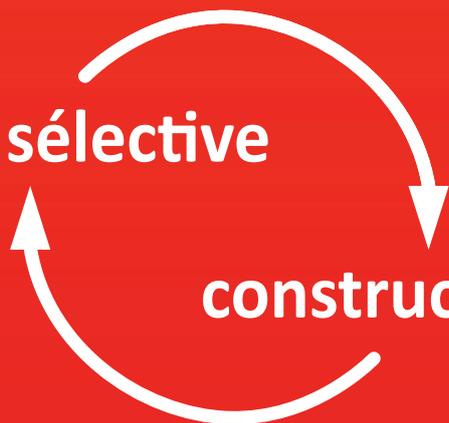


déconstruction sélective



construction réversible

recueil
pour diminuer les déchets et favoriser le réemploi
dans la construction



Küpfer C., Fivet, C. (2021)

Déconstruction Sélective- Construction Réversible: recueil pour diminuer les déchets et favoriser le réemploi dans la construction.

DOI: [10.5281/zenodo.4314325](https://doi.org/10.5281/zenodo.4314325) (160 pages)

Structural Xploration Lab · <http://sxl.epfl.ch>

EPFL Ecole polytechnique fédérale de Lausanne · Lausanne/Fribourg · Suisse

smart living lab · www.smartlivinglab.ch

direction

Corentin Fivet, EPFL

rédaction

Célia Küpfer, EPFL

Corentin Fivet, EPFL

nouvelles illustrations et droits d'auteurs

Julie Allémann, EPFL

Maxence Grangeot, EPFL

Célia Küpfer, EPFL

relecture

Julien Grisel, bunq architectes

Catherine de Wolf, EPFL

Maléna Bastien Masse, EPFL

Barbara Lambec, EPFL

Jan Brütting, EPFL

mandant

Office Fédéral de l'Environnement · <http://www.ofev.ch>

Division Déchets et Matières Premières

Section Cycles matières premières

CH-3003 Berne, Suisse

Dr. David Hiltbrunner (accompagnement)

DOI: [10.5281/zenodo.4314325](https://doi.org/10.5281/zenodo.4314325)

© EPFL, 2021

Document généré le 26/07/21

La présente étude a été réalisée sur mandat de l'OFEV. Seuls les mandataires portent la responsabilité de son contenu.

Page de garde: déconstruction sélective à Lysbüchel (image: baubüro in situ/Martin Zeller).

	abrégé	4
	panorama des études de cas	6
	réduire les déchets du bâti suisse / constats et leviers	8
	déconstruction sélective	20
	construction réversible	72
	perspectives	150
	lexique	152
	abréviations et acronymes	153
	remerciements	154
	crédits des figures	155
	table des matières détaillée	158

Depuis plusieurs décennies, l'industrie de la construction contribue de manière préoccupante à la **dégradation de notre planète**. Aujourd'hui, la consommation de la moitié des matériaux utilisés en Europe est attribuée au secteur de la construction et de la démolition alors que, en Suisse, deux tiers des déchets proviennent de chantiers. L'accumulation incessante de déchets et la consommation croissante de ressources premières participent directement à la détérioration des écosystèmes et portent préjudice à la santé humaine.

Les **solutions** pour une utilisation plus responsable des ressources sont diverses: diminuer les quantités produites, augmenter la durée de vie des composants sur site et hors site, mieux trier les rejets en fin de vie et conserver l'énergie investie dans les matériaux et les bâtiments par leur réemploi. Bien que ces stratégies nécessitent des ajustements complexes, elles sont toutes tributaires d'une bonne application de deux actions très spécifiques et peu communes en Suisse: la déconstruction sélective et la construction réversible.

La **déconstruction sélective** consiste à séparer les composants d'un bâtiment à la fin de leur vie utile dans le but d'en conserver les qualités intrinsèques. Grâce à un diagnostic précis des ressources libérées par la déconstruction, il s'agit de diriger chaque composant vers le procédé de fin de vie (recyclage, incinération, enfouissement) ou le nouveau cycle de vie (réutilisation sur site ou hors site, pour une utilisation comparable ou inférieure, avec ou sans réparation et modification) le plus approprié. Cela a pour effet d'ajouter aux options de fin de vie les plus conventionnelles des procédés moins énergivores (réparation, réutilisation sur place, réemploi hors site).

La **construction réversible** consiste à concevoir des bâtiments de sorte à ce qu'ils présentent deux propriétés particulières: la première propriété est la réversibilité spatiale, soit l'aptitude d'un espace à accueillir des usages différents et à être transformé au gré de l'évolution des modes de vie et des besoins fonctionnels, malgré les difficultés de prédictions. La seconde propriété est la réversibilité technique, soit le potentiel des composants d'un bâtiment à être désassemblés sans perte de qualité technique ou fonctionnelle. Grâce à l'application de principes fondamentaux de la conception réversible (composants à haut potentiel de réemploi, assemblages accessibles, etc.), le projet cherche à s'inscrire dans une vision à long terme de la construction et à prolonger la durée de vie des bâtiments et ensuite de leurs composants.

Aujourd'hui, déconstruction sélective et construction réversible sont des ingrédients de l'**économie circulaire** trop peu appliqués dans la pratique. Ce recueil vise à réduire certains des freins principaux à cette implémentation, à savoir le manque de retours d'expérience entre professionnels, le manque de partage des bonnes pratiques, ou encore le **manque d'illustrations du champ des possibles**. Il est avant tout destiné à tous les corps de métier impliqués dans les phases de conception, construction et déconstruction du bâtiment. Les maîtrises d'ouvrages et législateurs du bâtiment y trouveront également une description des tenants et aboutissants disponibles en la matière. Certaines pistes de développement s'adressent aussi aux organismes de formation.

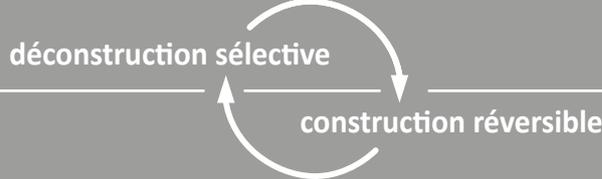
A travers une **revue de la littérature**, ainsi que **32 études de cas** et des **entretiens** avec des praticiens, ce recueil:

- › synthétise les principes fondamentaux des deux approches;
- › documente et diffuse les retours d'expériences et les bonnes pratiques;
- › apporte aux entrepreneurs/entrepreneuses, concepteurs/conceptrices et maîtrises d'ouvrage des références techniques;
- › procure aux parties prenantes un bagage théorique à la pointe et détaillé ainsi qu'une série de référence pour aller plus loin;
- › esquisse les perspectives d'évolution et opportunités applicables au bâti suisse.

Le deuxième et troisième chapitre s'adressent respectivement à la déconstruction sélective et aux techniques constructives qui démontrent un potentiel de réversibilité. Les principes fondamentaux sont d'abord étayés en tête de chapitre puis complétés par des **principes spécifiques** à la gestion du projet et à chaque fonction du bâtiment. Ensuite, un état des lieux de la pratique actuelle exemplaire en la matière est dressé pour chaque couche. Une sélection de **techniques conventionnelles et innovantes** est proposée et compare leur potentiel de réversibilité. Ces éléments sont ensuite illustrés dans des études de cas.

Ces revues s'adressant en premier lieu mais sans exclusivité au bâti suisse existant et à venir, un travail exploratoire a été mené pour identifier des études de cas à l'intérieur du pays. Dans le deuxième chapitre, une attention particulière au travail de pionniers suisses a permis de localiser une grande majorité (85%) des études de cas de déconstruction en Suisse. Le rassemblement de **savoir-faire techniques peu connus** illustre le vaste potentiel de la déconstruction sélective pour diminuer les déchets de construction malgré les défis à différents niveaux. Ce recueil démontre que la déconstruction sélective est aujourd'hui **déjà applicable** à une série d'éléments du bâti suisse qui sont aujourd'hui démolis et permet déjà d'en prolonger l'utilisation via des circuits courts. Face aux défis existants pour systématiser les démontages sélectifs et faciliter le réemploi des composants, le rapport présente des pistes de développement parallèles (diagnostique-ressource obligatoire, formation et fiscalité adaptées, réversibilité comme critère, etc.).

Dans le troisième chapitre, les sources d'information accessibles les plus richement documentées sur le sujet ont mené à des études de cas dans le Nord-Ouest de l'Europe. A travers leurs analyses, le recueil présente des pratiques réversibles qui sont **potentiellement applicables** avec de moindres ajustements au bâti suisse. Le recueil démontre également que la durée potentielle d'utilisation des ressources sera prolongée par une gestion du projet transformée (longévité de l'information, nouveaux modèles de responsabilité, documentation pour nouveau cycle de vie, etc.). Finalement, le rapport présente des **actions de développement** (passeports matériaux/bâtiment obligatoires, formations spécifiques, soutien aux modèles circulaires, etc.) dans le but d'accompagner l'intégration concrète de la réversibilité parmi les stratégies nécessaires à la construction durable et à la réduction de l'obsolescence des bâtiments.



p.30
ameublements
p.134

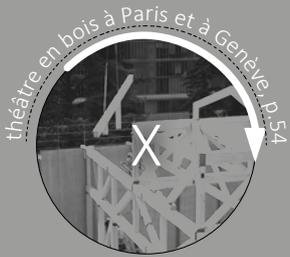


p.34
partitions et revêtements
p.128



p.40
éléments techniques
p.122





p.44

p.50

enveloppes

structures en bois

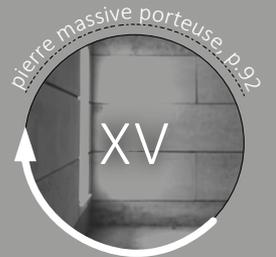
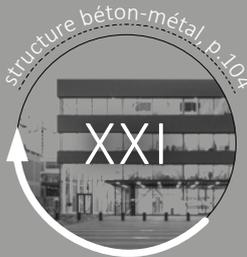
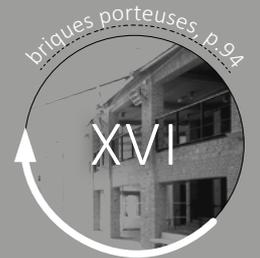
structures métalliques

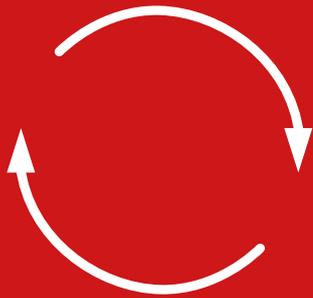
structures bétonnées

maçonneries

p.114

p.85





réduire les déchets du bâti suisse
/ constats et leviers

le bâti, source de déchets	11
séparer pour valoriser	12
coordonner pour fermer la boucle	15
documenter et transmettre	17
références	18



figure 1 · En Suisse, le secteur de la construction est responsable de la production de plus de environ 16 mio. tonnes déchets de chantier par année (Wälti et Almeida 2016).

Un déchet est un objet sans utilité connue. Sa valeur économique, technologique, ou culturelle sera conservée ou retrouvée, en tout ou en partie, dès lors qu'une nouvelle utilité lui est reconnue. Diminuer la quantité de déchets, et en particulier les déchets de construction et démolition, revient ainsi à s'assurer que chaque composant non-renouvelable du bâtiment garde ses qualités intrinsèques le plus longtemps possible, de telle sorte à permettre une gamme d'affectations potentielles la plus large possible.

L'**impact environnemental** des déchets de construction et démolition est préoccupant. Le secteur est responsable d'un tiers de tous les déchets en Europe, en poids comme en volume (Eurostat 2018, Pérez-Lombard et al. 2008, Allwood et al. 2012). Les déchets de construction et démolition constituent 65% des déchets générés en Suisse (Wälti et Almeida, 2016). Le traitement des déchets est coûteux en termes financiers, énergétiques, et écologiques. La mise à disposition de zones de décharge est un défi territorial sans réelle solution sur le long terme.

Par ailleurs, l'absence de revalorisation systémique des déchets de construction et de démolition en dehors du sous-cyclage – c'est-à-dire autre que toute transformation diminuant la valeur d'usage du composant – est une occasion manquée pour diminuer la demande en matières premières des nouvelles constructions, pourtant très préoccupante de par notamment son impact sur les écosystèmes, le climat et son incompatibilité avec l'offre limitée de nombreuses matières premières non-renouvelables.

Dans les pays industrialisés, le secteur de la construction est celui qui consomme le plus de matériau à hauteur de 50% de tous les besoins, mesurés en volume ou en masse (BIO Intelligence Service 2013, EEA 2010, Herczeg et al. 2014). En Suisse, l'industrie de la construction consomme 70 millions de tonnes de matériau chaque année (Gauch et al. 2016). La densification des centres urbains et l'évolution typologique constante des logements, lieux de travail et surfaces commerciales indiquent un besoin permanent de transformation du bâti. Ce besoin a un impact direct sur le réchauffement climatique: en 2017, la part de dioxyde de carbone (CO₂) issue de la production, maintenance et démolition des bâtiments fut estimée à 11% de toutes les émissions anthropogènes de CO₂ annuelles dans le monde (IEA 2019).

Les **raisons** expliquant l'impact écologique prépondérant de l'industrie de la construction sont multiples et sont identifiables à de nombreux niveaux: lente mais constante remise à neuf du parc immobilier en réponse aux fortes pressions foncières et rapides mutations d'usages; production de composants particulièrement gourmande en ressources énergétiques et en matériau; choix de détails constructifs plus favorables à une mise en œuvre rapide et à bas coût qu'à une gestion responsable des ressources sur la durée.

Les **solutions** sont tout autant diversifiées: diminuer les quantités produites, augmenter la part des composants renouvelables, augmenter la durée de vie des composants non-renouvelables sur site et hors site, et mieux trier les déchets en fin de vie. Ces stratégies sont chacune intégrées dans l'engagement du gouvernement suisse en matière de politique climatique pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre (Röthlisberger 2017) et son souhait d'engager des nouvelles mesures efficaces pour une gestion des ressources plus durable et circulaire (OFEV 2020a).

Bien que ces stratégies nécessitent des ajustements complexes entre dispositions logistiques, réalités économiques et volontés politiques, elles sont toutes tributaires d'une bonne application de deux actions très spécifiques et peu communes en Suisse: la **déconstruction sélective** et la **construction réversible**.

La **déconstruction sélective** consiste à séparer les composants d'un bâtiment à la fin de leur vie utile dans le but d'en conserver toutes leurs qualités. La déconstruction sélective est applicable lors de toute transformation, complète ou partielle, du bâtiment (réparation, rénovation, extension, diminution, démolition). D'une part, elle assure un tri plus fin entre composants à conserver et composants à retirer. D'autre part, elle assure un meilleur tri des déchets, permettant de les affecter individuellement vers une fin de vie (recyclage, incinération, enfouissement) ou un nouveau cycle de vie (réemploi délocalisé, avec ou sans redéfinition d'exigences fonctionnelles), de la manière la plus appropriée possible. Une déconstruction sélective est applicable à tout bâtiment existant ou neuf mais ne sera parfaite que si le bâtiment est construit de manière réversible.

La **construction réversible** consiste à édifier un bâtiment de telle sorte à (1) permettre une modification d'usage, géométrique (dimensions), ou topologique (divisions), de tout ou partie du bâtiment sans en changer les composants de construction (**réversibilité spatiale**) et (2) permettre d'en désassembler les composants sans perte de leurs qualités techniques et fonctionnelles (**réversibilité technique**). Il s'agit donc à la fois de concevoir un produit pour lui permettre d'être démonté à la fin de sa vie utile de manière à permettre la réutilisation, le recyclage, la récupération d'énergie ou la réutilisation sur site ou hors site des composants (ISO14021 2016) et de dessiner un espace apte à accueillir des usages différents et à être transformé avec l'évolution des modes de vie et des besoins fonctionnels.

La littérature anglophone se réfère couramment au terme **design-for-disassembly (DfD)**, dont une traduction littérale est celle de «conception démontable». Le terme «construction réversible» est ici préféré car il permet d'une part de traiter conjointement les aspects de réversibilité à la fois spatiale et technique, et d'autre part d'insister sur la conservation des propriétés des composants avant et après déconstruction.

Combinées, la déconstruction sélective et la construction réversible augmentent la durée de vie des composants de chaque couche du bâtiment et en permettent une fin de vie et une transition entre cycles de vie plus performantes en termes de qualité environnementale. Les deux techniques réduisent la quantité des déchets de démolition et de transformation des bâtiments. Elles réduisent l'énergie nécessaire au reconditionnement du matériau en fin de vie. Elles diminuent la quantité de déchets résiduels et les demandes énergétiques durant les processus de transformation du composant en fin de vie ou entre cycles de vie. Elles augmentent la quantité de composants réemployables et permettent de conserver leurs qualités techniques et fonctionnelles autant que possible. Par conséquent, elles créent de nouveaux emplois locaux nécessaires à la transformation des composants, tout en participant à la diminution de la demande en matières premières des nouvelles constructions. Enfin, elles diminuent le fardeau des zones de décharge sur le territoire.

A titre d'exemple, le *Centre Pompidou* conçu par Richard Rogers et Renzo Piano (figure 2) est emblématique des principes de construction réversible. Entre autres, la traditionnelle intégration des fonctions techniques dans le système porteur est éclatée et les plans d'étage sont flexibles, ouverts grâce aux grandes portées du système porteur. En outre, ces principes sont garants d'une déconstruction sélective à chaque rénovation localisée du bâtiment.



figure 2 · le *Centre Pompidou*, Paris.

Ces prédispositions ont par exemple été employées lors de la campagne de rénovation et de remplacement des vitrages de la façade ouest et des escaliers extérieurs entreprise en 2018. Face à l'impact environnemental du verre, un travail de recherche a évalué les possibilités de recyclage et de réemploi des pièces démontées (figure 3). La géométrie des verres cintrés et la méthode d'assemblage en clin facilitent ensemble la manutention, le stockage et une nouvelle mise en œuvre. En parallèle, des simulations aux éléments finis ont permis de tester la résistance des éléments. Réutiliser les pièces dans des serres ou des aménagements intérieurs permettrait de les dévier d'une mise en décharge ou d'un recyclage énergivore ainsi que réduire ponctuellement le besoin de pièces neuves (169 architecture et Mégnard 2018).

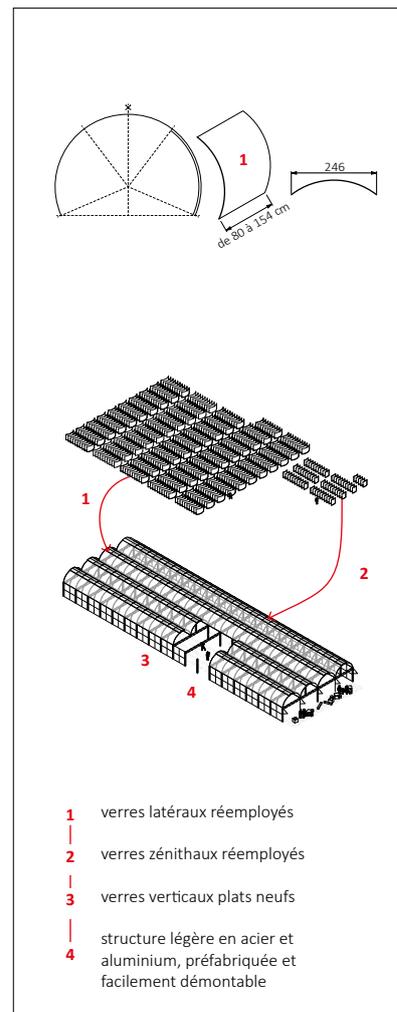


figure 3 · extraits du «catalogue raisonné» des ressources libérées par la rénovation partielle du Centre Pompidou et exemple de scénario de réemploi, ici pour une serre horticole.

Les principes de déconstruction sélective et construction réversible invitent à considérer le bâtiment non pas comme un produit fini mais comme un **objet évoluant dans le temps**. La qualité réversible d'une construction et la qualité sélective d'une déconstruction sont fonctions de l'adaptabilité des systèmes, de la séparabilité des composants et de l'indépendance des systèmes ayant chacun une durée de vie différente. Considérant le bâtiment dans le temps plutôt que dans l'espace, Brand (1994) le décompose en six «couches» ou «layers».

