3 Système de façade circulaire mur-rideau à la Gare Maritime, Bruxelles

Autrefois la plus grande gare de marchandises d'Europe, la Gare Maritime, sur le site de Tour & Taxis à Bruxelles, est aujourd'hui un lieu inspirant où des entreprises s'installent, avec un espace public agréable pour les événements de grande et de petite envergure. En collaboration avec les architectes Jan de Moffarts (aujourd'hui ALTSTADT) et Bureau Bouwtechniek, Neutelings Riedijk Architecten a conçu « la ville couverte où il ne pleut jamais » entièrement en bois. Cela fait de la Gare Maritime un bel exemple de développement durable et actuellement le plus grand projet CLT d'Europe. Mais la nouvelle Gare Maritime est également un modèle de construction circulaire, notamment grâce à un système de profilés de façade en acier circulaire..

4.3.1 Réversibilité spatiale

La réversibilité spatiale de la Gare Maritime a été maximisée en tenant compte des quatre indicateurs dans ce domaine. pose la réversibilité spatiale du projet.

4.3.1.1 Dimensions

Datant du début du XX^e siècle, la Gare Maritime mesure 140 mètres de large pour 280 mètres de long. La totalité de l'espace situé sous les sept toitures en acier reliées entre elles, trois grandes et quatre petites, est désormais accessible au public. Sous les parties latérales de la structure existante, Neutelings Riedijk Architecten a placé douze pavillons en bois, qui accueillent ensemble le nouveau programme de plus de 45 000 m² et peuvent être retirés à tout moment. Les éléments modulaires aux dimensions identiques augmentent la compatibilité et les possibilités de réemploi.

4.3.1.2 Positionnement

Le système modulaire en bois lamellé-croisé ou 'CLT' avec une finition de façade en chêne (FSC) s'inscrit parfaitement dans la structure existante faite de fermes et de colonnes. Les pavillons en bois se composent d'un rez-de-chaussée et de deux étages, avec une mezzanine supplémentaire sous le faîte. Les vitrines en chêne du rez-de-chaussée forment également des balcons pour les bureaux situés au-dessus. Les pavillons sont reliés entre eux par plusieurs « escaliers transversaux » sculpturaux en chêne au-dessus des rues intérieures. Dans le cadre d'un système modulaire avec des surfaces au sol librement compartimentables, il est possible d'accueillir facilement différentes fonctions, telles que des bureaux, des commerces, des salles d'exposition et des espaces de production.

4.3.1.3 Capacité

L'utilisation du CLT avec un bardage en chêne permet de réduire considérablement la quantité de ciment : en béton, le bâtiment aurait été cinq fois plus lourd. Par conséquent, aucune intervention fondamentale n'a dû être effectuée sur la structure porteuse de la Gare Maritime. Les techniques de la « nouvelle ville sous les toits » sont logées dans les pavillons intégrés et ne compromettent donc pas de futures nouvelles affectations de la Gare Maritime.

4.3.1.4 Potentiel de désassemblage et de réemploi

La conception a également tenu compte de la circularité de la structure en concevant des connexions démontables et des éléments de construction modulaires. Ceux-ci augmentent la compatibilité et le potentiel de réemploi. L'assemblage par vis et boulons a été privilégié pour les pavillons. Un système de mur-rideau en acier a également été raccordé de manière réversible à la structure en bois et aux toitures existantes, en utilisant différents types de connexions démontables.

4.3.2 Réversibilité technique

Ce qui précède a déjà illustré la réversibilité technique des pavillons en bois, mais le système de murs-rideaux en acier qui y est fixé joue donc également un rôle majeur dans la circularité de la Gare Maritime.

Le système de mur-rideau déployé existe depuis plus d'un demi-siècle. Au fil des ans, plusieurs types de connexions sèches en T ont été développées pour ce système. Selon leur type, ces connexions permettent aux éléments de façade d'être désolidarisés plus ou moins facilement de la structure porteuse du bâtiment.

Pour la Gare Maritime, l'équipe de conception a souhaité utiliser des connexions réversibles pour la structure de façade. Au lieu de souder tous les raccords, le choix a été pour ce projet de travailler avec plusieurs éléments soudés, complétés par des montants et des traverses séparés et connectés réversiblement lorsque la stabilité le permettait. Ainsi, plusieurs structures de façade ont été installées, qui pourront être démontées à l'avenir sans grand effort. La maquette réalisée pour le projet a déjà permis de montrer comment se déroulera exactement ce démantèlement. Avec les architectes et les entreprises d'installation, toutes les étapes nécessaires au démontage du système de mur-

rideau ont été passées en revue. La maquette démontée du système de profilés de façade de la Gare Maritime a ensuite été réutilisée, bien qu'un peu raccourcie, dans un autre projet à Leiden, aux Pays-Bas.



Figure 114 : Maquette de la Gare Maritime avant le démontage. (Source : Jansen AG)



Figure 117 : Stockage de la maquette de la Gare Maritime. (Source : Jansen AG)



Figure 115 & 116 : Maquette de la Gare Maritime pendant le démontage. (Source : Jansen AG)



Figure 118 : Maquette de la Gare Maritime en route vers l'atelier. (Source : Jansen AG)



Figure 119 : Après mesurage du nouveau site, deuxième phase de reconfiguration en atelier. (Source : Blonkstaal)



Figure 121 : Installation de la structure porteuse, deuxième phase. (Source : Blonkstaal)



Figure 120 : Installation de la structure porteuse, deuxième phase. (Source : Blonkstaal)



Figure 122 : Résultat final du deuxième cycle d'utilisation. (Source : Jansen AG)

Nous examinons à présent comment les indicateurs de réversibilité technique ont été appliqués pour le système de profilés de façade à la Gare Maritime.

4.3.2.1 Indépendance fonctionnelle

Le système de façade est conçu pour être indépendant des autres fonctions du bâtiment, telles que la structure ou le toit. Il est fixé au gros œuvre par des connexions sèches. Ce principe s'applique aux murs-rideaux des façades longitudinales de la Gare Maritime, mais aussi aux façades en acier fixées aux structures internes en CLT. Les montants sont fixés aux planchers en CLT au moyen de platines d'accouplement. La structure de la façade n'est pas fixée directement à la structure du toit. Le toit se dilate en effet d'environ 11 cm dans le sens longitudinal, mais bouge également dans le sens vertical. C'est pourquoi la structure de la façade est dotée d'une connexion souple tant sur sa face extérieure qu'intérieure, en partie supérieure, capable d'absorber une telle dilatation.

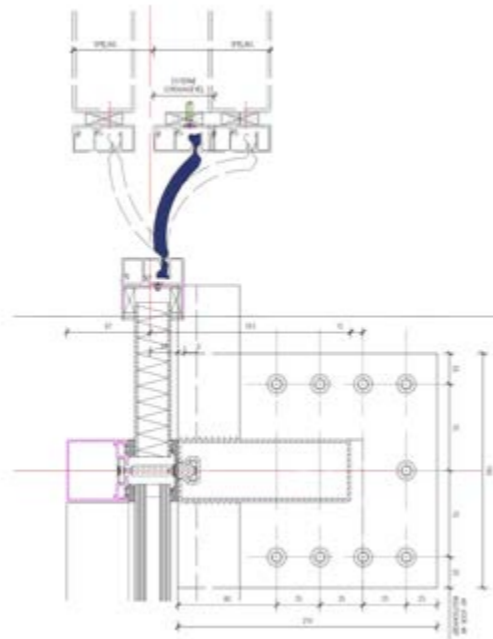


Figure 123 : Détail du raccord flexible. (Source : Bureau Bouwtechniek)



Figure 124 : Extérieur de la même façade avec une vue claire des techniques passant en douceur dans le raccord de la façade. (Source : Tim Fisher)

Le raccordement de la façade intérieure à la structure du toit peut être qualifié d'unique. Pour garantir la stabilité de la façade, celle-ci est connectée au volume intérieur par deux tubes en acier. Ces tubes en acier sont fixés aux deux montants centraux de la façade et s'appuient sur le volume du CLT situé à l'arrière. Cela permet non seulement au toit de bouger, mais aussi de faire passer librement les techniques. Une étanchéité souple est prévue pour l'isolation thermique et acoustique (Fig. 10). Pour plus d'images de ce raccord flexible et des points d'appui au moyen de tubes en acier, voir les figures.



Figure 125 : Extérieur de la même façade avec à l'arrière-plan le tube d'acier se dirigeant vers le volume CLT pour le soutenir. (Source : Toon Grobet)

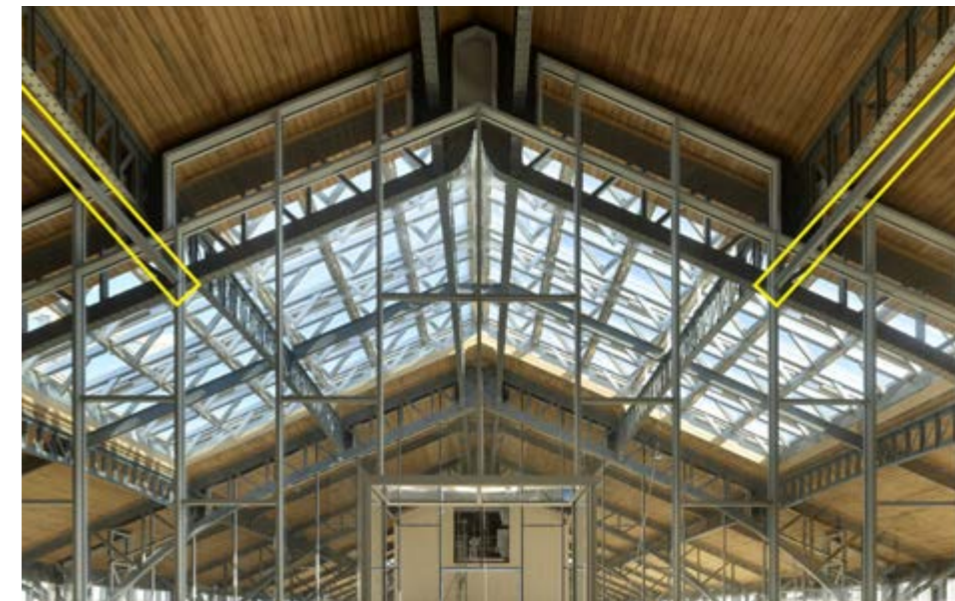


Figure 126 : Intérieur de la même façade avec le tube d'acier se dirigeant vers le volume CLT pour le soutenir. (Source : Toon Grobet)

La façade peut ainsi être démontée en éléments et en montants indépendants sans endommager les parties et fonctions adjacentes.

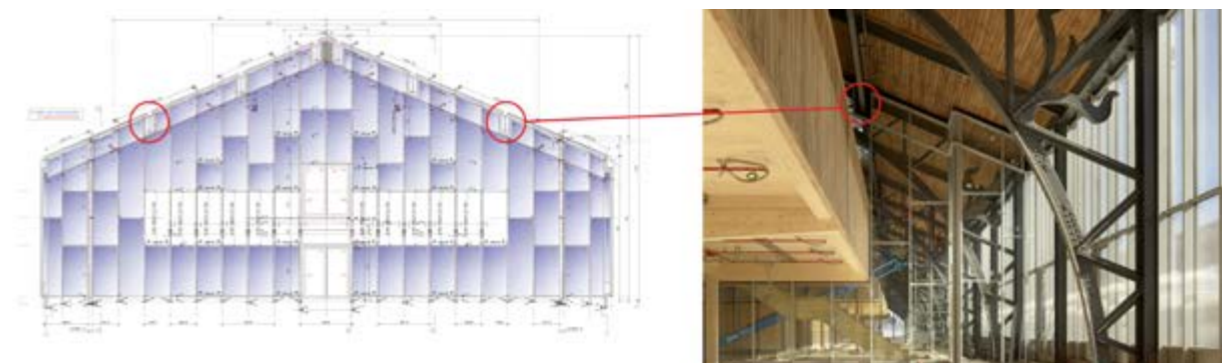


Figure 127 : Espace flexible ouvert en haut qui permet le passage des techniques à travers la façade sans compromettre l'intégrité et la détachabilité de la façade. (Source : Toon Grobet & dessins Lootens)

4.3.2.2 Systématisation

Bien que le système de façade offre la possibilité de préfabriquer des pièces complètes, dans ce projet, le choix a été fait de travailler avec une combinaison de pièces préfabriquées

(pour la stabilité requise) combinées à des montants et des traverses séparés. Tous les éléments de support ont été équipés en usine de caoutchoucs et de boulons de fixation pour recevoir le verre sur le chantier.



