

**VERS UNE
CONSTRUCTION
RÉVERSIBLE
PRAGMATIQUE**

Énoncé théorique

École Polytechnique Fédérale de Lausanne

Bruno Känel

Sous la direction de:

Prof. Corentin Fivet, responsable de l'Énoncé théorique

Prof. Martin Fröhlich, directeur pédagogique

Tiago Borges, maître EPFL



2022 Bruno Känel

Ce document est mis à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution (CC BY <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).

Vous pouvez utiliser, distribuer et reproduire le matériel par tous moyens et sous tous formats, à condition de créditer l'auteur de l'œuvre. Les contenus provenant de sources externes ne sont pas soumis à la Licence CC BY et leur utilisation nécessite l'autorisation de leurs auteurs.

**VERS UNE
CONSTRUCTION
RÉVERSIBLE
PRAGMATIQUE**

TABLE DES MATIÈRES

Introduction et plan de l'ouvrage	2	Projet de master	86
I. L'utopie de la construction réversible dogmatique	10	Conclusion	90
La réversibilité technique	10	Bibliographies	94
La réversibilité spatiale	17	Crédits des figures	98
Utopie de la construction réversible dogmatique	19	Annexes	100
Synthèse	22		
II. Le retour à une construction réversible économiquement viable	26		
Pénurie de matériaux	28		
L'économie de la fonctionnalité	30		
Vendre les bénéfices de la construction réversible	32		
Synthèse	34		
III. La nécessité d'une construction réversible contre l'obsolescence	38		
Obsolescence des bâtiments et de ses composants	38		
Espérance de vie des bâtiments en Suisse	42		
La construction réversible contre l'obsolescence	45		
Synthèse	48		
IV. La construction réversible ciblée	52		
Exemples	55		
Synthèse	64		
V. La construction réversible au service d'autres stratégies	68		
Halle 118 - Baubüro InSitu	72		
Synthèse	82		

Fig.1 (page suivante)
 Trajectories of elements - Pavillon du Japon à la Biennale de Venise 2021.
 Le concept a été de démonter une maison japonaise ordinaire en bois des années 1950, pour la transporter jusqu'à Venise et la réparer avec des artisans locaux. Le but est de faire la démonstration que l'une des ressources principales de la planète est celle des constructions existantes.



1984

1966

ca.1965

1964

INTRODUCTION ET PLAN DE L'OUVRAGE

¹ Eurostat. Chiffre clé de l'Europe, édition 2016

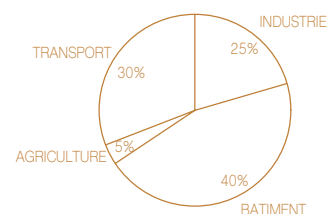


Fig.2 Consommation d'énergie par secteur

Le secteur de la construction est celui consommant le plus d'énergie (40%) devant les transports (30%) et l'industrie (25%)¹ (fig.2). Dans ces 40% sont comprises deux types d'énergies : l'énergie grise nécessaire pour construire le bâtiment et l'énergie opérationnelle, nécessaire pour exploiter le bâtiment (chauffage, refroidissement, ventilation, éclairages, appareils).

Récemment, des efforts considérables ont été entrepris en Suisse afin de diminuer cette dernière, mais peu d'actions ont été menées pour réduire la consommation d'énergie grise. C'est pourtant sur ce point que la marge de progression est la plus grande afin de réduire l'impact du secteur de la construction sur notre planète, que ce soit en termes de génération de déchets, d'épuisement des ressources ou de pollution des sols et de l'air.

Dans cette optique, le concept d'économie circulaire est la piste la plus prometteuse pour sortir du schéma traditionnel extraction - production - utilisation - élimination. Dans ce nouveau schéma (fig.3), l'application du réemploi permet de réutiliser des composants de bâtiment afin de diminuer la génération de déchets et de réduire la consommation de nouvelles ressources. Le terme réemploi tel qu'utilisé dans ce travail désigne le fait de récupérer un « déchet » lors d'une déconstruction et de lui trouver un nouvel usage dans un autre projet.

Sous ce nouveau paradigme, les villes passent alors du statut de générateur de déchets à celui de générateur de ressources. Dès lors, on arrêterait de construire des bâtiments avec des composants neufs mais on n'utiliserait que le « gisement » urbain existant à disposition ou l'on transformerait les

bâtiments pour les besoins actuels sans les détruire. Toutefois, même si nous atteignons un jour ce monde idéal, il semble hautement improbable que nous cessions totalement de produire des éléments neufs. En effet, l'histoire nous a démontré que le futur est difficilement prévisible, que la technologie et la société ne cesseront jamais d'évoluer, et par conséquent nos bâtiments aussi.

Afin de créer un secteur du bâtiment plus durable, le réemploi est donc amené à prendre une part plus importante de la construction. Pour accompagner la mise en place de cette économie circulaire, deux outils principaux doivent se généraliser: la déconstruction sélective et la conception en vue de la déconstruction.

La déconstruction sélective consiste à récupérer les composants d'un bâtiment dans le but de sauvegarder leurs caractéristiques mécaniques et esthétiques. Des études estiment aujourd'hui qu'elle coûte entre 17-25% plus cher que la démolition et prend deux à dix fois plus de temps². C'est pour cela que la conception en vue de la déconstruction est nécessaire.

La conception en vue de la déconstruction (*Design for deconstruction*) est un concept qui a été développé par l'industrie manufacturière en réponse au durcissement des réglementations sur la gestion de fin de vie de certains déchets. En Europe c'est notamment depuis la mise en place de la directive européenne année 2000 (directive 2000/53/EC), que les constructeurs automobiles ont été obligé de prendre une responsabilité étendue sur leurs produits. Cette dernière les a incités à prévoir la phase de désassemblage lors de la conception³. À

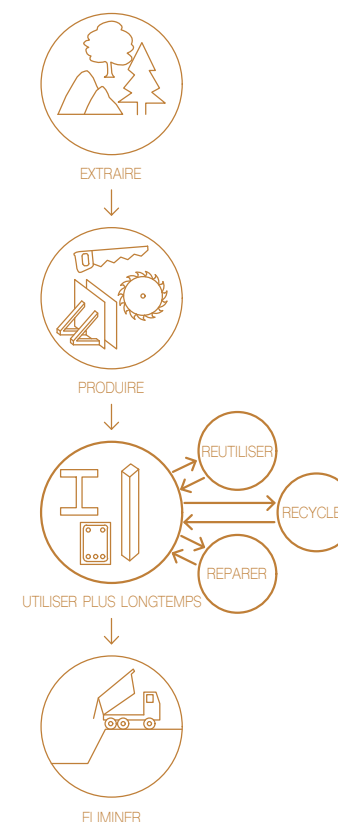


Fig.3 Passer d'une économie linéaire à une économie circulaire

² N. Dantata, A. Touran, J. Wang (2005), *Resources, Conservation and recycling* n° 44 «An analysis of cost and duration of deconstruction and demolition residential buildings in Massachusetts». Elsevier, p. 1-15

³ B. Guy, N. Ciarimboli (2008), *Design for Disassembly in the built environment: a guide to closed-loop design and building*. Hamer Center for Community Design State College, p. 1

⁴ M. Ghyoot, L. Devlieger, L. Billet, A. Warnier (2018), *Déconstruction et réemploi*. Lausanne: Presses Polytechniques et universitaires romandes, p. 142

⁵ C. Küpfer, C. Fivet (2021), *Déconstruction sélective-Construction réversible*. EPFL, p.26

⁶ M. Gauch, C. Matasci, I. Hincapi  , R. H  rler, H. B  ni (2016), *Projekt MatCH - Bau - Material- und Energieressourcen sowie Umweltauswirkungen der baulichen Infrastruktur der Schweiz*. EMPA, OFEV, Berne, St-Gall.

⁷ C. Küpfer, C. Fivet (2021), *Déconstruction sélective- Construction réversible*. EPFL, p.12

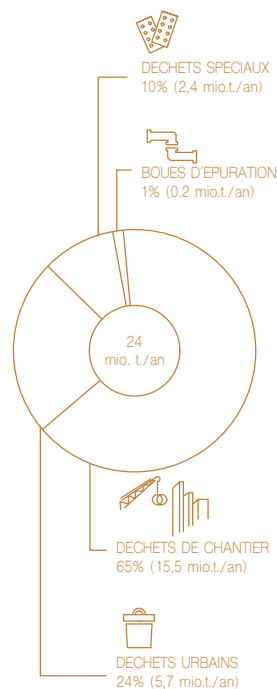


Fig.4 Pourcentage de déchets produits en Suisse par type

partir de 2003, ce principe est étendu aux équipements électriques et électroniques (DEEE)⁴. Cette manière d'anticiper le recyclage ou le réemploi de chaque composant a permis de résoudre les problèmes croissants d'élimination de grande quantité de biens, tout en atteignant une rentabilité économique et en réduisant les risques pour l'environnement.

C'est pour ces même raisons qu'il est intéressant de transposer le *design for deconstruction* aux bâtiments. En effet, en Suisse, le secteur de la construction génère 65% de tous les d  chets⁵ (fig.4). Une grande partie de ceux-ci sont recyclés (75%) mais produisent par ce processus, à nouveau, des émissions de gaz à effet de serre. Le reste (20%) est mis à la décharge et une faible proportion est réemployée (4%)⁶.

Plusieurs termes sont couramment utilisés dans la littérature tels que le *Design for Disassembly* ou le *Design for adaptability*. Dans ce travail on lui pr  f  rera l'appellation de construction réversible afin de pouvoir englober deux types de réversibilité: la réversibilité technique et la réversibilité spatiale⁷.



Fig.5 Démolition destructive de l'ensemble Pruitt-Igoe    Saint-Louis (US) en 1972

PLAN DE L'OUVRAGE

Malgré des principes relativement simples, la construction réversible est un concept quasiment inexistant dans les bureaux d'architecture aujourd'hui. Tout en explorant les différents aspects de cette thématique, cet Énoncé propose cinq caractéristiques nécessaires à son introduction progressive dans le milieu professionnel.

Le premier chapitre s'intéresse aux différents principes qui régissent la construction réversible technique et spatiale. Il permettra de comprendre les enjeux et d'identifier les principaux freins qui limitent leur application dans la profession actuellement. Une de ces contraintes principales est économique et est approfondie dans le deuxième chapitre. Par un bref aperçu historique, il permet de comprendre la relation qu'entretient le réemploi, et par extension la construction réversible, avec la valeur de la matière. Nous nous intéressons ensuite aux différents moyens de retrouver une viabilité économique à cette pratique.

Le troisième chapitre porte sur la construction réversible comme moyen de prévenir l'obsolescence d'un bâtiment et de ses composants. Reprenant l'idée que "le meilleur déchet est celui que l'on ne produit pas", il convient de comprendre pourquoi un bâtiment est démoli ou transformé. Ce chapitre passe en revue les différents facteurs poussant à l'obsolescence. À travers l'analyse de différentes statistiques suisses, nous étudions le rapport entre durée de vie et affectation. Sur la base de ces conclusions, le quatrième chapitre défend le recours à une construction réversible ciblée comme moyen d'accompagner la mise en place d'une économie circulaire dans le

milieu professionnel. Il s'agit d'identifier les stratégies qui peuvent être intégrées assez facilement et à moindre coût, tout en apportant un maximum de gains lors d'une future transformation ou déconstruction.

Le cinquième chapitre élargit le propos en l'incluant dans un contexte plus global. Il condamne l'idée de considérer la construction réversible comme une alternative à d'autres stratégies. Ce n'est pas une méthode permettant de repousser à un horizon plus lointain les problématiques actuelles de génération de déchets et d'épuisement des ressources. Il s'agit d'une approche complémentaire avec celles du réemploi et de l'utilisation de matériaux biosourcés permettant une activité plus durable du secteur de la construction. Prenant l'exemple de la Halle 118 du Baubüro InSitu, il démontre les possibilités de mise en œuvre de ces trois stratégies.

Fig.6 (page suivante)

La yourte est un exemple de construction réversible qui a accompagné l'humanité durant toute son histoire. Elle a été développée par des peuples nomades afin de leur permettre de se déplacer d'un pâturage à un autre.



I. L'UTOPIE DE LA CONSTRUCTION RÉVERSIBLE DOGMATIQUE

⁸ C. Küpfer, C. Fivet (2021), *Déconstruction sélective - Construction réversible*. EPFL, p.12

La construction réversible comprend deux grandes catégories: la réversibilité technique et la réversibilité spatiale.

La première consiste à concevoir des détails constructifs facilitant un démontage et remontage sans perte de qualité technique ou fonctionnelle. De cette manière, on augmente la capacité des composants à pouvoir être désassemblés, réparés, changés, réutilisés ou recyclés⁸. La réversibilité spatiale englobe toutes les stratégies pouvant être mises en œuvre afin de permettre à un bâtiment d'accepter des utilisations différentes et de pouvoir s'adapter à de nouvelles configurations spatiales, avec un minimum de changements ou de transformations de ses composants.

LA RÉVERSIBILITÉ TECHNIQUE

La réversibilité technique n'est pas une idée nouvelle: depuis longtemps, des peuples nomades ont développé des techniques constructives leur permettant de pouvoir facilement construire, déconstruire et transporter leurs habitations, comme par exemple les tipis ou les yourtes. Ces développements répondaient principalement à une nécessité alimentaire: en effet il s'agissait de pouvoir maintenir un déplacement saisonnier afin de chercher de la nourriture et de trouver des endroits sécurisés pour passer l'hiver.



Fig.7 Sanctuaire Ise

Au Japon, des techniques traditionnelles d'assemblage en bois ont été développées en réaction à leur environnement. En effet, le Japon étant sujet à de nombreux tremblements de terre, il était important de pouvoir reconstruire rapidement. De plus, l'omniprésence du bois et le peu de minerai disponible ont forcé les artisans japonais à redoubler

d'ingéniosité pour créer des assemblages nécessitant peu voire pas de fixation mécanique. L'importance de ces traditions est illustrée au sanctuaire Ise: ce temple est déconstruit et reconstruit à neuf tous les 20 ans depuis 1300 ans (fig.7). Ce processus comprend la gestion des ressources en bois dont la plupart des éléments récupérés sont envoyés dans tous le pays afin de renforcer d'autres temples. Il permet aussi la sauvegarde et le transfert du savoir des techniques de charpente traditionnelle japonaise.

La révolution industrielle a participé à faciliter la construction et la déconstruction en standardisant certains composants et leurs assemblages comme ceux des profilés métalliques. Après la deuxième guerre mondiale, le développement de la préfabrication industrielle intéresse des architectes comme Jean Prouvé qui l'applique à la conception de meubles comme de maisons. Avec ses maisons à portiques, ses maisons standard ou ses maisons tropicales, il conçoit des habitations pouvant être fabriquées en série à l'instar de l'industrie automobile. Pour les maisons à portiques réalisées comme habitations d'urgence pour les sinistrés de Lorraine et des Vosges, tous les éléments sont interchangeables et facilement transportables, chaque pièce ne devant pas peser plus de 100kg ni mesurer plus de 4m de long. Ces maisons ont été conçues pour être construites et déconstruites par deux ouvriers seulement⁹ (fig.8).

Depuis, les bâtiments n'ont pas arrêté de se complexifier et comportent toujours plus d'éléments techniques. Un des principes clés de la construction réversible technique est de considérer le bâtiment comme un objet



Fig.8 Construction d'une maison à portiques

⁹ N. Peters (2006), *Jean Prouvé*. Köln: Taschen, p.35

¹⁰ S. Brand (1994), *How buildings learn, What happens after they're built*. New York: Viking Penguin, p.13

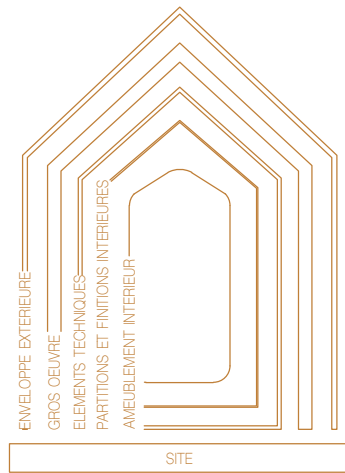


Fig.9 Les couches de Brand. L'épaisseur de la couche est proportionnelle à sa durée de vie.

composé de couches amenées à évoluer dans le temps de manières différentes. Dans son livre¹⁰, Brand identifie six couches (fig.9):

- Le site est intemporel.
- Le gros-œuvre est l'élément le plus durable d'une construction (30-300 ans).
- L'enveloppe a une durée de vie plus courte que la structure car plus exposée aux éléments et à l'usure, aux changements de mode ou de technologie (20 ans).
- Les éléments techniques comprenant les CVSE (Chauffage, Ventilation, Sanitaire, Électricité), communication, informatique, domotique et ascenseurs et escalators suivent l'évolution des technologies et doivent être régulièrement remplacés (7-15 ans).
- Les partitions intérieures, dépendant de l'affectation du bâtiment, peuvent changer très souvent (3-30 ans).
- L'ameublement dépend des modes, des nouveaux usages et peut être remplacé très fréquemment.

Cette manière de percevoir un bâtiment incite à garantir une indépendance mécanique entre ces différentes couches afin d'éviter que le remplacement de l'une amène à la destruction de l'autre. Il s'agit donc de prévoir des connexions accessibles et réversibles entre les couches ayant des durées de vie différentes, de manière à pouvoir remplacer facilement leurs composants lors d'une transformation ou de les récupérer lors d'une déconstruction sélective.

Sur la base de ce concept d'autonomie des couches, B. Guy et N. Ciarimboli identifient dix principes généraux permettant une réversibilité technique¹¹:

- Choisir des matériaux durables.
- Prévoir des connexions accessibles.
- Éviter les connexions chimiques.
- Utiliser des connexions standard qui ne requièrent pas d'équipement spécial pour être démontées.
- Séparer les flux CVSE et les rendre facilement accessibles.
- Concevoir des composants à taille humaine, évitant l'utilisation de trop de moyens mécaniques pour les manipuler.
- Simplicité des formes et de la structure
- Interopérabilité
- Privilégier une déconstruction sécurisée.
- Documenter les matériaux et les méthodes de construction.

La réversibilité des assemblages entre les différentes couches est un principe fondamental (fig.10). L'utilisation de connexions mécaniques «sèches» comme les clous, vis et boulons, doit donc être privilégiée au contraire des connexions «humides» chimiques (colle, résine, ciment, etc.). Toutefois, si une connexion chimique est nécessaire, privilégier un liant faible et facilement nettoyable, comme le mortier de chaux.

Pour faciliter le démontage des éléments: minimiser ces points de connexion au strict minimum tout en optimisant la dimension des composants pour permettre un transport sans machines; choisir des connexions simples nécessitant des outils standard et limiter le nombre de types de connexions différentes; rendre ces points de séparation identifiables visuellement et physiquement accessibles; prévoir une tolérance suffisante pour le démontage et le remontage; idéalement choisir un mode d'assemblage qui permette un montage/démontage en parallèle.