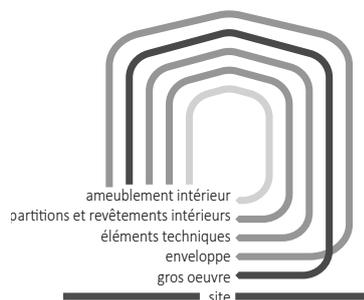


figure 4 · couches de Brand (1994)

Il classe les éléments de construction en groupes ayant des durées de vie similaires, allant du permanent à l'éphémère, selon le concept de «*pace layering*»:

- › le site;
- › la structure (fondations et éléments porteurs) est souvent le système le plus persistant des constructions;
- › la durée de vie de l'enveloppe est généralement plus courte afin de suivre des changements de mode ou technologiques plus fréquents;
- › les «services» (câblage électrique et de communication, chauffage, ventilation et climatisation, zones sanitaires et ascenseurs / escaliers mécaniques) sont souvent remplacés ou adaptés à une fréquence plus élevée;
- › il en est de même pour le cloisonnement intérieur, selon la fonction que le bâtiment abrite;
- › les meubles bougent quotidiennement ou mensuellement et sont remplacés le plus fréquemment.

Pour l'auteur, garantir une indépendance mécanique entre éléments de couches différentes permet leur remplacement sans forcer la démolition d'autres éléments ayant une durée de vie différente. Cette vision par couche a été formulée à la fin des années 1990, dans un contexte bâti déjà marqué par l'avènement de la pétrochimie et d'une approche de la conception du bâti de plus en plus séquentielle. Cette période est également le témoin de la multiplication des normes énergétiques et exigences liées à la sécurité et au confort des usagers, incitant une gestion de plus en plus spécialisée et compartimentée du projet encore actuelle.

Bien que pleinement valable pour de nombreux bâtiments conçus d'après un système «multicouche», cette vision est une approche qui ne peut être pleinement transposée à l'ensemble du patrimoine bâti dont le temps a montré la longévité. Les églises en pierre sont des exemples de construction monolithique qui ont perduré dans le temps et répondent encore aujourd'hui aux attentes des utilisateurs et utilisatrices. Des exemples contemporains bousculent également cette approche, comme par exemple l'immeuble de bureaux 2226 à Lustenau en Autriche qui ne dispose pas de réseau de chauffage ou ventilation conventionnel. Dans ce projet, l'isolation, la reprise des charges et une partie de la régulation thermique sont obtenues conjointement grâce à un mono-mur en maçonnerie de 78 cm et un détail d'encadrement de fenêtre adapté (Schoof 2014).

Sans perdre de vue l'argument initial d'une indépendance des éléments de durée de vie différente pour assurer une réversibilité technique, ces exemples sont une invitation à une vision plus souple de l'approche de Brand, qui autorise des glissements et recouvrements d'une couche à l'autre et suggère une distinction plus conceptuelle des «couches», reliées alors à des notions de «fonctions» ou «d'exigences».

coordonner pour fermer la boucle

La déconstruction sélective et la construction réversible sont deux ingrédients techniques nécessaires pour faciliter l'adoption d'une **économie circulaire** par le secteur de la construction. L'économie circulaire (Stahel 2019) vient en opposition au paradigme économique actuel dans lequel les matériaux sont extraits, produits, utilisés et puis éliminés, en sens unique et définitif (figure 5). Une économie circulaire extrait la valeur maximale des biens en prolongeant leur durée de vie ou en les réutilisant en fin de vie comme nouvelles ressources, tout en minimisant leur impact environnemental. Le territoire urbain n'est alors plus seulement perçu comme un lieu d'utilisation mais également comme un gisement. Selon le concept de «mine urbaine», le parc bâti est considéré comme émetteur régional

de ressource et plus seulement comme un producteur de déchet. En complément à la rénovation des bâtiments existants, la déconstruction sélective et la construction réversible apparaissent alors comme de solides vecteurs additionnels de circularité.

Récemment en Suisse, le recyclage – compris ici comme toute opération menant à la transformation des caractéristiques physiques d'un matériau, à l'inverse du **réemploi** qui évite une telle transformation – a été fortement encouragé. Cependant, dans une économie circulaire, le recyclage est le dernier recours si les produits ne peuvent plus être utilisés, réparés ou réemployés. En effet, le recyclage implique le processus de retraitement des matières de déchet en matières premières pour de nouveaux produits, ce qui consomme encore une quantité importante d'éner-

gie (Thormark 2000). Avant de recycler, il convient d'allonger la durée de vie du composant en réinventant son utilité, en le réparant et finalement en le réemployant ailleurs dans de nouvelles configurations (Choppin et Delon 2014, Ghyoot 2018, EMAF 2016).

Cet ordre de préférence de la gestion des ressources – prévenir-minimiser-réparer-réutiliser-recycler-éliminer – est illustré par l'*échelle de Lansink* (développée en 1979, Kristinsson et al. 2001) qui hiérarchise les stratégies en fonction de leur impact environnemental. Dans cette représentation, le réemploi précède le recyclage, qui est une stratégie de *down-cycling*, soit de «sous-cyclage». Lors d'un «sous-cyclage», une partie des capacités d'un composant et de sa matière est perdue à travers les opérations de transformation.

A l'inverse, la réparation et la réutilisation cherchent à conserver la forme, les propriétés mécaniques, la technologie et l'énergie investies dans un composant. Selon une perspective énergétique, la réparation et le réemploi permettent de retarder l'augmentation de l'entropie de la matière, soit d'en ralentir la dégradation. Issu du 2^{ème} principe de thermodynamique, le concept d'entropie est, d'une certaine manière, la mesure du désordre de la matière. Au fil des opérations de transformation, ce désordre ne cesse d'augmenter jusqu'à nécessiter l'utilisation de nouvelles ressources (Georgescu-Roegen et Grinevald 1979).

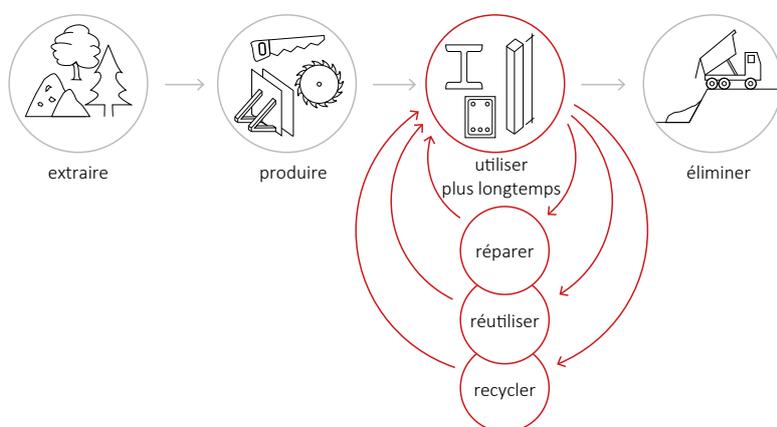


figure 5 · d'une économie linéaire vers une économie circulaire.

De même que pour l'économie circulaire au sens large (OFEV 2020a), l'application d'une construction réversible et d'une déconstruction sélective se heurte encore à plusieurs obstacles pratiques: normes et réglementations actuelles inadaptées, réseau d'une filière pas encore assez connecté, stratégies économiques peu éprouvées, et médiatisation et communication entre acteurs/actrices trop restreinte, entre autres (Chiron 2017). Les protagonistes d'une déconstruction sélective ou d'une construction réversible sont multiples: corps régulateurs publics et professionnels, investisseurs et maîtrises d'ouvrage, personnel enseignant et scientifique, architectes, ingénieur-e-s, technicien-ne-s, équipes de construction, designers d'aménagements d'intérieurs et utilisateurs/utilisatrices (Canal architecture et Rubin 2017).

Tous ces maillons doivent réévaluer leurs objectifs, embrasser de nouvelles routines, et parfois inventer de nouveaux modèles économiques afin de fermer la boucle des composants de construction. De nouvelles distributions de responsabilités, chronologies d'actions, et procédés de coordination entre toutes ces acteurs/actrices sont nécessaires. Les nouveaux concepts (par exemple, le

gisement urbain), outils (par exemple, le *BIM - Building Information Modelling*), et modèles (par exemple, les passeports matériaux) sont autant d'opportunités pour enclencher un changement systémique des modes de production et de maintien du bâti (Debacker et al. 2017, EMAF 2016, Guldager Jensen et Sommer 2018, Luscuere 2016, Peters et al. 2017).



figure 6 · revente des matériaux issus de la déconstruction du Grenier à blé de Rive, Genève, env. 1897.

Ce recueil est conçu comme une porte d'entrée vers les multiples techniques permettant la déconstruction sélective de bâtiments existants d'une part, et la construction réversible de nouveaux bâtiments d'autres parts. Ces deux actions sont trop peu appliquées dans la pratique et ce recueil vise à réduire certains des freins principaux à cette implémentation, à savoir le manque de retours d'expérience entre professionnels, le manque de partage des bonnes pratiques, ou encore le manque d'illustrations du champ des possibles.

Ce recueil a pour but de:

- › diffuser les retours d'expériences et les bonnes pratiques du domaine académique et professionnel;
- › apporter aux entrepreneurs/entrepreneuses, concepteurs/conceptrices et maîtrises d'ouvrage des références techniques;
- › procurer aux parties prenantes un bagage théorique à la pointe et détaillé ainsi qu'une série de référence pour aller plus loin;
- › esquisser les perspectives d'évolution et opportunités applicables au bâti suisse.

Ce recueil est avant tout destiné à tous les corps de métier impliqués dans les phases de conception, construction et déconstruction du bâtiment. Les maîtrises d'ouvrage et législateurs/législatrices du bâtiment y trouveront également une description des tenants et aboutissants disponibles en la matière.

revue au fil des couches

Le deuxième chapitre concerne la déconstruction sélective. Le troisième chapitre concerne la construction réversible.

Tout deux proposent une revue des techniques disponibles pour chaque couche ou fonction du bâtiment: gros œuvre, enveloppe, partitions intérieures, CVSE (chauffage, ventilation, sanitaire et électricité) et l'ameublement intérieur.

Ces revues:

- › synthétisent les principes spécifiques à chaque couche. Ceux-ci sont rédigés en complément aux listes de principes et recommandations générales valables pour toutes les couches et présentées en tête de chapitre;
- › dressent un état des lieux de la pratique en Suisse;
- › compilent une sélection non-exhaustive de techniques conventionnelles et innovantes et compare leur potentiel de réversibilité;
- › illustrent ces techniques avec des études de cas;
- › fournit une liste bibliographique vers les sources d'informations plus spécialisées.

L'organisation repose sur le concept de *pace layering* (Brand 1994) qui distingue les couches du bâtiment par leur durée de vie. La réversibilité spatiale est discutée de manière transversale dans plusieurs couches. Ces inventaires non-exhaustifs de connaissances professionnelles et académiques s'appuient sur une revue de la littérature et une série d'entretiens avec des acteurs et actrices professionnels suisses.

portée géographique

Ces revues s'adressent en premier lieu mais sans exclusivité au bâti suisse existant et à venir. Un travail exploratoire a donc été mené pour identifier des études de cas à l'intérieur du pays. Le présent rapport porte une attention particulière au travail de pionniers suisses qui, par exemple, démontent de manière sélective éléments de façade et structures porteuses. Toutefois, à l'échelle nationale, la construction réversible et la démolition sélective ne sont pas pratiquées à des fréquences comparables sur l'ensemble des couches. Pour étendre ces revues à l'ensemble des fonctions d'un bâtiment, des connaissances théoriques et pratiques développées à l'étranger et potentiellement applicables avec de moindres ajustements au bâti suisse sont intégrées.

- 169 architecture, Ménard R. / 2018** Faire et refaire le verre. Pavillon de l'Arsenal, Paris.
- Allwood J.M., Cullen J.M., Carruth M.A. / 2012** Sustainable Materials: With Both Eyes Open. UIT Cambridge, Cambridge.
- BIO Intelligence Service / 2013** Sectoral Resource Maps. Prepared in response to an Information Hub request. European Commission, DG Environment.
- Brand S. / 1994** How Buildings Learn, What Happens After They're Built. Viking, New York.
- Canal architecture, Rubin, P. (Eds.) / 2017** Construire Réversible. Paris.
- Chen D., Ross B., Klotz L. / 2018** Parametric Analysis of a Spiraled Shell: Learning from Nature's Adaptable Structures. Designs 2, 46.
- Chiron F. / 2017** Le réemploi dans la construction, Une perspective pour une architecture soucieuse des enjeux environnementaux. Thèse de Master. Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes, Nantes.
- Choppin J., Delon N. / 2014** Matières Grises. Éditions du Pavillon de l'Arsenal, Paris.
- Debacker W., Manshoven S., Peters M., Ribeiro A., De Weerd Y. / 2017** Circular Economy and Design for Change within the Built Environment: Preparing the Transition. Proceedings of the International HISER Conference on Advances in Recycling and Management of Construction and Demolition Waste, 114–117.
- EEA / 2010** Material Resources and Waste- The European environment- State and outlook. Publications Office of the European Union.
- EMAF / 2016** Circular in the Built Environment: Case Studies, A compilation of Case Studies from the CE100. Ellen MacArthur Foundation.
- Eurostat / 2018** Waste statistic [en ligne]. URL http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics (consulté 02.15.18).
- Gauch M., Matasci C., Hincapié I., Hörler R., Böni H. / 2016** Material- und Energieressourcen sowie Umweltauswirkungen der baulichen Infrastruktur der Schweiz. EMPA, OFEV, Berne.
- Georgescu-Roegen, N., Grinevald, J. / 1979** La décroissance: entropie-écologie- économie. Sang de la Terre, Paris.
- Guldager Jensen K., Sommer J. / 2018** Building a Circular Future - 3rd edition. Danish Environmental Protection Agency.
- Herczeg M., McKinnon D., Milios L., Bakas I., Klaassens E., Svatikova K., Widerberg O. / 2014** Resource efficiency in the building sector (Final Report). European Commission, DG Environment, Rotterdam.

International Energy Agency (IEA)

/ 2019 Material efficiency in clean energy transitions [en ligne]. URL www.iea.org/publications/reports/MaterialEfficiencyinCleanEnergyTransitions (consulté 08.05.2019).

ISO14021 / 2016 Environmental labels and declarations — Self-declared environmental claims (Type II environmental labelling).

Kristinsson J., Hendriks Ch. F., Kowalczyk T., te Dorsthorst B.J.H.

/ 2001 Reuse of Secondary Elements: Utopia or Reality. CIB World Building Congress, Wellington.

Luscuere L.M. / 2016 Materials Passports: Optimising value recovery from materials. Proceedings of the Institution of Civil Engineers- Waste and Resource Management 170, 25–28.

OFEV / 2020a Rapport à l'attention du Conseil fédéral- Mesures de la Confédération pour préserver les ressources et assurer l'avenir de la Suisse (économie verte). OFEV, Confédération suisse, Berne.

Pérez-Lombard L., Ortiz J., Pout C.

/ 2008 A review on buildings energy consumption information. Energy and buildings 40, 394–398.

Peters M., Ribeiro A., Oseyran J., Wang K.

/ 2017 Buildings as Material Banks and the need for innovative Business Models- Extract from an internal BAMB Report. Buildings As Material Banks.

Röthlisberger R. / 2017 Évaluation de la réalisation des objectifs sectoriels intermédiaires 2015 et première estimation de la réalisation de l'objectif 2020. Confédération suisse & OFEV, Berne.

Schoof J. / 2014 Haus ohne Heizung: Bürogebäude von Baumschlager Eberle in Lustenau [en ligne]. Detail.de. URL <https://www.detail.de/artikel/haus-ohne-heizung-buerogebaeude-von-baumschlager-eberle-in-lustenau-11703/> (consulté le 02.10.20).

Stahel W. / 2019 The Circular Economy, A User's Guide. Edited by the Ellen MacArthur Foundation, Routledge. ISBN: 978-0-367-20014-6

Thormark C. / 2000 Environmental analysis of a building with reused building materials. International Journal of Low Energy & Sustainable Building Vol. 1.

Wälti C., Almeida J. / 2016 Élimination des déchets, Illustration en Suisse. OFEV, Berne.



objectifs / soin et valorisation	25
activités en Suisse / opportunités gaspillées et freins systémiques	26
préparation au démantèlement / le diagnostic ressource	28

études de cas:

ameublement intérieur	30	I.	aménagements intérieurs à Berne
partitions et revêtements intérieurs	34	II.	plancher à Lausanne
		III.	le collectif Rotor
		IV.	sols de bureaux à Lausanne
éléments techniques (CVSE)	40	V.	installations techniques à Berne
enveloppes	44	VI.	graviers de toiture à Lausanne
		VII.	façades à Zurich et Winterthour
		VIII.	mur-rideau à Bienne
gros œuvre	50	IX.	structure en bois à Rheinau
		X.	théâtre en bois à Paris et à Genève
		XI.	structures métalliques à Bâle et Zurich
		XII.	dalles en béton à Genève
		XIII.	éléments coulés en béton en Europe
		XIV.	logements en béton à Berne
stratégies de développement	64		
références	68		





Extremes

RESTAURANT

VAL D'OR

PIANOS Rue Verdaine 9

CAFÉ ASSERIE
A. & PIGUT



a



b



c

Réaliser une **déconstruction sélective** consiste à séparer et démonter les éléments d'un bâtiment en minimisant la production de déchets et valorisant autant que possibles les éléments en leur faisant subir le moins de transformations possibles. L'objectif est de conserver au mieux la valeur et l'énergie grise contenue dans chaque composant en évaluant les possibilités de réutilisation sur site, de réemploi hors-site et de recyclage. En d'autres mots, il s'agit de ralentir le processus de *down-cycling*, c'est-à-dire le processus par lequel un matériau perd ses qualités et fonctionnalités tout au long de son cycle de vie, et principalement, à chaque réaffectation d'usage.

La déconstruction sélective peut être totale ou partielle. Un exemple de technique de démontage sélectif est le retrait et la dépose soignée d'éléments métalliques initialement boulonnés (figure 11, p.29) ou simplement déposés (figure 7, p.25). Ces opérations généralement visent à réutiliser les profilés dans un nouveau projet plutôt que de les abattre et de les recycler.

figure 8 · une déconstruction sélective manuelle est conduite de manière partielle sur une halle de stockage à Uster. Une portion des profilés métalliques est démontée soigneusement pour être réutilisée dans une nouvelle structure. Le reste du bâtiment est démoli de manière destructive.

Les objectifs sont donc de:

- › limiter la production de déchets;
- › conserver la valeur intrinsèque des composants de construction pour les réutiliser;
- › dévier du recyclage les éléments aptes à la réutilisation;
- › dévier de l'incinération et de la mise en décharge une quantité maximale de matière.

Pour y parvenir, les leviers d'action de la déconstruction sélective sont:

- › un diagnostic avant le début des travaux qui évalue et compare les différentes stratégies de gestion des ressources et la conduite, si besoin, d'une série de tests;
- › un démontage par couche du bâtiment;
- › la conservation autant que possible des caractéristiques physiques et mécaniques des composants lors du démontage, de l'entreposage, et du transport de ces composants.

Une phase de préparation et de planification est nécessaire. Elle aura pour objectif d'évaluer la méthode et l'outillage les plus adaptés pour valoriser les composants. Cette évaluation est réalisée en fonction des contraintes techniques et économiques, des filières exutoires à disposition et du potentiel environnemental.

Le collectif belge *Rotor*, pionnier de la déconstruction sélective, insiste sur la nécessité de déconstruire de manière sélective le bâti disponible aujourd'hui, sans attendre la mise en pratique complémentaire des principes de la construction réversible dans les futurs bâtiments:

«Il est évident que toutes les recommandations formulées [à propos de la construction réversible] à l'égard des concepteurs et conceptrices d'aujourd'hui sont autant de manières de faciliter le travail des déconstructeurs de demain et d'anticiper ainsi les formes de gaspillage facilement évitables. Mais il ne faudrait pas pour autant *postponer* la question du réemploi à un futur incertain. Une grande partie du patrimoine bâti actuel, dans toute sa diversité, se prête d'ores et déjà à de telles opérations.» (Ghyoot et al. 2018).

En outre, une lecture précise des techniques et pratiques de démontage, établies ou émergentes, soutient une meilleure compréhension de la construction réversible.

figure 7 · (pp. 22-23) démontage du Grenier à blé de Rive, Genève, env. 1897.