Figure 128 : Arrivée des sections de façade et des montants sur le chantier. (Source : Jansen AG)



Figure 129 : Éléments préfabriqués stockés temporairement sur chantier. (Source : Jansen AG)

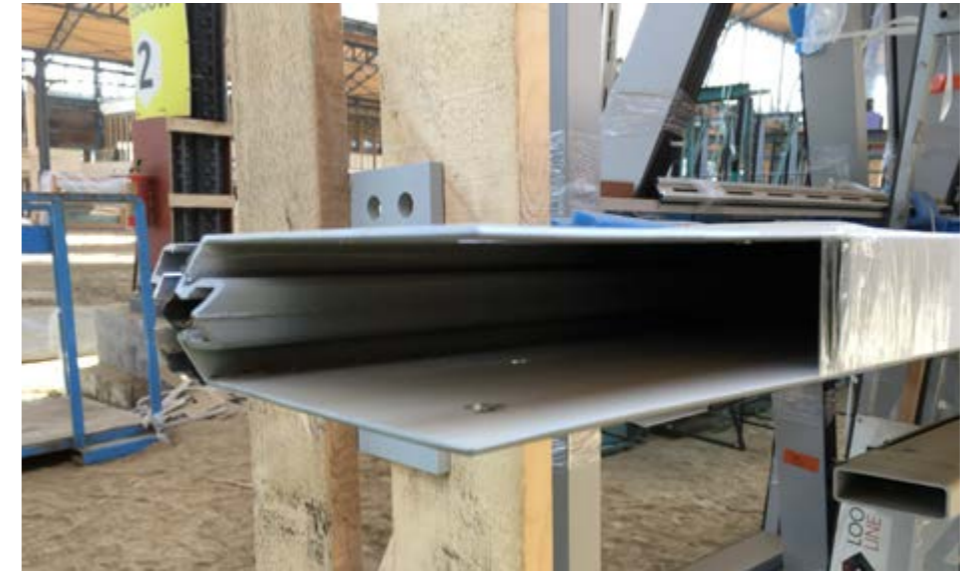


Figure 130 : Détail du faitage de la façade intérieure, un élément préfabriqué. (Source : Jansen AG)

Le système de façade permet de démonter des parties de la façade sans entraver la fonction des autres parties. Comme décrit ci-dessus, la structure porteuse de la façade peut être placée en tant qu'un grand ensemble soudé (ce qui réduit drastiquement la réversibilité et le potentiel de réemploi), en éléments couplés ou avec des montants et traverses séparés ou dans une combinaison de ces options. Viennent ensuite les vitrages et les panneaux pleins, qui sont pincés à la structure porteuse par des connecteurs attachés par des connexions vissées.

Dans son ensemble, la façade est composée de plusieurs éléments, tels que des vitrages fixes, des panneaux isolants (souvent la balustrade), des parties ouvrantes, des techniques telles que les protections solaires ou les installations photovoltaïques et leurs gaines de câbles. Toutes ces éléments peuvent être retirés séparément, pour l'entretien ou le remplacement. Dans ce système de mur-rideau en acier, une hiérarchie a également été appliquée, basée sur la théorie de Stewart Brand. Le profilé de support intérieur fait office de « structure » et les caoutchoucs et le vitrage de « peau ». Ces couches sont donc conçues pour être indépendantes les unes des autres.

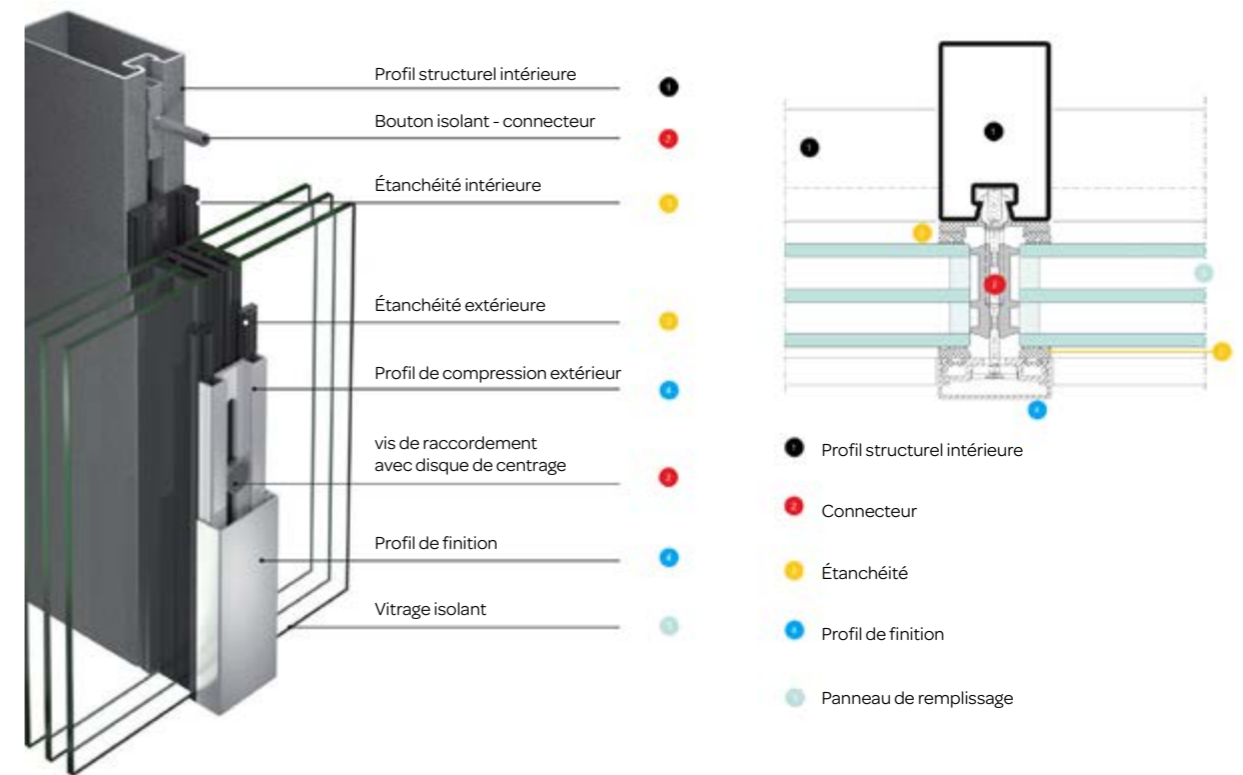


Figure 131 : Détail en vues 2D et 3D des clusters du système de façade VISS de Jansen. (Source : Jansen AG)

4.3.2.3 Élément de base

La structure du système de mur-rideau peut être considérée comme un élément de connexion indépendant (principe 4). Il est suspendu devant la structure porteuse d'un bâtiment et le poids du système est transféré à cette structure. Les différentes connexions peuvent être modélisées par l'architecte selon ses besoins et en fonction de la stabilité requise.

Aujourd'hui, la réversibilité de cette connexion joue un rôle de plus en plus important.

Quelques exemples de ces connexions de base sont présentés ci-dessous. Les figures montrent à la fois le modèle théorique et la connexion appliquée en Gare Maritime.

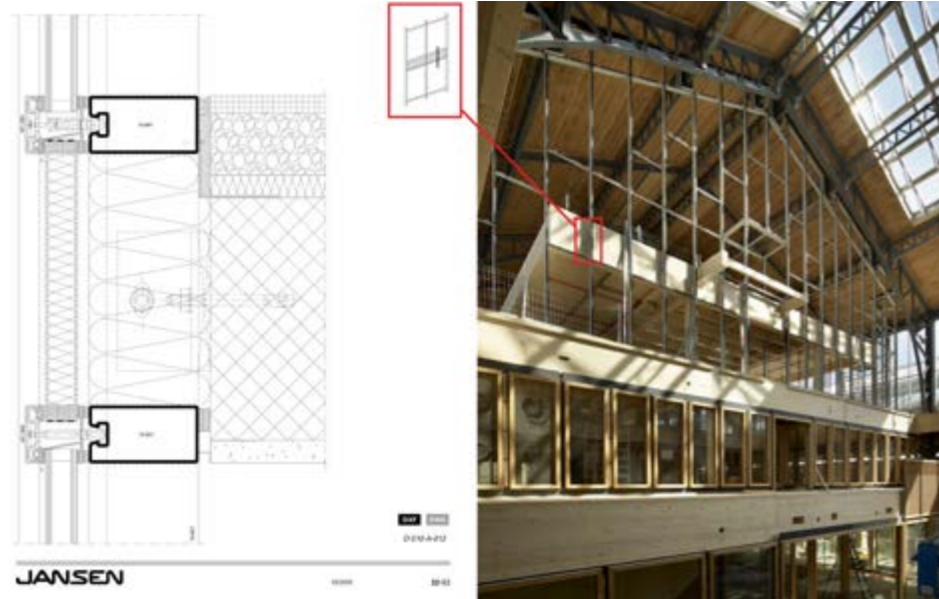


Figure 132: photo et détail de la connexion du mur-rideau en acier et de la structure porteuse au plancher intermédiaire en CLT (Source : Toon Grobet)

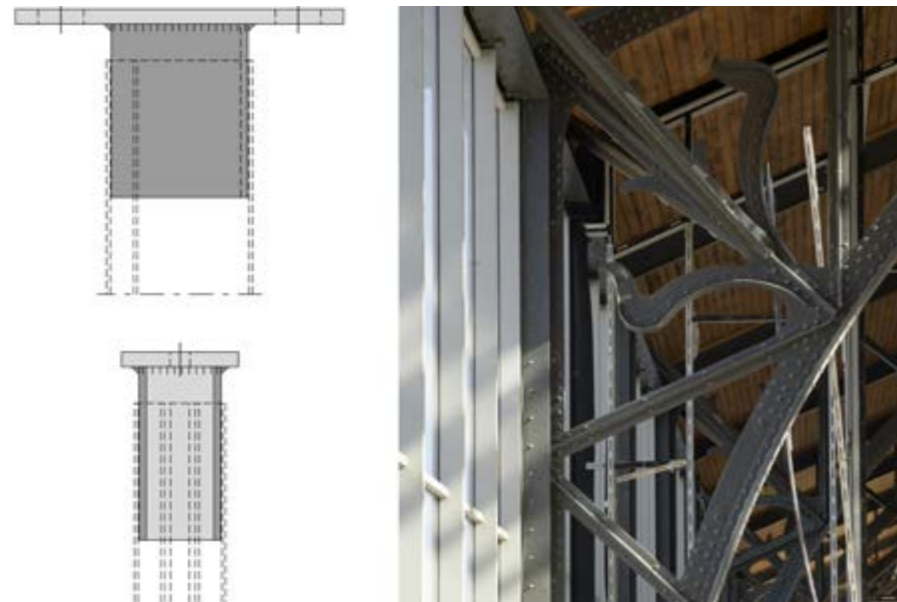


Figure 133: photo et détail de principe de la connexion supérieure avec liaison télescopique. (Source : Toon Grobet)

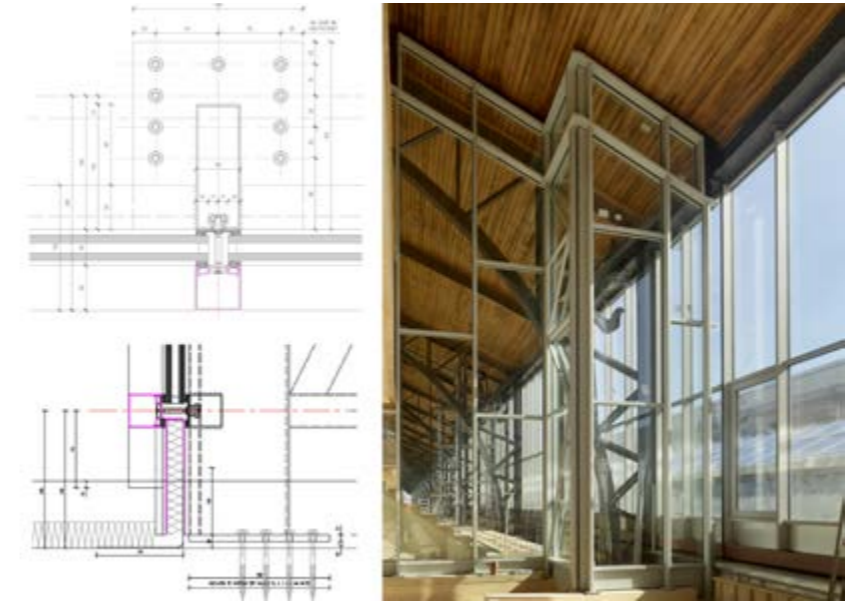


Figure 134: photo et détail d'exécution de la connexion supérieure avec liaison télescopique. (Source : Toon Grobet - Dessin Lootens)

4.3.2.4 Hiérarchie de (dé)montage et coordination du cycle de vie

La plupart des systèmes de façade ont une hiérarchie de montage de l'intérieur vers l'extérieur, dans le cas du système de façademur-rideau, elle commence par le profilé porteur en acier et se termine par les bandes de recouvrement. Lors du démontage, ce processus se déroule dans l'ordre inverse, c'est-à-dire de l'extérieur vers l'intérieur.

Comme ce type de système existe depuis plus d'un demi-siècle, plusieurs rénovations et améliorations de projets ont été effectuées en l'utilisant. Le profil de support qui est resté inchangé, peut être conservé au cours des projets. Pour effectuer une rénovation énergétique du système, il suffit de changer le verre et les joints. La structure peut rester en place et est toujours compatible avec les nouveaux composants pour l'étanchéité, ce qui permet au propriétaire du bâtiment d'économiser son budget et de ne faire qu'une intervention esthétique ou énergétique. La structure du bâtiment demeure de préférence également intacte. Cela permet au propriétaire du bâtiment d'influencer favorablement le TCO (coût total de possession). La valeur résiduelle offerte par ce système peut être exploitée financièrement.