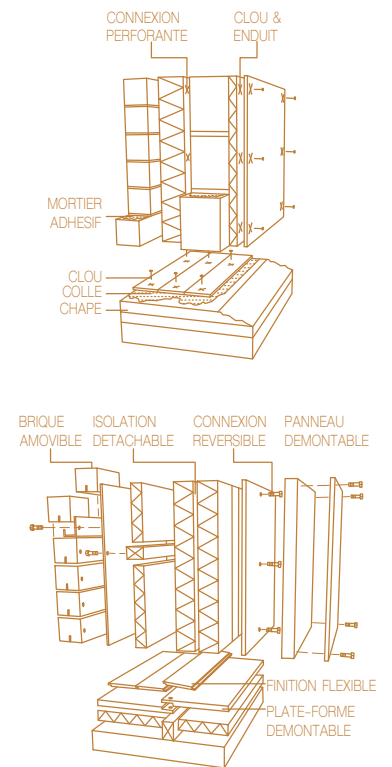


Fig.10 Différence entre la construction standard et la construction réversible

¹¹ B. Guy, N. Ciarimboli (2008), *Design for Disassembly in the built environment: a guide to closed-loop design and building*. Hamer Center for Community Design State College, p. 6

Le choix des matériaux de construction est également un facteur important dans la construction réversible. En effet, un matériau de qualité est souvent plus durable et acceptera par conséquent mieux les futurs démontages et remontages. De plus, il gardera une valeur forte dans le temps et aura donc plus de chance d'être réutilisé après une déconstruction sélective. Mais cette assertion doit toujours être nuancée selon le contexte local. En effet, pour des raisons économiques certains composants pouvant être récupérés et réemployés ne le sont pas. Car déconstruire proprement prend du temps et coûte donc de l'argent. En Suisse par exemple, certaines briques de terre cuite pourraient théoriquement être récupérées. Mais au contraire du Danemark notamment¹² (fig.11), il n'existe pas d'entreprise en Suisse spécialisée dans la déconstruction, le nettoyage et le stockage des briques en vue de leur réutilisation. Le manque de ces infrastructures empêche l'opération d'être viable économiquement et rend impossible leur récupération pour l'instant malgré la durabilité et la valeur du matériau.

Il est également important de privilégier les matériaux bruts car les finitions ajoutées peuvent cacher les connexions et sont souvent difficiles à nettoyer, entraînant des coûts de déconstruction supplémentaires. Dans la même idée, les matériaux composites sont à éviter car ils sont souvent plus compliqués à recycler ou à réutiliser. En règle générale, il est préférable d'utiliser des matériaux dont le comportement dans le temps est connu et vérifié par l'expérience sur le long terme.

Évidemment ces principes doivent être adaptés à tout type de situation. Une évaluation au cas par cas doit être faite avec

une pesée d'intérêts suivant le contexte et les objectifs à atteindre.

Sur les mêmes principes énumérés ci-dessus, on pourrait imaginer un système constructif universel avec des connexions compatibles. Les bâtiments seraient hautement adaptables et pourraient être agrandis ou réduits facilement. Les composants pourraient facilement être remplacés par d'autres et on limiterait drastiquement la génération de déchets.

Comme vu avec l'exemple de Jean Prouvé plus haut, le développement de la construction préfabriquée après la seconde guerre a ouvert la voie à ce genre de réflexions. Dans le même esprit, on peut citer l'exemple de Konrad Waschmann qui a travaillé durant des années au développement de différents modèles de nœuds universels. Pour l'US Air Force, il a été mandaté afin de développer un système constructif basé sur des éléments standardisés pouvant être produits en masse, permettant un grand nombre de configurations, de portées et de géométries différentes. Le contrat stipulait également un démontage facile, sans génération de déchets et permettant une réutilisation future des éléments. Pour répondre à toutes ces contraintes, il imagina un connecteur qui se referme autour des éléments primaires comme un anneau et à partir duquel les éléments secondaires peuvent se fixer dans toutes les directions¹³ (fig.12). Ce concept sera repris plus tard par Max Mengerighausen qui simplifiera son nœud et optant pour une connexion vissée: il s'agira du système Mero¹⁴ (fig.13).

LE SYSTÈME CONSTRUCTIF UNIVERSEL

¹² L'entreprise danoise Gamle Mursten ApS récupère, nettoie et revend les briques de terre cuite.



Fig.11 Automatisation du nettoyage des briques par Gamle Mursten

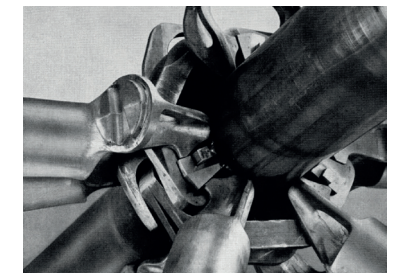


Fig.12 Nœud universel pour l'US Air Force



Fig.13 Système Mero

¹³ K. Wachsmann (1961), *The Turning Point of Building*. New-York: Reinhold Publishing Corporation

¹⁴ H. C. Schultiz, W. Sobek, K. J. Habermann (2003), *Construire en acier*. Presses polytechniques et universitaires romandes, p.73

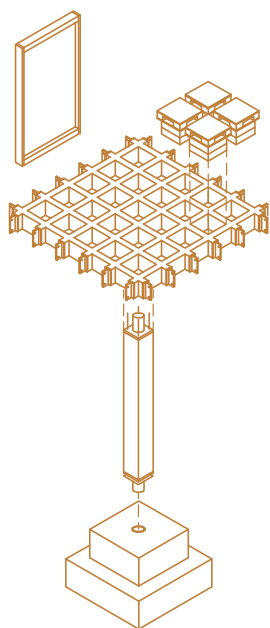


Fig.14 Système constructif d'Aeternum

¹⁵ D'après l'entretien réalisé le 14.10.21 avec Alex Museran, fondateur d'Aeternum.

Outre les éléments structurels, d'autres acteurs se sont intéressés à développer un système constructif englobant quasiment tous les composants d'un bâtiment. C'est le cas de la start-up suisse Aeternum qui propose un système constructif modulaire (fig.14), pouvant être configuré dans un grand nombre de variantes possibles. Elle accompagne les investisseurs du début du projet jusqu'à la livraison du bâtiment. Après la fin de leur utilisation, Aeternum rachète les composants, les répare si nécessaire et les revend pour commencer un nouveau cycle de vie. Avec son système, Aeternum défend une vision de la ville du futur beaucoup plus dynamique, où les bâtiments ont une durée de vie plus courte car ils pourraient sans cesse s'adapter et se transformer selon les besoins et l'évolution de la société et de la technologie¹⁵.

Mais ce rêve d'un système standardisé universel semble condamné à être un marché de niche dans la pratique. La solution d'Aeternum est surtout intéressante pour les bâtiments temporaires mais semble trop contraignante pour les bâtiments permanents. De plus, malgré le possible gain en ressources, ce type de système pose beaucoup de questions à d'autres niveaux. Comme le souligne le collectif Rotor, ce genre de système ne prend pas en compte les spécificités régionales de l'architecture en termes de matériaux ou de culture du bâti. De plus, sa standardisation extrême risque d'entraîner la délocalisation des usines vers des pays où le prix de la main-d'œuvre est moins élevé. Ces délocalisations augmentant les transports nécessaires, cela risque de réduire à néant les bénéfices gagnés par la réutilisation des éléments¹⁶.

¹⁶ M. Ghyoot, L. Devlieger, L. Billet, A. Warnier (2018), *Déconstruction et réemploi*. Lausanne: Presses Polytechniques et universitaires romandes, p. 140

La réversibilité spatiale est la capacité d'un bâtiment à s'adapter à différents usages durant sa vie. Au niveau constructif, ce concept trouve ses origines au début du 20ème siècle notamment avec des architectes modernistes tels que Mies Van der Rohe ou le Corbusier. Ce dernier l'a théorisé en l'incluant dans ses cinq points de l'architecture moderne en tant que plan libre. Cependant, ce n'était pas sa flexibilité spatiale pour de futurs usages qui intéressait Le Corbusier mais plutôt la liberté offerte de composer ses espaces indépendamment des contraintes structurelles.

C'est à partir des années 1960 avec entre autres le mouvement de l'Open Building System¹⁷ porté par John Habraken et son livre *De dragers en de menses - Het einde van de massawoningbouw* que le concept du plan libre est utilisé pour apporter une flexibilité spatiale. L'idée de Habraken était de remettre l'habitant au sein du processus de projet en lui permettant de participer activement à la conception de son logement¹⁸. Il développe un système constructif totalement préfabriqué rendu possible par la préfabrication de masse développée à cette époque (fig.15). Ce système – basé sur une trame de 30x30cm appelée SAR-raster¹⁹ – avait pour but d'offrir aux habitants une structure (nommée le *support*) qui générerait un espace que Habraken désignait par *infill*. Cet espace permettait une grande adaptabilité aux utilisateurs qui pouvaient se l'approprier selon leurs envies.

«The support represents the most permanent parts of the building, like the structure, and can be seen as a bookcase. The infill represents the adaptable part of the building, or in other words the books.» - John Habraken (1961)

LA RÉVERSIBILITÉ SPATIALE

¹⁷ C. Küpfer, C. Fivet (2021), *Déconstruction sélective- Construction réversible*. EPFL, p.81

¹⁸ <https://www.openbuilding.co/legacyhttps://www.openbuilding.co/legacy> (consulté le 13.12.21 à 13:23)

¹⁹ Du nom du groupe de travail de Habraken: Stichting Architecten Research



Fig.15 De Drie Hoven, construit par H. Hertzberger suivant les principes de J. Habraken

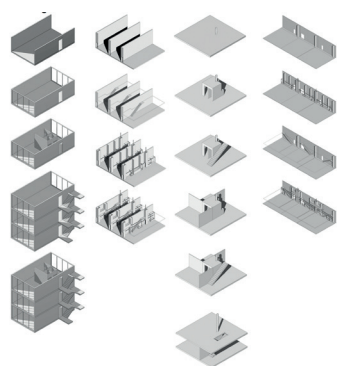


Fig.16 Série de combinaison par élément permanent du projet (de gauche à droite: (enveloppe, mur porteur, noyau central, façade)

Cette idée d'adaptabilité est reprise par B. Leupen dans son texte *The Frame And The Generic Space, A New Way Of Looking To Flexibility*, dans lequel il invite à prendre comme point de départ du projet les éléments permanents plutôt que le changeable. Dans ce texte, Leupen introduit la notion de *generic space*, c'est-à-dire un espace non spécifique créé par les éléments permanents du projet et qui est amené à évoluer dans le temps. Se basant entre autres sur les couches de Brand, il défend que chaque couche pourrait être considérée comme la *frame* au sein duquel prend place le *generic space* (fig.16).

Actuellement, plusieurs types d'affectations misent sur ces principes car leur fonctionnement et leurs utilisations deviennent rapidement obsolètes. On peut prendre en exemple les hôpitaux, immeubles de bureaux ou autres surfaces commerciales. Toutes ces infrastructures doivent s'adapter rapidement aux changements sociaux, culturels, technologiques et exigent donc à leur conception des installations flexibles prêtes à être transformées.



Fig.17 Hôpital AZ Groeninge

Un exemple de mise en pratique de cette réversibilité spatiale est l'hôpital AZ Groeninge construit par Baumschlager Eberle (fig.17). Le projet a été imaginé à partir de deux mots-clés: flexibilité et confort. L'idée était de créer un bâtiment avec une esthétique neutre et élégante permettant un changement d'affectation si besoin. En plan, la réflexion s'est concentrée sur l'emplacement des colonnes techniques et de la structure porteuse, de manière à ce qu'elles permettent le plus grand nombre de reconfigurations possibles²⁰.

²⁰W. Nerdinger (2007), *Baumschlager-Eberle 2002-2007*. Springer-Verlag/Wien, p.69

Les réversibilités techniques et spatiales se basent sur des principes théoriques relativement simples. Cela demande certes une réflexion supplémentaire des architectes, des ingénieurs et des entreprises durant la phase de projet mais ce ne sont pas des systèmes complexes et ultra-technologiques à mettre en place. Au contraire, il s'agit plutôt de revenir à une certaine forme de bon sens constructif et de simplicité de projet. Pourtant aujourd'hui la construction réversible est complètement absente du monde professionnel, à l'exception de projets spécifiques avec souvent une durée limitée dans le temps.

Dans un contexte où les préoccupations environnementales prennent de plus en plus de place au sein de la société, pourquoi les principes de la construction réversible ne sont-ils pas plus utilisés?

Une étude²¹ menée par l'UWE (University of the West of England) a tenté de répondre à cette question. Après une série d'interviews faite avec plusieurs groupes composés de différents acteurs du secteur de la construction²², cinq grands facteurs ont été identifiés:

- Absence de législation contraignante
- Absence d'information adéquate au début du processus de projet
- Absence d'un marché du réemploi suffisamment grand
- Difficultés à justifier économiquement
- Absence d'outils spécifiques

Sans grande surprise, l'absence de lois ou normes qui pousseraient les architectes et les entreprises à concevoir des bâtiments réversibles ressort comme un des facteurs

²¹O. Akinade, L. Oyedele, A. Oyedele, J. M. D. Delgado, M. Bilal, L. Akanbi, A. Ajayi, H. Owolabi (2020), *Production Planning & Control vol 31 n°10*, «Design for deconstruction using a circular economy approach: barriers and strategies for improvement». London: Taylor & Francis, p. 829-840

²²Architectes, ingénieurs civils et CVSE, entreprises de démolition, BIM managers

principaux. En effet, pourquoi changer des habitudes constructives qui ont fait leurs preuves si l'on n'y est pas obligé? À moins qu'il y ait une vraie volonté politique de mettre en place une législation contraignante, il semble impossible que la pratique ne se démocratise toute seule dans le milieu de la construction. Des parallèles peuvent être faits avec l'énergie opérationnelle des bâtiments où il a fallu attendre que des lois et normes soient mises en place pour que la pratique se généralise et deviennent une évidence lors du processus de projet.

L'argument économique est évidemment le plus gros frein. Il est aujourd'hui très difficile de justifier économiquement le recours à une construction réversible. En effet la construction réversible demande des efforts supplémentaires en temps de conception et de construction, qui augmentent le coût du bâtiment et des honoraires. Ces coûts supplémentaires sont très difficiles à comprendre pour la plupart des maîtres d'ouvrage. En effet, les bâtiments sont aujourd'hui un produit sujet aux fluctuations du marché et à la spéculation. Souvent les investisseurs recherchent des profits sur le court terme avec des rendements toujours plus élevés. Dès lors, il est extrêmement difficile de vendre les futurs gains que pourraient rapporter une construction réversible, mise à part dans des cas particuliers où le maître d'ouvrage a une volonté forte de le faire grâce à ses convictions personnelles.

Un des freins qui ne transparaît pas dans l'étude de l'UWE est celui de la barrière psychologique, présente inconsciemment ou consciemment chez les architectes mais aussi chez les clients. En effet, comme sou-

ligné par Mark Gorgolewski²³, la culture du bâti en Europe associe traditionnellement l'architecture à la longévité. Les architectes sont formés avec en tête de nombreuses références de bâtiments ayant traversé les époques et espèrent donc que leur future création fera de même. Pourtant, pour des raisons économiques, culturelles ou techniques, ces bâtiments deviendront souvent obsolètes beaucoup plus rapidement que prévu. Dans certains cas, cette idée de permanence de l'architecture s'applique également aux clients. Que ce soit dans l'idée de montrer la stabilité et la durabilité d'une entreprise ou de construire une maison familiale pouvant être transmise aux générations suivantes, il est difficile d'accepter de parler de la fin de vie de son bâtiment lors du processus de création.

Dans ces conditions, il semble utopique de pouvoir appliquer dans un projet tous les principes de la construction réversible et rend une approche dogmatique de celle-ci irréalisable.

²³M. Gorgolewski (2018), *Resource salvation: The architecture of reuse*. Hoboken: John Wiley & Sons p.14

SYNTHÈSE

Ce chapitre a permis de comprendre les principes qui régissent la réversibilité technique et spatiale.

La réversibilité spatiale a trouvé un intérêt auprès de certaines affectations spécifiques comme les hôpitaux, les surfaces commerciales ou les bureaux. Cependant dans la grande majorité des cas, il ne s'agit pas de préoccupations environnementales mais économiques. Les changements s'opérant rapidement, les gains obtenus sont intéressants pour les investisseurs car ils sont tangibles à court terme.

Cet intérêt économique est notable et prouve que son application pourrait être élargie. Mais sans prise en compte de l'aspect environnemental, le danger est que la réversibilité spatiale incite à transformer plus que nécessaire et fasse ainsi perdre les bénéfices voulus en termes de durabilité. Ce même risque existe pour le système constructif universel.

Les principes de la réversibilité technique sont plus difficiles à appliquer. En effet, de manière générale, la réversibilité technique comprend toutes les stratégies pouvant être mises en place afin d'encourager le recours à une future déconstruction sélective. Car faciliter une future déconstruction sélective fait baisser ses coûts et donc augmente son attractivité économique, d'autant plus pour récupérer des matériaux de qualité. Il est donc difficile de vendre ces gains car ils ne pourront se matérialiser que sur le long terme. C'est pourquoi actuellement la construction réversible est principalement utilisée pour des bâtiments temporaires.

Le facteur économique est donc le plus gros frein à l'application d'une construction réversible systématique dans le milieu professionnel. En effet, les surcoûts immédiats de la réflexion supplémentaire fournie par les mandataires ainsi que ceux induits par le chantier sont extrêmement difficiles à vendre à la plupart des clients. Ceux-ci désirent souvent rentabiliser leur investissement rapidement, la promesse d'un potentiel futur gain lors d'une transformation ou d'une déconstruction n'est pas persuasive.

De manière plus générale, la pluralité des facteurs à prendre en compte lors de l'élaboration d'un projet, qu'ils soient économiques, culturels, sociaux ou techniques, rendent impossible une approche dogmatique de la construction réversible.

Fig.18 (page suivante)

Vouée à la démolition pour faire place à un centre commercial, la halle Lustucru à Arles a finalement été déconstruite après une mobilisation populaire. C'est une nouvelle étape dans la longue vie de cette structure métallique qui prouve que la construction réversible et le réemploi sont très adaptés pour ce type de construction. La structure avait initialement été construite à Marseille lors de l'Exposition coloniale de 1906. Entre 1906 et 1939 elle accueille diverses manifestations jusqu'à être démontée et reconstruite à Arles en 1951.

(<https://www.connaissancedesarts.com/monuments-patrimoine/la-grande-halle-du-site-lustucru-arles-sauvee-de-la-des-truction-1185831/>, consulté le 03.01.22 à 13:16)



II. LE RETOUR À UNE CONSTRUCTION RÉVERSIBLE ÉCONOMIQUEMENT VIABLE



Fig.19 Mur du fort franc

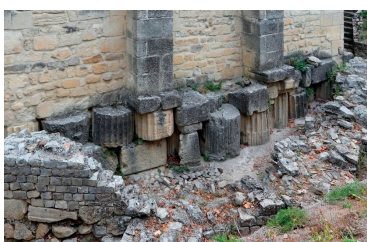


Fig.20 Fondations de Notre-Dame-de-Nazareth

L'argument économique est donc l'un des plus gros freins à la construction réversible. Pourtant, pendant des siècles, la déconstruction propre et le réemploi de matériaux dans les nouveaux bâtiments étaient tout à fait naturels car les ressources de temps et de main-d'œuvre pour extraire, transporter et travailler la matière étaient gigantesques. De nombreux exemples de réemploi peuvent être trouvés dans des bâtiments issus du Moyen-Âge, où il n'est pas rare de tomber sur une colonne antique prise dans un pan de mur. On peut prendre pour exemple le fort franc édifié en 1260 à Parikia sur l'île grecque de Paros, dont le patchwork de matériaux de construction (fig. 19) est notamment tiré des ruines d'un ancien temple grec situé non loin de là. À Vaison-la-Romaine, des morceaux de colonnes appartenant à un édifice antérieur sont utilisés comme fondations pour la cathédrale Notre-Dame-de-Nazareth (fig.20).