La déconstruction sélective est peu pratiquée en Suisse: sur les environ 16 millions de tonnes de déchets de chantier produites annuellement, environ 75% sont recyclées, 20% mises en décharge, 4% incinérées et une fraction seulement réemployée (Gauch et al. 2016). En effet, aujourd'hui, les habitudes et pratiques employées à la fin d'un cycle de vie d'un bâtiment font conventionnellement recours à la démolition sélective. Régulièrement confondues, la démolition sélective est distincte de la déconstruction sélective. En effet, bien que les deux méthodes séparent les matériaux, la démolition sélective ne vise pas à conserver la forme des composants mais directement à trier les déchets par type de matériaux pour en optimiser le recyclage ou la valorisation thermique.

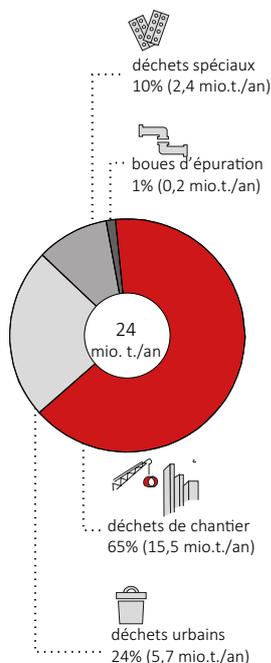


figure 9 · les activités de construction et démolition sont responsables de 65% des déchets en Suisse.

En Suisse, sur un chantier de démantèlement, sauf demande particulière de la maîtrise d'ouvrage, les matériaux sont donc séparés de manière destructive, triés en général sur site et envoyés pour la plupart au recyclage, conformément à l'«Ordonnance sur la limitation et l'élimination des déchets» (Conseil fédéral 2020). Par exemple, lors d'une démolition, les profilés métalliques d'une structure sont en principe abattus à l'aide d'outillage lourd et acheminés pour recyclage. De la même manière, les parquets massifs sont arrachés pour être recyclés en sous-produit (pour autant que leur bois soit sans problème) et les appareils électroménagers sont apportés en déchetterie pour être recyclés.

A l'inverse, lors d'une déconstruction sélective, le diagnostic évaluera si les conditions techniques et économiques permettent que les profilés métalliques soient démontés un par un par sciage ou déboulonnage, les lames du plancher déclouées soigneusement et les appareils électroménagers dans les normes et en bon fonctionnement testés et nettoyés pour être revendus à un prix plus élevé, compensant la main d'œuvre supplémentaire nécessaire au soin apporté. Ainsi, la déconstruction sélective cherche à remettre en circulation des éléments de construction en conservant l'énergie, la technologie, le savoir-faire, la culture et le temps déjà investis.

protagonistes

En Suisse, les acteurs et actrices professionnels actifs dans la déconstruction sélective sont:

- › le réseau de bourses de réemploi qui disposent d'un département de démontage (p. ex. la *Fondation ProMaison* à Renens ou *Syphon AG* à Bienne). Ces bourses sont partiellement recensées sur <https://www.bauteilclick.ch/fr/menu-principal> dans a section Fournisseurs. Leurs activités se concentrent surtout sur le démontage d'éléments d'aménagement et d'équipement intérieur, tel que portes, cuisines, éléments de salles de bains et de mobilier, luminaires, appareils de chauffage, de rares faux-plafonds ou encore quelques revêtements de sol. Grâce généralement à un rattachement avec une entreprise de démolition et/ou l'accès à équipement plus conséquent, certaines de ces bourses proposent quelques éléments de gros œuvre démontés (poutres en bois massifs, structures métalliques, escaliers, etc.);
- › des bureaux d'architectes pionniers qui ont développé une réelle expertise dans le domaine (p. ex. *baubüro in situ* à Bâle et Zürich) ainsi que des maîtrises d'œuvre qui collaborent aujourd'hui de manière ponctuelle avec des entreprises de démolition pour des déconstructions sélectives (p. ex. *Ingeni* et *FAZ architectes* à Genève, voir étude de cas XII). Ces collaborations permettent de fournir en composants

d'occasion leurs propres projets. Ces acteurs et actrices étendent de manière innovante la déconstruction sélective aux enveloppes et structures porteuses;

- › des acteurs et actrices de niches actifs dans le secteur des antiquités, des pièces décoratives et des matériaux rares et à haute valeur pour les rénovations.

défis

En plus des techniques de tri développées par et pour la démolition et la filière du recyclage, la déconstruction sélective rencontre une série de défis, dont beaucoup sont également présents dans des contextes constructifs et économiques comparables (Addis 2006, Buser 2019, Chini 2001, Chini et Schultmann 2002, Choppin et al. 2014, Cuenet 2020, Dechantsreiter 2015, Fivet 2019, Ghyoot et al. 2018, Kibert et Chini 2000, Kúpfer 2018, Nakajima et Russell 2014, Rieder 2020, Zwahlen 2020).

Les défis principaux en Suisse peuvent être listés comme suit:

- › la filière du recyclage est solidement établie et les standards actuels de démolition y sont entièrement adaptés;
- › le bâti actuel suisse n'a pas été conçu pour être démonté: les méthodes constructives incluant par exemple du béton coulé et l'usage de colles inhibent une partie des opportunités de désassemblage;
- › les méthodes et techniques de déconstruction sélective sont peu connues;
- › la nécessité de garantir les qualités des composants d'occasion et les questions associées de responsabilité restent un frein majeur à la croisée entre bâtiments donateurs et receveurs;
- › les codes de construction ne sont pas ajustés à l'intégration d'éléments d'occasion, ce qui limite l'intérêt de les démonter soigneusement;

› les bénéfices et risques économiques pour une application en Suisse ne sont, à ce jour, pas encore bien établis et les potentiels surcoûts liés entre autres à la main-d'œuvre supplémentaire ou au stockage constituent des craintes décisives;

› une démolition sélective nécessite du temps additionnel alors que les délais d'exécution pour la déconstruction sont généralement courts;

› la synchronisation entre chantiers de déconstruction sélective et lieu de stockage temporaire est complexe;

› la réparation ou la réutilisation sur place est régulièrement jugée plus complexe que la construction neuve par les acteurs et actrices impliqués malgré un possible intérêt environnemental et social apparent;

› les impacts environnementaux ne font pas automatiquement partie intégrante des critères de décision dans le processus de sélection d'un composant. Bien que difficiles à calculer et à attribuer, la mise en lumière des diverses externalités négatives permettrait probablement une comparaison plus complète des stratégies linéaires et circulaires.



figure 10 · déplacement d'un plan de cuisine à Zollikofen

Le but de la préparation au démantèlement est de réaliser un **inventaire** des composants qui permette, avec les parties prenantes (maîtrise d'œuvre, maîtrise d'ouvrage, consultant-e-s, potentiels mandataires pour la déconstruction, repreneurs/repreneuses des ressources extraites, etc.) de conduire une évaluation technique, environnementale et économique des stratégies de démontage, dans le but de sélectionner les techniques adéquates, qu'elles soient innovantes ou bien établies, sur la base de connaissances interdisciplinaires, précises et objectives.

Le collectif français *Bellastock* nomme ce processus le «**diagnostic ressource**» (Bellastock et CSTB 2018, Interreg FCRBE 2020). Avec cet outil, le collectif propose de compléter le traditionnel «diagnostic déchet» français, dont l'équivalent suisse sont les obligations de l'OLED (Ordonnance sur les déchets), à savoir l'obligation du «maître d'ouvrage [à] indiquer dans sa demande de permis de construire à l'autorité qui le délivre, le type, la quantité et la qualité des déchets qui seront produits ainsi que les filières d'élimination prévues» (Conseil fédéral 2020). Les **objectifs** du «diagnostic ressources» sont (Bellastock et CSTB 2018):

- › une évaluation objective de l'ensemble des stratégies de traitement;
- › une meilleure quantification des composants candidats à la réutilisation (introduisant des dimensions linéaires, volumétriques et unitaires);

- › une meilleure qualification de ces composants (relevé géométrique, description de l'état d'usure, description chimique, mécanique et technique);
- › un ajout des filières de réemploi dans les solutions exutoires (impliquant un descriptif et un dessin des nouveaux domaines d'emploi possibles, les débouchés/projets/revendeurs cibles, les précisions sur le travail de remise en état à fournir, le cadre normatif du nouveau produit);
- › une sécurisation de la démarche logistique et de la prise de décision (arbre décisionnel qui inclue les étapes de tests et contrôle, la vérification des compétences des acteurs et actrices locaux, l'estimation économique, la vérification de l'impact environnemental et de la performance technique).

Ce diagnostic est réalisé en étapes interdépendantes. D'abord, l'inventaire des composants est réalisé via un relevé sur site (incluant marques d'usure, détails d'assemblage, transformations, indications sur les matériaux) et une recherche d'information qualitatives et quantitatives hors-site (documents graphiques et photographiques, bons de commande, etc.) (Administration de l'environnement, Luxembourg Institute of Science and Technology 2018). Ensuite, l'évaluation technique, environnementale et économique doit être réalisée avec les parties prenantes pour vérifier la faisabilité du démontage. Les éléments nécessaires pour cette évaluation sont (remaniés à partir de Addis et Schouten 2004 et Rotor asbl 2015a):

- › des informations suffisantes sur les composants et le bâtiment;
- › des connaissances techniques et pratiques sur les méthodes de démontage sélectif;
- › la maîtrise des risques (chimiques, statiques, etc.);
- › la possibilité d'estimer le temps requis et les besoins techniques particuliers;
- › l'existence et le choix d'une filière exutoire;
- › la possibilité d'estimer le coût de démontage et le prix de revente;
- › idéalement, une estimation des gains environnementaux.

Cette évaluation pourra être complétée par des tests de démontage sur site et d'éventuels tests en laboratoire. Après vérification de l'absence de substances toxiques (amiante, plomb, goudron de houille, etc.), ces essais visent à compléter le «diagnostic ressource», sécuriser la démarche et la prise de décision. *Rotor* (Ghyoot et al. 2018) explique que ces tests réalisés sur échantillon réel auront pour but de:

- › confirmer la démontabilité du composant;
- › déterminer la méthode de démontage et l'outillage les plus adaptés;
- › évaluer le temps nécessaire;
- › anticiper les besoins en termes de manutention;
- › évaluer la capacité de l'élément à être réassembler et les besoins d'établir des modes d'emploi;
- › estimer le coût de l'opération.

En parallèle avec l'étude de faisabilité technique, la rentabilité économique de l'opération est donc évaluée. *Rotor* propose de l'estimer en vérifiant que le coût de démontage et de manipulation multiplié par un facteur de risque reste inférieur à la valeur du composant sur le marché (Rotor 2017). Aujourd'hui en Suisse, les bourses de matériaux réa-

lisent à travers leur devis un travail analogue dans leur rayon d'action. Ce devis est réalisé en fonction de leurs capacités en termes de main-d'œuvre et d'outillage et de manière empirique par les chefs des démontages s'appuyant sur leur expérience (Cuendet 2020, Zwahlen 2020).



figure 11 · démontage de la patinoire provisoire de Malley (VD), 2020.



L'ameublement intérieur comprend les aménagements et équipements de salle de bains et de cuisine, ainsi que le mobilier fixe et mobile.

pratiques

En général, les équipements de salle de bains et de cuisine ainsi qu'une partie du mobilier sont acheminés vers les filières de recyclage ou d'élimination. Toutefois, une portion des meubles rejoint le marché secondaire mais actif de l'occasion. Cela dépend notamment du temps à disposition pour organiser le don ou la vente, la demande, la valeur du meuble et sa facilité à être déplacé/démonté.

Pour des meubles en bon état qui peuvent être transportés sans être démontés, le marché secondaire compte sur une pluralité d'outils numériques et d'acteurs/actrices, dont voici une liste non-exhaustive:

- › les particuliers avec la vente directe via les sites de petites annonces et les réseaux sociaux;
- › les bourses de matériaux ou «ressourceries»;
- › les magasins d'antiquités;
- › les œuvres caritatives et fondations sociales (p.ex. les communautés *Emmaüs* et *l'Armée du Salut* présents à travers la Suisse et de nombreuses associations régionales et locales);
- › certaines grandes enseignes qui proposent un système de reprise sous certaines conditions de leurs anciens meubles.

En parallèle, des entreprises investissent souvent dans du mobilier démontable ou mobile. Il s'agit en général de parois de bureaux mobiles ou de mobilier modulaire (étagères, bibliothèques, etc.). Conçus pour être déplacés, ces éléments sont souvent détachables avec des outils simples et peuvent être redispuestos selon une nouvelle configuration en suivant l'évolution de l'entreprise.

Au-delà des meubles, de nombreux éléments de cuisine et salle de bains peuvent, moyennant un temps de démontage supplémentaire, être démontés soigneusement et déviés du recyclage. Un marché d'occasion existe. Il est notamment alimenté par le travail des bourses de matériaux qui, pour beaucoup, emploient grâce à des subventions des personnes sorties du marché traditionnel de l'emploi. Ces bourses ont développé un savoir-faire pratique conséquent et construit un réseau avec des cuisinistes et architectes qui font appel à leurs services pour ôter ces éléments avant une démolition ou transformation.

Les cuisines construites avec des caissons de 55 ou 60 sont démontables et cela n'excède généralement pas un jour de travail avec une équipe de plusieurs ouvriers. Les tiroirs sont d'abord ôtés puis ce sont les caissons qui sont séparés, au tournevis ou au cutter. La plupart des difficultés résident dans le travail préalable de démontage des plans de travail, souvent solidement collés. Pour un plan de travail en marbre, plus de 30 minutes sont nécessaires pour un joint transversal (60cm de long) et la technique varie au cas par cas. Parfois,

la première partie de la séparation est effectuée à la scie circulaire puis le dernier tronçon, souvent bloqué contre des carrelages, est réalisé séparément, en usant d'un foehn industriel pour dilater le joint. Il faut alors en surveiller la température qui, trop élevée, peut modifier la couleur de la pierre. Les joints silicones latéraux peuvent être plus larges et découpés au cutter. Une attention particulière doit être apportée aux endroits où des réservations, par exemple pour un évier, fragilisent la plaque. La manutention de ces plans de travail doit être précise et entièrement contrôlée. *A Syphon AG* (voir [figure de l'étude de cas 1](#)), des lambourdes en bois fixées avec des serre-joints sont souvent utilisées pour renforcer les points fragiles de ces pièces. Les résidus de résines/colles peuvent être enlevés avec la scie circulaire. Les cuisines de moins de 20 ans sont traitées en priorité; les équipements plus anciens trouvent aujourd'hui difficilement reprenneur ([Rieder 2020](#)).

Pour les équipements de salle de bains, un travail comparable de découpe des joints et dépose des équipements peut être effectué.

Une information plus détaillée est mise à disposition par *CDR Construction* en partenariat avec *bruxellesenvironnement* ([Stockmans 2016](#)), disponibles uniquement en français. Partiellement applicables au bâti suisse, les onze manuels de démontage illustrent étape par étape des techniques de démontage avec une finalité réemploi sur le bâti belge pour lavabos et robinetterie, cabines de douche et accessoires, cuisines et meubles intégrés.

freins

Les barrières au démontage sélectif de l'ameublement intérieur sont fortement liées à la nécessité de connaissances et expériences pratiques, aux contraintes économiques et aux habitudes de chantier.

Tout d'abord, bien que partiellement proche de l'inverse du montage, le processus de démontage sélectif des équipements de cuisine et de salle de bains repose sur des connaissances et un savoir-faire pratiques acquis au fil du temps sur le terrain puisque les connexions de ces éléments n'ont pas été expressément conçues pour être réversibles. Une partie de ces éléments de connexion sont fabriqués pour un emploi unique et au moyen de matériaux de qualité moindre (PVC, acier très fin, etc.). Les opérations de démontage et remontage créent dès lors un «jeu», suffisamment important dans certains cas pour nécessiter l'adjonction de système complémentaire de fixation à celui initial. Cette expérience est nécessaire pour le choix des outils, de la séquence des gestes et des précautions à prendre. Le manque d'expérience augmente le taux d'éléments endommagés et entache la rentabilité des opérations. Cet impact a été nettement visible sur l'étude de cas présentée ci-dessous, où le personnel employé sur les deux sites avait des niveaux de qualification et d'expérience nettement différents. La transmission de ces connaissances de terrain, la formation des ouvriers et l'implication de personnes spécialistes de la pose de ces éléments est un prérequis au bon déroulement des opérations (Rieder 2020).

Deuxièmement, malgré la faisabilité technique, le démontage sélectif de l'ameublement intérieur est contraint par une concurrence des autres filières. En effet, puisque le démontage soigneux de la plupart des éléments nécessite un temps de démantèlement plus long, il requiert un investissement plus important au départ, rendant l'opération plus risquée qu'une mise en déchetterie conventionnelle. Cette concurrence est accentuée par un prix de mise en déchetterie trop bas pour être dissuasif ou pour que l'économie réalisée en déviant des composants de la déchetterie ne contrebalance l'investissement. En parallèle, le prix des éléments neufs vendus en grande surface n'inclut pas toutes les externalités et, de ce fait, ceux-ci sont particulièrement bons marché, ce qui rend difficilement concurrentiels les éléments d'occasion impliquant des opérations de déconstruction chronophages et/ou complexes (Rieder 2020).

Finalement, malgré leur intérêt environnemental et social, leur faisabilité technique et l'existence d'un marché – pour le moment dépendant de subventions –, le démontage sélectif et la récupération des aménagements intérieurs ne font pas partie des habitudes de chantier. Face à des alternatives moins chères, plus rapides et bien établies, le Code des Frais de Construction ne prévoit pas de poste fixe pour la réalisation d'un inventaire ni la conduite d'un démontage sélectif, même partiel, ce qui rend d'autant moins aisée leur inclusion dans un planning de chantier (Zwahlen 2020).

étude de cas I aménagements intérieurs à Berne

Syphon AG est une entreprise suisse d'utilité publique qui crée des emplois dans le secteur de la récupération d'éléments de construction et leur revente pour les personnes en marge du marché du travail traditionnel. Comme d'autres bourses de matériaux suisses, l'entreprise reçoit des subventions, ici communales. Active dans le démontage d'aménagement intérieur, la firme est spécialisée dans le démontage de cuisines, avec une centaine d'opérations par année en plus du démontage de salles de bains complètes et la récupération d'équipements électroménagers et techniques démontables, de luminaires et autres pièces qui ne demandent pas d'élévateurs. L'entreprise intervient la plupart du temps dans des maisons individuelles et parfois dans des petits immeubles de logement ou de bureau récupérant ce qui est démontable à la main avec un outillage simple, sans outils de levage ni échafaudages, et pour lequel un marché d'occasion existe. Les deux exemples ci-dessous sont représentatifs de leurs activités.

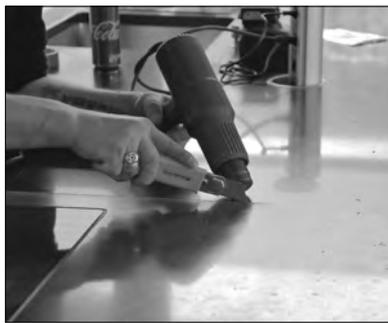
A Zollikofen, une maison des années 1950 récemment rénovée est vouée à la démolition. L'architecte du nouveau projet fait un appel d'offre pour le débarrasage des éléments intérieurs et extérieurs aptes au démontage sélectif mais sans budget plus élevé que pour une mise en déchetterie. *Syphon AG* remporte le mandat pour l'ensemble des éléments sauf la cuisine et les meubles de salle de bains, attribués à un cuisiniste professionnel dont l'une offre est plus basse. Le démontage sélectif avec finalité un réemploi est effectué sur la cuisine au complet, les radiateurs, les

chauffe-serviettes, les équipements de production de chaleur, les équipements électroménagers séparés (congélateur, lave-linge, etc.), les meubles et accessoires de salle de bains, les mains-courantes, les poignées de portes et les luminaires. Les éléments démontés sont ensuite testés, nettoyés et mis en vente. Cela est réalisé selon les techniques décrites aux pages précédentes. Le démontage de la cuisine par un mandataire non spécialisé dans le démontage conduit à une sous-estimation du temps nécessaire et montre l'importance de l'expérience dans le choix des outils et des méthodes de manutention pour assurer le bon état des pièces.