4.3.2.5 Géométrie des bords de produit et des connexions

La géométrie des bords du produit est ouverte. En fonction de la connexion structurelle, qui est déterminée par l'architecte, le système de façade permet la mise en place réversible de poteaux et de rails. Il convient d'en tenir compte lors de la conception de la façade.

4.3.2.6 Séquence d'assemblage

Les éléments de façade sont normalement assemblés dans un ordre déterminé par la conception. La séquence de désassemblage est également déterminée par cela. Dans une version de poteaux et de rails individuels, il est possible de s'en écarter et de remplacer des éléments individuels de manière aléatoire. Cette approche nécessite une nouvelle façon de concevoir, en s'orientant davantage vers l'utilisation flexible future d'un bâtiment. Bien que des recherches soient menées à ce sujet, les exemples restent limités.

Dans les rénovations esthétiques, les choses sont plus simples. Là, souvent, seul un panneau extérieur est remplacé.

4.3.2.7 Type de connexions

Les clusters du système de façade sont interconnectés de manière démontable. Au niveau des éléments et des composants, une stratégie permettant d'obtenir un désassemblage et une interchangeabilité optimaux peut être déterminée lors de la conception. Pour cela, l'architecte veillera à travailler en étroite collaboration avec le fournisseur du système.



Figure 135: photo d'un détail d'un montant et d'une traverse Jansen VISS équipé d'une connexion en T démontable et universelle, une connexion mécanique développée pour les profilés Jansen VISS mais qui s'adapte également aux profilés standards en tube d'acier. Idéal pour les applications circulaires. (Source : Tim Fisher)

Pour la façade-rideau installée dans la Gare Maritime, il existe trois approches, avec des variantes supplémentaires. Par le passé, la conception était réalisée en fonction de la production ou de la vitesse d'exécution sur le chantier. Ainsi, on a souvent choisi des éléments de façade soudés ensemble en « échelles », entre lesquelles on pouvait monter des traverses fixées mécaniquement. Aujourd'hui, les conceptions sont

faites pour minimiser les coûts d'échec sur le chantier et les éléments sont souvent préfabriqués et suspendus au projet. Ce principe fonctionne également avec des montants et des traverses séparés démontables, où le vitrage est monté sur place. Cela reste un arbitrage à effectuer principalement d'un commun accord. Quelques-unes des méthodes les plus courantes sont illustrées ci-dessous.

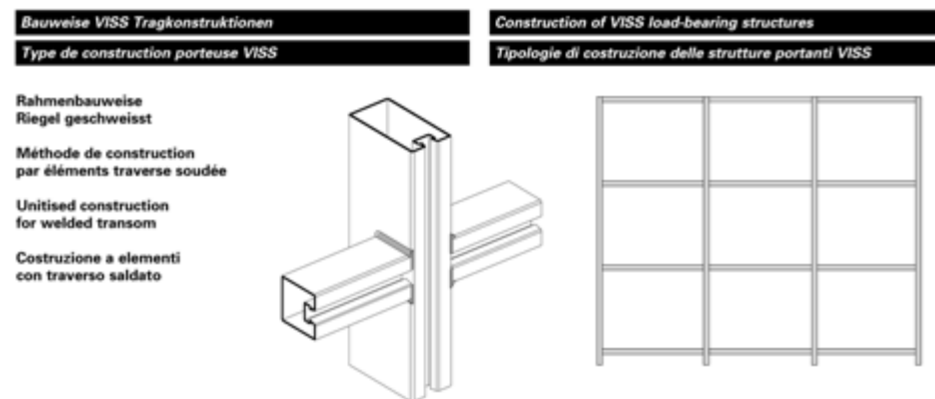


Figure 136: Détail d'un élément Jansen VISS entièrement soudé. Il faut ensuite le démonter complètement. (Source : Jansen AG)

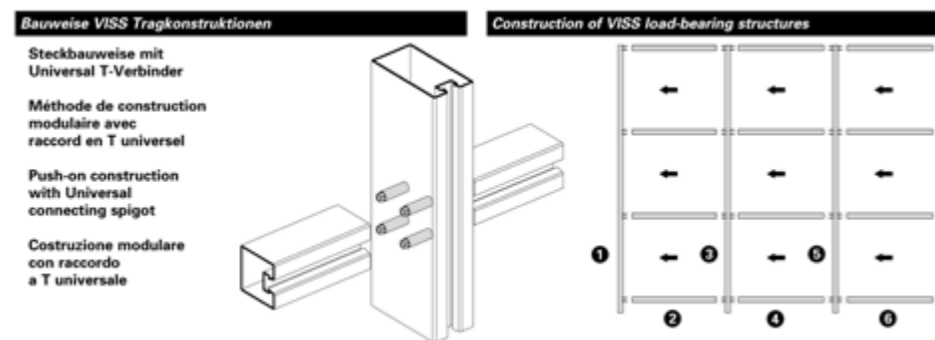


Figure 137: Détail des montants et traverses Jansen VISS reliés mécaniquement avec un connecteur universel en T. (Source : Jansen AG)

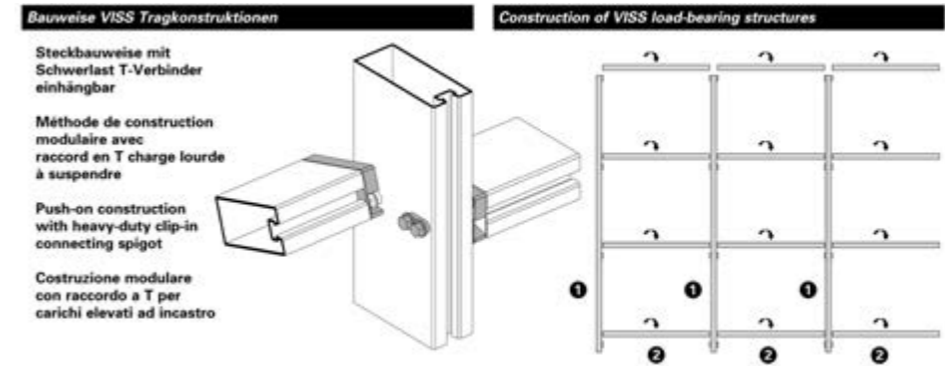


Figure 138: Détail des montants et traverses Jansen VISS avec une connexion mécanique suspendue. Elle offre une liberté de séquence lors de l'assemblage. Pensez également aux installations lourdes qui doivent être déplacées à travers la façade pendant la phase de construction. Toute la façade peut être vitrée et seule la partie destinée au transport temporaire reste ouverte. Juste avant la livraison, cette partie est achevée. Pendant l'exploitation, cette solution offre également un haut degré de flexibilité à l'utilisateur. (Source : Jansen AG)

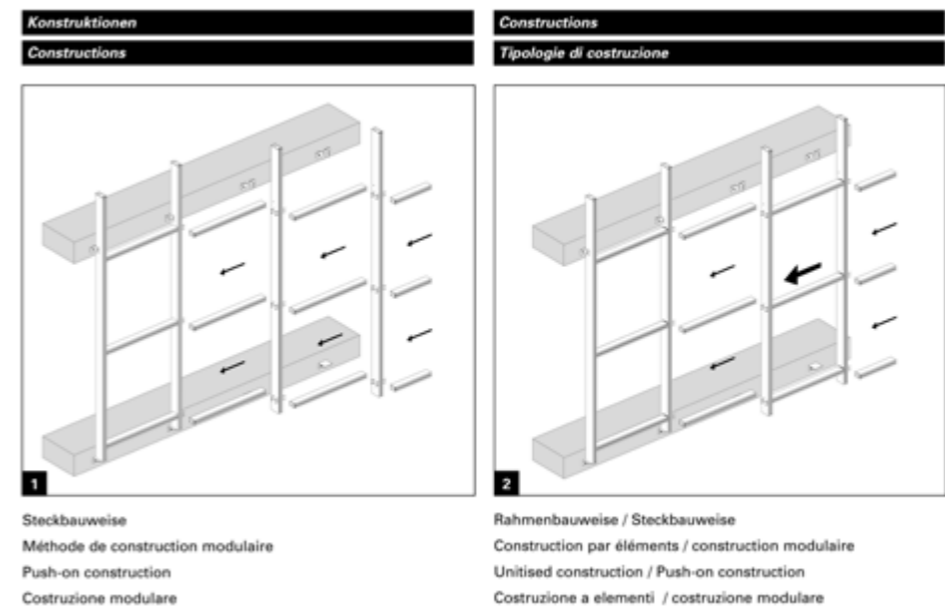


Figure 139: Détail 1 : Jansen VISS sous forme de montants et de traverses connectés de manière démontable. Le détail 2 montre le même connecteur en T, mais ici les éléments préassemblés sont composés des mêmes « connecteurs ouverts », alternant avec des traverses séparées entre les éléments. Cela peut augmenter l'efficacité sur le chantier. (Source : Jansen AG)

FICHE TECHNIQUE

- Maître d'ouvrage: Extensa
- Entrepreneur général: MBG
- Bureaux d'études: boydens engineering (techniques, PEB), Ney & Partners (stabilité), Venac (acoustique), Bureau Bouwtechniek et FPC (sécurité incendie), OMGEVING (aménagement des abords), Bopro (coordination sécurité, BREEAM).
- Fournisseur du système de menuiserie métallique: Jansen
- Calendrier: 2017 – 2020

4.4 Hôpital Joseph Bracops, Anderlecht

Le master plan gagnant pour la rénovation de l'hôpital Joseph Bracops, à Anderlecht, par archipelago et NU architecturatelier, a été conçu intégralement selon les principes de la construction circulaire : des matériaux locaux et durables, une conception adaptable, le principe du zéro-énergie, et un (dés)assemblage bien pensé du bâtiment. La création d'espaces publics, aussi bien à l'extérieur qu'à l'intérieur de l'enceinte de l'hôpital, fait en sorte que le site rénové est durablement inséré dans son contexte urbain.

L'hôpital, maillon dans le réseau hospitalier bruxellois IRIS, se situe dans le centre d'Anderlecht, à un jet de pierres du stade du Sporting. La rénovation du site représente un projet pilote à grande échelle pour la construction circulaire dans le secteur des soins de santé. Il n'est donc pas surprenant que tous les paramètres de conception relatifs à la réversibilité spatiale et technique aient été intégrés dans la conception de la polyclinique.

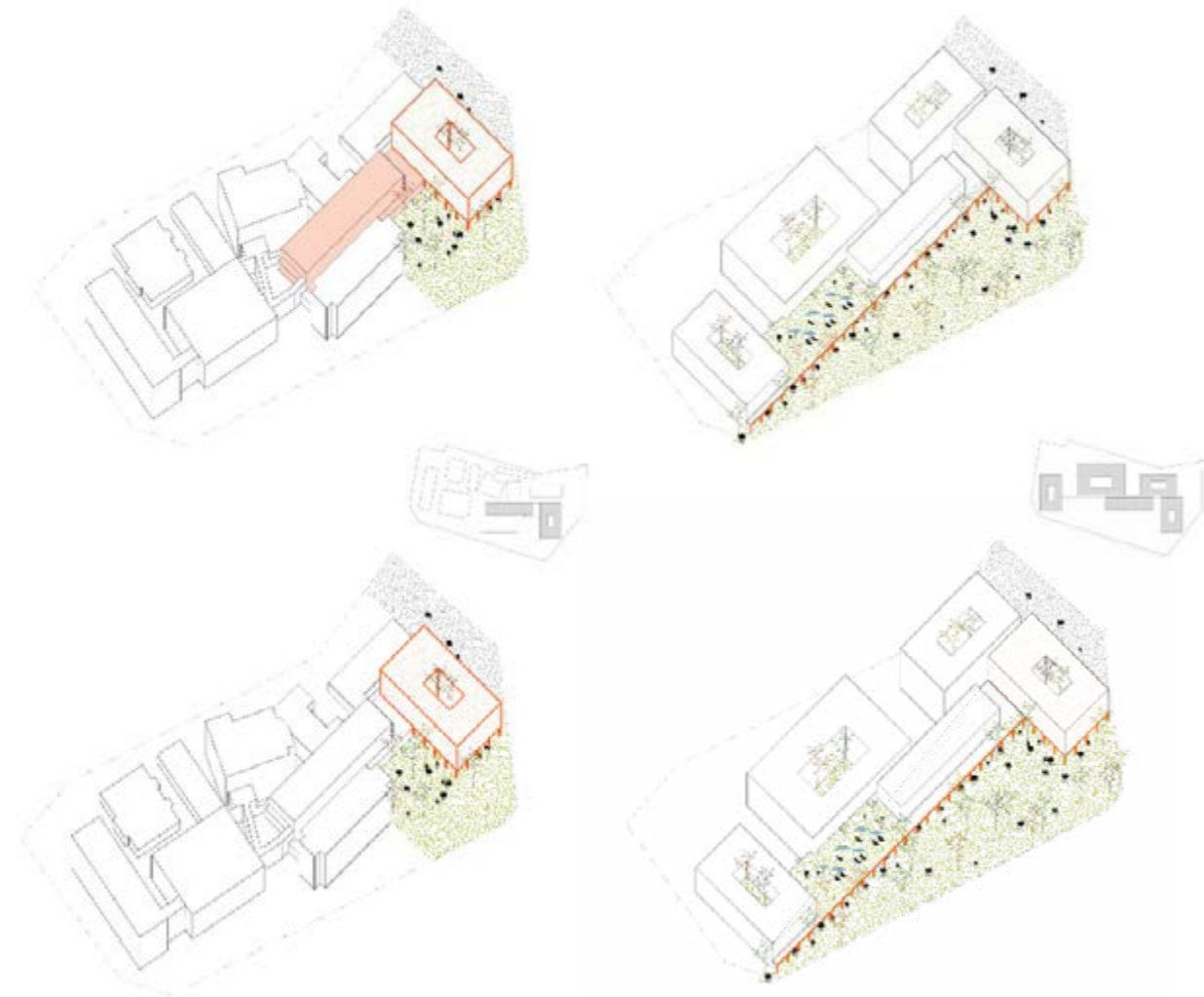


Figure 140 : Master plan du site hospitalier Bracops (Source : archipelago architects)

4.4.1 Réversibilité spatiale

La polyclinique est conçue sur la base de scénarios qui permettent un changement d'utilisation et de fonctions à l'avenir. Par exemple, en plus d'une clinique de jour, le bâtiment pourrait à l'avenir accueillir des chambres d'hôpital, une

maison de repos et de soins, des chambres d'étudiants et même des logements. Les paramètres de conception relatifs aux différents indicateurs – dimensions, capacité, positionnement et désassemblage – sont prévus en conséquence.