Cette pratique de la réutilisation s'institutionnalise et se formalise à partir du 18ème siècle. L'exemple proposé par Rotor dans leur livre *Déconstruction et réemploi* en est représentatif: l'organisation de la déconstruction des ruines de l'ancien palais des ducs de Bourgogne par le conseil des finances permet un bénéfice considérable. En effet, à la fin de la déconstruction, il s'avère que les coûts de démolition se sont élevés à 16'061 florins tandis que les revenus liés à la vente des matériaux ont apporté 47'396 florins. Les autorités ont donc fait un bénéfice net de 31'335 florins, ce qui vaudrait environ 300'000 euros aujourd'hui à pouvoir d'achat égal²⁴.

²⁴M. Ghyoot, L. Devlieger, L. Billet, A. Warnier (2018), *Déconstruction et réemploi*. Lausanne: Presses Polytechniques et universitaires romandes p. 18

Jusqu'au début du 20ème siècle, cette évidence économique faisait de la déconstruction sélective un travail automatiquement inclus dans les prestations des entreprises de démolition. En effet, elles estimaient ce qu'elles allaient pouvoir revendre et fixaient leurs prix en prenant en compte ces futurs gains. La déconstruction propre en vue du réemploi de matériaux était donc la norme et une activité lucrative.

Que s'est-il donc passé? C'est au moment où le prix de la main-d'œuvre a dépassé celui du matériau qu'il a été de plus en plus difficile de justifier économiquement la déconstruction. De fait, avant le développement des techniques de démolition destructive, la déconstruction d'un bâtiment n'était finalement qu'une construction à l'envers: les revêtements intérieurs et les techniques étaient enlevés, la structure dénudée et ensuite démontée de haut en bas. Mais le temps et la place nécessaires afin de déconstruire, nettoyer et stocker les matériaux commençaient à manquer, en particulier dans les grandes métropoles. Dès lors, un changement de paradigme s'est opéré: la démolition est passée d'un poste rapportant de l'argent, à celui augmentant drastiquement le budget du chantier. L'exemple de la démolition du Gellender Building (fig.21) par Jacob Volk décrit par Jeff Byles dans son livre²⁵ révèle les conséquences de cette nouvelle mentalité. Ce bâtiment – vieux de seulement 12 ans – devait être démolé pour faire place à un nouveau gratte-ciel plus grand, construit sur son terrain et sur celui d'à côté. Le contrat à 50'000\$ proposé à Volk l'obligeait à le déconstruire en 45 jours sous peine de recevoir une pénalité de 500\$/jour. Un délai qui semblait irréaliste pour la plu-

²⁵J. Byles (2005), *Rubble: unearthing the history of demolition*. New-York: Harmony Books



Fig.21 Démolition du Gellender Building

part des démolisseurs de l'époque. Jacob Volk réussit ce tour de force en utilisant une nouvelle technologie qui venait d'arriver sur le marché: le marteau-piqueur. À partir de ce moment, la mécanisation de la démolition devient peu à peu la norme et entraîne avec elle la disparition de la déconstruction non destructive. C'est à cet instant qu'un gaspillage de ressources sans précédent dans l'histoire a débuté et continue à ce jour.

PÉNURIE DE MATÉRIAUX

Pourtant face à l'épuisement des ressources en cours, il devient urgent de revenir à certaines pratiques et redonner une place importante au réemploi et de ce fait à la construction réversible dans le domaine du bâtiment.

Il est vrai que la construction est un secteur où les changements s'opèrent très lentement et où il est difficile de bousculer les habitudes de la culture du bâti en place. Depuis plus de 60 ans, nous avons été habitué à pouvoir obtenir tous les produits que nous voulions tout de suite. Pourtant, la pénurie d'approvisionnement que subit l'ensemble du secteur manufacturier depuis 2020 pourrait éventuellement être un déclic qui pousserait certains à revoir leur modèle de production. En effet, selon Économie suisse²⁶, en octobre 2021, 80% des entreprises souffraient d'un problème d'approvisionnement. Cantonnée à la base aux produits en provenance d'Asie, la crise s'étend désormais à toutes les régions du monde. Outre la difficulté de s'approvisionner en matières premières, la hausse du prix de l'énergie pour la production et le transport ajoute également un surcoût supplémen-

²⁶<https://www.economiesuisse.ch/fr/articles/les-penuries-de-viennent-un-risque-conjoncturel> (consulté le 15.12.21 à 13:50)

taire. La pandémie de Covid 19 en est bien sûr la raison principale à cause de la fermeture partielle ou totale des usines et des infrastructures de transports, notamment les ports. De plus, le pouvoir d'achat accumulé pendant les confinements dope la consommation, ce qui creuse encore plus le fossé entre l'offre et la demande. L'allongement des délais et l'augmentation des charges ont pour conséquence que certaines entreprises sont contraintes d'annuler des commandes et de refuser de nouvelles offres. Il en résulte une perte de chiffre d'affaires. Afin de contrer cette situation, des entreprises se tournent vers d'autres fournisseurs, souvent plus proches géographiquement et situés dans des pays moins exposés au virus. Pourtant, bien que les prédictions annoncent une persistance du problème pour de nombreux mois encore, peu d'entreprises pensent à réintégrer la fabrication des composants manquants dans leurs systèmes de production²⁷.

Le secteur de la construction est également durement touché par ces problèmes d'approvisionnement. Les prix des matériaux ont globalement augmenté de 10-40%, les isolants, le bois, l'acier et les produits pétrochimiques étant particulièrement impactés²⁸.

Cette situation est peut-être l'occasion de mettre en lumière les avantages des circuits courts ainsi que des matériaux de réemploi, présents localement et disponibles tout de suite. Certaines entreprises comme Hunziker – un loueur de grandes tentes pour des événements – a déjà réagi dans un sens positif grâce à cette pénurie. L'entreprise avait pour habitude de se débarrasser de son

²⁷<https://www.economiesuisse.ch/fr/articles/les-penuries-de-viennent-un-risque-conjoncturel> (consulté le 15.12.21 à 13:50)

²⁸ F. Breithaupt (2021), *Tribune de Genève*, « Une pénurie mondiale pourrait faire grimper les prix des logements »

stock de panneaux triplis qu'elle utilise pour le sol de ses tentes au bout de 3-4 années seulement, les considérant comme trop usés ou abîmés. Cette année par contre, au vu de la valeur qu'ont pris les matériaux, Hunziker a décidé de conserver ses stocks et de les entretenir afin de pouvoir les utiliser quelques années de plus²⁹.

²⁹ D'après l'entretien réalisé le 18.10.21 avec Benjamin Poignon, du bureau InSitu et Zirkular.

L'ÉCONOMIE DE LA FONCTIONNALITÉ

Afin de freiner notre consommation de ressources, certaines expériences sont menées dans le but de changer notre rapport à la propriété, en proposant d'acheter un service plutôt qu'un produit. Ces expérimentations sont basées sur les principes de l'économie de la fonctionnalité, théorisés par Walter Stahel, qui propose de détacher la croissance économique de l'exploitation et de la consommation de ressources³⁰, ce qui nous invite à revoir notre conception de la consommation. En effet, consommation est aujourd'hui souvent synonyme d'acquisition, bien que dans de nombreux cas la possession d'un objet soit moins importante que son utilité.

Différents exemples ont démontré l'application concrète de l'économie de fonctionnalité, comme le service de location de pneus de l'entreprise Michelin. De fait, pour les entreprises de transport routier, posséder les pneus de leurs camions n'est pas forcément une nécessité, leur priorité étant de transporter des marchandises. Michelin vend donc un service de fourniture et d'entretien des pneus dont il reste propriétaire, et les loue avec un prix au kilomètre.

³⁰ J. Van Niel (2007), *L'économie de la fonctionnalité*. UNIL-UTT, p.3

Ce nouveau type d'économie présente de nombreux avantages. En effet, il lutte contre l'obsolescence programmée de certains produits, les entreprises ayant tout intérêt à développer un bien le plus durable possible afin d'économiser des frais d'entretien et de remplacement. Ces produits se transforment donc en une forme de capital qu'elles doivent gérer efficacement au même titre que leurs autres capitaux (biens de production, investissements financiers, main-d'œuvre...)³¹. De ce fait, elles sont poussées à une meilleure gestion des ressources et génèrent beaucoup moins de déchets. De plus, l'entreprise est assurée d'un revenu régulier sur le long terme.

« Dans le schéma de pensée économique traditionnel, les producteurs sont considérés comme créateurs de valeur et les clients comme destructeurs de valeur. Dans une économie de fonctionnalité, les producteurs deviennent fournisseurs de valeur et les clients utilisateurs de valeur. Il devient de l'intérêt des deux parties de faire en sorte que la fonction soit constamment remplie et que la valeur soit continuellement fournie. »³²

Un exemple de mise en œuvre de ce principe dans le secteur de la construction est celui de l'éclairage de l'aéroport de Schiphol Amsterdam. En collaboration avec Philips, Thomas Rau (Rau Architects) a développé le système *pay per lux* (fig.22). Philips reste propriétaire de l'installation technique et s'engage à atteindre les objectifs fixés en termes d'éclairage. De cette manière, l'entreprise cherche à optimiser son réseau et à lutter contre l'obsolescence de ses composants car il voit un avantage économique d'y minimiser ses interventions de maintenance. Le fait d'être propriétaire

³¹ O. Mont (2004), *Product-service systems: Panacea or myth?*. Doctoral dissertation, International Institute for Industrial Environmental Economics, Lund University

³² J. Van Niel (2007), *L'économie de la fonctionnalité*. UNIL-UTT, p.4

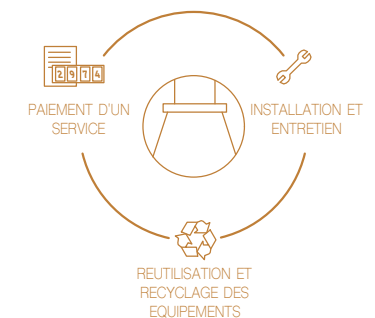


Fig.22 Représentation schématique du système Philips Pay per Lux

³³ M. Ghysels, L. Devlieger, L. Billet, A. Warnier (2018), *Déconstruction et réemploi*. Lausanne: Presses Polytechniques et universitaires romandes, p. 175

des installations l'oblige également à être responsable de la fin de vie de celles-ci. Des expériences similaires sont actuellement réalisées sur d'autres composants. On peut citer les façades en leasing à l'université de Delft ou les dalles de moquettes de Interface Inc. et DuPont Flooring System³³. Mais l'application de ces principes sur tous les éléments de la construction semble difficile. En effet, la longue durée de vie de la plupart des composants demande aux entreprises propriétaires d'assumer une responsabilité étendue qui paraît incertaine sur le long terme.

VENDRE LES BÉNÉFICES DE LA CONSTRUCTION RÉVERSIBLE

D'autres raisons peuvent contribuer à rendre la construction réversible intéressante économiquement. Comme relevé dans le chapitre précédent, elle permet à court terme d'être en accord avec les demandes du marché ou des investisseurs pour certaines affectations spécifiques. Outre l'adaptabilité offerte pour le propriétaire actuel, elle permet également de maintenir une valeur marchande forte pour la revente du bâtiment en réduisant les futurs coûts de transformation ou de rénovation³⁴.

Sur le long terme, la construction réversible est intéressante pour réduire le coût de maintenance et de réparation des composants du bâtiment. Même si les investisseurs désirant un rendement rapide seront moins enclins à y recourir, elle peut devenir avantageuse pour d'autres acteurs du marché immobilier, comme les fondations ou les caisses de pension, qui ont un intérêt de gains sur le long terme. Évidemment, les surcoûts liés à la construction réversible

doivent être inférieurs aux futurs gains pour qu'elle fasse sens.

Elle peut également servir à anticiper les futurs changements de lois: taxes et responsabilité élargie sur les déchets de construction, normes et labels prenant en compte l'énergie grise, etc. Prouvant qu'il ne s'agit pas d'une réalité si lointaine, l'état de Genève a voté en décembre 2021 une modification de la loi sur les constructions et les installations (LCI). Dans ce nouvel article, il est indiqué qu'«en premier lieu, il y a lieu de privilégier, dans la mesure du possible, le réemploi des matériaux de construction existants».

Enfin, la construction réversible pourrait permettre d'assurer un gain sur la revente de matériaux dans un possible futur contexte de hausse des prix des ressources et des coûts de la main-d'œuvre³⁵.

³⁴ W. Addis, J. Schouten (2004), *Design for reconstruction, principles of design to facilitate reuse and recycling - C607*. Construction Industry Research & Information Association, Londres, p.24

³⁵ B. Guy, N. Ciarimboli (2008), *Design for Disassembly in the built environment: a guide to closed-loop design and building*. Hamer Center for Community Design State College, p.9

SYNTHÈSE

Ce chapitre a démontré que la déconstruction sélective dans le but de revendre les matériaux de construction a été jusqu'à récemment un poste du chantier rapportant de l'argent. C'est cette évidence économique poussant de facto à mettre en place une construction réversible qui doit être retrouvée.

La situation actuelle de pénurie de matériaux amène peut-être une réflexion dans ce sens-là. Après à peine une année, certaines entreprises prennent des mesures positives allant dans le sens d'une économie circulaire, comme la recherche de fournisseurs situés plus proches géographiquement ou la mise en place de moyens pour allonger la durée de vie de leurs stocks. Seul l'avenir dira si ces mesures ne sont que temporaires ou si elles sont amenées à se pérenniser. Mais face à l'épuisement annoncé de certaines ressources ou à l'explosion des coûts d'extraction, il s'agit là peut-être d'un aperçu du monde de demain. Dans un monde où les prix des matériaux auront pris l'ascenseur, le retour au réemploi redeviendra alors une évidence économique.

L'économie de fonctionnalité offre de belles perspectives allant dans le sens de l'économie et d'une meilleure gestion des ressources. Mais son usage semble limité à certains composants seulement, comme les CVSE. En effet, l'économie de fonctionnalité nécessite des objectifs clairs qui peuvent être facilement mesurables et comparés avec un seuil légal à atteindre comme l'éclairage, la ventilation, l'acoustique ou le chauffage. Par conséquent, elle paraît pouvoir être plus facilement mise en place dans des bâtiments publics ou commerciaux car ces lieux sont

réglementés de manière plus stricte que les habitations. De plus, la longue durée de vie de certains composants rendent l'opération incertaine pour les clients et les entreprises. À qui appartient le produit en cas de faillite du fournisseur? Quelle quantité de produit doit être installée pour que l'opération devienne rentable pour l'entreprise? Sans noter qu'en cas de mécontentement des prestations fournies, un maître d'ouvrage pourra difficilement faire marche arrière sans déconstruire la moitié de son bâtiment.

Finalement nous avons vu que des arguments économique existent en faveur de la construction réversible, à condition que les coûts de réalisation n'excèdent pas ceux des gains qu'elle peut apporter. Il est cependant nécessaire d'adapter ces principes aux intérêts et aux objectifs du maître d'ouvrage.

Fig.23 (page suivante)

Le Palais de l'Équilibre a été construit initialement pour l'Expo 02. En 2003, il a été offert au CERN pour ses 50 ans par la Confédération. Le bâtiment – une structure bois assemblée par fixation mécanique – a été démonté puis reconstruit en périphérie de Genève où il est maintenant utilisé comme centre d'exposition.



III. LA NÉCESSITÉ D'UNE CONSTRUCTION RÉVERSIBLE CONTRE L'OBSOLESCENCE

Afin de réduire la consommation de ressources et la génération de déchets, le mieux est encore de ne pas en produire. Dans cette optique, il est nécessaire de s'intéresser à ce qui rend un bâtiment ou ses composants obsolètes. Quand on regarde l'histoire de l'architecture et de la construction, on se rend vite compte que l'obsolescence des bâtiments est un processus inexorable. Rien que dans l'histoire récente, les intérieurs des bâtiments ont subi de nombreux changements: la disparition des serviteurs qui a rendu les espaces qui leur étaient consacrés inutiles, l'ajout des garages avec l'arrivée de la voiture, la transformation du salon autour de la télévision, la généralisation du travail des femmes, les familles recomposées, etc.

OBSOLESCENCE DES BÂTIMENTS ET DE SES COMPOSANTS

L'obsolescence survient quand un objet devient inutile, démodé, dépassé ou que son état physique se dégrade. Dans le domaine du bâtiment, les raisons poussant à l'obsolescence sont nombreuses et principalement d'ordre économique, plus que causées par une dégradation physique ou technique³⁶.

Pour Stewart Brand ce processus est alimenté par trois forces irrésistibles: la technologie, l'argent et la mode³⁷.

La technologie a toujours modifié nos bâtiments, en particulier au regard du siècle dernier et de son évolution exponentielle. En effet, l'ajout progressif de couches techniques dans le bâtiment, comme l'électricité pour l'éclairage, l'eau courante pour la salle de bain et la cuisine, le chauffage pour les espaces habités, va poser des questions quant à leur intégration dans une architecture chargée héritée du 19ème siècle, composée

de moulures, boiseries et autres ornements. Il n'est pas anodin par exemple que l'arrivée généralisée de l'éclairage électrique aille de paire avec un dépouillement progressif des intérieurs modernistes³⁸ (fig.24), ces derniers supportant mieux une lumière crue que les intérieurs trop ornements. Les bâtiments ne sont plus seulement des enveloppes protectrices mais deviennent un entremêlement de tuyaux (fig.25). L'arrivée de l'ascenseur va également profondément changer l'immobilier et l'échelle de la ville: les bâtiments peuvent être de plus en plus hauts et les étages les plus prisés – qui se trouvaient avant dans les étages inférieurs – deviennent ceux des étages supérieurs. La technologie répond également aux nouvelles préoccupations qui apparaissent: isolation thermique, personnes à mobilité réduite, protection incendie, et suit les normes mises en place pour y répondre.

Quant à l'argent, nous avons vu au chapitre précédent qu'il influence grandement le secteur de la construction. Les bâtiments étant avant tout des biens, ils sont également sujets aux fluctuations du marché. Dans ce contexte, les propriétaires n'ont cessé de faire des travaux dans leurs bâtiments: au minimum afin de maintenir la valeur de leur bien par les réparations et l'entretien nécessaires, et au maximum afin d'augmenter la valeur du bien ou d'exposer leur richesse.

La mode est impossible à prédire outre la certitude qu'elle changera. De quels matériaux, couleurs, styles ou ornements devront se parer les futurs bâtiments pour être considérés au goût du jour? Le grand danger de réaliser un bâtiment trop caractéristique de la tendance du moment réside

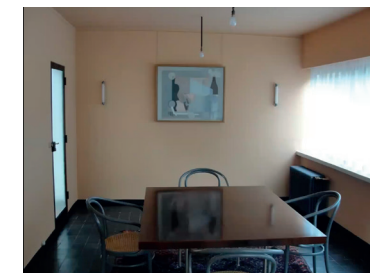


Fig.24 Salle à manger de la maison La Roche de Le Corbusier

³⁸ A. Picon, «De la structure à l'ornement», cours du 14.10.20 à l'EPFL

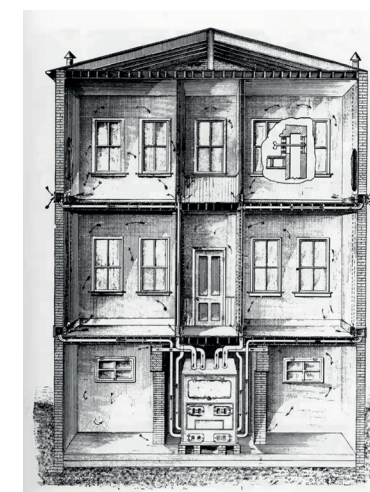


Fig.25 Intégration des techniques dans l'architecture traditionnelle

³⁶ M. Gorgolewski (2018), *Resource salvation: The architecture of reuse*. Hoboken: John Wiley & Sons, p.12

³⁷ S. Brand (1994), *How buildings learn, What happens after they're built*. New York: Viking Penguin, p.5

dans le fait qu'il sera probablement détruit ou transformé dès qu'il deviendra démodé.