A Muri bei Bern, le même type d'intervention est réalisé sur une maison vouée à la démolition. Suivant le souhait de la maîtrise d'ouvrage demandant que les équipements aisément récupérables soient réutilisés, l'architecte fait appel à *Syphon AG* pour le débarrasage des éléments intérieurs et extérieurs pouvant être démontés sans plateforme élévatrice ni matériel de protection complexe. *Syphon AG*, qui rentabilise l'opération au moment de la revente des composants, démonte soigneusement: la cuisine complète, les meubles, accessoires et appareils de salle de bains, les équipements de chauffage, les équipements électroménagers séparés, les lampes et les rideaux. Tous ces éléments sont proposés à la revente pour réutilisation. A noter que les fenêtres récupérées ne pourront, sans certification, être pleinement intégrées dans un nouveau projet

soumis à autorisation mais pourront dépanner un particulier. Dans les deux maisons, les éléments restants (enveloppe, gros œuvre, partitions et revêtements intérieurs, réseaux techniques) sont démolis de manière conventionnelle après le passage de *Syphon AG*.

- › opération: chantiers de déconstruction et démolition de villas individuelles;
- › lieux: Muri bei Bern (BE) et Zollikofen (BE);
- › maîtrises d'ouvrage: propriétaires des maisons vouées à la démolition;
- › maîtrises d'œuvre: architectes des nouvelles maisons;
- › mandataires: *Syphon AG*, ainsi qu'un cuisiniste professionnel pour le chantier de Zollikofen;
- › filière exutoire: revente des matériaux d'occasion dans le magasin de *Syphon AG* et revente directe à un-e client-e pour le cuisiniste;
- › période de démontage: 2020;
- › sources: *Rieder 2020*, *Zwahlen 2020*;
- › figures: (a) chauffage d'un joint pour aider la découpe au cutter; (b) meulage d'un joint; (c) protection d'un plan-de-travail avec des lambourdes; (d) meulage des résidus de colle et résine; (e,f,h) remise en vente des équipements et pièces d'occasion; (g) pièces sanitaires démontées.



a



b



c



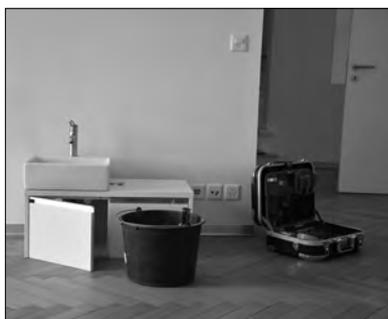
d



e



f



g



h

pratiques

Sols, plafonds et parois sont généralement raclés ou arrachés avec un outillage mécanique. D'anciens parquets sont parfois démontés pour leur valeur culturelle. L'utilisation de parois amovibles dans les bureaux facilite leur déplacement.

Pour les sols, certains revêtements fixés mécaniquement peuvent être démontés de manière non-destructive avec un outillage adapté: les faux-planchers et dalles de moquette sont de bons candidats (voir [étude de cas IV](#)) alors que les parquets (voir [étude de cas II](#)) sont plus chronophages. Les carrelages fixés au mortier (voir [étude de cas III](#)) demandent des processus de démontage et de remise en état faisables techniquement mais complexes et particulièrement longs.

Pour les plafonds, les bourses de matériaux suisses contactées n'ont pas pu fournir d'exemple abouti de démontage de faux-plafonds, mettant en cause la fragilité de ces matériaux dont le voilement est difficilement évitable ([Cuendet 2020](#), [Rieder 2020](#), [Zwahlen 2020](#)). En Belgique, le collectif *Rotor* a orienté une partie de ses activités sur le démontage d'équipements de bureaux, dont des faux-plafonds, car il s'agit d'un stock soumis à une fréquence de rotation élevée. L'[étude de cas III](#) revient sur leur travail et les méthodes développées.

Le démontage soigneux de cloisons est aujourd'hui très restreint en dehors des cloisons de bureau amovibles. Ces dernières peuvent généralement être démontées en suivant de peu l'inverse du schéma de montage. Pour les portes, elles ne sont valorisées seulement si elles disposent de leur cadre, dont les connexions doivent être accessibles. Les bourses de matériaux suisses se limitent à récupérer des portes composées de matériaux de haute qualité, de sorte à garantir la rentabilité de l'opération.

freins

La colle ou le mortier utilisé pour fixer certains revêtements (p. ex. parquets ou carrelages), la fragilité des matériaux (p. ex. plâtre ou lambris en aggloméré), l'emprisonnement des extrémités (p. ex. châssis des partitions intérieures posés avant la coulée de la chape), soit la dissimulation des systèmes de fixations (p.ex. revêtus par des coffrages, enduits, tapisseries), entravent une séparation soignée ([Cuendet 2020](#), [Rieder 2020](#), [Zwahlen 2020](#)). Pour les partitions dont la faisabilité technique n'est pas une contrainte, le surcoût lié au temps de démontage en astreint souvent la rentabilité.

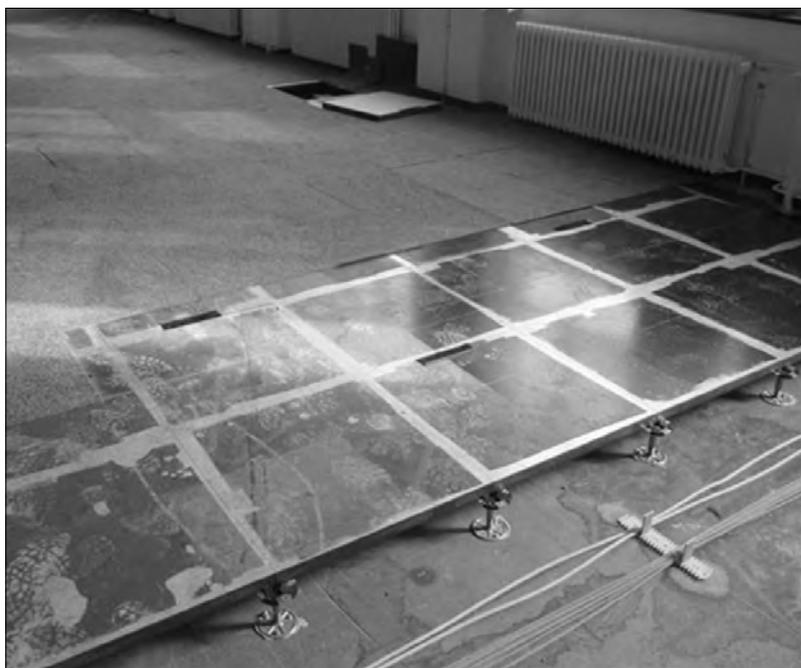


figure 12 · démontage d'un faux-plancher et dalles de moquette en Suisse dans le but d'un réemploi.

étude de cas II plancher à Lausanne

Les parquets sur lambourdes peuvent être décloués et les parquets flottants démontés à l'aide d'un pied-de-biche et de ciseaux à bois. Cette technique a été utilisée dans le cadre de la rénovation du Parlement Vaudois, où il a été décidé de démonter les parquets d'origine et de les revendre. Ici, pour ôter la première lame, l'équipe de démontage de *ProTravail* a conçu spécialement une spatule pour couper la fausse languette et poursuivre le démontage du vieux parquet.

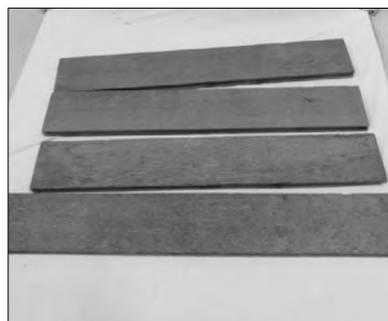
- › site de démontage: Parlement Vaudois, Lausanne (VD);
- › maîtrise d'ouvrage: État de Vaud;
- › mandataire: *Fondation ProMaison*, Renens;
- › filière exutoire: revente des matériaux d'occasion dans le magasin de *ProMaison*;
- › surface: environ 130 m²;
- › source: Cuendet 2020;
- › figures: le plancher en bois du Parlement Vaudois à Lausanne avant (a), pendant (b) et après (c) son démontage.



a



b



c

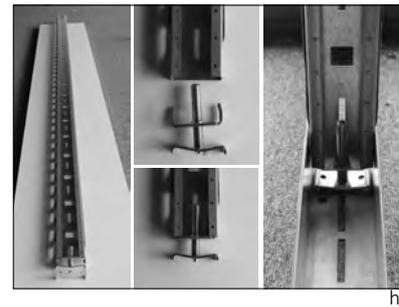
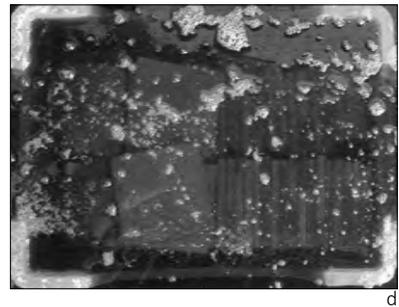
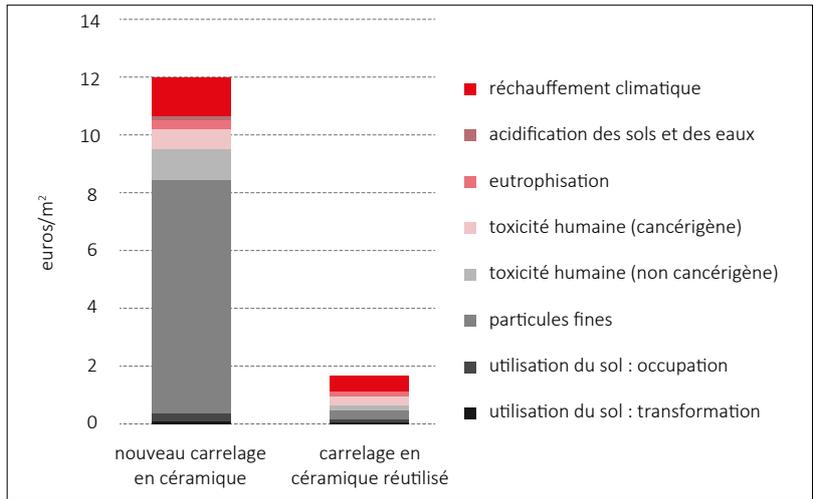
étude de cas III **le collectif Rotor**

Acteur majeur dans la déconstruction sélective, le collectif belge *Rotor* est une agence de conception, d'assistance et de recherche spécialisée dans la valorisation des éléments construction. Grâce à son expertise pratique, ses connaissances systémiques et ses activités de recherche, *Rotor* réalise des démontages à grande échelle, développe des méthodes de remontage, conseille acteurs publics et privés sur la gestion des ressources du secteur de la construction et propose des modèles économiques et des recommandations politiques. Part intégrante de leurs activités, le collectif a publié une série d'ouvrage et rapports de références sur le démontage avec finalité réemploi (Ghyoot 2017, Ghyoot et al. 2018, Rotor asbl 2015b). Il contribue également comme partenaire principal au projet de recherche européen *Interreg NWE «FCRBE - Facilitating the circulation of reclaimed building elements in Northwestern Europe»* («Faciliter la circulation des éléments de construction récupérés dans le Nord-Ouest de l'Europe») dont les premiers résultats sur les outils et méthodes de déconstruction ont été publiés (Interreg FCRBE 2020).

Sur le terrain, le collectif interdisciplinaire s'est spécialisé dans le démontage sélectif d'aménagement intérieur de bureaux, soumis à une fréquence de rotation particulièrement élevée. L'agence a développé des techniques de démontage pour de nombreux éléments de partition intérieure et démonte régulièrement portes, revêtements de sols, faux-plafonds, cloisons, luminaires, etc. Une attention particulière est également portée à l'accessibilité et à la qualité de l'information nécessaire au remontage. Parmi les techniques développées, le collectif propose de démonter des carrelages assemblés au mortier, par pré-découpage des joints à la scie et trempage en solution acide pour en ôter les résidus. Les carrelages sont ensuite nettoyés avec de l'eau à haute pression, séchés, emballés et prêts pour être intégrés dans un nouveau projet. Une analyse de cycle de vie (cstc.be et Rotor n.d.) a montré que la réutilisation de ces carrelages par rapport à l'utilisation de carrelages neufs permettait de réduire de 85% l'impact du cycle de vie.

› sources: [Ghyoot 2017](#), [Ghyoot et al. 2018](#), [Rotor asbl 2015b](#), [Interreg FCRBE 2020](#); [cstc.be](#) et [Rotor n.d.](#);

› figures: *Rotor* a développé une série de protocoles de démontage; ici, le démontage soigneux de faux-plafonds (b), la dépose de dallages en marbre après le pré-découpage du joint de mortier (f) et le nettoyage des traces de mortier sur des carreaux de céramique dans une solution acide (c,d,e). La comparaison de l'impact du cycle de vie de carrelage neuf (données *eco-invent*) et récupérés en Belgique (a) affiche les scores sont présentés sous une forme monétarisée. La monétarisation des impacts de cycle de vie est une procédure délicate qui vise à faciliter l'intégration de ces impacts dans la réflexion économique. Tout en bas, images du démontage de paroi de bureau (g), complété par la production d'un mode d'emploi de remontage illustré (h).

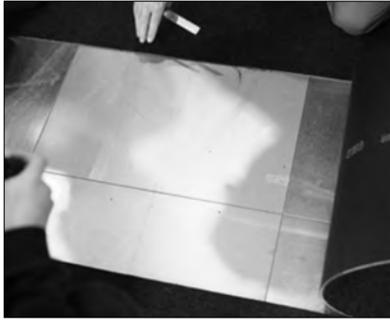


étude de cas IV sols de bureaux à Lausanne

La valorisation des matériaux de l'ancien siège du *Comité Olympique International (CIO)* a été étudiée en collaboration avec l'*EPFL* qui a organisé l'atelier *Youth for Reuse*, supervisé par le collectif belge *Rotor* et le bureau d'architecture allemand *AFF*, en partenariat avec les acteurs et actrices locaux des filières exutoires. Le but de cet atelier était d'identifier les stratégies de valorisation régionale par réutilisation ou recyclage des matériaux. Parmi les éléments démontables soigneusement, des dalles de faux-planchers composites bois-métal, sur lesquelles étaient posées des dalles de moquette amovibles présentaient un fort potentiel. Commun depuis les années 1960, ce type de dalles de faux-planchers est posé sur des plots, rendant possible l'accès aux réseaux techniques qui courent dessous.

Ce système est aisément démontable: les carreaux de moquette - non collés - sont ramassés et empilés sur des palettes et les dalles soulevées du plot. L'entreprise française *Mobius réemploi* s'est spécialisée dans la récupération et la revente de ces dalles pour réemploi et en démontré la faisabilité technique à grande échelle. Toutefois, au *CIO*, pour des raisons économiques, organisationnelles, culturelles et logistiques, la réutilisation n'a été effective que de manière partielle. Une partie de la moquette a été réutilisée temporairement en place d'une moquette neuve pour une manifestation et une petite partie des dalles a été préservée par le *Musée Olympique*, comme stock de remplacement. Une large majorité des matériaux a été recyclée (Bach 2017).

- › site du démontage: bâtiments de l'ancien siège du *CIO*, Lausanne (VD);
- › maîtrise d'ouvrage: *CIO*;
- › acteurs/actrices de l'atelier *Youth for Reuse*: *EPFL-EAST*, Lausanne, conseillés par *Rotor*, Bruxelles, et *AFF*, Berlin;
- › mandataires: consortium d'entreprises de recyclage;
- › filières exutoire: préparation au recyclage des faux-planchers par *SRS*, Bâle/Bussigny et réutilisation par le *Musée Olympique* et une manifestation culturelle cantonale;
- › période de démontage: 2016;
- › source: [Bach 2017](#);
- › figures: démontage sélectif et palettisation des dalles de moquette (a,b), alors que les dalles de faux-plancher sont recyclées (c).



a



b



c



Les éléments techniques comprennent les équipements, les supports et les réseaux des éléments de chauffage, ventilation, sanitaire et électricité (CVSE). Pour les gaines et les éléments de réseaux, la faisabilité technique d'un démontage sélectif est aujourd'hui faible car ces réseaux sont difficilement accessibles dans la plupart des cas. Pour les équipements (chauffe-eau, machine à laver, etc.) les difficultés techniques sont moindres mais les contraintes économiques, culturelles et de garanties sont encore des obstacles.

pratiques

Sur les chantiers, un tri sélectif des métaux est systématiquement fait. La mise en décharges spécialisées des aciers (fixations), cuivres (réseaux d'alimentation en eau et chauffages ainsi que réseaux électriques), aluminium (rails de fixation), etc. permettent un retour pécuniaire suffisamment important pour systématiser la pratique. Les équipements CVSE sont peu réutilisés et majoritairement acheminés en déchetterie où les matériaux recyclables sont séparés et valorisés. Ce service de recyclage est bien établi et soutenu à l'échelle domestique par la Contribution Anticipée au Recyclage (CAR) et à la Taxe d'Élimination Anticipée (TEA) ([Swiss Recycling 2015](#)).

Moyennant un temps de démontage supplémentaire, luminaires, interrupteurs, rails et prises électriques dont les fixations sont accessibles peuvent être démontés soigneusement et revendus s'ils sont aux normes et en bon état. Les appareils électriques, électroménagers et de chauffage/ventilation sont pour la plupart aisément démontables mais vite confrontés aux problèmes de garantie. Aujourd'hui, les possibilités de valorisation de matériel encore fonctionnel sont illustrées par les activités des bourses de matériaux en Suisse.

Pour aller plus loin, nous mentionnons une seconde fois qu'une sélection de techniques de démontage avec une finalité réemploi est détaillée étape par étape par le *CDR Construction* dans des manuels développés pour le bâti belge qui présente des similarités avec les installations suisses (disponibles ici, seulement en français) ([Stockmans 2016](#)) pour prises et interrupteurs, radiateurs et vannes thermostatiques, luminaires et accessoires.

freins

Les freins systémiques au démontage sont similaires à celles décrites pour l'"ameublement intérieur". A celles-ci s'ajoutent des difficultés liées à la faisabilité technique pour les réseaux, l'obsolescence des appareils et la question des garanties.

Pour commencer, la faisabilité technique est un obstacle important: les réseaux techniques ne sont dans la plupart des cas pas conçus pour être démontés. Les câbles et la tuyauterie qui ont été coulés dans le béton tout comme les chauffages au sol posé avec système humide dans la chape en sont des exemples. Certains réseaux sont également trop fragiles pour être démontés. Par exemple, les réseaux pour sprinkler, en plus des questions de sécurité, sont fins et difficilement démontables sans être voilés. Ensuite, l'obsolescence des appareils difficilement réparables ou ne répondant plus aux normes en vigueur est une barrière importante. Par exemple, les prises électriques plates ne sont plus dans les normes et les pièces récupérées ne peuvent que servir à remplacer d'anciennes prises plates cassées.

De manière générale, il est préférable de réaliser les nouveaux réseaux avec un nombre minimum de pièces et de raccords. Cette nécessité pratique restreint directement l'intérêt du démontage d'anciens réseaux puisque la dimension de l'élément démontable correspond rarement parfaitement au

besoin du projet et des assemblages supplémentaires deviennent nécessaires si les pièces récupérées sont trop courtes. Or, les risques de fuite d'un tuyau augmentent avec le nombre de raccords; les risques de disjonction, voir d'incendie (possible entrée de poussière), d'un réseau électrique augmentent avec le nombre de raccords (au moyen de domino ou connecteurs). Quant aux réseaux d'eau, il est possible de les souder, toutefois, l'ouvrage dépend alors de la qualité des olives réalisées.

Pour terminer, le marché des équipements de deuxième main est contraint par la difficulté des revendeurs à garantir ces appareils et répondre au droit suisse. Selon l'art. 210 du Code des Obligations suisse, le vendeur doit garantir deux ans à compter de la livraison d'une chose neuve, durée qui peut être réduite jusqu'à une année pour la vente de biens d'occasion. Les bourses de matériaux ne disposent pas d'un équipement de test suffisant pour formellement garantir leurs appareils d'occasion. En contrepartie, des revendeurs proposent pour le moment un service après-vente et d'échange plus flexible.



figure 13 · sanitaires récupérés et conservés dans les dépôts de l'entreprise Syphon à Bienne.

étude de cas V installations techniques à Berne

Lors de l'intervention de *Syphon AG* dans deux maisons individuelles vouées à la démolition (voir [figure de l'étude de cas I](#)), l'équipe de démontage récupère des équipements de chauffage et électroménagers qui sont pour la plupart récents, aux normes et en bon état. Ils ne sont pas envoyés en déchetterie et intégreront l'offre d'équipements d'occasion de *Syphon AG* après une vérification de leur fonctionnement et un nettoyage.