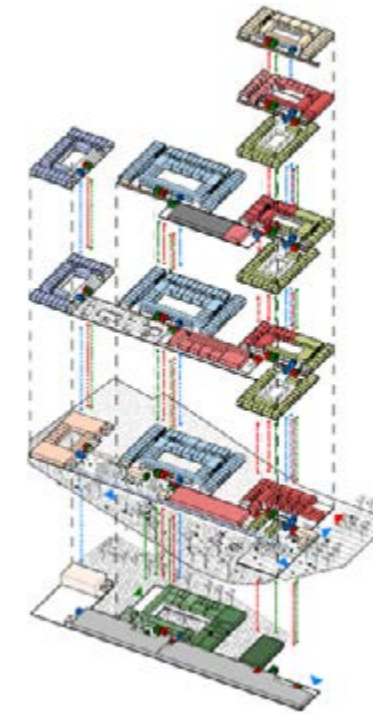


Figure 141 : Master plan du site hospitalier Bracops (Source : archipelago architects)

4.4.1.1 Dimensions

Les dimensions du bâtiment, combinées au patio stratégiquement implanté, sont optimisées en termes d'éclairage naturel et adaptées aux dimensions de différents programmes

tels que chambres d'hôpital, maison de repos et de soins, une résidence-service, des appartements... et bien sûr au programme initial de la polyclinique, comparable à un programme de bureaux.

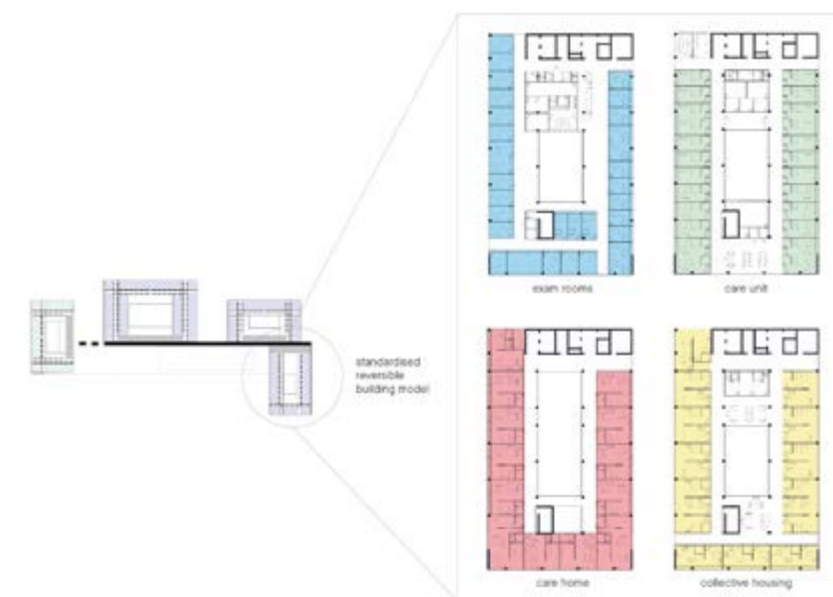


Figure 142 : Réversibilité spatiale : étude de programmation alternative dans le contexte d'une utilisation future. En haut à gauche : consultation/clinique de jour. En haut à droite : chambres d'hôpital. En bas à gauche : maison de repos et de soins. En bas à droite : appartements. (Source : archipelago architects)

Le volume de base a une surface au sol de 30 x 50 mètres. Il est percé asymétriquement d'un patio de 15 x 10 mètres. La profondeur des dalles de plancher et la hauteur libre des étages (3,45 mètres de plancher fini sous dalle) sont adaptées à un éclairage naturel sur toute la dalle de plancher et aux

exigences des différentes fonctions. Ces caractéristiques ont été déterminées à un stade précoce de la conception à l'aide de règles empiriques et testées à l'aide de simulations d'éclairage naturel.



Figure 143: Coupe verticale de l'hôpital de jour. (Source : archipelago architects)

Les dalles de plancher sont conçues comme des planchers champignons. Cela a un impact sur la hauteur de plancher à plancher et sur l'emplacement des techniques horizontales telles que la ventilation, car ces techniques ne peuvent pas être installées entre les poutres sous la dalle de plancher. Les planchers champignons présentent l'avantage considérable

d'offrir une grande flexibilité en termes d'emplacement des techniques horizontales. Cependant, ils présentent également un inconvénient, car par rapport à un système de poteaux-poutres, il est plus difficile de retirer des parties du plancher à l'avenir pour créer par exemple une cage d'escalier supplémentaire.

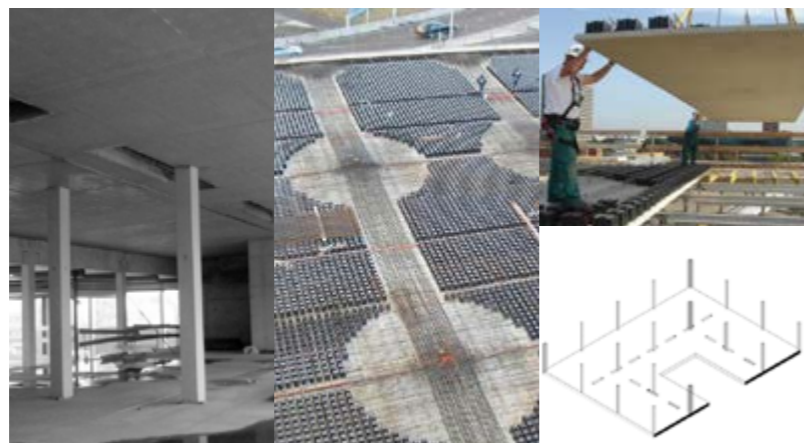


Figure 144: Illustrations de référence planchers-champignons (Source : archipelago architects)

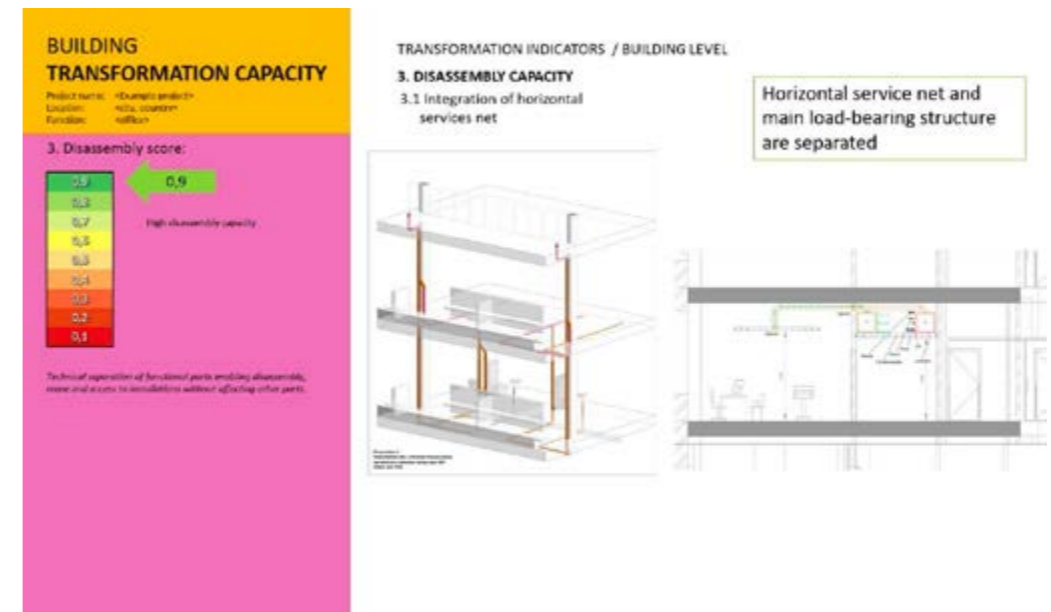


Figure 145: Les planchers champignons présentent l'avantage considérable d'offrir une grande flexibilité en termes d'emplacement des techniques horizontales (Source : archipelago architects)

4.4.1.2 Positionnement

Les noyaux de circulation et les locaux techniques sont principalement concentrés sur la façade nord, créant un plan ouvert sur l'ensemble de la dalle. Un escalier extérieur offre des possibilités de circulation supplémentaires et sert d'escalier de secours qui peut également être utilisé pour d'autres fonctions (par exemple, en résidentiel pour répondre aux normes de distance de circulation verticale).

L'implantation et le dimensionnement des noyaux d'escalier sont adaptés à un large éventail de programmes, dont les plus déterminants sont ceux des hôpitaux et des maisons de repos et de soins. Les zones de circulation principales sont positionnées en fonction de la profondeur des locaux.



Figure 146: Position des noyaux de circulation verticales (Source : archipelago architects)

Les colonnes sont positionnées de façon indépendante, derrière la façade pour permettre des ajustements de façade sans affecter la structure. Elles sont appliquées selon une

grille régulière de 7,5 x 7,5 mètres, alignée sur le parking sous-jacent. Cette grille peut être divisée en espaces de 7,5 x 7,5 mètres ou de 2 x 3,75 x 7,5 mètres ou en dimensions dérivées.

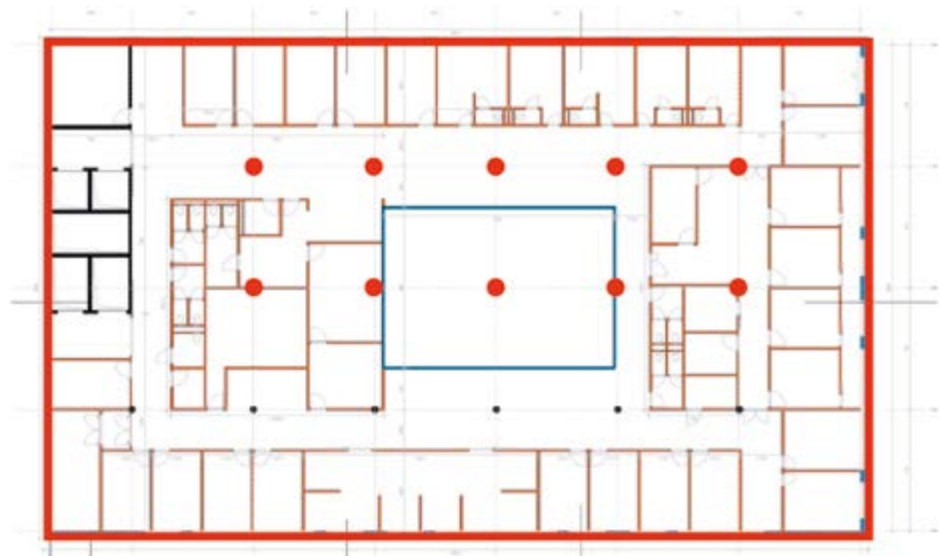


Figure 147: Grille de conception (Source : archipelago architects)

La position de la distribution horizontale des techniques est alignée sur les zones de circulation et, grâce au plancher

champignon, elle peut être facilement modifiée. Deux gaines verticales principales sont prévues pour la distribution verticale des techniques. Celles-ci sont implantées centralement, de sorte que la longueur des gaines peut être limitée.