Dans ces conditions, qu'est-ce qui fait qu'un certain bâtiment résiste au temps et non un autre? Selon Brand³⁹, c'est principalement la capacité du bâtiment à s'adapter aux changements amenés par les forces décrites ci-dessus. Il identifie deux voies principales possibles pour qu'un bâtiment survive: la *low road* et la *high road*.

La *low road* concerne majoritairement des bâtiments non protégés, sans valeur patrimoniale ni esthétique particulière et peu entretenus. Ces caractéristiques leur permettent souvent d'avoir une grande flexibilité spatiale et une grande adaptabilité car plus enclins à être transformés au gré des envies et des besoins. Ce sont souvent des bâtiments temporaires dont l'espace n'a pas été conçu spécifiquement pour une activité plutôt qu'une autre. C'est d'ailleurs généralement cette sur-spécialisation envers une activité qui empêche un bâtiment de s'adapter et mène à sa destruction.

La *high road* s'applique au contraire à un bâtiment historique à forte valeur patrimoniale, bien entretenu. Les modifications apportées se font par étape et sont bien réfléchies car prévues pour durer. Sa capacité d'adaptation est faible et son coût de maintenance très élevé pour ses occupants. Mais sa longévité et son aptitude à être un fragment d'histoire tangible projettent un futur certain qui donne une responsabilité sur le long terme à ses habitants.

Peu importe la voie qu'ils suivent, il est certain que les bâtiments qui ont su traverser les époques ont beaucoup moins de probabilité d'être détruits que les autres. Première-

ment parce qu'ils ont prouvé leur capacité à s'adapter, deuxièmement car les gens s'y sont attachés. L'ancienneté représente souvent un facteur clé pour l'appréciation d'un bâtiment⁴⁰, valorisée par l'aptitude de ce dernier à traverser des époques et des changements. La tendance du faux-vieux en est un bon exemple, tout comme le goût pour les antiquités, le néoclassique des 18ème et 19ème siècles, la possibilité de vieillir artificiellement certains matériaux, etc.

Évidemment, outre sa capacité à s'adapter, d'autres facteurs entrent en compte dans la décision de démolir ou de transformer un bâtiment. Ces différentes raisons peuvent être retrouvées dans le modèle conceptuel développé par A. Thomsen et K. van der Flier⁴¹ (fig.26): des raisons techniques comme l'usure, une qualité de matériaux insuffisante, ou une mauvaise mise en œuvre qui font que les composants ont perdu leurs caractéristiques mécaniques; le recours à une esthétique trop représentative d'une mode et d'une époque qui ne correspond plus au goût du jour; des raisons économiques induites par un coût de transformation ou de rénovation supérieur à celui d'une démolition ou d'une reconstruction; une pression immobilière trop importante ainsi qu'un changement de nature du quartier où se trouve le bâtiment.

³⁹ S. Brand (1994), *How buildings learn, What happens after they're built*. New York: Viking Penguin, p.23

⁴⁰ S. Brand (1994), *How buildings learn, What happens after they're built*. New York: Viking Penguin, p.10

⁴¹ A. Thomsen et K. van der Flier (2011), *Understanding obsolescence: A conceptual model for buildings*. Building Research & Information 39:4, p.352-362

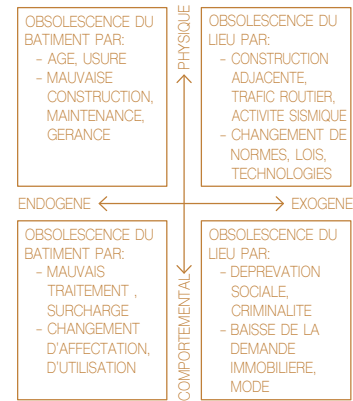


Fig.26 Modèle conceptuel de l'obsolescence

ESPÉRANCE DE VIE DES BÂTIMENTS EN SUISSE

⁴² M. Kornmann, A. Queisser (2012), *Mauerwerk 16 heft 4 "Service life of the building stock of Switzerland"*. Berlin: Ernst & Sohn, p.210-215
⁴³ Chiffre extrait des données transmises le 18.10.21 par l'Office Fédéral de la Statique (OFS)

LOGEMENT	77
MAISONS INDIVIDUELLES	80
MAISONS A DEUX LOGEMENTS	91
IMMEUBLES A TROIS LOGEMENTS ET PLUS	80
HABITATS COMMUNAUTAIRES	55
INDUSTRIE ET AGRICULTURE	65
BATIMENTS INDUSTRIELS	61
RESERVOIRS, SILOS, ENTREPOTS	62
BATIMENTS DE GARDE D'ANIMAUX	50
BATIMENTS POUR CULTURE VEGETALE	42
AUTRES BATIMENTS AGRICOLES	90
BATIMENTS EXPLOITATION AGRICOLE	87
COMMERCIAL	74
HOTELS	89
HEBERGEMENTS TOURISTIQUES	81
IMMEUBLES DE BUREAUX	63
BATIMENTS COMMERCIAUX	65
RESTAURANTS ET BARS	-
PUBLIC	51
GARAGES (PARKING)	55
GARES, AEROGARES	48
BATIMENTS A USAGES RECREATIF OU CULTUREL	55
MUSEES ET BIBLIOTHEQUES	38
BATIMENTS D'ENSEIGNEMENT ET RECHERCHE	45
HOPITAUX	52
SALLES DE SPORT	47
EDIFICES RELIGIEUX	64
MONUMENTS HISTORIQUES	46
AUTRES	61
PRISONS, CASERNES	-

Fig.27 Moyenne d'âge par affectation des bâtiments démolis en Suisse

En Europe et plus spécifiquement en Suisse, la durée de vie des bâtiments est assez longue en comparaison avec d'autres pays. L'estimation pour les habitations en Suisse est de 180 ans, ce qui est bien plus élevé que les estimations standard de durée de vie proposées par la SIA⁴². D'après les statistiques⁴³, les logements démolis en Suisse ces vingt dernières années ont une moyenne d'âge de 77 ans, ce qui est bien en dessous de l'estimation de 180 ans énoncée plus haut. Sans être extrêmement précis, ces chiffres donnent une tendance qui vient confirmer les propos de Brand: les vieux bâtiments ayant déjà fait la preuve de leur capacité d'adaptation, ce sont plutôt les «nouveaux» bâtiments qui sont le plus amenés à être démolis.

L'âge moyen de démolition d'un bâtiment varie fortement selon son affectation (fig.27). Les logements sont en tête, suivis des bâtiments industriels et commerciaux (excepté les hébergements touristiques et les bâtiments agricoles) pour finir avec les bâtiments publics.

L'affectation qui compte le plus grand nombre de bâtiments démolis est celui des logements (69%) suivi des bâtiments publics, de l'industrie, et des bureaux (fig.28). Mais afin d'identifier les affectations les plus génératrices de déchets de démolition, il convient évidemment de mettre en relation ces chiffres avec les volumes des bâtiments démolis. Dans ce cas-là, l'industrie prend la première place suivie des logements, des bâtiments publics et des bureaux (fig.29).

En regardant plus précisément les chiffres par type, on voit que dans la catégorie du

logement ce sont les maisons individuelles qui représentent 64% du nombre de logements détruits (fig.30). Cette forte proportion peut s'expliquer assez facilement: l'extension des villes sur leur périphérie a pour conséquence une pression immobilière très forte sur ces anciens quartiers de villas, avec comme finalité leur destruction pour densifier la zone. Il en va de même concernant les bâtiments industriels: dans de nombreuses villes, l'agrandissement du centre urbain amène les zones industrielles autrefois construites en dehors à devoir se délocaliser plus loin.

Les données ci-dessus ont été extraites du Registre fédéral des bâtiments et logements (RegBL). Ce registre a été créé sur la base des informations issues du recensement de la population 2000 et est – depuis la révision de l'ordonnance sur le RegBL (ORegBL) en 2017 – le système national de référence dans le domaine des bâtiments. Son contenu est mis à jour au fur et à mesure, principalement avec les données fournies par les services de construction des communes qui y enregistrent tous les projets de construction soumis à l'obtention d'un permis de construire (nouvelles constructions, transformations, démolitions).

L'année de démolition indiquée dans le registre ne correspond non pas à l'année d'obtention du permis de construire mais au moment où la démolition à bel et bien eu lieu. Les démolitions effectuées avant 2000 sont répertoriées avec l'année 1999 et ne peuvent donc être utilisées pour le présent travail.

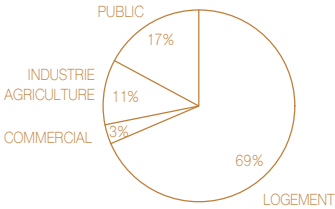


Fig.28 Nombre de bâtiments démolis par affectation

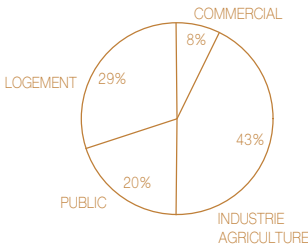


Fig.29 Volume de bâtiments démolis par affectation

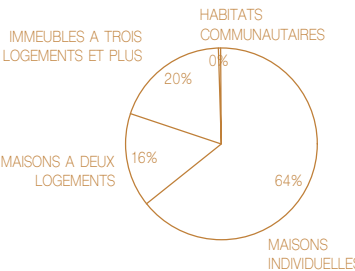


Fig.30 Nombre de bâtiments démolis par type de logement

Les bâtiments sont regroupés selon une classification basée sur la nomenclature Eurostat complétée par de nouvelles classes permettant des groupements plus précis. Les bâtiments à usage mixte sont classés selon l'affectation prédominante du bâtiment.

Pour ce travail, toutes ces classes ont été réparties en quatre catégories: les logements (maisons individuelles, immeubles,...), les activités commerciales (bureaux, commerces,...), les activités productrices (industrie, agriculture,...) et les bâtiments publics (écoles, hôpitaux, édifices religieux, infrastructures de transport,...). Évidemment, tous ces chiffres donnent plutôt une tendance générale. En effet, dans le RegBL, environ la moitié seulement des bâtiments démolis sont renseignés avec des informations de surfaces et quasiment aucun (0.23%) n'a son volume indiqué. L'année de construction et leur affectation peuvent également manquer dans certains cas, réduisant encore la quantité de données complètes disponible. De plus, ces chiffres ne couvrent que les 20 dernières années, ce qui ne permet pas d'analyser leur évolution sur le long terme.

Par ailleurs, ces données ne prennent pas en compte tout un autre pan essentiel de l'obsolescence des bâtiments et de la génération de déchets: les transformations et rénovations. La seule information indiquée dans les chiffres fournis est celle de la dernière rénovation «ayant augmenté sensiblement la valeur du bâtiment». Cette catégorie – qui a été supprimée depuis la dernière version du RegBL – permet quand même de se rendre compte de la proportion entre

rénovations et démolitions: sur les environs 2.8 millions de bâtiments recensés, 267'561 ont été rénovés et 89'234 ont été démolis, ce qui correspond à un pourcentage de respectivement 9% et 3%.

Faute de statistiques détaillées, il est difficile de faire la différence entre le changement d'une chaudière et la transformation complète d'un immeuble de bureaux. Vu la complexité de chaque projet de rénovation, peu de chiffres existent sur leur nature exacte et il est donc compliqué de les analyser. Ce qui est certain, c'est que les travaux de rénovation et de transformation sont une part majeure des chantiers effectués en Suisse et en Europe (fig.31). Par conséquent, ils sont également de gros générateurs de déchets.

La construction réversible a la capacité de prévenir l'obsolescence et doit être utilisée en premier lieu dans le but d'allonger la durée de vie du bâtiment et de ses composants. La réversibilité technique permet de faciliter le remplacement et la maintenance de certains composants, comme par exemple les systèmes CVSE que nous savons être des éléments qui doivent être remplacés à moyen terme⁴⁴. En privilégiant des systèmes de pose secs et en rendant les connexions visibles et accessibles, cela évite de devoir démolir d'autres composants pour les remplacer et empêche la génération de déchets inutiles. La réversibilité spatiale peut également grandement influencer l'obsolescence ou non d'un bâtiment. Comme on a pu le voir, la capacité d'adaptation d'un bâtiment est primordiale pour sa survie. En lui donnant une certaine flexibilité spatiale, on augmente donc les chances qu'il puisse

LA CONSTRUCTION RÉVERSIBLE CONTRE L'OBSOLESCENCE

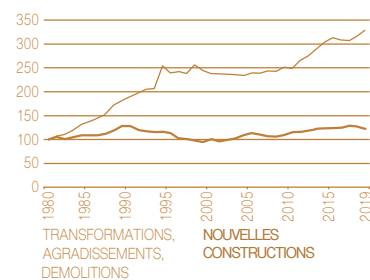


Fig.31 Dépenses dans la construction par type de travaux

⁴⁴ Voir le schéma des couches de S. Brand fig.8 p.12

⁴⁵ S. Brand (1994), *How buildings learn, What happens after they're built*. New York: Viking Penguin, p.178



Fig.32 Processus traditionnel

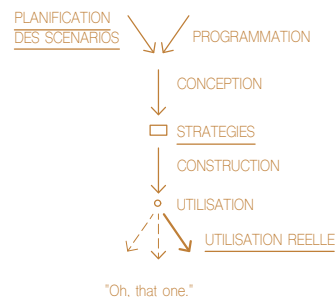


Fig.33 Processus utilisant le scenario planning

accueillir d'autres usages dans le futur. Mais il s'agit là d'un exercice complexe: comme le souligne Brand: "*All buildings are predictions. All predictions are wrong*"⁴⁵.

Afin de maximiser les chances d'adaptation, il propose de travailler avec le *scenario planning*. Cet outil utilisé à l'origine dans le domaine militaire, s'est rapidement imposé auprès des grandes entreprises par la nécessité d'anticiper le futur contexte de leurs activités.

L'objectif est de créer une stratégie plutôt qu'un plan. En effet, un plan est une prédiction de l'avenir et se révèle donc souvent inexact (fig.32). Au contraire, une bonne stratégie permet d'atteindre les objectifs fixés, peu importe les événements qui pourraient se produire.

Brand propose donc de penser en stratégie plutôt qu'en planification et de travailler à des scénarios en parallèle du programme (fig.33). Le but est alors de créer deux à cinq scénarios plausibles mais comportant également des éléments improbables, de manière à imaginer un bâtiment pouvant s'adapter à toutes ces possibilités.

Cette méthodologie demande une réflexion plus importante de la part des mandataires mais peut être une bonne piste afin de lutter contre l'obsolescence prématurée de certains bâtiments, et de ce fait évite la génération de déchets inutile.



Fig.34 Transformation successive de la Tour Bois le Prêtre à Paris (Raymond Lopez 1959, Rénovation 1990, transformation Lacaton & Vassal 2011). Le bâtiment a su s'adapter pour survivre.

SYNTHÈSE

Ce chapitre détaille les différents facteurs poussant un bâtiment à l'obsolescence, l'une des raisons principales guidant le choix de sa destruction. Comprendre les facteurs qui l'animent permet d'identifier les points clés sur lesquels travailler avec la construction réversible.

Car la construction réversible doit être utilisée en premier lieu afin d'allonger la durée de vie du bâtiment et de ses composants. En effet, il ne s'agit pas d'une méthode permettant de repousser à un horizon plus lointain les problématiques actuelles de génération de déchets et d'épuisement des ressources. Dans un deuxième temps, si le bâtiment est voué à la démolition, la construction réversible devrait permettre d'augmenter les chances de ces composants d'être réemployés en rendant leur déconstruction sélective plus intéressante économiquement.

En Suisse la durée de vie des bâtiments est assez élevée. À travers l'analyse de différentes statistiques, nous observons que les bâtiments plus anciens sont moins enclins à être démolis que ceux construits plus récemment. Cela vient confirmer les propos de Brand qui affirme que les vieux bâtiments ont déjà prouvé leur capacité à s'adapter et donc survivent. Nous avons également pu remarquer la différence de durée de vie entre les différentes affectations et identifier des facteurs probables qui l'expliquent.

Comme établi dans le chapitre précédent, les bâtiments sont un produit comme un autre. Et comme pour tous les biens, lutter contre leur obsolescence est primordial afin de diminuer la génération de déchets.

Fig.35 (page suivante)
Tallwood House à Brock Commons est une résidence étudiante de University of British Columbia (UBC). Imaginé par le bureau Acton Ostry Architects, le bâtiment est constitué d'éléments préfabriqués en bois massif assemblés par des fixations mécaniques et accessibles donnant ainsi la possibilité de déconstruire et de récupérer une grande partie de ses composants.



IV. LA CONSTRUCTION RÉVERSIBLE CIBLÉE

Comme démontré dans le premier chapitre, une approche dogmatique de la construction réversible est dans la grande majorité des cas impossible. Pourtant le gaspillage et l'épuisement des ressources rendent obligatoire un changement de paradigme dans le secteur de la construction. La question est donc de comprendre quelles stratégies peuvent être mises en place aujourd'hui lors du processus de projet: premièrement, afin d'augmenter la durée de vie du bâtiment ainsi que de ses composants, et deuxièmement, pour faciliter leur futur réemploi. Comme vu avec les statistiques du chapitre précédent, la durée de vie des bâtiments démolis varie fortement selon leur affectation. Cette dernière influence la manière dont le bâtiment va changer selon qu'il est résidentiel, commercial, public ou industriel. L'obsolescence dépend donc directement de l'activité qui se déroule au sein du bâtiment.



Fig.36 Intérieur d'un appartement parisien en 1910

Les bâtiments résidentiels sont les plus stables face aux changements: ils sont modifiés au gré des envies de leur propriétaire, ou de l'évolution des normes technologiques et sociales, mais leur fonctionnement interne reste au fond assez similaire (fig. 36).

Les bâtiments commerciaux sont les plus prompts à changer rapidement car ils subissent une intense pression pour suivre les dernières tendances. Les immeubles de bureaux transforment également leurs espaces de travail assez régulièrement de manière à correspondre à la mode actuelle ou pour être en adéquation avec l'image que la compagnie veut renvoyer. Au cours du siècle dernier, ils sont passés d'espaces complètement cloisonnés à complètement ouverts, pour aboutir à la perte de la place

nominative combinée au télétravail (fig.37). Les bureaux et les surfaces commerciales sont condamnés à changer régulièrement.

Les bâtiments publics réagissent à leurs affectations, de manière très différente. Les bâtiments institutionnels sont souvent conçus pour ne pas changer. Ils doivent montrer la stabilité de l'institution qui s'y trouve, ce qui fige leur organisation interne. Lorsqu'ils sont amenés à être transformés, cela prend énormément de temps et d'argent.

Les musées et les écoles s'adaptent principalement pour correspondre à la société et dans une moindre mesure pour se conformer à l'évolution de la technologie. Mais cela ne modifie pas radicalement leur fonctionnement interne. Au contraire, les hôpitaux sont régulièrement transformés pour suivre les avancées technologiques.

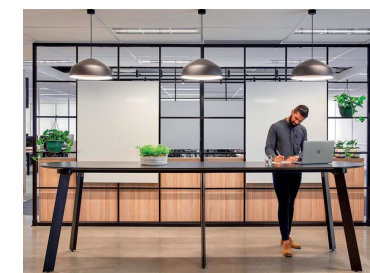


Fig.37 Évolution des espaces de bureaux entre 1980 et 2020

Les bâtiments industriels peuvent quant à eux offrir une grande capacité d'adaptation, en particulier les grandes halles. À l'inverse, les bâtiments sur-spécialisés dans un domaine sont souvent amenés à devenir obsolètes plus rapidement. Leur plus grand ennemi est leur situation géographique et la pression foncière qui les obligent à délocaliser leurs productions toujours plus loin des centres-villes.