- › opération: chantiers de déconstruction/démolition de villas;
- › lieux: Muri bei Bern et Zollikofen (BE);
- › maîtrise d'ouvrage: propriétaires des maisons vouées à la démolition;
- › maîtrises d'œuvre: architectes des nouvelles maisons;
- › mandataires: *Syphon AG*;
- › filière exutoire: revente des installations d'occasion dans le magasin de *Syphon AG*;
- › période de démontage: 2020;

- › sources: [Rieder 2020](#), [Zwahlen 2020](#);
- › figures: à l'exception de la purge, la procédure de démontage d'un chauffage est peu différenciable de celle d'une pose inversée. Un récipient pour l'eau purgée et une clé de serrage forment l'essentiel de l'outillage. Grâce à la rapidité et la simplicité de l'opération ainsi qu'à la récence des appareils, la fréquence de vente est élevée.



a



b



c

Alors que les façades vitrées de bâtiments de bureaux présentent un bon potentiel technique, le démontage de façades de beaucoup de logements est aujourd'hui difficile techniquement à cause des modes constructifs peu réversibles.

pratiques

Aujourd'hui, les matériaux des façades démolies sont dirigés vers les filières de recyclage ou incinération adaptées (Département de la sécurité et de l'environnement 2013). Pour les toitures, l'aspiration et la réutilisation des graviers et matériaux de granulés utilisés en toiture et non contaminés sont des pratiques répandues mais les autres matériaux sont généralement également recyclés ou incinérés.

Un démontage sélectif peut être réalisé sur des revêtements de façades dont les connexions mécaniques réversibles sont accessibles. Il peut s'agir par exemple de panneaux ou de tôles vissées. Les vitrages dont les fixations sont accessibles peuvent souvent être démontés en répliquant l'inverse de leur schéma de montage (Rieder 2020). Les façades de bureaux sont des bonnes candidates pour un démontage sélectif soigneux. Selon les cas, bien que collés, des isolants peuvent être détachés en glissant une lame à l'arrière, mais le faible coût de ces produits neufs sur le marché limite ce type de pratique:

«Seul un petit nombre d'opérateurs, principalement basés aux Pays-Bas, les proposent à la vente de façon régulière. La revente de ce produit n'est toutefois pas au cœur de leur modèle économique: au vu des faibles coûts

de ces produits sur le marché du neuf, il est difficile de faire de leur réemploi une activité à part entière. Les entreprises proposant des matériaux d'isolation de réemploi sont des démolisseurs qui récupèrent ces éléments sur leurs chantiers et développent, de façon complémentaire, une filière de revente pour ces produits» (Opalis 2020).

Pour les toitures, la déconstruction sélective concerne à ce jour surtout les revêtements. Les éléments fixés mécaniquement, par exemple des dallages, des graviers, des tôles vissées, des tuiles emboîtées, des ardoises (pour les régions concernées) ou des dalles sur plots, sont de bons candidats au démontage. Les éléments sous forme de granulés peuvent être aspirés et réutilisés s'ils ne sont pas contaminés (voir figure de l'étude de cas VI).

freins

En dehors des revêtements, les couches d'étanchéité sont généralement soudées sur place et les isolants, régulièrement endommagés, sont de possibles sources de risques pour la santé. De plus, leur vocation première étant l'étanchéité, les découper pour les réemployer nuirait à leurs propriétés. Moins souples que les

parties courantes, les soudures sont des points critiques vis-à-vis des possibles désordres. Aussi, l'ensemble des émergences et pénétrations traversent et modifient les propriétés de ces revêtements s'il fallait les réemployer et de ce fait créer des rustines à ces endroits.

Pour les façades, l'utilisation massive de crépis conventionnels et les modes de fixations (chevilles et colles) contraignent le démontage de l'isolation périphérique (Rieder 2020, Zwahlen 2020). L'isolant ne peut alors être difficilement déposé en bandes plus larges qu'une vingtaine ou trentaine de centimètres. Encore une fois, l'augmentation du nombre d'éléments et donc de jonctions diminue les performances et rendent les risques de désordres plus élevés.

Pour les vitrages, l'origine et la qualité des fenêtres doivent être formellement reconnues et répondre aux normes. Une fenêtre en triple vitrage ne peut être officiellement utilisée dans un projet soumis à autorisation si son origine et ses capacités ne peuvent être garanties par le vendeur. De plus, les possibles retours d'isolation en façade tendent à dissimuler les fixations des cadres de fenêtres et ainsi complexifier leur démontage.

Pour le travail de démontage sélectif en toiture, Bellastock (2014) et la Fondation ProTravail (Cuendet 2020) soulignent tous deux les contraintes liées aux besoins de sécurité en hauteur.



figure 14 · isolants récupérés pour réemploi.

étude de cas VI graviers de toiture à Lausanne

Les toitures plates de l'ancien siège du CIO étaient des toitures chaudes isolées par l'extérieur, protégées par un lé d'étanchéité puis recouvertes de graviers ronds pour certaines ou d'une couche végétalisée pour les autres. Alors

que les lés ont dû être arrachés puis incinérés, 67 tonnes de graviers ronds ont été aspirés et transportés par camion pour être réutilisés sur un chantier CFF à 26 km du site de déconstruction (Bach 2017).



› maîtrise d'ouvrage: *Comité Olympique International*, Lausanne (VD);

› acteurs/actrices du workshop *Youth for Reuse*: *EPFL-EAST*, Lausanne, conseillés par *Rotor*, Bruxelles, et *AFF*, Berlin;

› mandataires: consortium d'entreprises de recyclage;

› site de démontage: bâtiments de l'ancien siège du CIO, Lausanne (hormis un bâtiment classé) (VD);

› filières exutoire pour les graviers: repreneurs désignés avant le démontage; les graviers sont réutilisés sur un autre chantier de l'entreprise du consortium en charge de leur évacuation;

› période de démontage: 2016;

› source: Bach 2017;

› figure: aspiration des graviers sur la toiture du CIO en vue de leur réemploi.

étude de cas VII façades à Zurich et Winterthour

Pour le projet de surélévation d'une partie de la *Halle 118* à Winterthour, le bureau d'architecture *baubüro in situ* souhaitait bâtir avec et à partir de matériaux d'occasion récupérés en Suisse, notamment sur des chantiers de démolition. Sans précédent en Suisse et demandant de repenser le modèle de conception et d'approvisionnement, ce projet a nécessité un travail de recherche de matériaux important. Cette entreprise a illustré quelques-unes des possibilités de démontage sélectif à grande échelle en Suisse. Pour les façades, deux bâtiments ont servi de sources principales.

Le premier site de démontage est l'immeuble de bureau *Orion* à Zurich voué à la démolition. Dans cet immeuble de bureau d'environ 12'000 m² de plancher, un démontage sélectif a été réalisé sur la partie basse de la façade. Des dalles verticales de parement en pierre ont été récupérées ainsi que 76 fenêtres en triple vitrage au rez-de-chaussée sur les 400 à disposition ([Poignon 2018](#)).

Le deuxième site de démontage est celui de l'imprimerie *Ziegler* à Winterthour. Lors du démantèlement de ce bâtiment industriel, 1'100 m² de revêtements de façade en tôle ondulée orange, 25 fenêtres d'un modèle Alu-PVC en triple vitrage encore en vente aujourd'hui et installées il y a 12 ans ainsi que des plaques d'isolation ont été récupérés ([Poignon 2018](#)).

- › sites de démontage: imprimerie *Ziegler*, Winterthour (ZH); immeuble de bureaux *Orion*, Zurich (ZH);
- › filières exutoire: surélévation d'une partie de la *Halle 118*, Winterthour (ZH);
- › maîtrise d'ouvrage de la surélévation: Caisse de pension *Fondation Abendrot*, Bâle (BS);
- › maîtrise d'œuvre de la surélévation: *baubüro in situ AG*, Zurich (ZH);
- › période de démontage: 2018;
- › source: [Poignon 2018](#);
- › figures: démontage partiel des façades de l'immeuble de bureaux *Orion* à Zurich (a-e), avec le démontage manuel du revêtement de façade en pierre et des fenêtres avec des ventouses de levage. Démontage manuel des 1'100 m² de tôles ondulées, de l'isolation et de 25 fenêtres à l'imprimerie *Ziegler* (f-i).



a



b



c



d



e



f



g



h



i

étude de cas VIII mur-rideau à Bienne

La conservation, la maintenance et la réutilisation *in-situ* sont des stratégies complémentaires et favorables à la longévité des bâtiments. Avec la déconstruction sélective et de la conception réversible, ces approches œuvrent en parallèle pour limiter la production de déchets et prolonger l'utilisation des ressources. La *Farelhaus* est un exemple suisse qui illustre la complémentarité et la convergence de ces pratiques.

Inaugurée en 1959, la *Farelhaus* est un bâtiment de six étages conçu par Max Schlup, figure du mouvement moderniste suisse de l'après-guerre. Utilisé pendant longtemps pour des activités paroissiales, le bâtiment souffrait d'un manque d'entretien et d'investissement. Constatant sa sous-utilisation, un groupement d'architectes a été autorisé à financer son rachat et sa rénovation. L'approche projectuelle visait à minimiser les dommages sur le bâtiment, préserver les composants existants, les qualités spatiales, l'apparence et la valeur monumentale du bâtiment et réutiliser les matériaux déjà présents. En parallèle au concept de rénovation, un concept d'exploitation a été développé. Il a alors été décidé d'adapter le programme aux particularités du bâtiment pour préserver la disposition des pièces et les équipements existants. En donnant une valeur importante aux composants existants, les architectes, qui œuvraient simultanément comme maîtrises de l'ouvrage et maîtrises de l'œuvre, ont pris le parti de sélectionner des usages qui puissent être compatibles avec le confort thermique propre à ce bâtiment et à une intervention minimale.

Des principes communs à la pratique de la déconstruction sélective ont été mis en œuvre: avant la définition de la stratégie d'intervention, le bâtiment a été entièrement documenté par des recherches provenant d'archives et des inspections; une équipe d'entrepreneurs et de spécialistes jugée appropriée pour une telle démarche a été identifiée et mise à contribution rapidement; un espace de prototypage *in-situ* a permis d'effectuer des tests, par exemple pour l'étanchéité et les surfaces des matériaux.

Le bâtiment a alors été perçu comme un «entrepôt de pièces de rechange»: les caves ont été fouillées pour retrouver des matériaux d'origine; les équipements (lavabos, clinkers, panneaux muraux) des pièces qui subissaient les modifications les plus importantes ont été démontés et réutilisés dans d'autres pièces; la façade a été presque entièrement démontée, nettoyée et remontée. Les opérations de maintenance ont également permis de prolonger l'utilisation d'équipements alors peu entretenus: les systèmes de chauffages au sol et au plafond qui étaient partiellement rouillés ont retrouvé du service grâce à des dérivations astucieuses; les murs en bois et les dallages ont été nettoyés et conservés; les éléments en plâtre ont été lissés et rafraîchis; le parquet massif a été restauré.

Pour la façade, qui répondait aux exigences thermiques des années 1950, une démarche de restauration et réutilisation sur site a été développée. Une approche multicritère a guidé le processus de décision. Il incluait la consommation d'énergie en phase d'exploitation, l'énergie grise, le besoin d'investissement, le risque pour les utilisateurs/utilisatrices et l'augmentation des loyers, la préservation du monument, le niveau de destruction des matériaux existants et les risques d'infiltration. La combinaison de ces critères a mené au remplacement localisé des vitrages du rez-de-chaussée et à la conservation des autres éléments de façade. Le revêtement en *eternit* a été démonté, nettoyé, traité et remplacé sur une nouvelle isolation ultra-performante de 2 cm. Les joints ont été refaits et les profils en aluminium soigneusement nettoyés à la main puis remontés.

pratiques

En règle générale et sauf souhait particulier de la maîtrise d'ouvrage, les éléments de gros œuvre sont aujourd'hui abattus de manière destructive et les matériaux pour la plupart recyclés ou sous-cyclés.

Pratique courante dans le passé, la déconstruction sélective des **profilés métalliques**, soutenue par leur versatilité et durabilité, peut être effectuée par meulage ou déboulonnage. Alors que le secteur de la construction suisse produit environ 500'000 tonnes de déchets métalliques (porteur et non porteur) chaque année (Wüest & Partner 2015), Addis et Schouten (2004) soutiennent que la plupart des colonnes et poutres en métal issues de sites de démolition devraient pouvoir être réutilisées. Les halles industrielles régulièrement démantelées pour faire place à de nouveaux programmes en zone péri-urbaine en sont un exemple de bon candidat au démontage.

Pour le **bois**, le démontage de structures et la réutilisation des composants sont des pratiques séculaires qui étaient largement diffusées avant la révolution industrielle. Aujourd'hui encore les structures en bois se combinent bien avec des modes d'assemblages démontables. Si les assemblages ne sont pas exclusivement en bois, les connexions faites de pièces métalliques peuvent être démontées en ôtant les quelques clous, vis, et boulons avec des outils adaptés, tels que le pied-de-biche et un *nail kicker* («décloueuse») (Falk et Guy 2007, Ghyoot et al. 2018, Cuendet 2020). Si des éléments sont collés, ils peuvent éventuellement

être sciés à proximité des connexions, à l'aide d'une scie circulaire. Après élimination des clous et vis, les profilés peuvent être redimensionnés, éventuellement rabotés et poncés. Falk et Guy (2007) détaillent l'outillage nécessaire pour des structures en bois.

Pour le **béton**, des éléments **préfabriqués** peuvent théoriquement être séparés grâce au sciage des joints de connexion. Les structures porteuses d'étages de logements multi-étagés ont été démontées de manière sélective, par exemple, en Allemagne, Finlande, Suède et aux Pays-Bas, permettant la récupération d'éléments porteurs en béton préfabriqués, par déseboîtement ou par sciage (Huuhka et al. 2019). Ces éléments ont été réutilisés sur-site et hors-site. Mettke (2008) a recensé des techniques de démontage et de levage d'éléments porteurs en béton préfabriqués provenant d'immeubles de logement de l'Allemande de l'Ouest voués à la démolition ainsi que des exemples de nouveaux bâtiments réutilisant ces éléments pour une fonction similaire ou différente. Un marteau de démolition (hydraulique) peut servir au décapage des éléments (p. ex. de restes d'isolation collée) et une tronçonneuse ou une mini pelle mécanique équipée d'un ciseau à la découpe des joints.

Concernant le **béton coulé sur place**, le sciage et la dépose restent des pratiques exceptionnelles, mais des contextes particuliers, comme des milieux urbains denses, ont mené au développement technique de démontage soigneux. L'étude de cas XII revient sur les détails d'un protocole de sciage des dalles d'un

immeuble à Genève. De tels démontages peuvent compter sur deux aspects techniques favorables: d'un côté la dégradation d'éléments de béton «intérieurs», c'est-à-dire non-exposés à l'environnement extérieur et à l'eau est normalement faible, voire inexistante, et de l'autre, tous les outils et techniques nécessaires pour définir l'état d'un béton et de ses armatures existent aujourd'hui (inspection visuelle, scléromètre, géoradar, essais de charges, chablon à fissure, etc.).



a



b

figure 15 · démontage d'une charpente en Suisse.

freins

Pour le **métal**, les entreprises de démolition sont habituées à travailler avec la filière du recyclage, bien établie en Suisse et associée à un démantèlement rapide des structures. La déconstruction sélective dans le but de réutiliser les profilés est rare car cela demande du temps supplémentaire, pour le démontage et la planification. De plus, le processus de reprise ne bénéficie pas de filière stable. En parallèle, la revente des éléments porteurs nécessite leur re-certification, processus qui peut s'avérer coûteux et rendre le prix de l'acier de réemploi équivalent au neuf (Earle et al. 2014). Pour le métal, la corrosion, la présence de peinture potentiellement toxique, de trous ou d'éléments soudés diminuent le potentiel de réemploi (Addis 2006).

Pour le **bois**, il peut avoir été altéré avec le temps par l'humidité et l'usage de nouveaux produits comme les panneaux à particules orientées (appelés aussi *OSB* pour «*Oriented Strand Board*») pour lesquels la fabrication et la fixation avec de la colle fragilise les composants par rapport à des éléments en bois massif montés à sec (Earle et al. 2014, Falk et Guy 2007).

Pour le **béton**, en plus des difficultés systémiques, les difficultés économiques sont de taille et s'additionnent aux enjeux techniques liés surtout au démontage, transport et remontage de ce type d'élément.



figure 16 · démontage sélectif de la structure métallique de la Halle Lustucru à Arles (a). Les éléments sont triés au sol (b).

étude de cas IX structure en bois à Rheinau

Inauguré en 1811 pour traverser le Rhin à la hauteur du village d'Eglisau (ZH), un pont en bois a été déconstruit une centaine d'années plus tard avec l'endiguement du Rhin. Assemblés selon la pratique traditionnelle, des éléments porteurs ont été récupérés et réutilisés

dans la construction d'une ferme toujours visible dans un village voisin. Les pièces en chêne et épicéa ont été réutilisées pour la charpente de la ferme, toujours en place aujourd'hui (Günter 2015, Fivet et Brütting 2020).

- › lieu du démontage: pont en bois à Eglisau (ZH);
- › filière exutoire: réutilisation pour la charpente d'une ferme à Rheinau (ZH);
- › dimension du pont démonté: tablier du pont: env. 750 m²;
- › surface de la ferme: env. 600 m²;
- › statut: pont utilisé env. de 1811 à 1919; ferme utilisée env. depuis 1920;
- › sources: Günter 2015, Fivet et Brütting 2020;
- › figures: les marque des anciens assemblages (c) témoignent du réemploi d'éléments du pont d'Eglisau (a) pour la charpente du toit d'une ferme à Rheinau (b).



a



b



c

étude de cas X théâtre en bois à Paris et à Genève

A Paris, une structure en bois a été construite pour abriter une salle de théâtre éphémère pour la *Comédie Française* pendant la rénovation de ses locaux. Conçu spécialement pour le théâtre, ce cube de 60 m par 20 m avec un toit à deux pans était inséré entre une double colonnade du Palais Royal (Rappaz 2014). Au terme de sa première utilisation, la structure a été rachetée par la Ville de Genève en vue de la construction d'un bâtiment provisoire pour l'*Opéra des Nations*. Les panneaux verticaux et éléments de charpentes ont été démontés et transportés jusqu'à Genève. Une grande partie la structure genevoise est constituée d'éléments de la structure de Paris. Pour répondre aux besoins des représentations lyriques, la structure a été transformée, allongée de 5 m et élargie de 8 m à l'axe des fermes pour accueillir 260 spectateurs supplémentaires. Une double ferme

longitudinale couplée à deux fermes transversales fonctionnant en grille de poutres ont été ajoutés à la structure initiale. Il fallut également adapter le rapport au sol pour le terrain végétal genevois puisque la structure parisienne, alors bâtie directement sur le parvis de la cour du Palais Royal, ne disposait pas de fondations. La proposition des ingénieurs suisses d'utiliser des pieux battus en épicéa, puis de les démonter soigneusement après utilisation, rapprochant le site proche de son état précédent, a permis de réduire l'impact environnemental (Lignum Genève 2015, Charpente Concept 2016). Aujourd'hui, le bâtiment est en cours de démontage sélectif pour la deuxième fois. Les connexions boulonnées permettent de séparer soigneusement les éléments, qui seraient alors promis à une troisième vie à l'étranger (Bonier 2016).

- › 1^{er} démontage:
- › site de démontage: théâtre éphémère de la *Comédie Française* au Palais Royal à Paris, F;
- › maîtrise d'ouvrage du théâtre: *Comédie Française*;
- › architectes du théâtre: *Société d'Architecture Alain-Charles Perrot & Florent Richard*, F;
- › statut: utilisé de 2012 à 2014, puis démonté entre l'été 2014 et février 2015 et transporté en camion jusqu'à Genève;
- › 2^{ème} démontage:
- › site de démontage: bâtiment provisoire de l'*Opéra des Nations* à Genève (GE);
- › maîtrise d'ouvrage de l'opéra: *Fondation du Grand Théâtre Genève*;
- › architectes de l'opéra: *BRAA SA* (GE);
- › ingénierie civile/bois de l'opéra: *Charpente Concept SA* (GE);
- › statut: utilisé de 2016 à 2019, en cours de démontage;
- › surface au sol: 2'600 m²;
- › sources: Rappaz 2014, Lignum Genève 2015, Charpente Concept 2016, Bonier 2016;
- › figures: après trois ans d'utilisation à Paris (a), le théâtre éphémère est démonté. Ses panneaux et fermes sont alors réutilisés pour l'Opéra temporaire des Nations à Genève (b). En 2020, la structure est à nouveau démontée (c) grâce aux assemblages réversibles (g). Les pieux battus réduisent l'impact sur le site (h,i).



a



b



c



d



e



f



g



h



i

étude de cas XI structures métalliques à Bâle et Zurich

Déjà décrit en amont (voir [figure de l'étude de cas VII](#)), le projet pour la surélévation d'une partie de la *Halle 118* à Winterthour est conçu à partir d'une large part d'éléments d'occasion. Des composants issus de trois sites de démolition ont été utilisés pour la nouvelle structure métallique et leur récolte illustre les processus de déconstruction sélective employés.