Figure 148: Position du réseau de ventilation (Source : archipelago architects)

En outre, des zones prédécoupées pour les gaines techniques ont été prévues dans les dalles de plancher en prévision de futurs changements d'utilisation. Ces découpes sont positionnées à côté de la structure porteuse afin que les noyaux

fixes soient regroupés et n'entravent pas la réaffectation. L'orientation des gaines techniques et de la structure est perpendiculaire à la façade et aux zones de circulation, afin de ne pas entraver une extension des locaux.

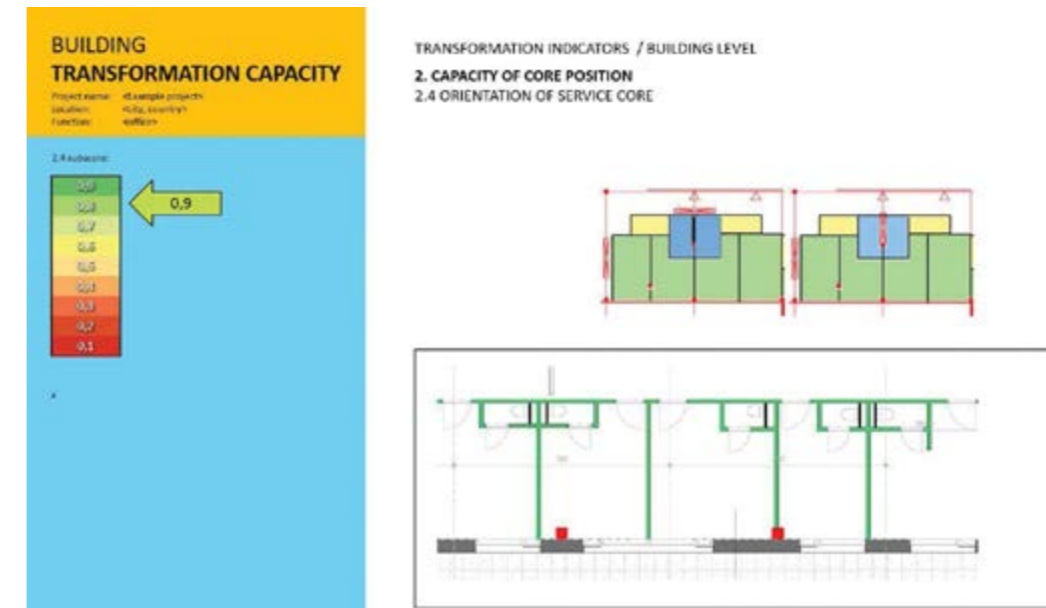


Figure 149: Analyse de la position des gaines techniques (Source : archipelago architects)

4.4.1.3 Capacité

Les zones pour les techniques, tant en distribution verticale qu'horizontale, sont surdimensionnées afin que des techniques puissent être ajoutées ultérieurement et/ou que les

techniques actuelles puissent être facilement supprimées ou modifiées. La hauteur libre entre les dalles de plancher est telle qu'il y a de la place pour des techniques supplémentaires au plafond.

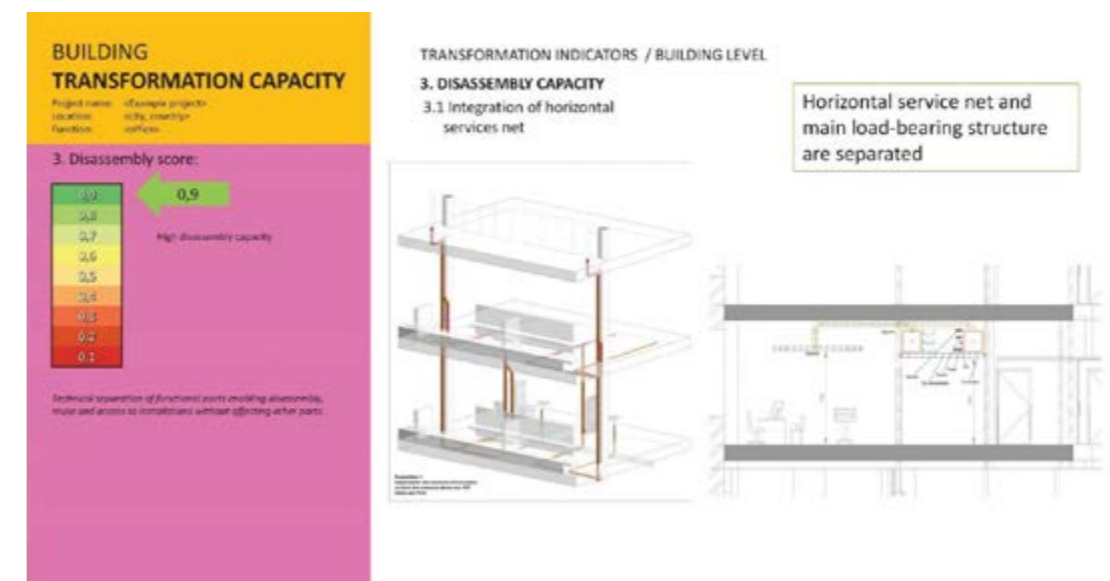


Figure 150: Les conduites et gaines techniques sont séparées de la structure porteuse, ce qui permet de les adapter facilement. L'espace pour la distribution horizontale et verticale est surdimensionné, facilitant les modifications ultérieures. (Source : archipelago architects)

La charge structurelle des dalles de plancher est dimensionnée sur la base du programme hospitalier (3,0kN/m² de charge fixe et 5,0kN/m² de charge utile), ce qui signifie que la plupart des autres programmes courants sont également possibles.

Deux cages d'escalier diamétralement opposées sont prévues, chacune ayant une largeur utile de 120 cm. Ainsi, les distances d'évacuation conviennent à la plupart des types d'occupation et la capacité d'évacuation permet également d'autres occupations. Compte tenu de la fonction actuelle, 3 ascenseurs pour personnes sont prévus ainsi que 2 ascenseurs pour lits. Ici aussi, la capacité est suffisamment importante pour d'autres programmes d'occupation.

4.4.1.4 Potentiel de désassemblage et de réemploi

- Techniques accessibles : toutes les techniques sont librement accessibles par le plafond suspendu. Les techniques sont regroupées dans les zones de circulation et dans les principales gaines verticales ;

- Sanitaires : la conception initiale prévoit des éléments sanitaires entièrement modulaires et indépendants des parois. Les éléments peuvent être facilement démontés et repositionnés. Voir l'exemple de la [section 3.2.1.1](#) (indépendance fonctionnelle) concernant une cellule sanitaire démontable ;
- Configuration favorisant le démontage et l'interchangeabilité : les parois intérieures à connexion velcro sont autoportantes et faciles à déplacer. La position des portes dans les parois intérieures est coordonnée avec le module des panneaux de finition des parois intérieures déplaçables. L'aménagement des bureaux est modulaire, facile à monter et à démonter et interchangeable entre les différents espaces de bureaux/consultation.
- Mobilier : le mobilier des espaces d'attente est modulaire et facilement reconfigurable en fonction des différents besoins.

En fonction du programme, un hôpital de jour, des matériaux de finition robustes ont été prévus, qui se prêtent au réemploi.

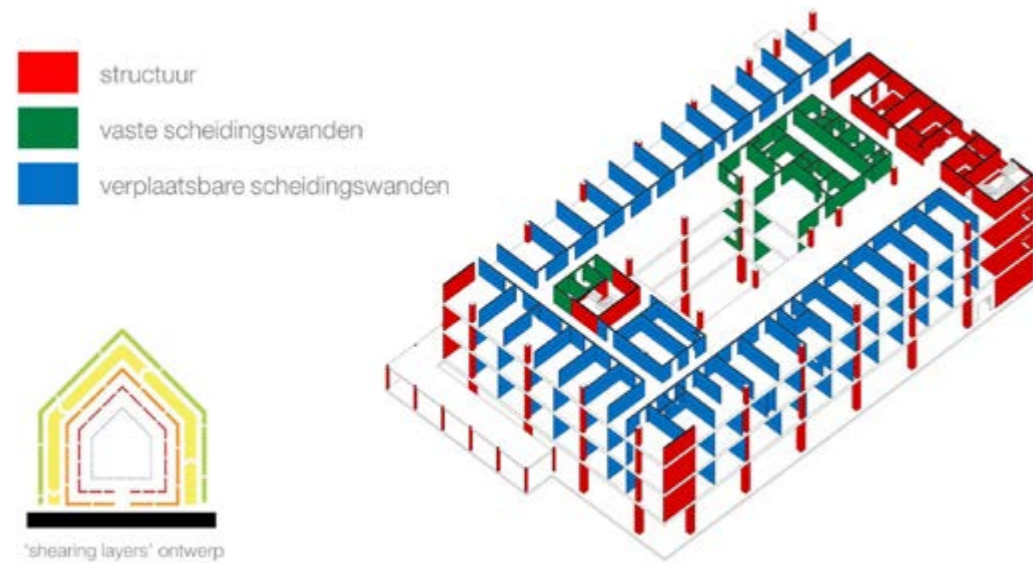


Figure 151 : En fonction de la durée de vie fonctionnelle prévue, le type de paroi a été différencié. (Source : archipelago architects)

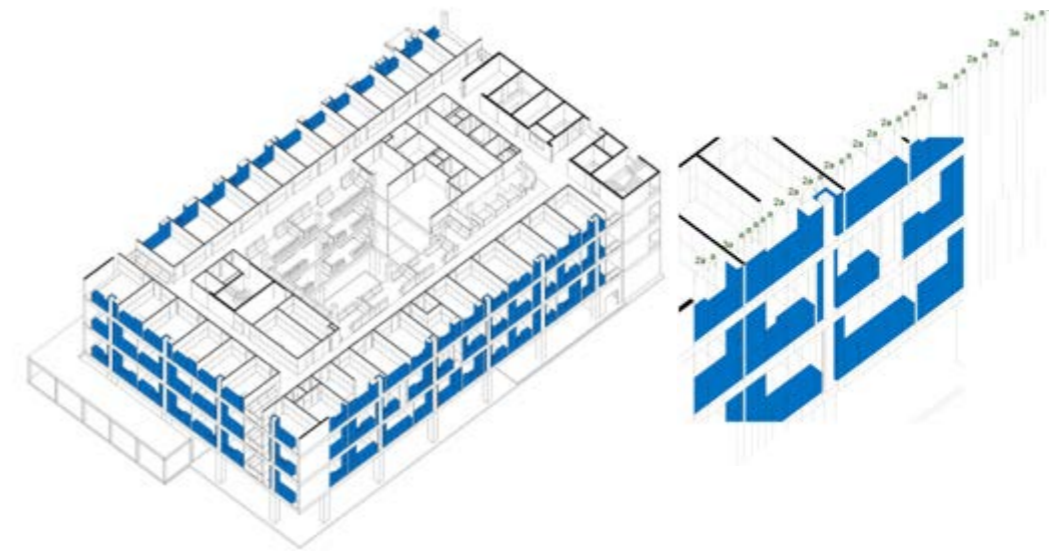


Figure 152 : Les équipements « fixes », modulaires et entièrement démontables, sont placés le long de la façade. (détail à droite) (Source : archipelago architects)

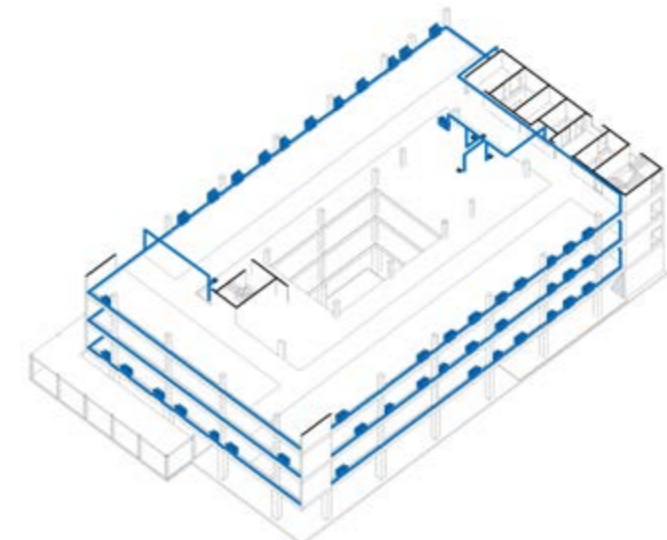


Figure 153 : L'alimentation et l'évacuation des installations sanitaires sont assurées le long de la façade selon le principe du « plug and play ». (Source : archipelago architects)



Figure 154 : Un élément modulaire intégrant un lavabo. (Source : archipelago architects)