Les bâtiments agricoles sont souvent protégés de la démolition grâce à leur valeur patrimoniale. Afin de correspondre aux nouvelles pratiques du secteur, des constructions neuves sont érigées à côté des vieux bâtiments, qui sont généralement transformés et qui voient leur usage modifié.

UNE CONSTRUCTION RÉVERSIBLE CIBLÉE

Pour lutter contre l'obsolescence grâce à la construction réversible, il faut identifier les stratégies qui peuvent être intégrées à moindre coût, tout en ayant le maximum d'impact lors d'une future transformation ou déconstruction. Ces stratégies doivent être ciblées selon l'affectation initiale du bâtiment, les futurs scénarios possibles, son emplacement géographique et sa probabilité à être déconstruit dans un court, moyen ou long terme.

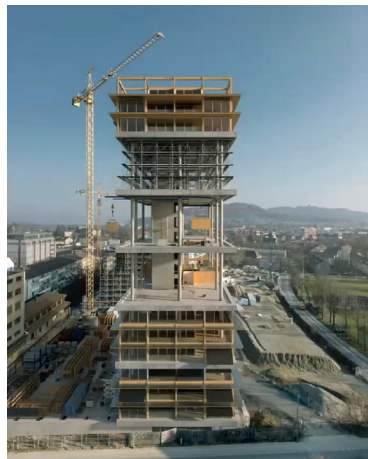


Fig.38 Projet pour le concours de la coopérative EBG à Berne par Ten Studio

Prenons par l'exemple d'un immeuble de logements: si ce bâtiment se trouve au centre-ville, il est alors peu probable qu'il soit détruit. La facilité de démontage de la structure n'est alors peut-être pas aussi importante que celle de la flexibilité spatiale, la réversibilité des revêtements intérieurs ou extérieurs. Le projet de Ten Studio pour le concours de la coopérative EBG à Berne va dans ce sens-là: la structure est prévue en béton mais les dalles sont placées tous les trois étages seulement. Le reste est prévu en bois. De cette manière, on économise du béton, du temps de construction et on donne une flexibilité spatiale en coupe (fig.38), permettant à la tour de s'adapter à de futurs usages. Au contraire, un bâtiment industriel construit en périphérie d'une ville a plus de chance d'être démoli. Il peut donc être judicieux de prévoir une structure réversible pouvant être facilement démontable et réutilisée ailleurs. En outre, comme déjà relevé, l'organisation interne des immeubles de bureaux est souvent transformée. Dès lors, la réversibilité spatiale peut apporter de gros gains de temps et d'argent. C'est une affectation qui est aussi très sensible à l'évolution des technologies, pouvant rendre une réversibilité des CVSE très intéressante. Christian

Kerez, pour le concours du nouveau siège de la télévision et de la radio flamande à Bruxelles, a conçu un projet allant dans ce sens: il propose une structure ponctuelle supportant des dalles perforées par de grands évidements (fig. 39). Ce dispositif permet une grande flexibilité spatiale en plan ainsi qu'en coupe. En effet, ces évidements peuvent être utilisés pour le passage des techniques, les circulations verticales, les doubles hauteurs, patios, etc.



Fig.39 Projet pour le concours du nouveau siège de la télévision et de la radio flamande à Bruxelles par Christian Kerez

Au vu de l'absence de cette thématique aujourd'hui dans le milieu professionnel, la construction réversible ciblée permet d'insuffler certains principes pouvant être compris et acceptés par le maître d'ouvrage. C'est finalement déjà le cas dans certaines situations. Mais en grande majorité, les principes mis en place ne découlent pas d'une logique de durabilité mais sont imaginés par l'architecte pour répondre à certaines exigences de son client. L'exemple des bureaux est le plus courant: comme vu précédemment, ces espaces seront très probablement amenés à être transformés assez rapidement, que ce soit pour créer un bureau supplémentaire, pour l'ajout de nouvelles salles de réunion ou à la suite d'une réorganisation interne de l'entreprise. Par expérience, les services techniques de ces compagnies sont donc conscients que ces changements vont arriver et ils ont tout intérêt à les anticiper afin de se faciliter la tâche et d'économiser de l'argent. Les pages suivantes décrivent des bâtiments qui ont mis en place des stratégies de réversibilité spatiale ou technique. Ces exemples prouvent qu'une construction réversible ciblée peut être appliquée dès aujourd'hui dans un très grand nombre de projets.

EXEMPLES

NOUVEAUX IMMEUBLES DE LOGEMENTS SOCIAUX - ARCHIPLEIN & PERRAUDIN ARCHITECTES



Fig.40 Façade

⁴⁶ F. Jacquier, M. Leroux (2019), *Tracés 07, « L'aventure de la construction en pierre massive, entretien par S Sonnette »*

Il s'agit de deux immeubles comprenant 68 logements sociaux, construits en pierre massive porteuse et apparente (fig.40). L'entièreté de la structure porteuse verticale est en pierre massive assemblée avec un mortier de chaux et de ciment (fig.41). La chaux permet de garantir la souplesse nécessaire dans les joints sur le long terme alors que le ciment assure la rapidité de prise pour une cadence de pose élevée. Ce mortier, plus souple que les mortiers habituels, devrait permettre de séparer les blocs lors d'une future déconstruction.

Le plan imaginé permet une certaine réversibilité spatiale. Trois couronnes organisent les espaces: une première couronne porteuse périphérique constitue la façade, une seconde couronne porteuse intermédiaire distribue les espaces et une troisième couronne non-porteuse définit les communs⁴⁶ (fig.43).

Ce dispositif typologique permet de concentrer les éléments techniques autour de la troisième couronne et d'organiser les pièces librement autour de la couronne intermédiaire. Cela rend possible de nouvelles configurations dans le futur.



Fig.41 Pose des pierres lors du chantier



Fig.42 Intérieur d'un des appartements

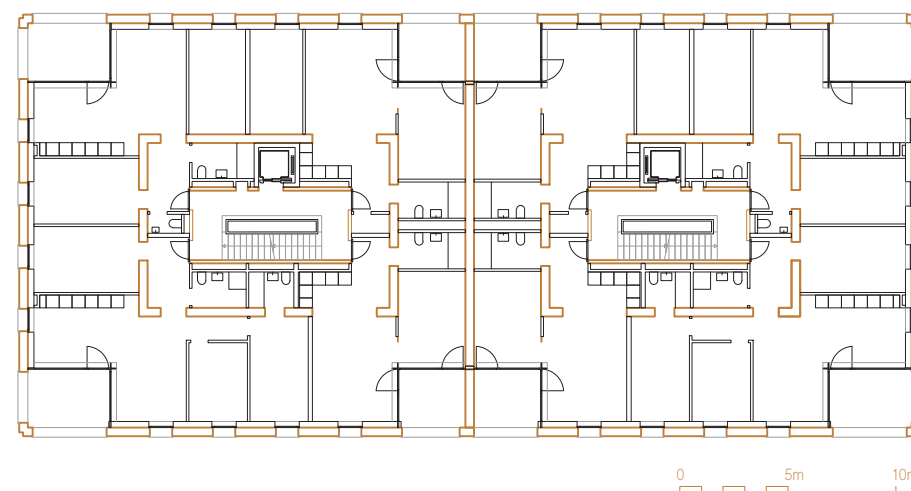


Fig.43 Plan d'un étage type

TRANSFORMATION D'UN IMMEUBLE DE BUREAUX- DE PLANTA & ASSOCIES ARCHITECTES



Fig.44 Le bâtiment après rénovation



Fig.45 Pré-installation des tubes électriques dans le doublage intérieur

Ce bâtiment constitue un bon exemple de la mise en place de certains principes de réversibilité spatiale ou technique répondant en premier lieu aux exigences formulées par le maître d'ouvrage plutôt qu'une réflexion portant sur l'économie circulaire.

Il s'agit d'une rénovation et surélévation d'un immeuble de bureaux (fig.44) où seule la structure et les menuiseries extérieures ont été gardées. Conscient des changements réguliers de la configuration des bureaux, le maître de l'ouvrage a demandé une grande flexibilité spatiale sur les plateaux.

Un faux-plafond sur mesure a donc été réalisé, de manière à prévoir toutes les filières pour la fixation des cloisons modulaires (fig.47). Les grilles de reprise et de pulsion d'air pour la ventilation ont été pré-installées de manière à ce qu'en cas de changement, il y ait seulement besoin de modifier les raccordements. Tous les réseaux électriques ont été prévus en façade dans des contre-cœurs démontables. Tous les tubes nécessaires ont été pré-installés dans le doublage intérieur afin de pouvoir y rajouter des prises si besoin (fig.45).

Les cloisons modulaires faisant 260cm de hauteur, le monte-charge a été construit sur mesure de manière à faciliter le transport et l'échange de cloisons d'un étage à un autre.



Fig.46 Intérieur

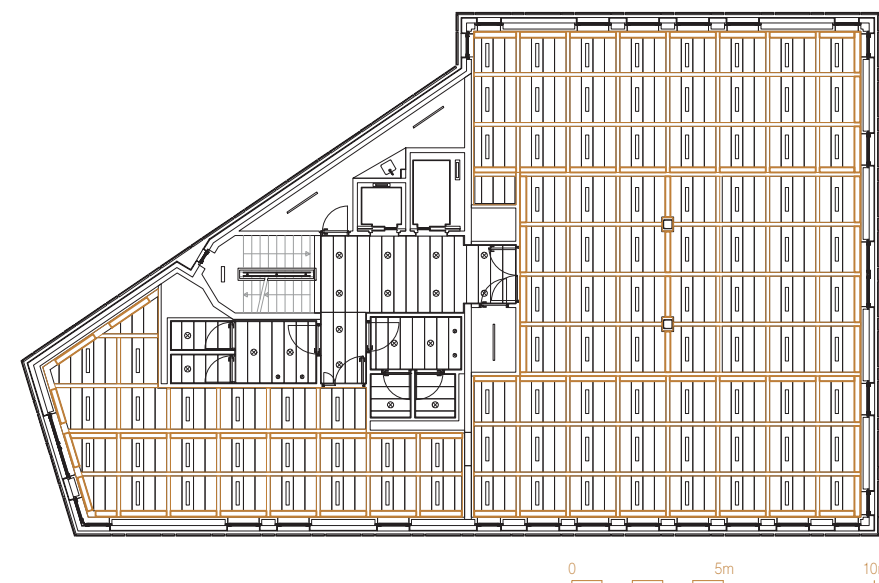


Fig.47 Plan du faux-plafond

ÉTABLISSEMENT DE RECHERCHE ETH E-SCIENCE LAB - BAUMSCHLAGER EBERLE



Fig.48 Le e-science lab de l'ETH

⁴⁷ W. Nerdinger (2007), *Baumschlagger-Eberle 2002-2007*. Springer-Verlag/ Wien, p.202



Fig.49 Vue des coursives extérieures

Le dernier bâtiment du e-Science Lab de l'ETH sur le campus d'Hönggerberg a été conçu par ses architectes pour être intemporel. Sa volumétrie cuboïde bien définie (fig.48) est allégée par l'usage de pans de pierre verticaux perpendiculaires à la façade et aux coursives extérieures. Ils permettent de limiter l'éblouissement et d'éviter au bâtiment de surchauffer pendant l'été (fig.49). Cette façade caractérise le bâtiment et le rend reconnaissable, tout en se voulant la plus neutre possible, le but étant que son esthétique puisse accepter des changements d'affectation.

Une réversibilité spatiale est permise par les porteurs ponctuels et l'usage de noyaux centraux comprenant les circulations verticales et les services (fig.51).

«Une neutralité d'usage est une qualité essentielle afin d'accepter les changements constants apportés par les utilisateurs. Grâce à une trame de 120cm définissant tous les espaces intérieurs, les murs peuvent directement se connecter à la façade. [...] La ventilation par induction se situe dans le faux plancher et est contrôlée par une unité centrale permettant d'assurer un réglage du confort climatique dans chaque pièce.»⁴⁷

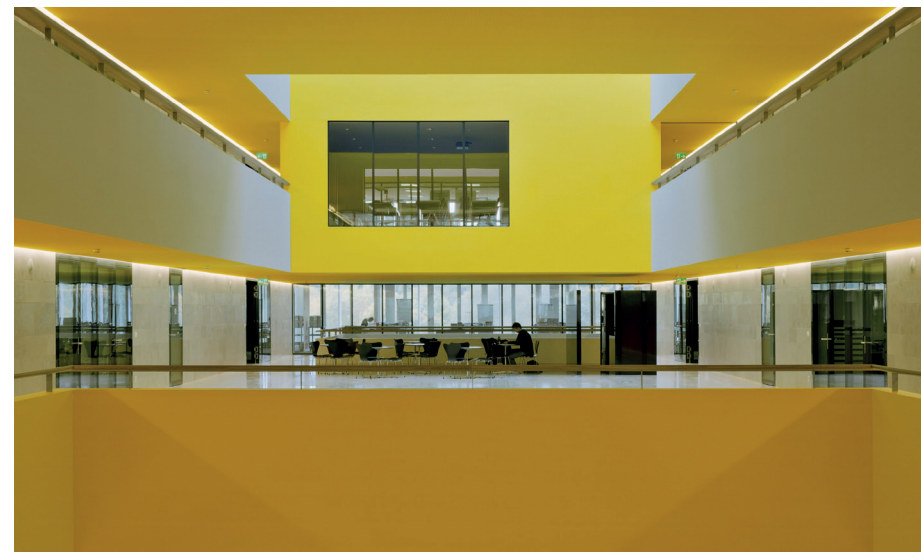


Fig.50 Vue de la partie centrale du bâtiment

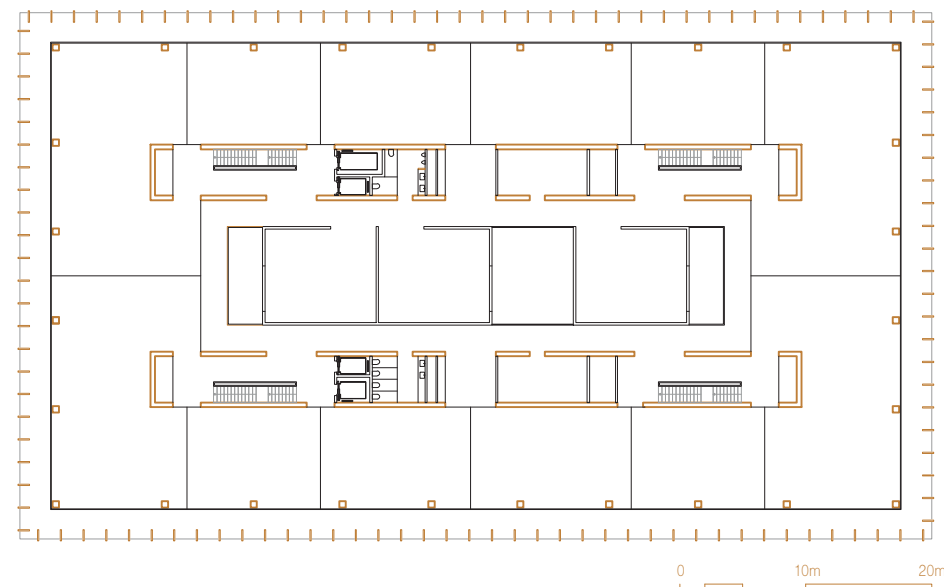


Fig.51 Plan d'un étage type

TILA HOUSING BLOCK - TALLI ARCHITECTURE & DESIGN



Fig.52 Façade sud

Cet immeuble de logements (fig.52) fait figure de projet pilote appliquant les principes de réversibilité spatiale. Situé dans le quartier d'Arabianranta à Helsinki, l'idée était de concevoir des appartements dans l'esprit «loft» mais sans connotations de luxe.

Les 39 «appartements» sont de grands espaces vides d'environ 100m² (50m² pour les petites unités (fig.53)) comprenant seulement deux salles de bains. Les habitants sont libres d'aménager leurs espaces comme ils le souhaitent et peuvent même ajouter une mezzanine, la hauteur libre sous plafond étant de 5m (fig.54). Les arrivées d'eau et d'électricité sont prévues pour la cuisine et permettent plusieurs dispositions possibles (fig.56).

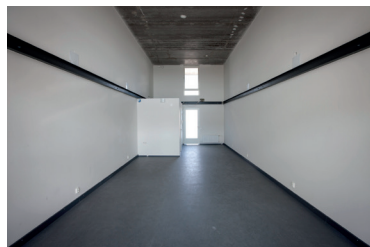


Fig.53 Intérieur d'une des petites unités avant appropriation par ses locataires

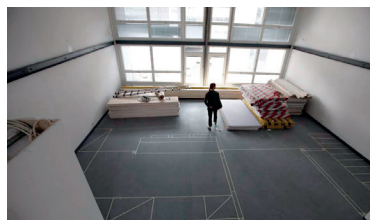


Fig.54 Intérieur d'une des grandes unités avant appropriation par ses locataires



Fig.55 Intérieur d'un appartement après appropriation par ses locataires

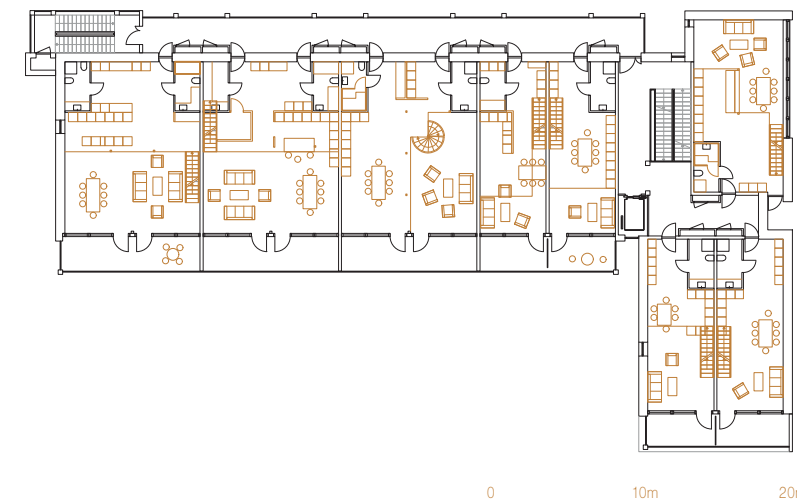


Fig.56 Plan d'un étage type

SYNTHÈSE

Partant du constat que la mise en œuvre dans chaque bâtiment de tous les principes de construction réversible – qu'ils soient de réversibilité technique ou spatiale – est utopique, il faut recourir à certaines stratégies ciblées selon différents facteurs, comme son affectation initiale, ses possibles utilisations future, sa situation géographique, etc.

La construction réversible ciblée doit donc identifier les stratégies qui peuvent être intégrées assez facilement et à moindre coût, tout en ayant le maximum d'impact lors d'une future transformation ou déconstruction. De cette manière, nous pouvons limiter drastiquement les coûts d'une construction réversible et plus facilement la faire accepter aux maîtres d'ouvrage.

À travers des exemples construits, ce chapitre présente des applications concrètes de la construction réversible ciblée sur différentes affectations.

Cette approche semble le meilleur moyen pour changer peu à peu de paradigme et accompagner la mise en place d'une économie circulaire dans le milieu professionnel.

Fig.57 (page suivante)
Logements sociaux - Archiplein et
Perraudin architectes. Voir page 56-57.
Construction des murs porteurs en pierre
massive. L'utilisation d'un mortier de
chaux et ciment permet d'assurer une
future réversibilité.



V. LA CONSTRUCTION RÉVERSIBLE AU SERVICE D'AUTRES STRATÉGIES

La construction réversible ne doit pas être considérée comme une solution unique. Il ne s'agit pas d'une méthode permettant de repousser à un horizon plus lointain les problématiques actuelles de génération de déchets et d'épuisement des ressources. Combinée avec d'autres stratégies, comme le réemploi et l'utilisation de matériaux biosourcés, elle est l'un des ingrédients allant dans le sens de la mise en place d'une économie circulaire pour un secteur de la construction plus durable.