Sur un premier site à Bâle, 60 tonnes de profilés en acier ont été démontées. Ils proviennent de la structure de la centrale de distribution *Coop* de Lysbüchel construite il y a 15 ans, inutilisée et vouée à la démolition:

«Sa charpente métallique était constituée d'IPE et HEA, avec des poutres secondaires sur appuis simples entre les poutres principales, fixées au moyen de goussets soudés. Selon les niveaux, les poutres principales, assemblées aux poteaux, se présentaient sous forme de poutres simples ou de poutres continues

sur deux travées, avec des liaisons boulonnées formant des articulations. Seuls les goussets, fonctionnant comme des éclisses, étaient soudés. Le démontage et le remontage étaient donc possibles sans nécessiter ni meule à disque ni chalumeau.» ([Hegner-van Rooden 2019](#)).

Sur un deuxième site industriel, une ancienne usine de machines textile dans le canton de Zürich, 210 IPE120 et 90 IPE100 (pour un total de 11 tonnes) ont été démontés manuellement. Sur 20 niveaux, les profilés étaient posés sur des consoles métalliques elles-mêmes ancrées dans le béton. La déconstruction sélective n'a été effectuée que sur les deux niveaux inférieurs. Les profilés métalliques de 18 rangées supérieures ont été démolis de manière traditionnelle avec le reste du gros œuvre en béton ([figure 7](#)) ([Poignon 2018](#)). Sur le troisième site, un immeuble de bureau, un escalier métallique de six étages en acier galvanisé, pesant 12 tonnes et vieux de 28 ans a été démonté et levé par volée.

› sites de démontage: centrale de distribution *Coop*, Lysbüchel (BS); usine de machines textiles *Zellweger*, Uster (ZH); immeuble de bureaux *Orion*, Zurich (ZH);

› filière exutoire: surélévation d'une partie de la *Halle 118*, Winterthour (ZH);

› maîtrise d'ouvrage de la surélévation: caisse de pension *Fondation Abendrot*, Bâle;

› maîtrise d'œuvre: *baubüro in situ AG*, Zurich;

› période de démontage: ~ 2018;

› sources: [Hegner-van Rooden 2019](#), [Poignon 2018](#);

› figures: aperçu des opérations de déboulonnage (b), levage (a) et stockage (c) lors de déconstruction sélective de la structure métallique de l'entrepôt *Coop* à Lysbüchel et du démontage par volée d'un escalier métallique pour réemploi à Zurich (d,e).



a



b



c



d



e

étude de cas XII dalles en béton à Genève

Dans un contexte urbain dense, la structure en béton coulé d'un immeuble de Lancy (GE) est soigneusement démontée à la scie circulaire. Cette déconstruction sélective par sciage permet non seulement de protéger l'environnement bâti avoisinant de plusieurs nuisances mais aussi de récupérer des pièces de dalles de béton. Plutôt qu'être concassées, ces dalles constituent une source d'éléments de construction de deuxième main pour un autre projet genevois. En effet, les dalles sciées à Lancy sont réutilisées comme dallage dans les nouveaux locaux d'exploitation du Jardin Alpin à Meyrin (GE). La valorisation de cette mine urbaine permet donc simultanément de réduire la quantité de déchets de chantier et de diminuer l'extraction de nouvelles ressources.

La méthode de déconstruction employée fait recours à une technique existante utilisée fréquemment dans des contextes urbains particulièrement denses ou lors de démolitions partielles. Dans l'ordre du protocole de déconstruction, l'ingénieur-e planifie d'abord la sécurisation du site puis dessine le contour des portions de dalles à couper. Ensuite, il s'agit d'étayer la dalle à découper par-dessous avec un platelage, puis de fixer les points de levage. On scie alors une première portion de la dalle en utilisant une scie circulaire. La scie est appuyée sur un rail pour assurer la linéarité de la coupe. Le protocole de recon-

naissance et de découpe publié par *Bellastock* sur l'expérience de découpe de murs au Clos Saint-Lazare (F) (*Bellastock et CSTB 2018*) est cité en référence, notamment pour la méthode de découpe aidée d'un rail. Une fois détachée, la pièce est levée à l'aide d'une grue.

Une fois démontées, les pièces découpées sont acheminées en camion jusqu'au chantier de réemploi à Meyrin. Sur place, des pièces sciées sur d'autres chantiers genevois de déconstruction de structures en béton complètent le stock. Les dalles de deuxième main sont alors retaillées aux justes dimensions si besoin puis déposées sur un lit de graviers et forment ensemble le dallage du parvis et du sol des nouveaux locaux d'exploitation du Jardin Botanique Alpin.

La réussite de ce réemploi est soutenue par divers facteurs dont: (1) une technique de déconstruction établie, (2) un contexte urbain nécessitant un démontage soigneux, (3) des architectes du projet «receveur» impliqués dans une démarche écologique, (4) un soutien important de la maîtrise d'ouvrage du projet «receveur», (5) l'implication du même bureau d'ingénieur-e-s civil-e-s à la fois dans le bâtiment «donneur» et le projet «receveur» ainsi que (6) un grand nombre de potentiels bâtiments «donneurs» parmi les chantiers des ingénieur-e-s, ce qui a augmenté les chances des disposer des justes quantités de dalles aux bonnes dimensions en temps voulu.

- › site de démontage: immeuble en cours de démolition à Lancy (GE);
- › ingénieur-e-s: *Ingeni* (GE);
- › entreprise de démolition: *Belloni SA*, Carouge (GE);
- › filières exutoire: réutilisation de 160 m² de dalle pour le projet de locaux d'exploitation pour la ville de Meyrin (GE) (maîtrise d'œuvre: *FAZ architectes*; ingénieur-e-s: *Ingeni*);
- › statut: en cours;
- › sources: *Bellastock et CSTB 2018*, *Favre et Gonçalves 2020*;
- › figures: protocole (j): après la sécurisation du site par la pose de garde-corps, un platelage en bois est installé pour étayer environ 30 m² de la dalle (d) et déplacé au fur et à mesure de la déconstruction. La découpe de blocs transportables à la grue est réalisée par un opérateur avec une scie. La scie est guidée grâce à un rail (b,c), rappelant alors le procédé utilisé par *Bellastock* au Clos Saint-Lazare (a). Un par un les blocs sont ensuite déposés par la grue (e). Quand un bloc est levé, l'opérateur n'est pas confronté au vide grâce au platelage en bois (f). Avec les dalles provenant d'autres chantiers genevois, les dalles découpées à Lancy sont réutilisées comme dallage de sol à Meyrin (g-i).



a



b



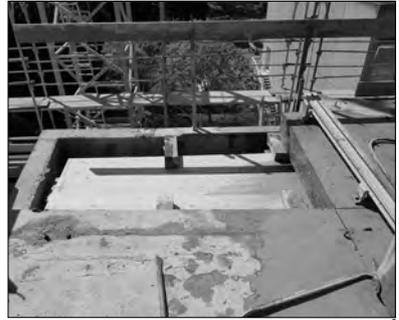
c



d



e



f



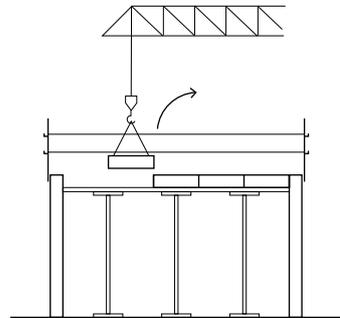
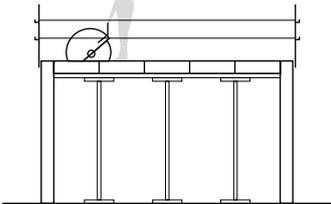
g



h



i



j

étude de cas XIII éléments coulés en béton en Europe

Huuhka et al. (2015, 2019) ont mis en lumière plusieurs expériences de déconstruction sélective de portions de structures en béton préfabriqué. Les déconstructions citées ont été effectuées sur des logements collectifs en Allemagne, aux Pays-Bas et en Europe du Nord entre 1986 et 2010. Ces démontages sont réalisés par étage car nombre de ces opérations ont pour but d'abaisser les bâtiments existants, c'est-à-dire d'enlever des niveaux à ces immeubles jugés alors trop hauts tout en conservant les étages inférieurs. Le démontage sélectif, réalisé par déseiboitement et/ou sciage, permet alors la conservation de ces parties basses et la récupération de pièces préfabriquées dont beaucoup sont réutilisées comme éléments porteurs dans de nouveaux bâtiments de faible à moyenne hauteur.

Parmi les expériences, la déconstruction sélective d'immeubles de quatre étages à Göteborg (SE) a permis, grâce à un système d'emboîtement des éléments, de récupérer 80 à 85 % des panneaux porteurs, dont le prix est alors estimé à un tiers de celui de panneaux neufs. Ils ont contribué à la construction de 320 logements dans la région de Göteborg. A Middelbourg (NL), le projet de conser-

vation par abaissement et rénovation d'immeubles de logement de 12 étages incluant la valorisation des panneaux issus de la déconstruction des 7 étages supérieurs de ces bâtiments a été sélectionné après une étude de faisabilité. Des études avaient été effectuées pour vérifier la démontabilité et la réutilisabilité des éléments en béton ainsi que la stabilité du bâtiment durant le démontage. Les éléments de murs et de dalles ont pu être séparés soigneusement car le joint en béton coulé n'avait qu'une faible adhérence aux éléments préfabriqués. Les connexions entre les dalles et les murs ont été sciées au diamant. Au final, plus de 900 éléments ont été démontés (Coenen et al. 1990, Huuhka et al. 2019).

Antérieurement, Mettke (2008) s'était penchée sur la déconstruction de bâtiments en béton préfabriqué en Allemagne de l'Ouest. Elle décrit les outils de séparation (marteau hydraulique, tronçonneuses, mini-pelle mécanique avec ciseau) et les méthodes de levage (fixation de poignée de levage) et similitude avec le processus de construction en béton armé.

sources: Huuhka et al. 2015, 2019, Coenen et al. 1990, Mettke 2008;
figures: construites entre 1971 et 1972, les trois tours d'habitation de Middelbourg comportaient à l'origine 12 étages chacune (a). En 1986, face à un taux d'inoccupation fluctuant autour de 20%, des travaux sont entrepris pour rénover les tours et en abaisser l'une d'entre elles de 7 étages. Pour cette tour, seuls les 5 étages inférieurs sont conservés sur place (b). Les joints coulés entre les éléments de murs et de dalles sont sciés (h). Les éléments récupérés grâce au démontage sélectif sont réutilisés dans la construction de trois nouvelles barres de logement, réparties dans d'autres quartiers de la ville (c). Un cadre de levage avait été conçu expressément (d). En bas (f-g), sciage et levage d'éléments en béton en Allemagne.



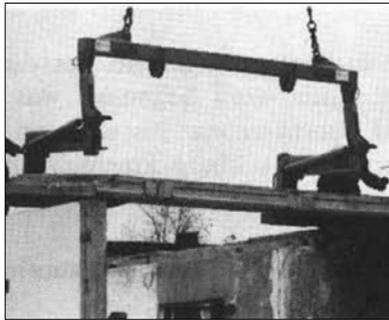
a



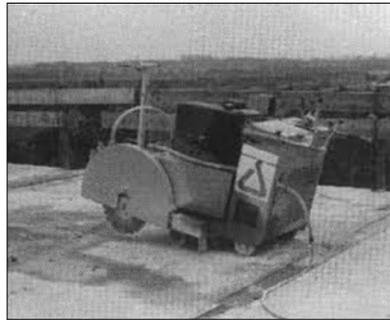
b



c



d



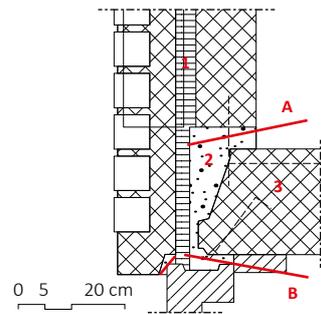
e



f



g



1 mur préfabriqué composé de:

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

2 joint en béton coulé

3 dalle préfabriquée en béton

A/B coupes effectuées lors du démontage

h

étude de cas XIV logements en béton à Berne

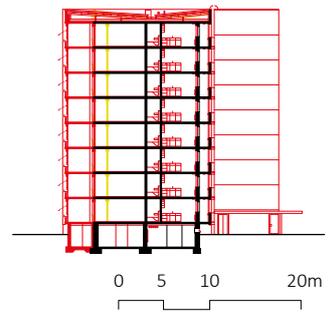
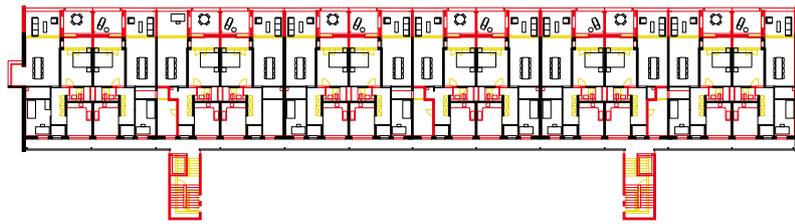
Face aux difficultés de réutiliser hors-site des structures en béton coulé, les stratégies de rénovation, conservation et extension sont des approches décisives pour la prolongation de la durée de vie de bâtiments et composants en béton coulé. Toutefois, ces approches questionnent directement des notions de confort et de patrimoine et se confrontent aux objectifs énergétiques. De nombreux bâtiments de logements collectifs construits depuis les Trente Glorieuses sont concernés.

Dessiné en 1955, le *Tscharnergut* est un ensemble d'immeubles d'habitation à l'Ouest de Berne. Depuis son inauguration en 1966, le nombre d'occupants avait baissé de plus de 30% en 2006 et de près de 50% en 2017. En 2006, un concours d'architecture a été organisé pour étudier les options de rénovation ou de remplacement, et donc de démolition. En concertation avec les habitant-e-s restant-e-s, la solution de

rénovation a été retenue. Un projet pilote a été effectué sur un premier bâtiment entre 2013 et 2017: une extension de 3 mètres vers l'Ouest de logement agrandi les pièces de vie intérieures et extérieures; des nouveaux blocs de circulation verticale desservent tous les étages et le repositionnement de cloisons a permis de diversifier la taille des logements.

Ce projet-pilote a été reçu de diverses manières. L'une des coopératives a choisi de ne pas répliquer la démarche et donc de remplacer un immeuble, invoquant notamment les seuils qui empêchent l'accès aux personnes à mobilité réduite et le respect seulement partiel des normes énergétiques. Une autre coopérative a quant à elle décidé de suivre la direction du projet pilote et une rénovation est en cours sur un second bloc d'habitation du *Tscharnergut* (Herzog 2016).

- › lieu: *Tscharnergut*, Bümpliz (BE);
- › programme: logement collectif;
- › concepteurs (concours 1955): Hansruedi Lienhard und Ulyss Strasser
- › client rénovation: *Fambau Genossenschaft* (BE);
- › architectes de la rénovation (2015): *Rolf Mühlethaler Architekt* et *Matti Ragaz Hitz Architekten AG*;
- › statut: inscrit à l'inventaire bernois des monuments dignes de protection;
- › surface: env. 12'000 m²/immeuble;
- › sources: [Herzog 2016](#), [rolf mühlethaler architekt](#) et al. 2019;
- › figures: au *Tscharnergut* (c), la différence de teinte du crépi laisse deviner l'extension de 3 mètres de l'une de barre d'habitation (g). Sa structure en béton avait été dénudée, conservée et prolongée (d-f). Le plan d'étage type (a) et coupe (b) présentent en noir la conservation, en jaune la démolition et en rouge la construction.



a

b



c



d



g



e



f

La revue des techniques de déconstruction sélective a illustré un potentiel technique important bien qu'inégal en fonction des couches et des systèmes constructifs. Les contraintes et limites actuelles de la pratique en Suisse ont également été soulignées. En plus de la nécessité d'appliquer les principes de la construction réversible aux futures réalisations, la revue a également montré l'importance de la circulation de l'information, de la diffusion des bonnes pratiques et du rôle clé de certains acteurs et actrices dans la réussite de ces démontages. Face à cela, des recommandations qui permettent d'accompagner la déconstruction sélective parmi les pratiques de chantiers établies sont nécessaires.

Diverses publications regroupent des recommandations, formulées dans une perspective nationale ou internationale. En 2018, le collectif Rotor a publié avec une équipe interdisciplinaire une série de recommandations adressées à des publics cibles comme les autorités publiques, les organes législatifs ou opérateurs, les entités de formation, les maîtrises d'œuvres, les scientifiques, etc. (Ghyoot et al. 2018). Formulées en priorité pour le milieu de la construction et de la déconstruction belge, ces propositions de développement peuvent pour la plupart trouver un écho dans le milieu suisse du bâtiment. Cet ouvrage, dont la lecture apporte un éclairage de qualité sur les enjeux de la déconstruction, a servi comme important matériel de base pour la rédaction des recommandations ci-dessous et s'y réfère en partie directement.

mettre en place des formations

Les connaissances pratiques et techniques sont des prérequis pour la conduite optimale d'une déconstruction sélective, l'évaluation des ressources et la diffusion de la pratique. Des formations théoriques et pratiques doivent permettre cette transmission de manière adaptée à chaque partie prenante.

qui peut agir ? Les centres de formation ont un rôle important à jouer pour organiser et dispenser un tel enseignement (Ghyoot et al. 2018). Les formations seront enrichies par des partenariats avec des acteurs/actrices du secteur et des praticien-ne-s des métiers de la pose et de la dépose (OREE 2018).

comment y parvenir ? Il est nécessaire de mettre en place des formations sur la déconstruction et la gestion/valorisation des déchets pour les différents acteurs et actrices. Pour commencer, cet enseignement théorique et pratique doit être intégré dans les cursus existants de formation aux métiers de la planification, de la construction et de la démolition (Dechantsreiter et al. 2014, Ghyoot et al. 2018, OREE 2018). Ensuite des modules indépendants, sous forme de formation continue ou de réorientation, doivent permettre une spécialisation. Le métier de «valoriste» (ou, en France, «technicien-ne valoriste des ressources du bâtiment») doit être enseigné et le personnel formé devenir un atout dans les équipes de planification et d'intervention. Finalement, des systèmes d'accompagnement pour les entreprises de démolition en partenariat avec les métiers de la pose doivent être proposés. En effet, à la vue du rôle

immédiat des entreprises de démolition dans la gestion des déchets, OREE (2018) soutient que, «[afin] de mettre en place des méthodes plus efficaces, la création de formations ou d'accompagnements serait un plus pour les entreprises de curage par les industriels, qui sont les mieux placés pour assurer un démantèlement et un stockage efficace des matériaux. Par exemple, un carreleur sait facilement assurer la dépose de nombreux carrelages là où les cureurs ne sont pas toujours en mesure de le faire en conservant l'intégrité du matériau. Il pourra donc être intéressant de créer de partenariats afin de faciliter les échanges entre ces professionnels.» La mise à jour régulière de ces formations doit permettre de diffuser les dernières avancées techniques et partager les retours d'expérience.

des exemples: fondée en 1993 à San Diego, l'organisation américaine *The ReUse People* dispense des modules sur la déconstruction pour divers groupes cibles (formation de base à la déconstruction, formation des chefs d'équipe, formation des entrepreneurs et formation des formateurs). Dans son offre figurent notamment des formations pour les entreprises de démolition et entreprises générales. Ces formations ont lieu dans les bureaux et sur le site de travail de ces entreprises directement (*The ReUse People 2020, 2013*).

En Belgique en 2017, le métier de «valoriste généraliste» et une formation associée ont officiellement été reconnus par le *Service Francophone des Métiers et Qualifications* grâce au travail de plusieurs acteurs/actrices (Be. Circular 2020, *Service Francophone des Métiers et des Qualifications* 2019). Cette reconnaissance est l'aboutissement d'une expérience pilote initiée par la fédération *RESSOURCES*, avec le soutien financier de l'administration *Bruxelles Environnement*. Une reconnaissance similaire a été obtenue en Allemagne (Dechantsreiter 2015).