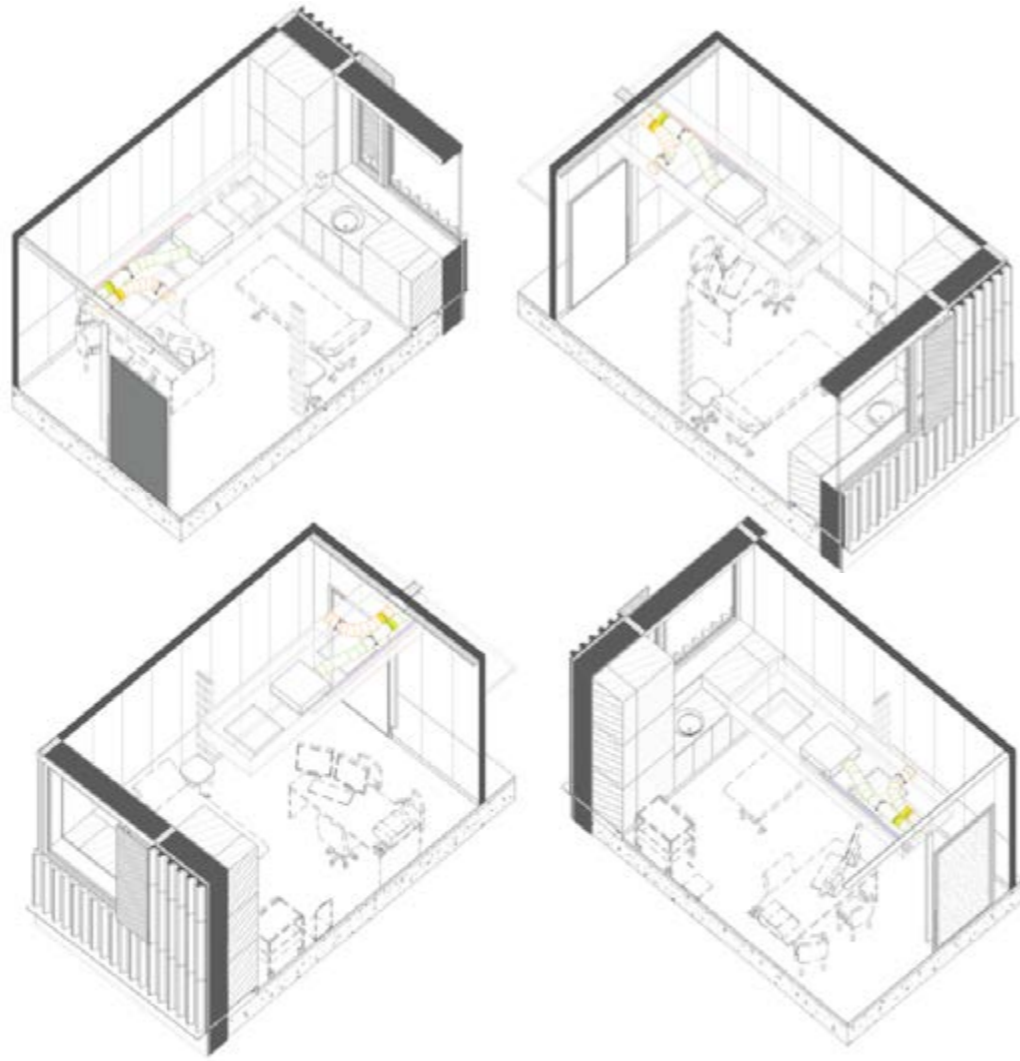


Figure 155 : Axométrie des espaces de consultation modulaires (Source : archipelago architects)



Figure 156 : L'îlot technique standardisé contient tous les équipements techniques nécessaires comme les luminaires et la ventilation (Source : archipelago architects)

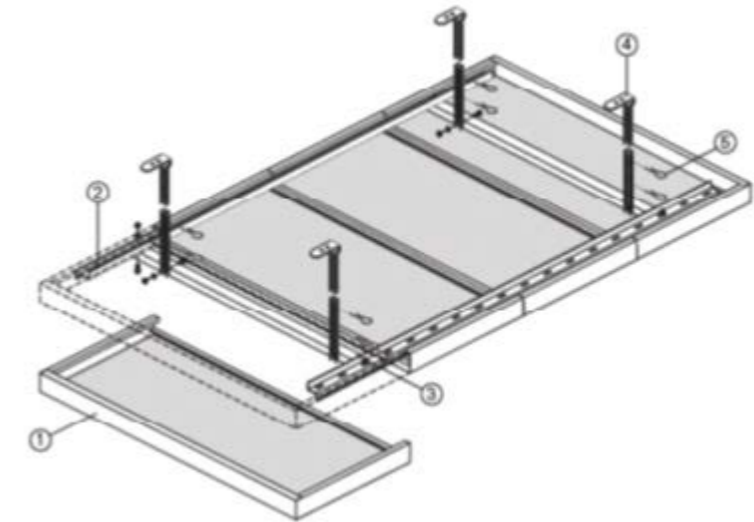


Figure 157 : L'îlot technique standardisé est facilement démontable pour faciliter l'entretien et les réparations (Source : archipelago architects)



Figure 158 : Matériau perforé utilisé pour la ventilation (Source : archipelago architects)

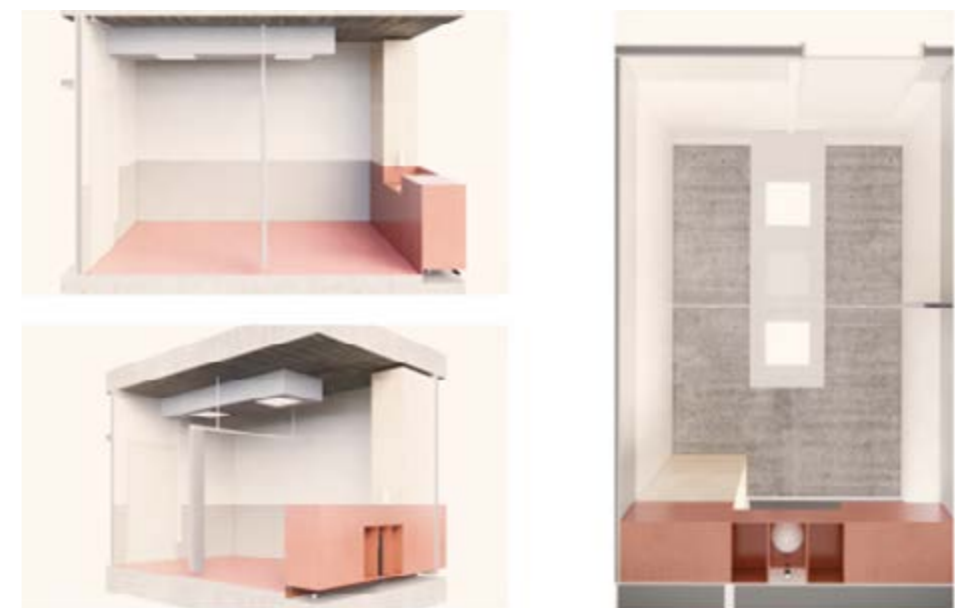


Figure 159 : îlot technique standardisé : en utilisant un îlot, la masse thermique reste disponible et des cloisons intermédiaires peuvent être librement retirées ou ajoutées. (Source : archipelago architects)

4.4.2 Réversibilité technique

4.4.2.1 Indépendance fonctionnelle

La façade est conçue à partir d'éléments préfabriqués, fixés à la structure porteuse principale par des connexions sèches. La structure de la façade est ainsi complètement découplée

de la structure porteuse. Les techniques sont également conçues comme indépendantes des modules de façade et incluses dans un « socle technique » qui peut être intégré le long de la façade dans un élément modulaire (de finition).

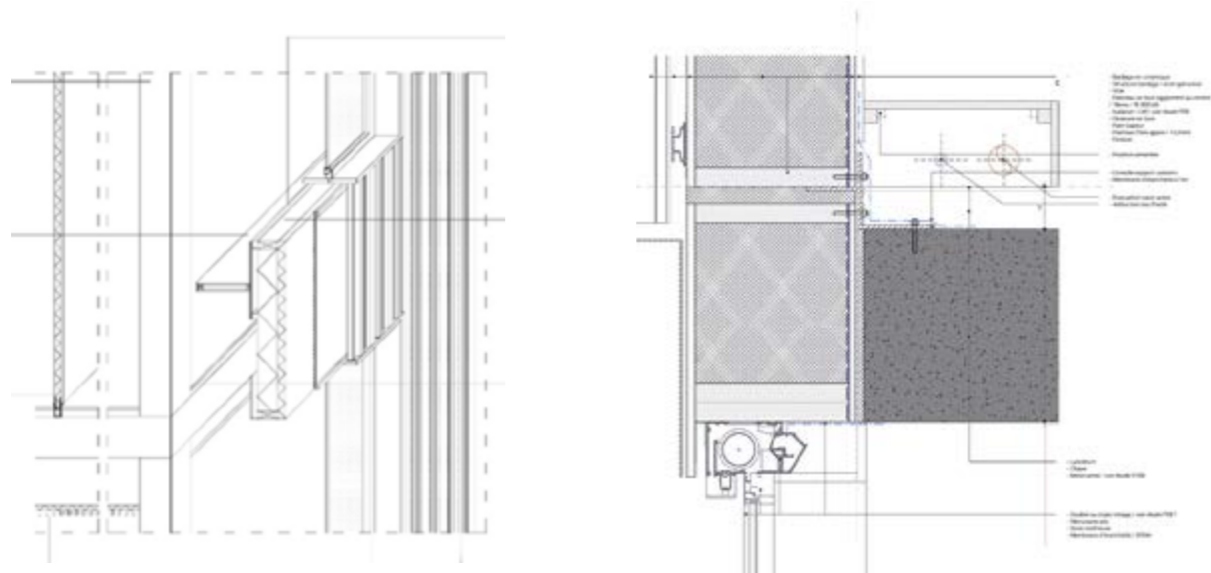


Figure 160 : Analyse de l'accessibilité de la connexion sèche des éléments de façade à la structure porteuse. Moyennant une intervention limitée sur la finition, ces connexions sont facilement accessibles. (Source : archipelago architects)

Les parois intérieures, caractérisée par des connexion velcro, sont complètement indépendantes et détachées de la structure porteuse. Elles sont composées d'un système de support indépendant, sur lequel sont fixés - de manière amovible - des panneaux de finition. Les panneaux de finition peuvent être facilement retirés et remplacés, tout en conservant le système de support.

Le réseau de distribution horizontal des techniques est complètement séparé de la structure porteuse et positionné de manière à ne pas entraver le déplacement des parois intérieures.

4.4.2.2 Regroupement fonctionnel

Le bâtiment a été conçu comme une construction avec un degré élevé de préfabrication. À l'exception de la structure en béton, tous les éléments sont constitués de systèmes préfabriqués. La séquence de montage est telle que le démontage ultérieur peut être effectué de manière logique,

conformément à la durée de vie fonctionnelle prévue des éléments. La façade réversible se compose d'un module de façade préfabriqué, avec des éléments tels que la menuiserie extérieure et les protections solaires déjà intégrés au module préfabriqué. Ces éléments peuvent donc être démontés dans leur intégralité, sans avoir à retirer la finition intérieure et/ou extérieure. Il en va de même pour les parois intérieures, les systèmes de plafonds, les placards, les blocs sanitaires... Les éléments et les composants du bâtiment sont ainsi regroupés de manière réfléchie en tenant compte de leur fonction, de sorte que des modifications puissent être effectuées facilement, sans impact sur les fonctions adjacentes.

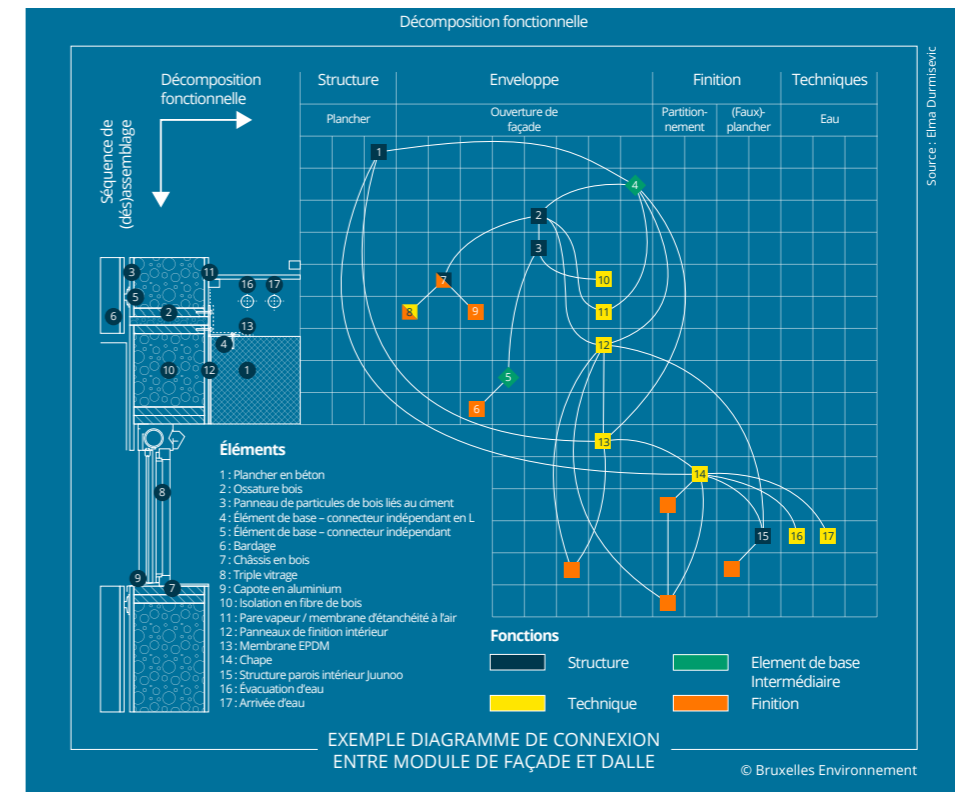


Figure 161 : Les éléments et les composants du bâtiment sont ainsi regroupés de manière réfléchie en tenant compte de leur fonction, de sorte que des modifications puissent être effectuées facilement, sans impact sur les fonctions adjacentes