En effet, le réemploi de matériaux ou d'éléments de construction est la solution la plus efficace aujourd'hui afin de diminuer la consommation d'énergie grise dans le bâtiment et le gaspillage de ressources. Comme démontré dans le troisième chapitre, la construction réversible doit avoir pour premier objectif d'allonger la durée de vie du bâtiment. La réversibilité technique permet de faciliter l'entretien et les possibilités de remplacement de ses composants. La réversibilité spatiale augmente la capacité du bâtiment à s'adapter à des nouveaux usages.

Cependant, l'histoire de l'architecture et de la construction nous a démontré que tous les bâtiments seront vraisemblablement détruits un jour. Et à ce moment-là, qui sait si les composants auront toujours assez de valeur pour être réutilisés?

Dès lors, ils aboutiront dans les ultimes filières de valorisation des composants en fin de vie: le recyclage, l'incinération avec récupération d'énergie ou l'enfouissement.

Combiner la construction réversible avec l'utilisation de matériaux biosourcés et de réemploi est donc essentiel afin de réaliser

un bâtiment véritablement durable dès sa construction.

Toutefois, l'incorporation de ces trois stratégies dans un projet demande un changement de conception de la part des architectes, en particulier pour le réemploi. En effet, le processus se retrouve inversé: ce n'est plus l'espace qui est générateur de composants mais les éléments de construction disponibles sur le moment qui vont définir la forme et l'esthétique de l'espace.

Une démonstration de l'utilisation de ces trois stratégies a été faite par le Baubüro InSitu lors de la transformation et surélévation de la Halle 118 à Winterthour. Ce projet montre à quoi peut ressembler une architecture conçue pour les principes d'une économie circulaire. Il combine à la fois l'utilisation de matériaux de réemploi et de matériaux biosourcés tout en appliquant les principes de la construction réversible. Il a été réfléchi de manière globale en prenant en compte l'ensemble du cycle de vie y compris le réemploi après une première utilisation⁴⁸. Chaque assemblage a été pensé de manière réversible afin de faciliter le futur réemploi des composants.

⁴⁸ C. Hegner van Rooden & I. Gutzwiller (2019), *Tracés 14-15/2019*, « Halle 118 à Winterthour: faire avec l'existant »

Fig.58 (page suivante)
Halle 118 - Baubüro InSitu



HALLE 118 - BAUBÜRO INSITU

La Halle 118 du Baubüro In Situ a été un des plus grands chantiers de réemploi de Suisse. Il a montré les possibilités d'une déconstruction sélective à grande échelle, en utilisant environ 80% de matériaux réemployés en terme de nombre d'éléments.

Le bâtiment est situé à Winterthur dans le quartier de Lagerplatz, une ancienne friche industrielle. Depuis 1990, le quartier s'est progressivement transformé au gré des locataires intéressés jusqu'à devenir un modèle de mixité. On y trouve entre autres des logements, bureaux, écoles, petits commerces, restaurants, espaces culturels et coopératives.

La fondation Abendrot, propriétaire des lieux depuis 2009, a mandaté en 2017 le Baubüro InSitu afin de rénover et surélever un des derniers bâtiments inutilisé du quartier en utilisant le maximum de matériaux de réemploi, l'objectif fixé étant l'ajout de trois étages pour créer 4300 m² de surface. Outre les espaces supplémentaires, cette nouvelle volumétrie a été pensée comme un phare, apportant une entité reconnaissable au site, visible depuis les alentours. Le programme n'avait donc pas de demande spécifique et a été défini lors de l'avant-projet.

Le rez a une grande hauteur sous plafond et possède une mezzanine. Il est utilisé comme atelier de production et exploité indépendamment des autres niveaux par la ZHAW⁴⁹. Les quatre étages sont consacrés à des bureaux et des studios d'artistes. L'escalier extérieur permet à tous les niveaux d'avoir accès, via les coursives, aux locaux communs pourvus de cuisines.



Fig.59 Bâtiment existant



Fig.60 Après surélévation

⁴⁹ Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, la Haute École Spécialisée de Winterthur

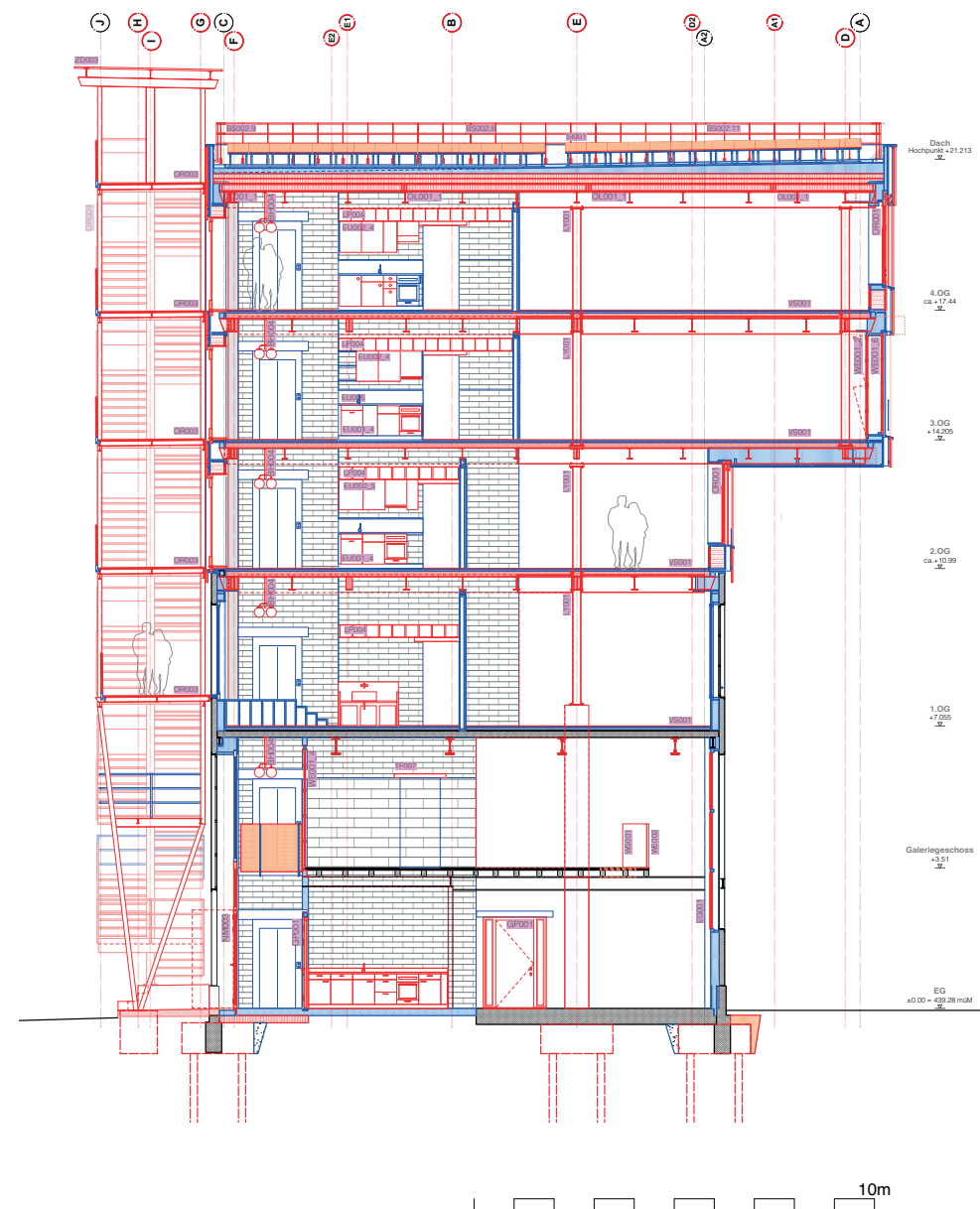


Fig.61 Coupe

élément neuf - élément de réemploi - existant

DÉCONSTRUCTION SÉLECTIVE, STOCKAGE ET TRANSPORT



Fig.62 Déconstruction sélective de la structure

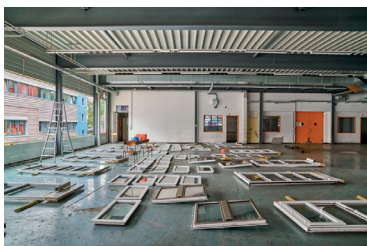


Fig.63 Inventaire des fenêtres



Fig.64 Stockage



Fig.65 Préparation au transport

Dessiné initialement de manière générique, le projet a évolué au fur et à mesure que les éléments de construction étaient disponibles.

Cette recherche a débuté dès 2017 avec la possibilité de récupérer la structure métallique de l'ancien site de distribution de la Coop à Bâle (fig.62). Les éléments provenant en grande majorité de chantiers de démolition, il a fallu être très réactif pour organiser leur déconstruction propre. Chaque élément a dû être soigneusement relevé afin de constituer un inventaire précis dans lequel piocher pour faire évoluer le projet (fig.63).

En attendant le début du chantier qui a commencé en octobre 2019, trois lieux de stockage ont dû être loués pour accumuler le matériel trouvé: à Pratteln dans le canton de Bâle, à Neftenbach proche de Winterthur, et à Zurich. Les éléments y étaient répartis suivant leur provenance géographique et la nécessité d'être conservés en intérieur ou non (fig.64 & 65).

La décision de récupérer un élément était principalement d'ordre économique. Ayant comme référence un premier devis général basé sur le projet construit avec des matériaux neufs, chaque élément récupéré devait coûter 20% moins cher (déconstruction comprise) que son équivalent neuf. Cette manière de procéder a non seulement permis d'avoir une marge comprenant le stockage et le transport, mais aussi de contrôler les coûts et de rendre un bâtiment au même prix qu'une construction nouvelle.

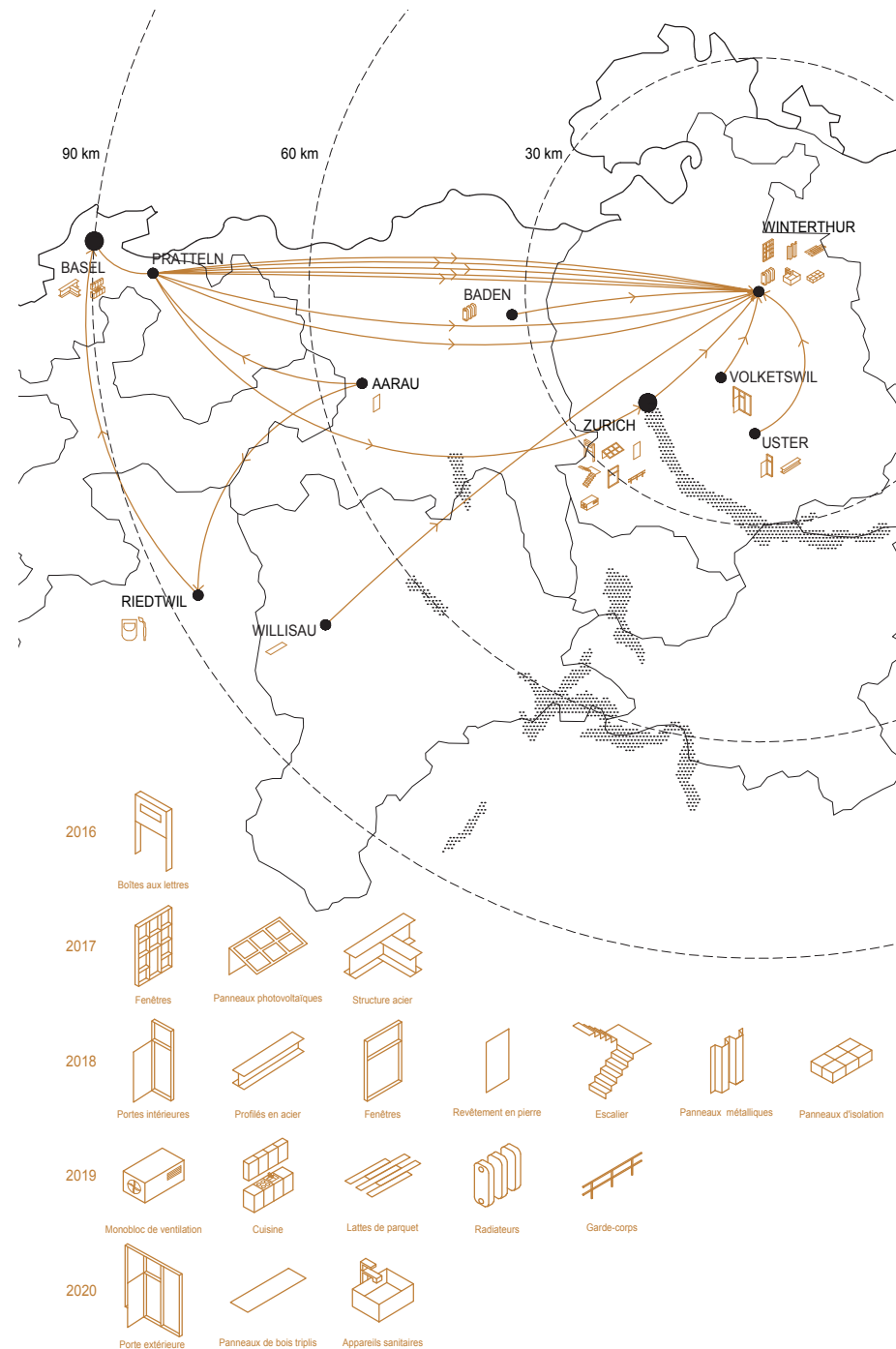


Fig.66 Provenance et parcours des éléments de réemploi

STRUCTURE PORTEUSE



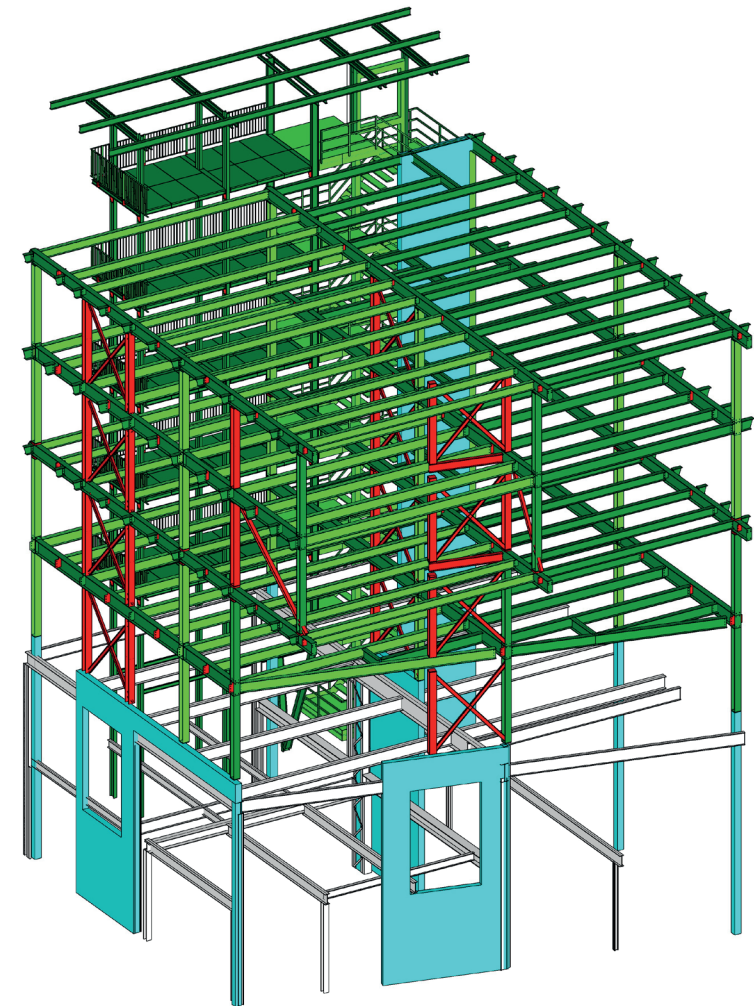
Fig.67 Remplissage en béton des poutres principales



Fig.68 Montage de la structure

C'est donc la structure récupérée à Bâle qui a déterminé le système constructif du bâtiment. En effet, sur ce site, plus de 60 tonnes de profilés en acier type IPE ou HEA ont pu être récupérés. Sur un deuxième site, une ancienne usine de machines textiles dans le canton de Zurich, 210 IPE120 et 90 IPE100 ont été désassemblés afin de compléter la structure. Mais après un inventaire détaillé de tous les éléments à disposition et une analyse structurelle, il a été démontré que ses propriétés mécaniques étaient insuffisantes pour l'usage qui était visé, que ce soit au niveau de la statique ou de la protection incendie. Un ajustement a donc été nécessaire pour augmenter sa capacité portante. Étant donné le grand nombre de profilés récupérés, l'écartement entre poutres secondaires a pu être divisé par deux en doublant leurs nombres. Concernant les poutres principales, leur portée a également été réduite par l'ajout de poteaux intermédiaires. Ils ont été positionnés dans les cloisons afin de ne pas perturber l'organisation spatiale des étages. Pour atteindre les normes de sécurité incendie, les poutres primaires ont dû être remplies de béton (fig.67). Ce système permet de se passer d'un revêtement de plaques de plâtre pour la protection incendie.

Les murs du bâtiment existant étant trop faibles pour reprendre les charges supplémentaires induites par la surélévation, il a fallu les renforcer: les fondations par des micro-pieux et le reste par des murs en béton (fig.69). Les dalles sont mixtes en acier-béton. À la place des tôles holorib habituellement employées dans ce type de système, c'est l'excédent des panneaux métalliques prévus pour la façade qui est utilisé en coffrage perdu.



- Réutilisé sans modifications
- Réutilisé avec modifications
- Éléments neuf
- Renforcement statique de la structure existante par du béton

Fig.69 Axonométrie de la structure métallique

ENVELOPPES



Fig.70 Déconstruction sélective des panneaux de façade



Fig.71 Préfabrication de la structure de façade



Fig.72 Pose des éléments de façade préfabriqués sur le chantier



Fig.73 La paille en attente de l'enduit en terre

Les façades du bâtiment existant – composées de structure en acier avec remplissage en brique – sont caractéristiques du site et devaient être conservées. L'isolation thermique s'est donc faite par l'intérieur. Dans la même optique, les fenêtres existantes sont doublées depuis l'intérieur pour respecter les normes énergétiques.

Pour les façades de la surélévation, deux bâtiments ont servi de "gisement". Le premier site est un immeuble de bureaux situé à Zurich: 76 fenêtres en triple vitrage ont été récupérées sur les 400 à disposition. Le deuxième est une ancienne imprimerie qui se trouve à Winterthur. Environ 1'100m² de panneaux de façade métalliques oranges ont été démontés (fig.70) ainsi que 25 fenêtres Alu-PVC en triple vitrage installées il y a douze ans et toujours en vente au moment de leur désassemblage. Quelques fenêtres ont également pu être récupérées dans un bâtiment adjacent à la Halle 118. Mais leur faible performance thermique a nécessité de les doubler.

En raison de leurs tailles et formes différentes, toutes les fenêtres sont alignées en haut de chaque étage, qui est marqué horizontalement par un décrochement permettant d'intégrer la protection solaire (fig.74). Ainsi, chaque niveau gagne légèrement en surface. Les fenêtres sont un peu en retrait et les encadrements habillés comme la nouvelle façade.