Dans le registre des infrastructures, le *CDR Construction (Centre de Référence Professionnelle Bruxellois pour le Secteur de la Construction)* a construit à Bruxelles un espace d'apprentissage dédié à la dépose sélective et repose d'éléments d'occasion (Holef 2018).



figure 17 · espace de formation du *CDR Construction* pour le montage et démontage d'éléments d'occasion

instaurer un diagnostic-ressource obligatoire

Le diagnostic-ressource est un outil d'aide à la décision clé pour la déconstruction sélective et la diminution des déchets. Détaillé dans la partie "préparation au démantèlement / le diagnostic ressource", il permet d'évaluer l'ensemble des stratégies de valorisation, de fiabiliser les décisions et de repérer les éléments réutilisables avant de démarrer les démolitions (Bellastock et CSTB 2018, Ghyoot et al. 2018, OREE 2018). La collection de ces inventaires par les pouvoirs publics permettrait également d'établir des statistiques plus précises sur les flux issus de la mine urbaine. Ces chiffres permettront une meilleure connaissance du gisement et l'établissement d'actions ciblées et adaptées aux spécificités régionales (Ghyoot et al. 2018).

qui peut agir ? Les organes législatifs, en partenariat avec les associations professionnelles, sont en mesure de rédiger les documents/formulaires nécessaires, recommander puis rendre obligatoire ces inventaires pour obtenir des permis de démolition. La maniabilité et l'efficacité d'un outil adapté seront soutenues par une collaboration avec des praticiens et praticiennes impliqués dans l'économie circulaire.

comment y parvenir ? Une phase test d'application de ces diagnostics plus complets pourra être proposée sur une base volontaire ou sur une sélection de marchés publics. Les autorités devront mettre à disposition des formulaires types et les instruments faciles d'usage. Elles seront aussi invitées à légiférer sur

le choix des «diagnostiqueurs». Des formations devront permettre de garantir la qualité de ces évaluations par des experts habilités. En effet, lors d'une analyse statistique citée par *Rotor* de 1073 demandes de permis imposant un diagnostic ressource à Seattle, Dirk Wassink a montré une relation forte entre l'estimation du potentiel de réutilisation et le profil de l'évaluateur (Wassink 2016 cité par Ghyoot et al. 2018). Que ce dernier soit revendeur, consultant externe, entrepreneur général, démolisseur ou propriétaire, l'estimation du taux d'éléments récupérables varie au-delà d'un facteur 10. Une étape finale à cette recommandation sera l'intégration de la rédaction de ces diagnostics dans les normes en vigueur comme la norme SIA 430 et les Codes et Frais de la Construction (Rieder 2020, Zwahlen 2020). Cela permettrait d'inclure cette évaluation et une possible intervention dans les soumissions et dans le calendrier du chantier.

un exemple: la ville de Seattle est citée en exemple pour avoir rendu obligatoire un inventaire des réutilisables dans la demande de permis de démolition (Ghyoot et al. 2018, *Seattle Department of Construction & Inspections* 2020, Wassink 2016).

inclure la déconstruction sélective et le réemploi dans les marchés publics

Si la typologie et les filières de reprise le permettent, les marchés publics devraient introduire la déconstruction sélective et le réemploi parmi les critères de sélection. Ces démarches exemplaires et utiles pour vérifier l'efficacité des outils mis à disposition inciteraient les entreprises à valoriser les matériaux sur site et hors-site et permettraient de comparer les propositions de gestion des ressources. Pour autant que les filières de reprises soient en mesure d'écouler les matériaux récupérés, une étape supplémentaire serait l'introduction progressive et bien étudiée d'un taux minimum d'éléments récupérés selon les typologies et adapté à la nature du bâti (Ghyoot et al. 2018). Une concertation avec les différents acteurs et actrices doit permettre d'établir une réglementation ambitieuse mais réaliste. Une extension au domaine privé de ce critère serait une marche significative dans l'évolution de la gestion des ressources.

qui peut agir ? Les autorités publiques en collaboration avec les associations professionnelles sont en bonne position pour soutenir l'ajout de ce critère dans les marchés. Une collaboration avec les experts du secteur et des filières extoires permettra d'agir avec justesse et réalisme. Les maîtrises d'ouvrage privées sont également invitées à ajouter de leur propre initiative ce critère dans leurs appels d'offre.

un exemple: en France, depuis janvier 2020 l'article L. 228-4 du code de l'environnement prévoit désormais que: «dans le domaine de la construction ou de la rénovation de bâtiments, [la commande publique ponne] en compte les exigences de lutte contre les émissions de gaz à effet de serre et de stockage du carbone et veille au recours à des matériaux de réemploi ou issus des ressources renouvelables.»

adapter la fiscalité pour les activités de déconstruction

En ligne avec le *Plan d'Action de l'Union Européenne pour l'Économie Circulaire* (Commission européenne 2015) qui encourage l'utilisation d'instruments économiques pour contribuer à la prolongation de la durée de vie des biens, les activités de déconstruction sélective, qui nécessitent un temps de travail plus important, pourraient être soutenues par des mesures fiscales. Les autorités soutiendraient par un avantage fiscal la création d'emplois indélocalisables dans des activités durables, l'efficacité des ressources et la réduction des déchets de chantier (Nakajima et Russell 2014, RREUSE 2017, 2013).

comment ? Les taux d'imposition pourraient être abaissés pour une série d'activité en lien avec l'économie circulaire comme la déconstruction sélective et les filières de réutilisation. Dans le canton de Vaud, des sociétés, «que cela soit une start-up, une société étrangère ou une PME [(petite ou moyenne entreprise)] qui développe une nouvelle division d'affaires» actives dans certains domaines peuvent être partiellement

ou entièrement exonérées de l'impôt cantonal ou communal direct pour une durée maximale de 10 ans (Service de la promotion de l'économie et de l'innovation 2020). Ces exonérations pourraient être étendues aux activités sises mentionnées.

exemple: recensées par RREUSE (2017), des mesures fiscales existent en Europe dans le domaine de la récupération et de la réparation. En France et en Belgique, les activités de collecte, préparation et remise en circulation de biens d'occasion par des entreprises à vocation sociales bénéficient de réductions fiscales (exemption de la TVA en France et taux d'imposition de 6% sous certaines conditions en Belgique). Une dizaine d'autres pays européens ont réduit la TVA sur les services de réparation de certains objets ménagers (Meuli 2019). Une extension de ces pratiques aux activités de récupération et valorisation des matériaux de construction serait un soutien direct à la déconstruction et à la valorisation des ressources à grande échelle.

soutenir l'innovation

Le secteur de la déconstruction sélective doit disposer des conditions nécessaires à l'expérimentation et ainsi qu'à des recherches approfondies. De paire avec une fiabilisation empirique basée sur l'expérience en déconstruction, rénovation et réutilisation, des systèmes de certification des matériaux d'occasion participeraient à la fiabilisation des techniques. Cela appuierait la fluidité du processus du démantèlement jusqu'à l'écoulement des stocks et l'intégration des éléments récupérables dans des projets en conformité avec les normes en vigueur (Storey et Pedersen 2014).

qui peut agir ? Les centres de recherches et les centres techniques sont bien placés pour conduire ce type de recherche. Les bureaux d'études et leur département recherche et développement peuvent également utiliser leurs compétences et expériences pour ce type d'innovation (Ghyoot et al. 2018) et l'accumulation d'expérience. Les organes normatives et législatives pourraient également, sous conditions, offrir la souplesse nécessaire à l'expérimentation (Bouchain 2017, Castaros 2017).

comment ? Il serait pertinent d'orienter les recherches en priorité sur les méthodes de certification pour les éléments qui présentent le plus de potentiel, à la fois en termes de volume/masse dans le bâti et en termes de faisabilité technique et d'intérêt sur le marché de l'occasion. Storey et Pedersen (2014) soutiennent qu'une partie de cette recherche soit au départ financée par des fonds de recherche d'intérêt public. Une fois un marché établi, les organisations commerciales et les bureaux d'études pourraient prendre le relais. L'application des principes de la construction réversible dans le nouveau bâti facilitera indirectement ces difficultés techniques à long terme.

- Addis B. / 2006** Building with Reclaimed Components and Materials: A Design handbook for Reuse and Recycling. Earthscan, Londres.
- Addis W., Schouten J. / 2004** Design for reconstruction, principles of design to facilitate reuse and recycling-C607. Construction Industry Research & Information Association, Londres.
- Administration de l'environnement, Luxembourg Institute of Science and Technology / 2018** Anleitung zum Erstellen des Inventars von Baumaterialien beim Gebäuderückbau / Guide pour l'élaboration de l'inventaire des matériaux de construction lors de la déconstruction d'un bâtiment. Le Gouvernement du Grand-Duché du Luxembourg, Ministère du Développement durable et des Infrastructures, Esch-sur-Alzette.
- Bach R. / 2017** 45 expériences simples pour 1 projet exceptionnel, La déconstruction des anciens bâtiments administratifs du Comité International Olympique.
- Be Circular / 2020** Valoriste, un métier d'avenir [en ligne]. Be Circular be brussels. URL <https://www.circular-economy.brussels/valoriste-un-metier-davenir/> (consulté le 04.07.20).
- Bellastock / 2014** REPAR, Réemploi comme passerelle entre architecture et industrie. ADEME, Angers.
- Bellastock, CSTB / 2018** REPAR #2 : Le réemploi passerelle entre architecture et industrie. ADEME, Angers.
- Bonier, S. / 2016** L'Opéra des Nations promis à la Chine [en ligne]. Le Temps. URL <https://www.letemps.ch/culture/lopera-nations-promis-chine> (consulté le 03.07.20).
- Bouchain P. / 2017** Le permis de faire, l'esprit plus que la lettre. Entretien par Sonnette S. Tracés 19, 7–12.
- Buser B. / 2019** Le réemploi génère la créativité. Entretien par Sonnette S. & Frochaux M. Tracés 14–15, 6–9.
- Buser B. / 2020** ReUse- new Aesthetics. Conférence dans le cycle de conférence «Reuse and New Aesthetics» organisé par EAST lab. EPFL, Lausanne.
- Castaros C. / 2017** Le permis de faire, une loi pour supprimer la loi. Tracés 19.
- Charpente Concept / 2016** Opéra des Nations- L'envers du décor- 14 minutes [en ligne]. URL <https://www.youtube.com/watch?v=VxjUeYqHDUY> (consulté le 01.07.2020).
- Chini A.R. (Ed.) / 2001** Deconstruction and materials reuse: Technology, economic, and policy- Rapport CIB 266. CIB, Rotterdam.
- Chini A.R., Schultmann, F. (Eds.) / 2002** Design for Deconstruction and Materials Reuse- Rapport CIB 272. CIB, Rotterdam.
- Choppin J., Delon N., Encore Heureux / 2014** Matière grise: matériaux/ réemploi/architecture. Pavillon de l'Arsenal, Paris.
- Cieslik T., Frank S. / 2017** Instandsetzung Farelhaus, Biel. «Der Nutzer passt sich dem Haus an». TEC21, 28–33.
- Coenen M., Lentz G., Prak N. / 1990** De Kop is Era: Evaluatie van de aftopping van een flat in Middelburg. Delft University Press, Delft. La publication est disponible chez IOS Press ici: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:d35bc47b-38fe-4bcf-bc7f-1199dbcef1cc>.
- Commission européenne / 2015** Closing the loop- An EU action plan for the Circular Economy- EUR-Lex - 52015DC0614. Bruxelles.
- Conseil fédéral / 2020** RS 814.600 Ordonnance du 4 décembre 2015 sur la limitation et l'élimination des déchets (Ordonnance sur les déchets, OLED). Confédération suisse, Berne.
- cstc.be, Rotor / n.d.** Carrelage de réemploi: aspects environnementaux.
- Cuendet S. / 2020** Pratiques et techniques de déconstruction à la *Fondation ProTravail*. Entretien par Küpfer C.
- Dechantsreiter U. / 2015** Entwicklung zukunftsfähiger Instrumente zum bewussteren Umgang mit gebrauchten Bauteilen- DBU Projekt AZ 28540 Referat 44. Forschungsvereinigung für Recycling und Wertstoffverwertung im Bauwesen e.V. (RWB), Bremen.
- Dechantsreiter U., Horst P., Mettke A., Asmus S., Schmidt S., Knappe F., Reinhardt J., Theis S., Lau J.J. / 2014** Instrumente zur Wiederverwendung von Bauteilen und hochwertigen Verwertung von Baustoffen. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- Département de la sécurité et de l'environnement / 2013** Déchets et eaux de chantier: quand écologie rime avec économies. Canton de Vaud.

- Earle J., Ergun D., Gorgolewski M. / 2014** Barriers for Deconstruction and Reuse/Recycling of Construction Materials in Canada. Barriers for Deconstruction and Reuse/Recycling of Construction Materials 20–37.
- Falk R.H., Guy B. / 2007** Unbuilding: Salvaging the Architectural Treasures of Unwanted Houses. The Tauton Press, Newtown.
- Farelhaus AG / 2020** Farelhaus | Geschichte [en ligne]. farelhaus.ch. URL <https://www.farelhaus.ch/de/haus/erneuerung> (consulté le 27.09.20).
- Farelhaus AG, 0815 architekten / s.d.** Farelhaus. Planches de présentation.
- Favre V., Gonçalves M. / 2020** Deux projets pour la ville de Meyrin, entretien par Küpfer C.
- Fivet C. / 2019** Sortir de l'esthétique du bricolage. Entretien by Sonnette S. Tracés 14-15, 16–20.
- Fivet C., Brütting J. / 2020** Nothing is lost, nothing is created, everything is reused: structural design for a circular economy. Structural Engineer 98, 74–81.
- Furrer B. / 2017** Restauration Farelhaus, Biel. Das Wunder von Biel. TEC21 11, 12–13.
- Gauch M., Matasci C., Hincapié I., Hörler R., Böni, H. / 2016** Projekt MatCH- Bau- Material- und Energie-ressourcen sowie Umweltauswirkungen der baulichen Infrastruktur der Schweiz. EMPA, OFEV, Berne, St-Gall.
- Ghyoot M. / 2017** Objectif réemploi: Pistes d'action pour développer le secteur du réemploi des éléments de construction en Région de Bruxelles-Capitale.
- Ghyoot M., Devlieger L., Billiet L., Warnier A., Rotor / 2018** Déconstruction et réemploi: Comment faire circuler les éléments de construction. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne.
- Günter A. / 2015** Der Brückenschlag. Verlag Stutz Druck, Wädenswil.
- Hegner-van Rooden C. / 2019** Faire avec ce qui existe. Steeldoc 02/19. Zurich, 19–23.
- Herzog A. / 2016** Im Denkmaldilemma. Hochparterre 11, 12–16.
- Holef J. / 2018** Le CDR Construction ouvre un centre dédié au réemploi des matériaux de construction [en ligne]. Be Circular be brussels. URL <https://www.circulareconomy.brussels/le-cdr-construction-ouvre-un-centre-dedie-au-reemploi-des-materiaux-de-construction/> (consulté le 04.07.20).
- Huuhka S., Kaasalainen T., Hakanen J.H., Lahdensivu J. / 2015** Reusing concrete panels from buildings for building: Potential in Finnish 1970s mass housing. Resources, Conservation and Recycling 101, 105–121.
- Huuhka S., Naber N., Asam C., Caldenby C. / 2019** Architectural Potential of Deconstruction and Reuse in Declining Mass Housing Estates. NA 31.
- Interreg FCRBE / 2020** Review of existing pre-demolition tools, policies, resources for identifying, quantifying and organizing the reclamation of reusable elements.
- Kibert C.J., Chini A.R. (Eds.) / 2000** Overview of Deconstruction in Selected Countries. Rapport CIB 252. CIB, Rotterdam.
- Küpfer C. / 2018** Éléments de réemploi, vers des stratégies activatrices de durabilité. Mémoire de Master. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne.
- Lignum Genève / 2015** Opéra des Nations. Plaquette du projet.
- Mettke A. / 2008** Neue Gebäude aus alten Platten.
- Meuli K. / 2019** Lutte contre la surexploitation des ressources- Sortir de l'ère du tout-jetable. l'environnement, 8–13.
- Mühlethaler, R. / 2019** Tscharnergut Bern 1958-1966 / 2013-2017.
- Nakajima S., Russell M. (Eds.) / 2014** Barriers for Deconstruction and Reuse/Recycling of Construction Materials- Rapport CIB 397. CIB, Rotterdam.
- Opalis / 2020** Isolants [en ligne]. Opalis. URL <https://opalis.eu/en/node/199> (consulté le 17.09.20).
- OREE / 2018** Comment mieux déconstruire & valoriser les déchets du BTP? Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, ADEME, EDF, SNCF Réseau, Paris.

Poignon B. / 2018 Kopfbau- Halle 118
- Architecture of Reuse- Conférence pendant le cours «Building Design in the Circular Economy». EPFL, Lausanne.

Rappaz P. / 2014 Théâtre ambulant et modulaire L'opéra de Genève a acheté à la Comédie-Française son Théâtre éphémère. Tracés 07.

Rieder R. / 2020 Pratiques et techniques de démontage par *Syphon AG*. Entretien par K pfer C.

rolf mühlethaler architekt, mrh Architekten Bern, gartenmann engineering ag / 2019 Tscharnergut Bern 1958-1966 / 2013-2017 [en ligne] URL https://ftnb.ch/assets/Uploads/Inhalte-Vertiefungssessionen/A4-Standards/3147150e70/1_Tscharni.-28.03.19-def_b_freigegeben.pdf (consulté le 04.07.20).

Rotor / 2017 Rotor ou la déconstruction de l'architecture. Interview par L. Muller [en ligne]. Chroniques d'architecture. URL <https://chroniques-architecture.com/rotor-ou-quand-la-deconstruction-se-fait-architecture/> (consulté le 30.06.20).

Rotor / 2015a Vade-mecum pour le réemploi hors site, Comment extraire les matériaux réutilisables de bâtiments publics ? Région de Bruxelles-Capitale.

Rotor / 2015b Vade-mecum pour le réemploi hors site, Comment extraire les matériaux réutilisables de bâtiments publics ? Rapport final – Partie 2 : Recommandations. Région de Bruxelles-Capitale, bruxelles environnement, Alliance Emploi-Environnement.

RREUSE / 2013 Differentiated VAT Rates and the Waste Hierarchy: An Opportunity to Improve Resource Efficiency and Socio-Economic Inclusion in Europe [en ligne]. URL <https://www.rreuse.org/differentiated-vat-rates-and-the-waste-hierarchy-an-opportunity-to-improve-resource-efficiency-and-socio-economic-inclusion-in-europe/> (consulté le 04.07.20).

RREUSE / 2017 Reduced taxation to support re-use and repair. Bruxelles.

Seattle Department of Construction & Inspections / 2020 Construction & Demolition Waste- Accomplishments - SDCI | seattle.gov [en ligne]. seattle.gov. URL <https://www.seattle.gov/sdci/vault/construction-and-demolition-waste> (consulté le 04.07.20).

Service de la promotion de l'économie et de l'innovation / 2020 Renseignez-vous sur le cadre fiscal et ses avantages [en ligne]. vaud-economie.ch. URL <https://www.vaud-economie.ch/services/nous-pouvons-vous-aider/reseignez-vous-sur-le-cadre-fiscal-et-ses-avantages> (consulté le 04.07.20).

Service Francophone des Métiers et des Qualifications / 2019 Valoriste généraliste [en ligne]. URL <http://www.sfmq.cfwb.be/index.php?id=2826> (consulté le 04.07.20).

Stockmans / 2016 Réemploi des matériaux de construction [en ligne]. Reuse.brussels. URL <http://reuse.brussels/> (consulté le 30.06.20).

Storey J.B., Pedersen M. / 2014 Overcoming the barriers to deconstruction and materials reuse in New Zealand. Barriers for deconstruction and reuse/recycling of construction materials, 130–145

Swiss Recycling / 2015 Questions fréquentes (FAQ) [en ligne]. Swiss Recycling. URL <http://www.swissrecycling.ch/fr/savoir/faq/> (consulté le 01.07.20).

The ReUse People / 2020 TRI Deconstruction Training and Certification Programs [en ligne]. URL <https://thereusepeople.org/ReUseInstitute/> (consulté le 11.12.20).

The ReUse People / 2013 Deconstruction Training [en ligne]. URL <http://www.deconstructiontraining.org/> (consulté le 04.07.20).