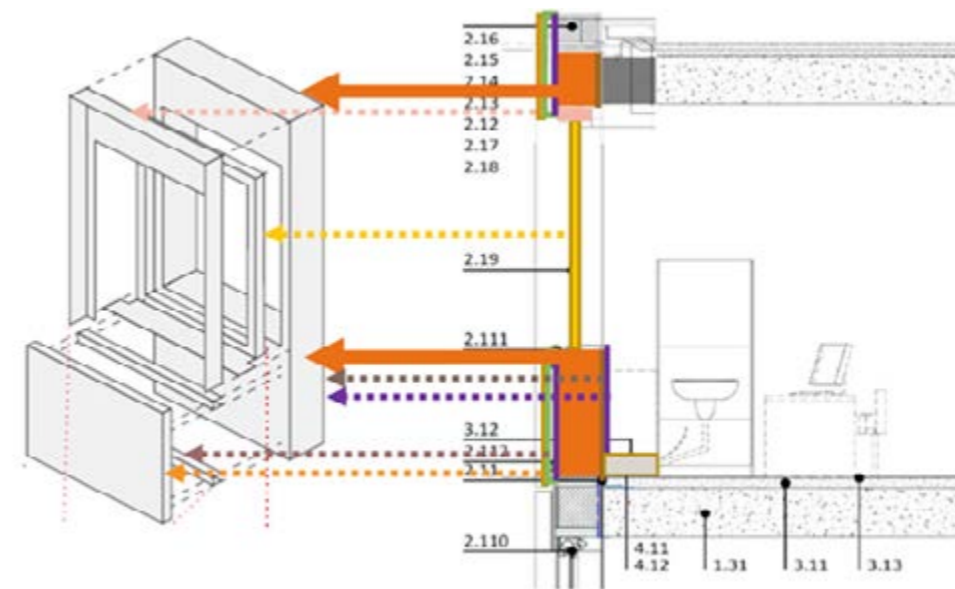


Figure 162 : La préfabrication permet de regrouper les éléments tenant compte de leurs fonctions tout en facilitant le montage et démontage sur chantier (Source : Archipelago architects)

4.4.2.3 Élément de base

Un profilé d'angle fait office d'élément de base indépendant (type 4, voir [section 3.2.2.1](#)) et assure la connexion entre la structure (dalle de plancher) et les panneaux de façade. Tous

les autres éléments y sont reliés de manière démontable. Le montage de l'élément de base se fait presque partout directement sur la structure en béton, de sorte que la dépendance au démontage est faible.



Figure 163 : Élément de base utilisé pour connecter le parement au module de façade (Source : Archipelago architects, Elma Durmisevic)

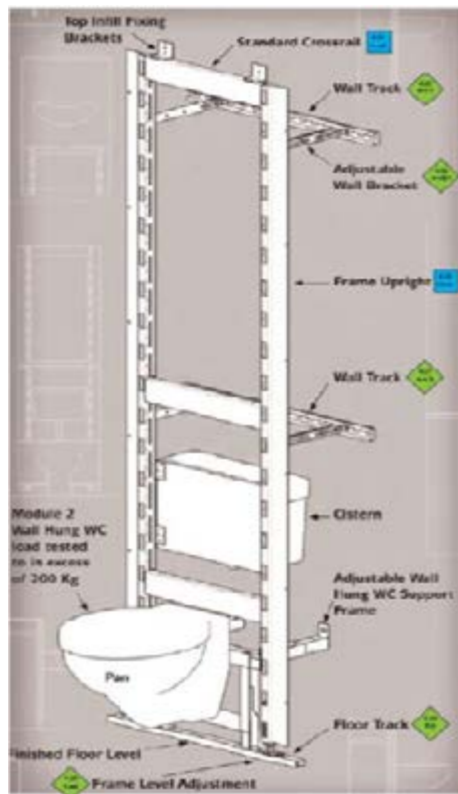


Figure 164 : Eléments de base utilisés pour connecter le système sanitaire au plancher et à la paroi porteuse (Source : Archipelago architects, Elma Durmisevic)

4.4.2.4 Hiérarchie de (dé)montage

Le (dé)montage est effectué en fonction de la durée de vie fonctionnelle prévue des différents éléments (voir ci-dessus). Lorsqu'une intervention doit avoir lieu sur un élément dont la durée de vie prévue est plus longue, on a veillé à ce que ces connexions soient également facilement accessibles. Par exemple, les profilés de connexion (voir élément de base indépendant ci-dessus) avec lesquels les éléments de façade sont fixés à la structure en béton, sont facilement accessibles par les fosses pour convecteur.

Une indépendance maximale des éléments a été recherchée. Les éléments et les différentes fonctions sont couplés au maximum les uns aux autres, de sorte que chaque matériau ne remplit généralement qu'une seule fonction et qu'il n'y a pas de combinaison, par exemple, de la fonction de support et de la fonction de séparation. Un exemple en est la façade

préfabriquée non porteuse, composée d'éléments séparables qui se concentrent chacun sur une seule fonction et sont assemblés de manière détachable les uns des autres et de la structure en béton.

4.4.2.5 Geometrie des bords de produit et des connexions

Les murs intérieurs devront être fréquemment démontés. Les murs JUUNOO (voir ci-dessus) présentent une configuration linéaire ouverte des bords du produit, car les panneaux de finition sont placés à froid les uns à côté des autres et fixés avec du Velcro industriel.

La finition de la façade est assurée par des carreaux de façade en céramique, qui sont placés sans chevauchement et fixés à sec. Ces éléments ont également une configuration linéaire ouverte.

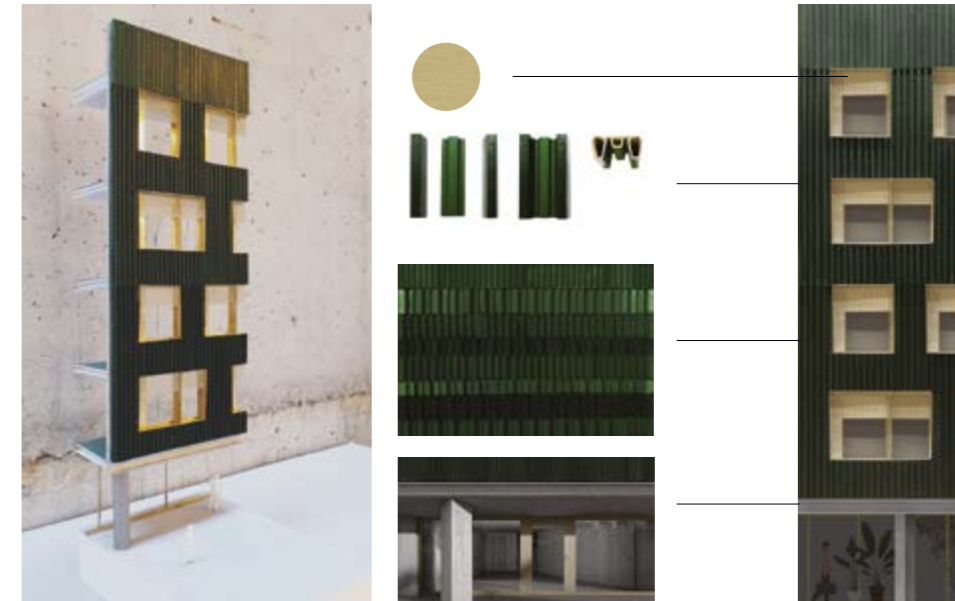


Figure 165 : La finition de la façade est constituée de cassettes en bois préfabriquées, habillées de carreaux en céramique. Tant au niveau des éléments que des composants, une démontabilité maximale a été visée. Toutes les connexions sont vissées. (Source : archipelago architects/NU architecturatelier)

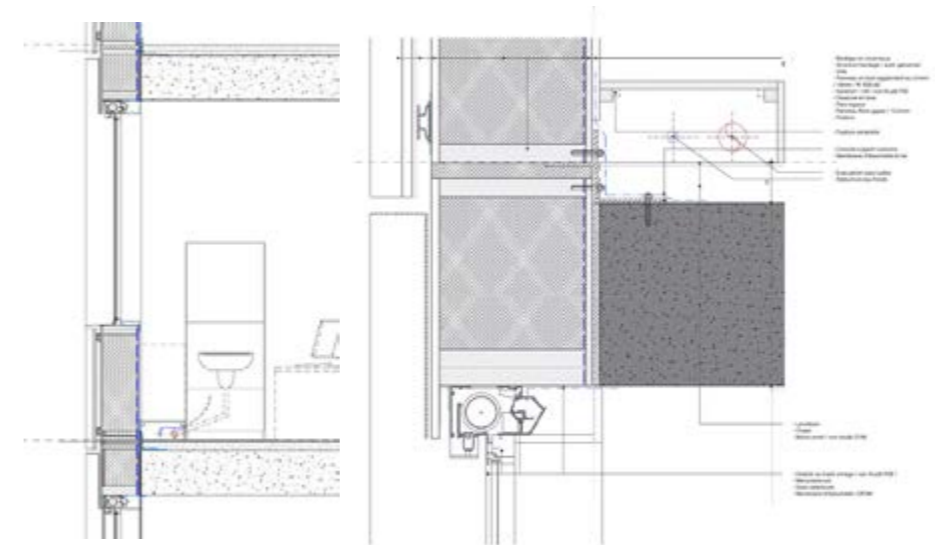


Figure 166 : Détail de la façade au niveau des éléments et des composants. (Source : archipelago architects)

4.4.2.6 Séquence d'assemblage

La plupart des éléments sont directement connectés à l'élément de base et ont une faible dépendance vis-à-vis des autres éléments, ce qui permet un assemblage et un désassemblage parallèles.

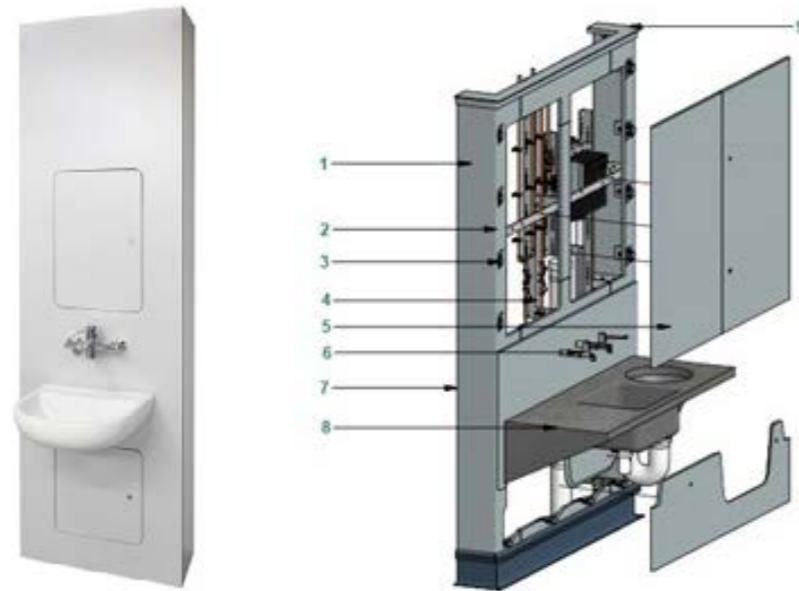


Figure 167 : Système sanitaire modulaire et démontable. Ces systèmes sont autonomes par rapport aux murs et sont entièrement démontables. (Source: IPS systems)



Figure 168 : Système de parois intérieures modulaire et démontable. Pose de la structure porteuse de la paroi dont les montants sont réglables en hauteur. (Source: JUUNOO)

4.4.2.7 Types de connexions

Des connexions sèches sont utilisées pour l'assemblage des éléments de façade, l'assemblage des éléments céramiques pour la finition de la façade ainsi que pour la finition intérieure – parois déplaçables, système de parois sanitaire... Dans le cas des planchers en céramique, le ciment colle implique une liaison chimique.