Les murs de la surélévation sont en ossature bois isolés avec de la paille (fig.71, 72, 73) et recouvert d'un enduit de terre à l'intérieur. Cette ossature a dû être construite avec du matériel neuf, le charpentier ne voulant pas risquer d'abîmer ses machines en utilisant du bois récupéré pouvant contenir des vieux clous ou vis.



Fig.74 Élévation sud-ouest

élément neuf - élément de réemploi - existant

AMÉNAGEMENT INTÉRIEUR, CIRCULATION VERTICALE, TECHNIQUES



Fig.75 Construction des cloisons intérieures



Fig.76 Pose du parquet



Fig.77 Cales en acier pour aligner les étages à l'escalier



Fig.78 Réseaux électriques et radiateurs apparents

Les cloisons intérieures sont composées d'une ossature en bois et d'une isolation neuve (fig.75). Les panneaux de revêtement sont réemployés (fig.79). Toutes les fixations sont visibles et accessibles permettant une future réversibilité. Les murs autour de l'ascenseur et des sanitaires sont en briques silico-calcaire neuves avec du mortier de ciment standard. Plusieurs tests ont été effectués afin d'en récupérer lors de la démolition mais aucune technique ne permettait à l'opération d'être viable économiquement. L'emploi d'un mortier d'argile a également été étudié, mais son utilisation requérant de construire les murs par tranches de 1m de haut pour des raisons de tassement rendait l'opération trop longue. Le parquet est fixé par vis sur des lattes de bois. L'espace restant est rempli avec un remblai sec apportant la masse nécessaire pour l'acoustique (fig.76).

L'escalier en acier galvanisé de six étages vient d'un immeuble de bureaux à Zurich. Excepté l'ajout de quelques marches en béton à son départ et quelques ajustements de la structure porteuse du bâtiment pour que les étages s'alignent parfaitement (fig.77), il a pu être réemployé sans autres modifications.

Au niveau des techniques, les radiateurs récupérés étant trop petits et trop peu performants pour atteindre les normes en vigueur, il a fallu doubler leur nombre (fig.78). Le monobloc de ventilation et certaines conduites ont également pu être réemployés. Le réseau électrique est neuf, l'utilisation d'éléments de réemploi étant trop cher. Tous les raccords sont fixés en apparent permettant une réversibilité technique totale. Les panneaux photovoltaïques en toiture viennent d'une ancienne usine Siemens à Zurich.



Fig.79 Espace commun



Fig.80 Bureau au 1er étage

SYNTHÈSE

De la même manière que la construction réversible ne doit pas être utilisée pour remettre à plus tard la question du gaspillage de ressources, elle ne doit pas non plus être vue comme une alternative au réemploi.

Combinée avec d'autres stratégies comme l'utilisation de matériaux biosourcés et le réemploi, elle est l'une des solutions accompagnant la mise en place d'une économie circulaire pour un secteur de la construction plus durable.

La Halle 118 du Baubüro InSitu en est un bon exemple. En passant en revue chaque couche du projet, il est intéressant de remarquer la systématique adoptée privilégiant pour chaque composant le réemploi en premier lieu, puis l'utilisation de matériaux biosourcés et le tout construit de la manière la plus réversible possible.

Évidemment cette démonstration n'a été possible qu'avec une forte volonté de la part du maître d'ouvrage. L'affectation choisie – des ateliers et des bureaux – facilite aussi l'acceptation d'un style brut et industriel. Il serait intéressant de transposer cette méthodologie aux logements où cette esthétique pourrait être plus difficile à assumer.

Toutefois cet exemple prouve de manière concrète que cette manière de faire est possible, économiquement viable et réalisable dans des délais similaires aux constructions neuves.

Fig.81 (page suivante)

Démontage d'un mazot en bois construit et réparé par le laboratoire EAST de l'EPFL. Grâce au système constructif du madrier utilisant uniquement des assemblages par encastrement, le mazot a pu être démonté en 4h par six personnes.



MOTOS

MOTOS

MOTOS



PROJET DE MASTER

Les cinq points énoncés dans ce travail sont une proposition des caractéristiques nécessaires afin que la construction réversible puisse être introduite progressivement de manière plus conséquente dans le milieu professionnel. Le recours à une construction réversible ciblée contre l'obsolescence des bâtiments et de ses composants devrait aller dans le sens des architectes, des investisseurs et d'un secteur de la construction plus durable pour l'environnement. Pour la suite pratique de ce travail, il serait intéressant de se focaliser sur une affectation en particulier afin de tester la faisabilité de l'hypothèse.

LA CONSTRUCTION RÉVERSIBLE CIBLÉE SUR UN PROJET DE LOGEMENT COLLECTIF

Comme vu dans les chapitres précédents, malgré l'âge moyen assez élevé du parc immobilier de logements en Suisse, c'est l'affectation la plus sujette aux transformations et aux démolitions. Même considérées en termes de volume, les habitations individuelles ou collectives restent - derrière les bâtiments industriels - celles générant le plus de déchets. C'est donc l'une de ces catégories - notamment les immeubles locatifs - où le potentiel de la construction réversible peut le plus impacter la longévité et le réemploi des composants et bâtiments.

La Suisse possède un marché immobilier spécifique en Europe: faible disponibilité de terrains à bâtir, des loyers relativement élevés, un taux de vacance relativement bas et très peu de propriétaires. En effet, au contraire de ses voisins européens où le taux de logement en propriété se situe autour des 70%, la majorité de la population en Suisse n'est pas propriétaire (autour des 38%) mais locataire⁴⁹. De plus, ces biens

immobiliers sont de moins en moins détenus par des propriétaires privés. Depuis les années 2000, leurs parts diminuent constamment (fig.72) au profit d'autres propriétaires institutionnels comme les caisses de pension, les fondations, les fonds immobiliers ou autres institutions publiques et privées.

On pourrait imaginer que certains de ces acteurs - comme les caisses de pension - puissent montrer un intérêt à un rendement sur le long terme et seraient donc possiblement intéressés par les gains futurs qu'apporterait la construction réversible. En effet, leur but étant de garantir le financement du deuxième pilier, elles ont tout intérêt à prendre soin de leur parc immobilier.

Dès lors, une possibilité pour continuer ce travail comme projet de master pourrait être la conception d'un immeuble de logement collectif. Afin d'ancrer le projet dans une réalité concrète, l'idée serait de prendre un projet ou un immeuble neuf construit récemment. Le projet serait entièrement refait en mettant en œuvre une construction réversible ciblée, utilisant le réemploi et des matériaux biosourcés. En ayant les mêmes contraintes liées au site, aux normes et aux lois, cela permettrait de pouvoir comparer les deux projets et les deux approches. Idéalement, à la fin du projet, un chiffrage approximatif pourrait être réalisé. Mais cela est conditionné par l'obtention de certaines données. En effet, le manque de chiffres précis disponibles concernant les phases de déconstruction sélective, stockage, nettoyage, reconditionnement, transport, rend l'opération incertaine et imprécise, ce qui empêcherait une comparaison valable.

⁴⁹ R. El Bernoussi & B. Progin (2018), Cronos Finance, « Les principaux investisseurs immobiliers en Suisse »

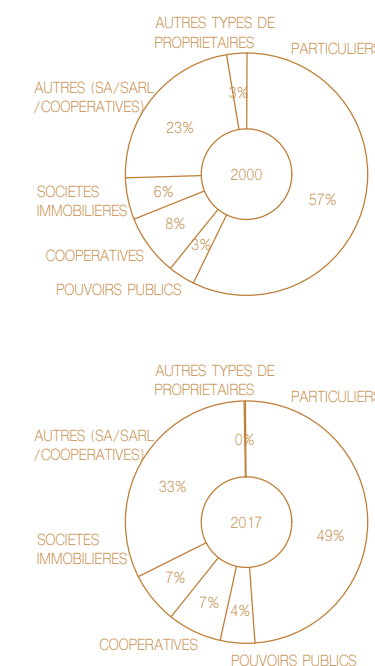


Fig.82 Types de propriétaires des logements locatifs en 2000 et 2017

Fig.83 (page suivante)
Tila Housing Block - Talli architects
Voir pages 62-63. Intérieur d'une des grandes unités avant appropriation par ses locataires.



CONCLUSION

Au fil des recherches, des lectures et des entretiens menés sur le sujet de la construction réversible, la question s'est posée de son application concrète dans le milieu professionnel. La réversibilité spatiale ou technique n'est pas fondamentalement difficile à appliquer en théorie. Mais comme toute théorie, sa mise en œuvre dans la pratique se retrouve souvent compliquée par des facteurs externes, qu'ils soient économiques, culturels ou sociaux. Pourtant, face aux enjeux environnementaux, il devient urgent de changer les habitudes du secteur de la construction afin de la rendre plus durable. Le gaspillage de matière première, la génération massive de déchets, la consommation excessive d'énergie, sont toutes des actions qui peuvent être freinées par le passage à une économie circulaire, et la construction réversible et le réemploi sont des pistes prometteuses allant dans ce sens-là.

Face à l'urgence de changer de paradigme, ce travail propose cinq caractéristiques nécessaires à son introduction progressive dans le milieu professionnel.

Le secteur de la construction est un domaine évoluant lentement. Partant de ce principe, il semble qu'un changement radical du jour au lendemain des habitudes de tous les acteurs concernés soit irréalisable. Afin "d'enclencher la machine", les architectes ont leur rôle à jouer: en informant et sensibilisant les maître d'ouvrage, les mandataires, les entreprises et tous les acteurs concernés.

Le recours aux points énoncés dans ce travail devrait permettre de pouvoir trouver une réponse satisfaisante aux différents intérêts de chacun, tout en faisant un pas vers une

construction plus durable et respectueuse de l'environnement. C'est finalement une pratique qui existe déjà et qui a toujours existé dans le milieu: celle du compromis. Un architecte a une vision, le maître d'ouvrage en a une autre, et des raisons économiques et techniques les influencent tous les deux. Quels sont les éléments pour lesquels se battre et quels sont ceux qui pourraient passer au second plan? Actuellement cela se joue souvent au profit d'une esthétique et d'un concept. Sans les mettre de côté, il faudrait dorénavant y ajouter celui de la construction réversible et du réemploi.

Fig.84 (page suivante)
Workshop EPFL: A Prototype Pavilion in Textile Reinforced Concrete
Inspiré du travail sur l'*argamassa armada* de l'architecte brésilien Lelé, ce workshop tente de transposer ce savoir en l'adaptant à des techniques et matériaux plus modernes. Les éléments sont réalisés en ciment renforcé au textile de carbone, ce qui permet d'atteindre des performances mécaniques remarquables avec une faible hauteur statique. Le pavillon a été pensé de manière à être facilement constructible et déconstructible, les éléments pouvant être manipulés par deux personnes.



BIBLIOGRAPHIES

LIVRES

W. Addis, J. Schouten (2004), *Design for reconstruction, principles of design to facilitate reuse and recycling - C607*. Construction Industry Research & Information Association, Londres

Baubüro InSitu (2021), *Bauteile wiederverwenden : ein Kompendium zum zirkulären Bauen*. Zurich: Park Books

S. Brand (1994), *How buildings learn, What happens after they're built*. New York: Viking Penguin

J. Byles (2005), *Rubble: unearthing the history of demolition*. New-York: Harmony Books

Encore Heureux (2019), *Matière Grise*. Paris: Editions Pavillon de l'Arsenal

M. Ghyoot, L. Devlieger, L. Billet, A. Warnier (2018), *Déconstruction et réemploi*. Lausanne: Presses Polytechniques et universitaires romandes

M. Gorgolewski (2018), *Resource salvation: The architecture of reuse*. Hoboken: John Wiley & Sons

F. Rambert, M. Colombet, C. Carboni (2015), *Un bâtiment, combien de vies? La transformation comme acte de création*. Milan: Silvana Editoriale Spa

P. Sassi (2006), *Strategies for Sustainable Architecture*. London: Taylor & Francis

T. Capelle (2019), *Testing BAMB results through prototyping and pilot projects*. Brussels Environment

S. Kendall (2014), *Report on the Tila Open Building project in Helsinki*. MIT

C. Küpfer, C. Fivet (2021), *Déconstruction sélective- Construction réversible*. EPFL

Salza, Matériuum (2020), *Construire le réemploi, état des lieux et perspectives: une feuille de route*. OFEV

O. Akinade, L. Oyedele, A. Oyedele, J. M. D. Delgado, M. Bilal, L. Akanbi, A. Ajayi, H. Owolabi (2020), *Production Planning & Control vol 31 n°10*, «Design for deconstruction using a circular economy approach: barriers and strategies for improvement». London: Taylor & Francis

C. Hegner van Rooden & I. Gutzwiller (2019), *Tracés 14-15/2019*, « Halle 118 à Winterthur: faire avec l'existant ». Espazium

M. Kornmann, A. Queisser (2012), *Mauerwerk 16 heft 4 "Service life of the building stock of Switzerland"*. Berlin: Ernst & Sohn

B. Leupen (2004), «The Frame And The Generic Space, A New Way Of Looking To Flexibility». Ball State University

C. Morgan, F. Stevenson (2005), *SEDA Design Guides for Scotland: n°1*, «Design for Deconstruction». ResearchGate

RAPPORTS

ARTICLES

THÈSES

A.Thomsen et K. van der Flier (2011), *Understanding obsolescence: A conceptual model for buildings*. Building Research & Information 39:4

J. Van Niel (2007), *L'économie de la fonctionnalité*. UNIL-UTT

E. Durmisevic (2006), *Transformable Building Structures, Design for disassembly as a way to introduce sustainable engineering to building design & construction*. TU Delft

SITES INTERNET

<https://www.aeternum-tech.com>

<https://afasiaarchzine.com/2016/02/christian-kerez-6/>

<https://www.archiplein.com>

<https://www.bamb2020.eu>

<https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/registres/registre-batiments-logements/contenu-documents-reference.html>

<https://www.baumschlager-eberle.com>

<https://www.connaissancedesarts.com/monuments-patrimoine/la-grande-halle-du-site-lustucru-arles-sauvee-de-la-destruction-1185831/>

<https://deplanta-architectes.ch>

<http://encoreheureux.org>

<https://www.espazium.ch/fr/actualites/los-sature-bois-la-rescousse-de-lhumanite>

<https://ec.europa.eu/eurostat/>

<https://www.fastapp.com/portfolio/ubc-tallwood-house-at-brock-commons-2/>

<https://france3-regions.francetvinfo.fr/provence-alpes-cote-d-azur/bouches-du-rhone/arles/arles-halle-lustucru-signe-eiffel-laisse-place-centre-commercial-1498105.html>

<http://www.gamlemursten.eu>

<http://www.groupe-h.com/fr/projets/lieux-culturels/renovation-du-globe-de-la-science-et-de-linnovation-au-cern-267>

<https://www.insitu.ch>

materiauxreemploi.com

<https://www.naturallywood.com/project/brock-commons-tallwood-house/>

<https://www.openbuilding.co>

<https://www.superuse-studios.com>

<https://ten.studio/studio>

<https://theprepared.org/features-feed/ise-jingu-and-the-pyramid-of-enabling-technologies>

<https://www.tudelft.nl/bk/onderzoek/projecten/green-building-innovation/facade-leasing/facade-leasing-pilot-project-at-tu-delft>

<https://venezia-biennale-japan.jp/e/architecture/2021>

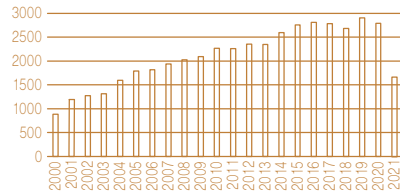
<https://www.vba2020.jp/overview/>

CRÉDITS DES FIGURES

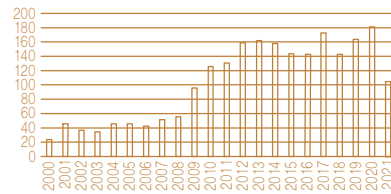
Figure 1: Alberto Strada
Figure 2: Bruno Känel
Figure 3: adapté de C. Küfer, C. Fivet (2021) - redessin Bruno Känel
Figure 4: adapté de C. Küfer, C. Fivet (2021) - redessin Bruno Känel
Figure 5: U.S. Department of Housing and Urban Development
Figure 6: Adam Harangozó
Figure 7: F. G. Bock
Figure 8: ADMM
Figure 9: adapté de S. Brand (1994) - redessin Bruno Känel
Figure 10: adapté de Rotor (2018) - redessin Bruno Känel
Figure 11: Gamle Mursten
Figure 12: K. Wachsmann (1961)
Figure 13: Creative Commons Attribution 4.0 International
Figure 14: adapté d'Aeternum - redessin Bruno Känel
Figure 15: Hidden Architecture
Figure 16: B. Leupen (2004)
Figure 17: Baumschlager Eberle
Figure 18: Pascal Bois
Figure 19: Bruno Känel
Figure 20: AA
Figure 21: Collection of The Skyscraper Museum
Figure 22: adapté de Rotor (2018) - redessin Bruno Känel
Figure 23: Lucien Fortunati
Figure 24: A. Picon
Figure 25: A. Picon
Figure 26: adapté de A. Thomsen, K van der Flier (2011) - redessin Bruno Känel
Figure 27: Bruno Känel
Figure 28: Bruno Känel
Figure 29: Bruno Känel
Figure 30: Bruno Känel
Figure 31: OFS - Construction et logement 2019 - redessin Bruno Känel
Figure 32: adapté de S. Brand (1994) - redessin Bruno Känel
Figure 33: adapté de S. Brand (1994) - redessin Bruno Känel
Figure 34: Pavillon de l'arsenal / Druot, Lacaton & Vassal / Philippe Ruault
Figure 35: Brudder
Figure 36: Cliché Bibliothèque Nationale de France
Figure 37: Allsteel office / Batessmart

Figure 38: Ten Studio
Figure 39: Christian Kerez architecte
Figure 40: Archiplein
Figure 41: Archiplein
Figure 42: Archiplein
Figure 43: adapté de Archiplein & Perraudin - redessin Bruno Känel
Figure 44: Nova Lux Production
Figure 45: Bruno Känel
Figure 46: Nova Lux Production
Figure 47: adapté de De Planta & Associés Architectes - redessin Bruno Känel
Figure 48: Salvatori
Figure 49: Salvatori
Figure 50: Slavatori
Figure 51: adapté de Baumschlager Eberle - redessin Bruno Känel
Figure 52: Talli Architectures & Design
Figure 53: Talli Architectures & Design
Figure 54: Talli Architectures & Design
Figure 55: Talli Architectures & Design
Figure 56: adapté de Talli Architectures & Design - redessin Bruno Känel
Figure 57: Archiplein
Figures 58-60: Martin Zeller - Baubüro InSitu
Figure 61: Baubüro InSitu
Figures 62-65: Martin Zeller - Baubüro InSitu
Figure 66: adapté de Baubüro InSitu (2021) - redessin Bruno Känel
Figures 67-68: Martin Zeller - Baubüro InSitu
Figure 69: Baubüro InSitu
Figures 70-73: Martin Zeller - Baubüro InSitu
Figure 74: Baubüro InSitu
Figures 75-80: Martin Zeller - Baubüro InSitu
Figure 81: Bruno Känel
Figure 82: adapté de Cronos Finance - redessin Bruno Känel
Figure 83: Talli Architectures & Design
Figure 84: Bruno Känel

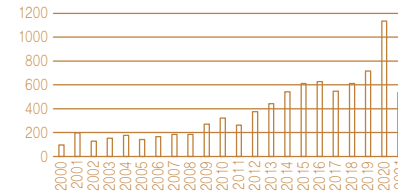
ANNEXES



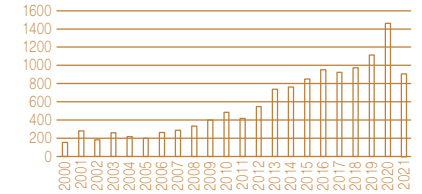
Nombre de bâtiments de logement démolis par année