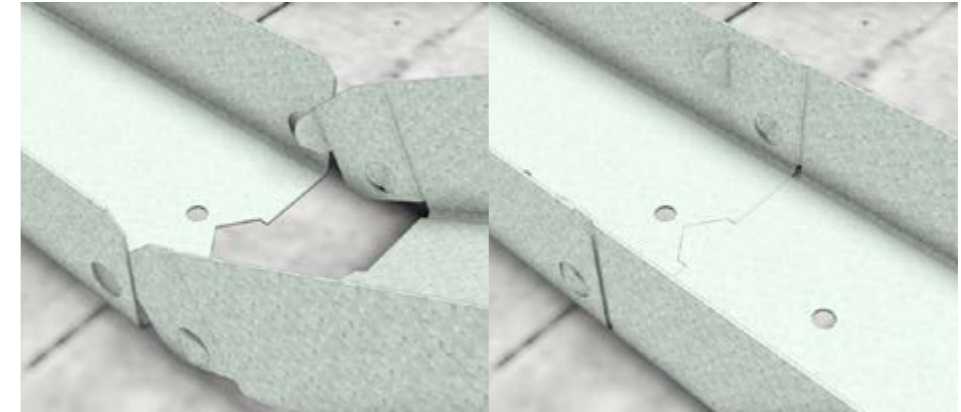


Figure 169 : Système de parois intérieures modulaire et démontable. Connexion sèche par emboîtement (Source: JUUNOO)



Figure 170 : Système de parois intérieures modulaire et démontable. Les panneaux sont fixés avec du Velcro et s'emboîtent les uns dans les autres. (Source: JUUNOO)

FICHE TECHNIQUE

- Maître d'ouvrage: Hôpitaux Iris Sud
- Architectes: archipelago, NU architecturatelier
- Bureaux d'études: BUUR, Ellyps, MATRIciel MC-carré, COSEP
- Entrepreneur général: non encore connu
- Calendrier: appel d'offres 2022



02 775 75 75 · ENVIRONNEMENT · BRUSSELS



Date de publication : juin 2023

Ed. responsable: Ed. resp./Ver. uit.: Bruxelles Environnement/Leefmilieu Brussel Havenlaan 86C/3000 Avenue du Port - Brussel 1000 Bruxelles

Rédaction: Basé sur l'ouvrage *'Design strategies for reversible buildings'* rédigé par Dr. Elma Durmisevic. Le contenu de cette publication (en ce compris les textes, le design, les marques, les illustrations, les logos, les images, les données et les éléments similaires) est protégé par les droits de propriété intellectuelle. Les droits de propriété intellectuelle appartiennent à Bruxelles Environnement et/ou à d'autres ayants droit. L'utilisation de ce guide n'équivaut pas à une cession de droits de propriété intellectuelle. Bruxelles Environnement concède aux utilisateurs une licence gratuite, mondiale, non exclusive et perpétuelle d'utilisation, de consultation, de téléchargement, de communication au public et de distribution gratuite, à condition que les ayants droit et la source du contenu soient mentionnés.

Toutes les images de ce livre ont été reproduites avec la connaissance et le consentement préalable des artistes concernés, et aucune responsabilité n'est acceptée par le producteur, l'éditeur ou l'imprimeur pour toute violation du droit d'auteur ou autre, découlant du contenu de cette publication. Tous les efforts ont été faits pour s'assurer que les crédits correspondent aux informations fournies.

La licence d'utilisation concédée ne comprend pas les droits d'adapter et traduire cette publication. Il est interdit de modifier ce Guide ou de créer des outils dérivatifs sans avoir obtenu l'autorisation préalable, expresse et écrite de Bruxelles Environnement. De telles demandes peuvent être adressées à batimentreversible@environnement.brussels. Les ayants droit ne peuvent être tenus responsables des dommages directs ou indirects qui pourraient résulter de la consultation ou de l'utilisation des informations de ce site, ou des sites extérieurs auxquels ce site renvoie. L'octroi des droits au titre de cette licence ne peut donc en aucun cas affecter la responsabilité des ayants droit. Toute utilisation du site et de la Checklist se fait entièrement aux risques et périls de l'utilisateur. Enfin, les ayants droit ne peuvent être tenus responsables des problèmes de disponibilité des informations dus à des erreurs techniques ou à des interruptions.

Coordination: Caroline Henrotay et Molly Steinlage

Comité de lecture: Nathalie Perrault, Ibram Nobels, Emilie Gobbo, Sophie Bronchart, Anne Paduart

Photos: Cover (sens horlogique): Patch22 à Amsterdam par Lemniskade, Photo: Luuk KRAMER; Gare Maritime à Bruxelles par EXTENSA, Neutelings Riedijk Architecten, ALTSTADT, Bureau Bouwtechniek, Photo: Toon GROBET; Gare Maritime à Bruxelles par EXTENSA, Neutelings Riedijk Architecten, ALTSTADT, Bureau Bouwtechniek, Photo: Jansen AG; La Cour de Justice temporaire d'Amsterdam par cepezed, Photo: Leon VAN WOERKOM; Circular Retrofit Lab à Bruxelles par KADERSTUDIO, Photo: Architectural Engineering, VUB.

Gare Maritime in Brussel door EXTENSA, Neutelings Riedijk Architecten, ALTSTADT, Bureau Bouwtechniek, Foto: Toon GROBET; Tila Housing Block in Helsinki door Talli Architecture & Design, Architect: Pia ILONEN, Foto: Stefan BREMER; Tila Housing Block in Helsinki door Talli Architecture & Design, Architect: Pia ILONEN, Foto: Stefan BREMER; Circular Retrofit Lab in Brussel door KADERSTUDIO, Foto: Architectural Engineering, VUB.

Fig 4 : p.8 VMRG; Fig 8, p.13 gettyimages; Fig 17 : p.19 Stefan BREMER; Fig 19: p.20 Annick VERMINNEN; Fig 21 & 22: p.21 Luuk KRAMER; Fig 29 : p.26 Architectural Engineering, VUB; Fig 34 : p.29 gettyimages; Fig 35 : p.30 Systimber; Fig 39 : p.32 PBS Holland; Fig 40 : p.33 Crowl Marketing & Pro Builder Media; Fig 41 : p.33 steelconstruction.info; Fig 42 : p.34 Bouwwereld.nl; Fig 44 : p.35 Juke Post XXarchitecten; Fig 62 : p.46 gettyimages; Fig 63 : p.47 gettyimages; Fig 66 : p.48 vloerbekleding.net; Fig 68 : p.49 Elma DURMISEVIC; Fig 69 : p.49 Elma DURMISEVIC; Fig 70 : p.49 Elma DURMISEVIC; Fig 71 : p.50 Caroline MORIZUR; Fig 72 : p.50 Elma DURMISEVIC; Fig 73 : p.50 l'Atelier de l'Avenir; Fig 74 : p.50 Elma DURMISEVIC; Fig 75 : p.50 Elma DURMISEVIC; Fig 76 : p.51 Elma DURMISEVIC; Fig 77 : p.51 Elma DURMISEVIC; Fig 78 : p.51 FelixWood; Fig 79 : p.51 Rotor; Fig 80 : p.51 Elma DURMISEVIC; Fig 81 : p.51 Elma DURMISEVIC; Fig 83 : p.52 Leon VAN WOERKOM; Fig 87 : p.59 Caroline MORIZUR; Fig 88 : p.59 Caroline MORIZUR; Fig 89 : p.60 Caroline MORIZUR; Fig 90 : p.60 KARBON; Fig 91 : p.61 Caroline MORIZUR; Fig 92 : p.61 Caroline MORIZUR; Fig 93 : p.62 Caroline MORIZUR; Fig 94 : p.62 Caroline MORIZUR; Fig 95 : p.63 Caroline MORIZUR; Fig 98 : p.64 Caroline MORIZUR; Fig 99 : p.65 Architectural Engineering, VUB; Fig 100 : p.66 Architectural Engineering, VUB; Fig 101 : p.67 Architectural Engineering, VUB; Fig 102 : p.67 Juunoo, Geberit, Saint-Gobain, Architectural Engineering, VUB; Fig 103 : p.68 Architectural Engineering, VUB; Fig 104 : p.68 Architectural Engineering, VUB; Fig 105 : p.69 Architectural Engineering, VUB; Fig 106 : p.69 Architectural Engineering, VUB; Fig 107 : p.70 Geberit; Fig 108 : p.70 Architectural Engineering, VUB; Fig 109 : p.71 Saint-Gobain, Architectural Engineering, VUB; Fig 110 : p.71 Architectural Engineering, VUB; Fig 111 : p.72 Geberit; Fig 112 : p.72 Geberit, Architectural Engineering, VUB; Fig 113 : p.72 JUUNOO; Fig 114 : p.74 Jansen AG; Fig 115 & 116 : p.74 Jansen AG; Fig 117 : p.75 Jansen AG; Fig 118 : p.75 Jansen AG; Fig 119 : p.76 Blonkstaal; Fig 120 : p.76 Blonkstaal; Fig 121 : p.77 Blonkstaal; Fig 122 : p.77 Jansen AG; Fig 123 : p.78 Bureau Bouwtechniek; Fig 124 : p.78 Tim FISHER; Fig 125 : p.79 Toon GROBET; Fig 126 : p.79 Toon GROBET; Fig 127 : p.79 Lootens, Toon GROBET; Fig 128 : p.80 Jansen AG; Fig 129 : p.80 Jansen AG; Fig 130 : p.81 Jansen AG; Fig 131 : p.81 Jansen AG; Fig 132 : p.82 Toon GROBET; Fig 133 : p.82 Toon GROBET; Fig 134 : p.83 Lootens, Toon GROBET; Fig 135 : p.84 Tim FISHER; Fig 136 : p.84 Jansen AG; Fig 137 : p.84 Jansen AG; Fig 138 : p.84 Jansen AG; Fig 139 : p.85 Jansen AG; Fig 140 : p.86 archipelago architects; Fig 141 : p.87 archipelago architects; Fig 142 : p.87 archipelago architects; Fig 143 : p.88 archipelago architects; Fig 144 : p.88 archipelago architects; Fig 145 : p.89 archipelago architects; Fig 146 : p.89 archipelago architects; Fig 147 : p.90 archipelago architects; Fig 148 : p.90 archipelago architects; Fig 149 : p.91 archipelago architects; Fig 150 : p.91 archipelago architects; Fig 151 : p.92 archipelago architects; Fig 152 : p.93 archipelago architects; Fig 153 : p.93 archipelago architects; Fig 154 : p.93 archipelago architects; Fig 155 : p.94 archipelago architects; Fig 156 : p.94 archipelago architects; Fig 157 : p.95 archipelago architects; Fig 158 : p.95 archipelago architects; Fig 159 : p.95 archipelago architects; Fig 160 : p.96 archipelago architects; Fig 162 : p.97 archipelago architects; Fig 163 : p.98 archipelago architects, Elma DURMISEVIC; Fig 164 : p.98 archipelago architects, Elma DURMISEVIC; Fig 165 : p.99 archipelago architects, NU architectuuratelier; Fig 166 : p.99 archipelago architects; Fig 167 : p.100 IPS systems; Fig 168 : p.100 Juunoo; 169 : p.101 Juunoo; 170 : p.101 Juunoo.

p. 57 : Patch22 in Amsterdam door Lemniskade, Foto: Luuk KRAMER; BRIC in Brussel door efp, Map Architecture, KARBON, Foto: Caroline MORIZUR; Gare Maritime in Brussel door EXTENSA, Neutelings Riedijk Architecten, ALTSTADT, Bureau Bouwtechniek, Foto: Toon GROBET; Circular Retrofit Lab in Brussel door KADERSTUDIO, Foto: Architectural Engineering, VUB; Het paleis van justitie van Amsterdam door cepezed, Foto: Leon VAN WOERKOM; BRIC in Brussel door efp, Map Architecture, KARBON, Foto: Caroline MORIZUR.

Leefmilieu Brussel : Fig 1 : p.6, Fig 2 : p.7, Fig 3 : p.8, Fig 5 : p.10, Fig 6 : p.11, Fig 7 : p.12, Fig 9 : p.13, Fig 10 : p.14, Fig 11 : p.14, Fig 12 : p.15, Fig 13 : p.16, Fig 14 : p.16, Fig 15 : p.17, Fig 16 : p.19, Fig 18 : p.20, Fig 20 : p.21, Fig 23 : p.22, Fig 24 : p.23, Fig 25 : p.23, Fig 26 : p.24, Fig 27 : p.25, Fig 28 : p.25, Fig 30 : p.26, Fig 31 : p.27, Fig 32 : p.28, Fig 33 : p.29, Fig 36 : p.30, Fig 37 : p.31, Fig 38 : p.32, Fig 43 : p.34, Fig 45 : p.35, Fig 46 : p.36, Fig 47 : p.37, Fig 48 : p.37, Fig 49 : p.38, Fig 50 : p.38, Fig 51 : p.39, Fig 52 : p.40, Fig 53 : p.42, Fig 54 : p.41, Fig 55 : p.42, Fig 56 : p.43, Fig 57 : p.43, Fig 58 : p.44, Fig 59 : p.45, Fig 60 : p.45, Fig 61 : p.46, Fig 64 : p.47, Fig 65 : p.48, Fig 67 : p.49, Fig 82 : p.52, Fig 84 : p.53, Fig 85 : p.54, Fig 86 : p.54, Fig 96 : p.63; Fig 97 : p.63, Fig 161 : p.97.

Back Cover: Circular Retrofit Lab à Bruxelles par KADERSTUDIO, Photo: Architectural Engineering, VUB.

Retrouvez-nous sur: www.environnement.brussels

© Bruxelles Environnement - juin 2023