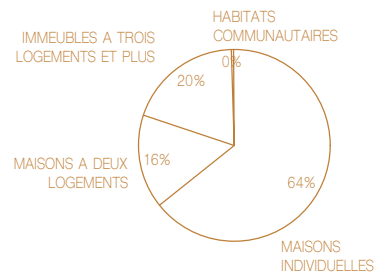
Nombre de bâtiments commerciaux démolis par année



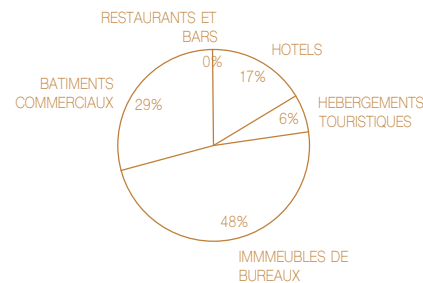
Nombre de bâtiments industriels démolis par année



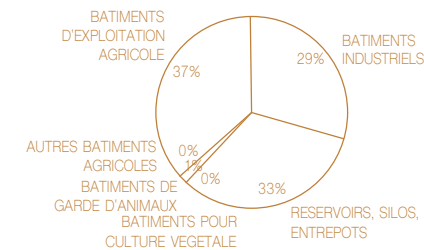
Nombre de bâtiments publics démolis par année



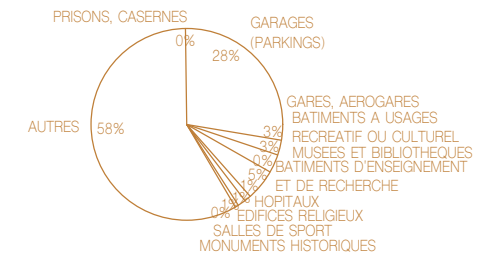
Nombre de bâtiments de logement démolis par type



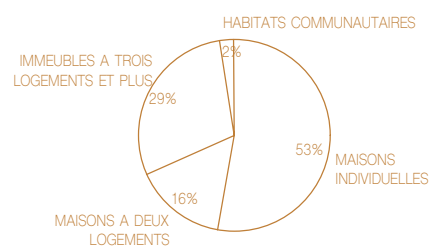
Nombre de bâtiments commerciaux démolis par type



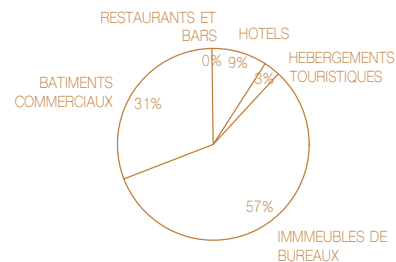
Nombre de bâtiments industriels démolis par type



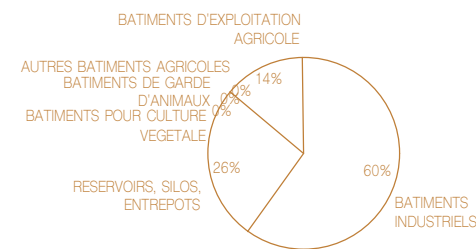
Nombre de bâtiments publics démolis par type



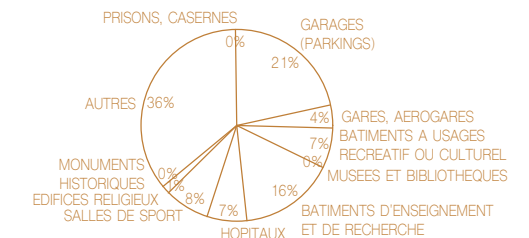
Surface de bâtiments de logement démolis par type



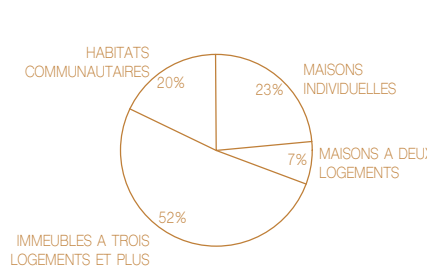
Surface de bâtiments commerciaux démolis par type



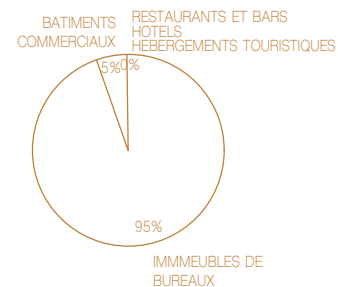
Surface de bâtiments industriels démolis par type



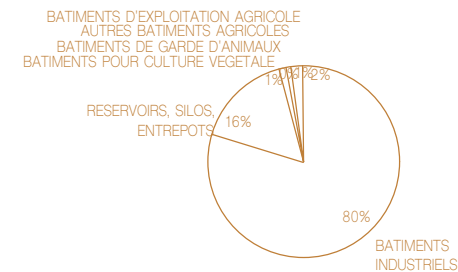
Surface de bâtiments publics démolis par type



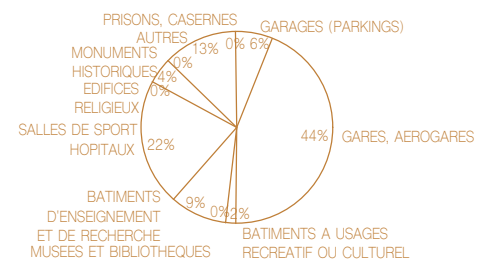
Volume de bâtiments de logement démolis par type



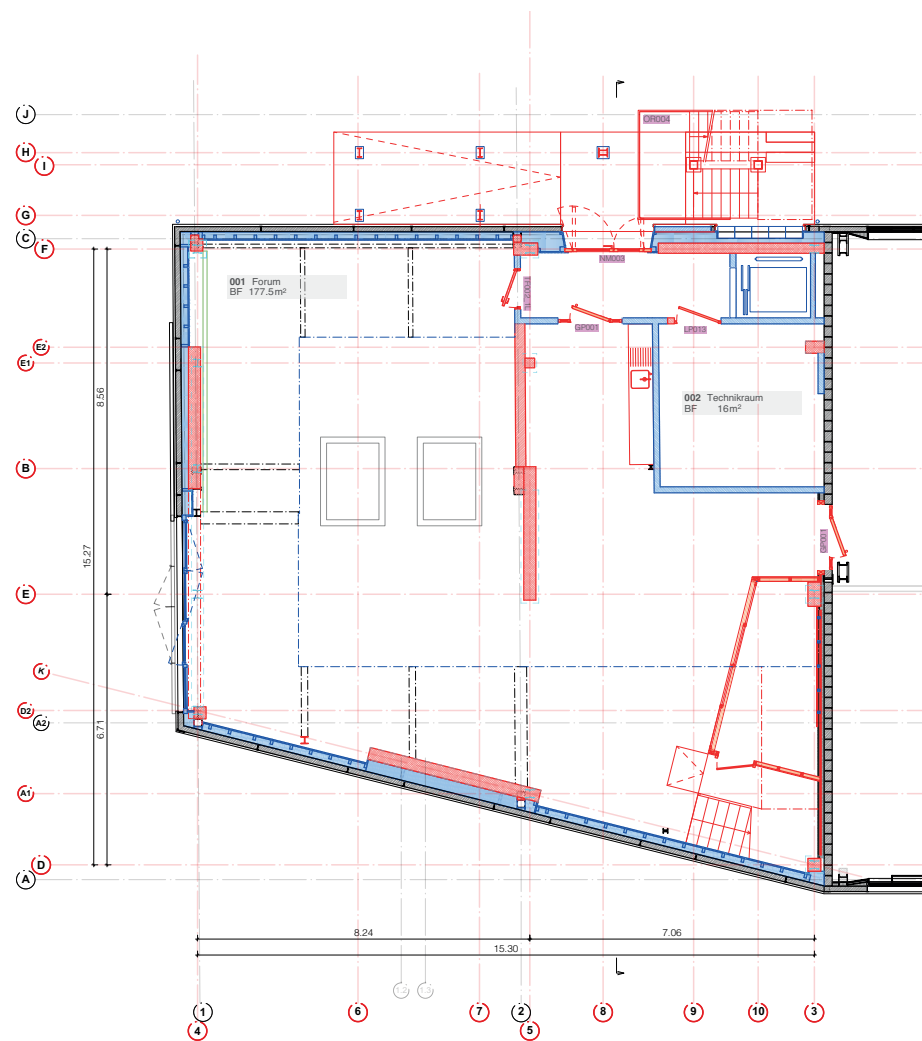
Surface de bâtiments commerciaux démolis par type



Volume de bâtiments industriels démolis par type

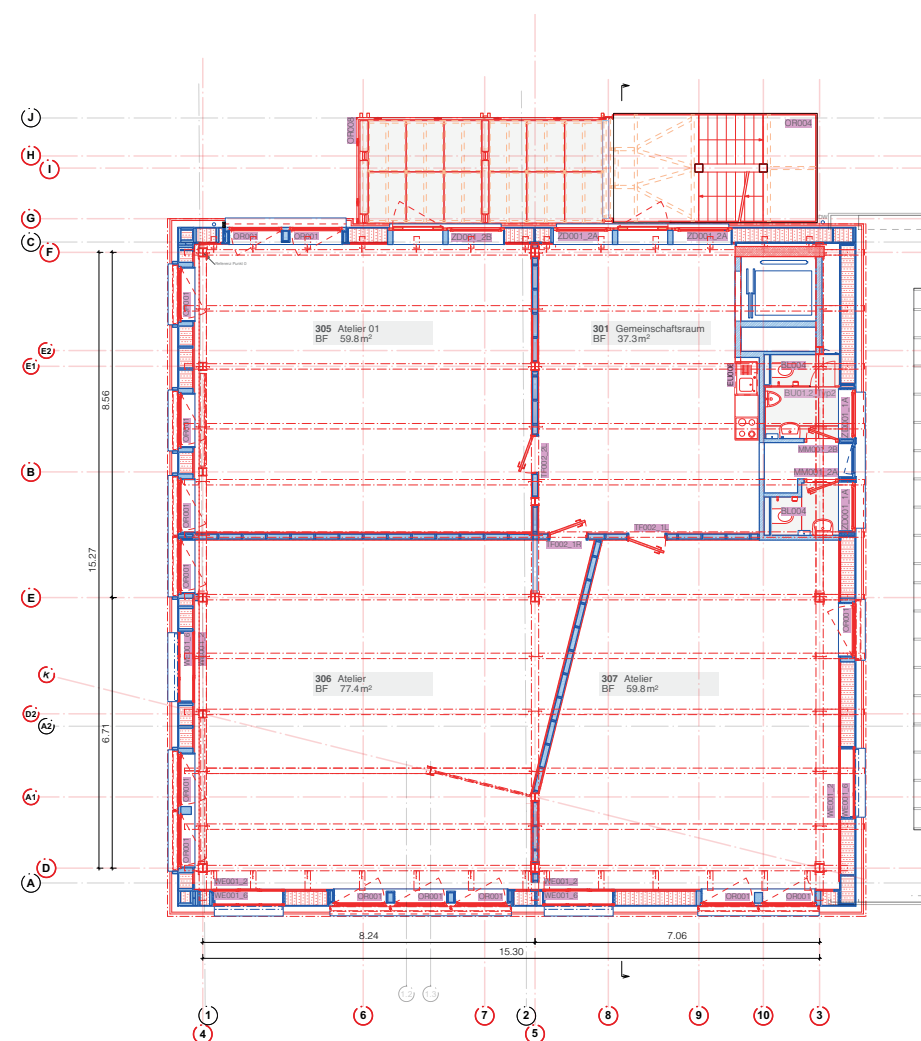


Volume de bâtiments publics démolis par type



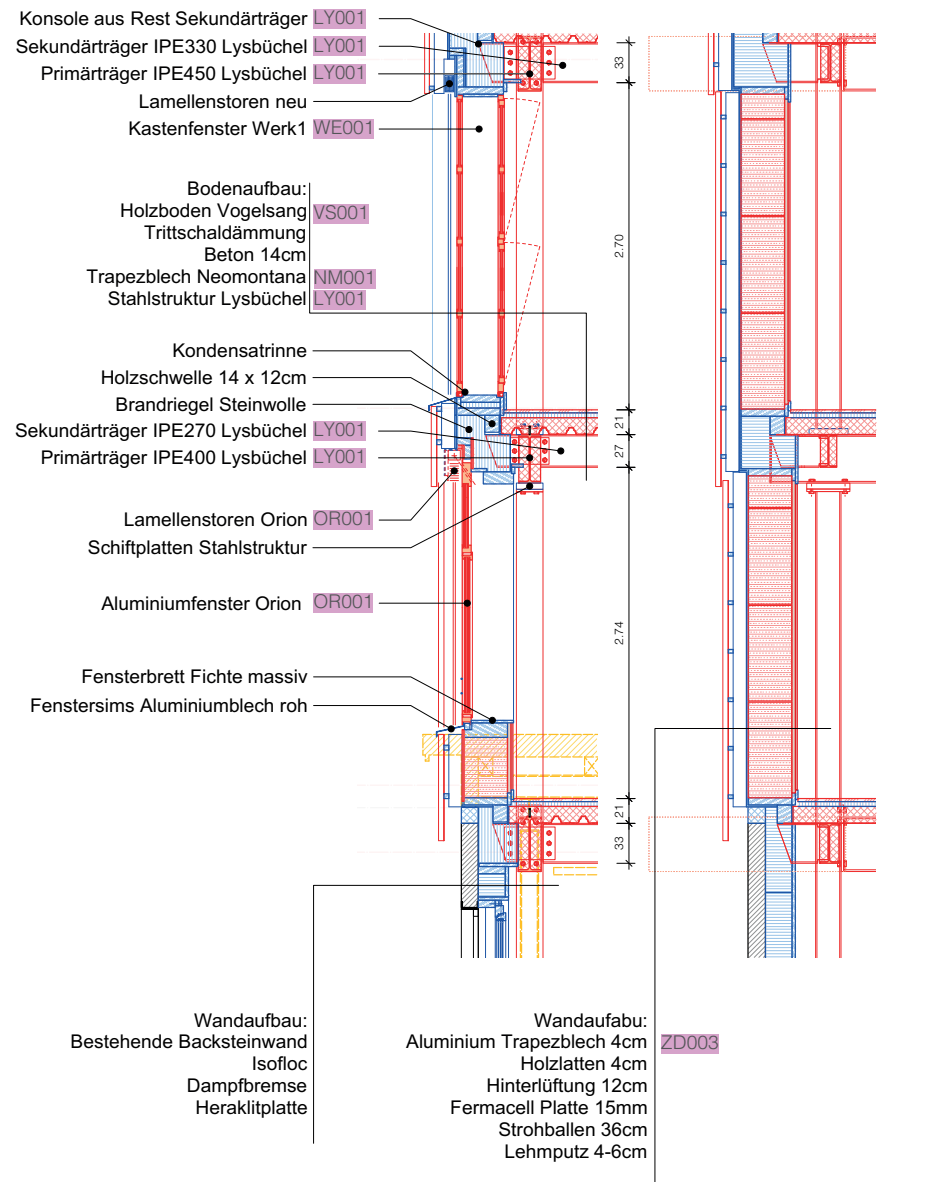
Halle 118 - Rez-de-chaussée
Source: Baubüro InSitu

10m
élément neuf - élément de réemploi - existant

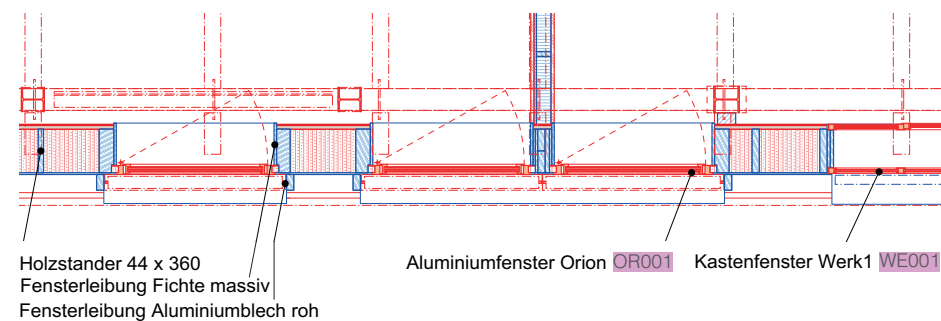
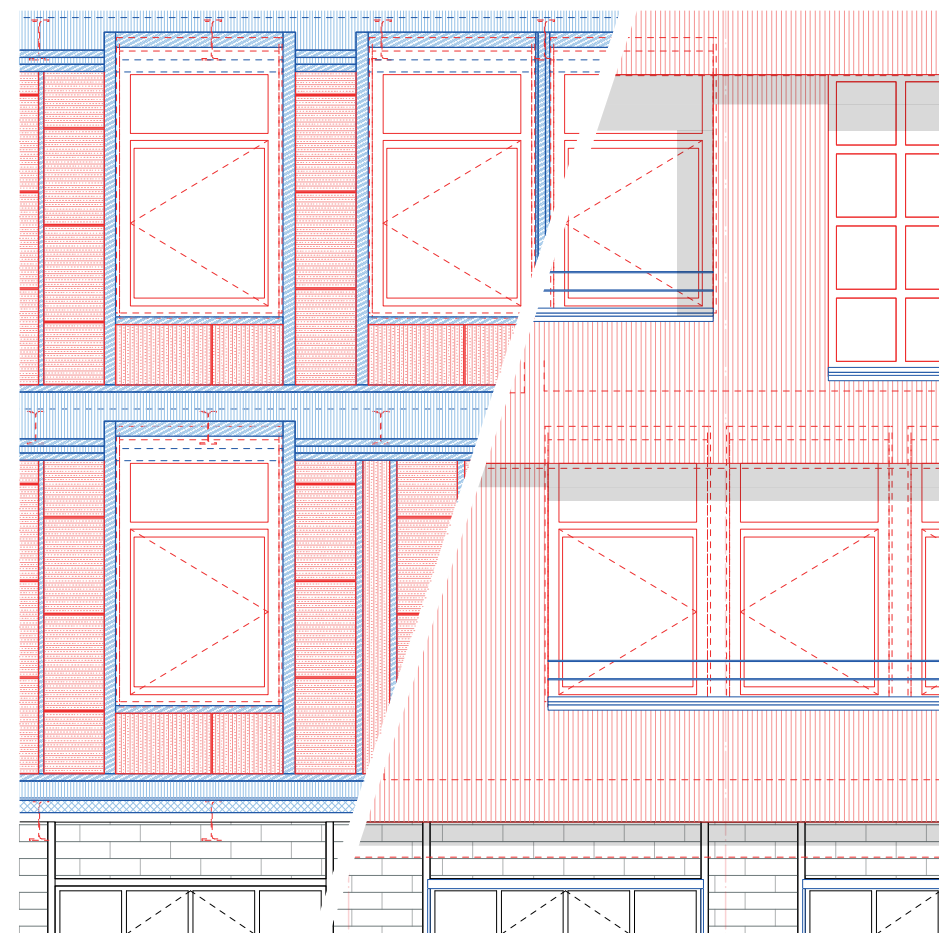


Halle 118 - Étage surélévation
Source: Baubüro InSitu

10m
élément neuf - élément de réemploi - existant



Halle 118 - Détails de principe - coupes
 Source: Baubüro InSitu



Halle 118 - Détails de principe - plans et élévations
 Source: Baubüro InSitu

élément neuf - élément de réemploi - existant

Remerciements

Alex Muresan
Benjamin Poignon
Olivier de Perrot
Raphaël Bach
Francis Jacquier
Prof. Corentin Fivet
Prof. Martin Fröhlich
Tiago Borges
Marie-Christine Beris