Wassink D. / 2016 Salvage Assessments in Seattle : Reflecting on a Policy Tool to Increase Building Material Recovery.

Wüest & Partner / 2015 Bauabfälle in der Schweiz- Hochbau Studie 2015. OFEV, Berne.

Zwahlen M. / 2020 Opportunités, démontage, revente et fonctionnement de *Syphon AG*. Entretien par Küpfer, C.



construction réversible

activités en Suisse / opportunités gaspillées et freins systémiques 77

défis et acteurs/actrices 78

principes génériques 79

principes pour la gestion du projet 82

études de cas:

gros œuvre 85

XV. pierre massive porteuse

XVI. briques porteuses

XVII. béton fibré boulonné

XVIII. béton préfabriqué assemblé par contact

XIX. béton préfabriqué boulonné

XX. béton préfabriqué avec assemblage cimenté

XXI. structure béton-métal

XXII. structure métallique

XXIII. structure bois-métal

XXIV. structure bois boulonnée

XXV. plancher en bois massif

enveloppes 114

XXVI. façade non-porteuse

XXVII. façade métallique

XXVIII. rénovation énergétique de façade

éléments techniques CVSE 122

XXIX. système de service d'éclairage

XXX. surélévation et isolation

XXXI. système de chauffage pour bureaux

partitions et revêtements intérieurs 128

XXXII. partitions internes

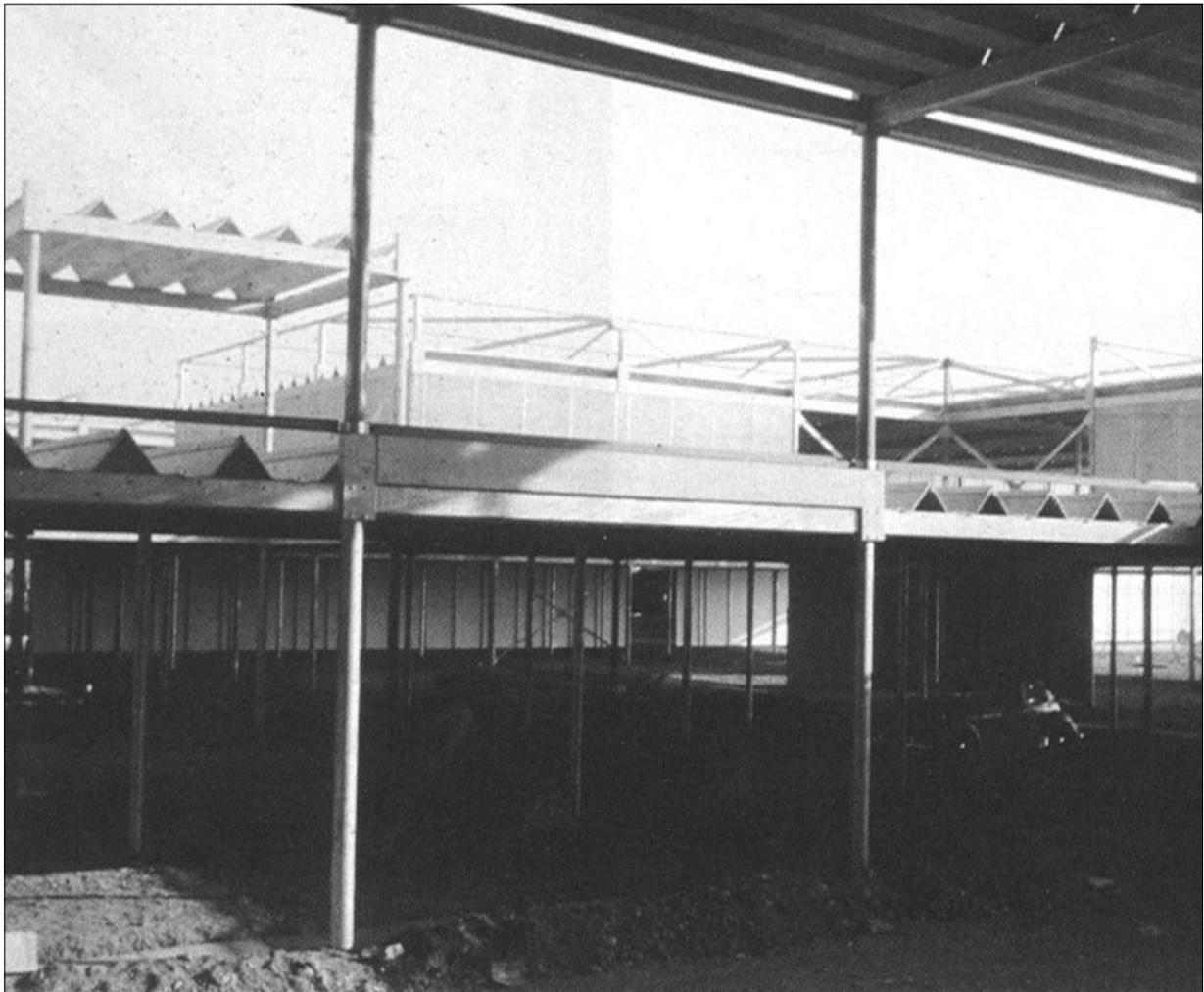
ameublement intérieur 134

stratégies de développement 136

références 142







a

La construction réversible vise à concevoir des bâtiments adaptables et démontables dans le but de prolonger la durée de vie du bâtiment et de ses composants en apportant une attention particulière aux aptitudes de réparation, transformation et démontage des composants et d'utilisation prolongée de l'espace. Ses principes concernent à la fois la **réversibilité technique**, c'est-à-dire la capacité des composants, sous-systèmes et systèmes à être démontés et remontés et la **réversibilité spatiale**, c'est-à-dire la capacité de l'espace à recevoir et être adapté à des changements d'utilisation (Durmisevic 2006).



figure 19 · le pavillon de Max Bill pour l'Expo 1964 à Lausanne suivait un objectif réversibilité spatiale et technique (a). A l'issue de l'exposition, la plupart des modules ont été rachetés par des entreprises de construction pour en faire des halles de production. Une de ces parties a été démontée et remontée à deux reprises: d'abord à Yverdon, pour l'entreprise *Arkina*, puis à Yvonand par l'entreprise de construction *Geiliger* (b) (Gilliard 1992).

Au regard de l'accélération des mutations urbaines et sociales et du rôle du secteur de la construction dans l'accumulation de déchets, l'épuisement de plusieurs ressources naturelles et la production de gaz à effets de serre, la construction réversible fait aujourd'hui partie des stratégies clés pour un environnement bâti durable. Cherchant à préparer au mieux le bâti à de possibles scénarios d'évolution malgré les difficultés de prédictions, cette approche s'inscrit dans une vision à long terme de la construction, proposant de livrer des bâtiments aptes à évoluer au-delà de la première livraison.

Une application étendue des principes de la construction réversible participerait, non sans défis, à l'atteinte des objectifs climatiques et de gestion des ressources de la Suisse (Nausser 2018, OFEV 2020).

Sur la base de Durmisevic (2006), les principes de la construction réversible s'appliquent à plusieurs niveaux dans un projet:

- › celui des **matériaux**, pour lesquels les principes de précaution visent à atténuer leur dégradation, leur impact environnemental et retarder le sous-cyclage des composants;
- › celui des **composants**, dont l'interchangeabilité permet d'en prolonger l'utilisation;
- › celui des **connexions** entre composants et entre sous-systèmes, qui jouent un rôle majeur dans la démontabilité de l'ensemble;
- › celui des **systèmes** de durée de vie différente et dont l'indépendance et la disposition doivent permettre des transformations localisées et proportionnelles;
- › celle du **bâtiment**, dont la durabilité dépendra de sa capacité à s'adapter à court, moyen et long terme à des changements d'usage et modes de vie.

Avant la révolution industrielle, le démontage soigneux de bâtiments et la valorisation presque sans exception des ressources disponibles localement étaient pratique usuelle. Cette économie circulaire de la ville-ressource était soutenue par l'usage de matériaux versatiles, d'un nombre réduit de matériaux, de connecteurs réversibles et d'un rapport des coûts élevé entre ressources et main d'œuvre. Par exemple, il était commun partout en Europe de récupérer les éléments en bois ou en pierre pour de nouvelles constructions. Dépassées par l'accélération de la production, l'apparition de nouveaux procédés de fabrication et matériaux (Barles 2014), ces pratiques de démontage et valorisation ont progressivement été effacées par la révolution industrielle, l'optimisation des matériaux pour des tâches spécifiques et la baisse des coûts de production et des matériaux soutenue par la révolution des transports et la mondialisation.

Aujourd'hui, l'application des principes de la construction réversible rencontre des défis importants. En Suisse, les difficultés principales sont:

- › une connaissance des bonnes pratiques limitée;
- › l'ancrage des habitudes constructives, qui font recours à une utilisation importante de matériaux composites et à des modes d'assemblages conçus pour un usage unique;
- › le modèle économique linéaire et le système de propriété actuel;
- › les difficultés de prédiction des futurs usages des bâtiments et composants.

Les protagonistes de la conception réversible sont multiples:

- › les équipes de conception et fabrication (designers, architectes, ingénieur-e-s, industriel-le-s, etc.);
- › les équipes de construction et déconstruction (entreprises de construction, de démolition, etc.);
- › les acteurs et actrices des filiales de reprise (fabricants, entreprises de revente, entreprises de recyclage, etc.);
- › les investisseurs (fonds de pension, particuliers, etc.);
- › les utilisateurs et utilisatrices réels et potentiels;
- › les détenteurs et détentrices du pouvoir législatif;
- › les centres de formations et de recherche.

Cette section présente une synthèse critique des principes qualitatifs de la conception réversible. Sous la forme d'une check-list, cette liste vise à soutenir de manière précise et accessible la prise de décision dès les phases initiales du projet. Elle est organisée par échelle, du matériau au bâtiment, et présente les principes généraux de réversibilité technique et spatiale. Cette liste de principes constructifs généraux fonctionne en binôme avec la liste des principes liés à la gestion du projet. Toutes deux ont été construites sur la base d'une revue de la littérature scientifique et d'ouvrages s'adressant aux praticiens.

sources: [Addis et Schouten 2004](#), [Boothroyd et Alting 1992](#), [Canadian Standards Association et Dwayne 2006](#), [canal architecture et Rubin 2017](#), [Crowther 1999a](#), [Debacker et al. 2017](#), [Durmisevic 2006, 2018](#), [Guldager et al. 2016](#), [Guy et Ciarimboli 2008](#), [Morgan et Stevenson 2005](#), [Nordby 2009](#), [Salama 2017](#), [Sassi 2002](#), [Thormark 2001](#), [Tingley et Davison 2011](#).

note: cette liste de principes constructifs généraux et celle de principes liés à la gestion du projet présentent les recommandations communes à toutes les couches. Les principes spécifiques à chaque couche du bâtiment sont présentés séparément à la suite.

sélectionner des matériaux durables

L'utilisation de matériaux durables joue un rôle clé dans le potentiel de réemploi et recyclage des composants, leur impact environnemental et leur durée de vie. Il s'agit de respecter entre autres les principes de *Cradle to Cradle*, ou «du berceau au berceau», défini par le chimiste allemand Michael Braungart et l'architecte américain William McDonough à la fin des années 1980 ([Braungart et McDonough 2011](#)). Ce concept vise à conserver la qualité des matières premières sur plusieurs cycles de vie, notamment en distinguant et maintenant séparer les matériaux organiques des matériaux techniques. Les principes à observer pour une construction réversible sont:

- › sélectionner des matériaux communs et de bonne qualité, résistants au temps, aisément nettoyables et avec une fréquence de maintenance adaptée, qui ne mélangent pas matière organique et technique;
- › limiter autant que possible les matériaux composites non-séparables (pour favoriser le recyclage) et non-versatiles (pour favoriser le réemploi), les finitions superflues et les matériaux ou liants dangereux;

- › préférer les matériaux versatiles et dont le comportement dans le temps est connu et vérifié par l'expérience sur le long terme;
- › en cas d'incertitude, se renseigner auprès des fournisseurs et acteurs/actrices de filières de reprise.

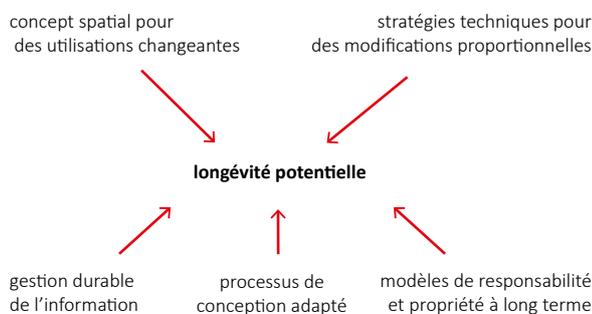


figure 20 · la réversibilité d'un bâtiment doit être à la fois spatiale et technique. Ce potentiel dépend également d'une gestion du projet adaptée et d'une vision à long terme du bâtiment et de ses composants.

veiller à la longévité et l'interchangeabilité des composants

Le choix des composants doit permettre d'optimiser la durée d'utilisation et le potentiel de réutilisation des composants. Les principes à observer sont:

- › sélectionner des composants modulaires, interchangeables, de forme simple et dimension standard, qui puissent être utilisés de manière répétée et dans différentes générations de bâtiment;
- › réduire autant que possible le nombre et le type, de composants;
- › préférer l'usage de composants préfabriqués;
- › choisir des composants dont les dimensions et le poids permettent une manutention aisée et sans danger;
- › prévoir une protection cohérente des composants, avec une attention particulière aux pièces d'usure, aux angles et bords;
- › garantir l'accessibilité visuelle et physique aux points d'usure et garantir l'obtention de composants de rechange;
- › favoriser le choix de composants qui remplissent plusieurs fonctions de durée de vie similaire.

garantir la réversibilité des connexions

La réversibilité de l'assemblage entre les composants d'une même ou différente couche est un critère décisif. Les principes à observer sont:

- › sélectionner des connexions réversibles et aptes à des usages répétés. De manière générale, il s'agit de préférer un assemblage mécanique, soit une connexion dite «sèche» (boulons, clips, chevilles, etc.) à un assemblage chimique, aussi appelée connexion «humide» (colles, résines, etc.);
- › si une connexion chimique est retenue, préférer les liants plus faibles que les composants assemblés et vérifier que les éventuels résidus de liants puissent facilement être nettoyés;
- › minimiser les points de connexion tout en optimisant la taille des composants pour la manutention et réutilisation;
- › limiter le nombre de connexions différentes;
- › sélectionner des connexions dites «simples», soit composées d'un nombre réduit de pièces, nécessitant des outils standards et un nombre limité d'étapes de montage et démontage simples;
- › rendre les points de séparation identifiables et visuellement et physiquement accessibles;
- › prévoir une tolérance adéquate et suffisante pour le démontage;
- › sélectionner un mode d'assemblage qui permette un montage/démontage en parallèle.

garantir l'autonomie des couches de durée de vie différente et sous-systèmes

L'indépendance des couches et sous-systèmes est un principe clé de la construction réversible. Ce principe, déjà illustré dans l'exemple du *Centre Pompidou*, soutient une durée de vie adéquate pour chaque composant et cherche à limiter l'impact de la transformation d'une couche sur une autre. Les principes à observer sont:

- › dessiner le projet selon un système de couches indépendantes et hiérarchisées, suivant l'estimation de la durée de vie technique et fonctionnelle des couches. Selon le concept du projet, des recouvrements, des suppressions et des glissements maîtrisés entre certaines couches ne sont pas à exclure;
- › concevoir une structure clairement séparée des éléments techniques, des partitions intérieures et, dans une construction multi-couche, du reste de l'enveloppe;
- › questionner la nécessité de chaque réseau technique et veiller à regrouper les points d'accès à ces réseaux de sorte à limiter les points de conflits avec les autres couches.

concevoir un bâtiment adaptable et transformable

La capacité d'adaptation et de transformation d'un bâtiment à un changement d'usage est un élément déterminant de la construction réversible. Les principes d'une telle réversibilité spatiale ont été décrits dès les années 1960 avec le mouvement de l'*Open Building System* (Habraken 1961, 2005, Kendall 2017, Kendall et Teicher 2000, Leupen 2006). Face aux constantes transformations socio-économiques, il s'agit de concevoir des bâtiments aptes à s'adapter à plusieurs scénarios d'utilisations à court, moyen et long terme. Les principes à observer sont:

- › concevoir des espaces versatiles qui s'adaptent, par de mineurs changements, à des usages différents au cours d'une même journée ou d'une même semaine;
- › dessiner un plan et une coupe capables d'accueillir, au long terme et à l'outil du projet, des nouvelles fonctions sans travaux majeurs sur l'ensemble des couches;
- › concevoir un système de structure et d'enveloppe modulaire et de dimensions régulières et standards, qui soutiennent différentes variantes de partitionnement, d'ameublement et d'usage. Une attention particulière doit être portée à la trame structurale: un porteur ponctuel permettra de disposer d'un plan libre qui pourra être divisé selon les besoins avec le second-œuvre;

- › offrir des conditions qui permettent un possible renforcement/extension de la structure dans le futur, pour une extension latérale ou verticale du bâtiment;
- › trouver un optimum entre le temps de démontage d'une surface (nombre de pièces et de connecteurs) et la complexité de la manutention.

planifier et documenter les opérations de déconstruction

Les étapes de démontage doivent être méthodiquement planifiées et intégrées lors de la phase de conception. La documentation nécessaire à l'entretien et au démontage partiel ou total doit être produite et stockée durablement. Pour la planification du démontage, il est important de veiller à:

- › sécuriser les opérations de démontage, notamment par le contrôle des substances dangereuses;
- › optimiser le temps des opérations de démontage sélectif, grâce à la minimisation du nombre d'opérations et le développement d'une séquence de montage/démontage qui permette un travail en parallèle et ne nécessite pas un démontage simultané de deux points;
- › dimensionner les composants de manière à permettre une réparation localisée et proportionnée;
- › utiliser un équipement et outillage standard, d'usage répandu et idéalement identique pour les phases de montage et démontage;

- › garantir la maniabilité des composants, notamment par la mise à disposition d'un moyen de manutention et une cohérence entre l'outillage de manutention à disposition et la dimension des composants;
- › optimiser le transport et le stockage des composants, grâce par exemple à des composants empilables et de dimensions non-exceptionnelles;
- › faciliter le travail de démontage, en garantissant par exemple un espace de travail et une accessibilité suffisante aux points de connexions.

mener une réflexion générale entre simplicité et qualité du projet

Le caractère d'un projet (forme, nombre et type des composants, des connexions et des matériaux, leur disposition, etc.) doit permettre de prolonger la durée de vie de tous les niveaux. L'efficacité des opérations de réparations et démontage, les économies d'échelles à plusieurs stades, l'interchangeabilité des pièces et le potentiel de réutilisation seront soutenus par un nombre limité de composants, matériaux et connexions différents. L'équipe de conception sera alors en charge de trouver un équilibre cohérent entre simplicité et qualité du projet.

Cette section présente une synthèse de principes liés à la démarche de planification et à la gestion de projet spécifique à la construction réversible. Elle revient notamment sur les précautions à prendre dans le jeu entre les acteurs/actrices, la passation de l'information et les aspects liés à la propriété.

adapter le processus de conception

Pour mener à bien un projet réversible, le processus de conception doit être adapté aux spécificités de cette approche dès les phases préliminaires du projet. En parallèle, l'objectif de réversibilité/transformabilité doit être inclus dans le cahier des charges dès le départ, après concertation avec les parties-prenantes. ont développé des recommandations pour intégrer les principes de conception réversible à tous les stades du processus. Les principes à observer et les outils à utiliser sont notamment:

- › établir des objectifs en termes d'adaptabilité, démontabilité et potentiel de réutilisation/recyclage dès le départ avec l'ensemble de l'équipe, le/la client-e, les spécialistes et les mandataires;
- › réaliser des audits, séances d'information et, si besoin, des formations sur la construction réversible pour les mandataires;
- › planifier et prévoir les délais supplémentaires nécessaires dès le début du projet pour vérifier la démontabilité, la transformabilité du projet et la préparation du plan de démontage;
- › utiliser des dessins tridimensionnels qui permettent une meilleure visualisation, communication et évaluation de la réversibilité;

- › selon les cas, discuter et établir un contrat avec les fournisseurs quant aux conditions de reprises des composants;
- › prévoir la mise en œuvre de prototypes pour vérifier et confirmer les méthodes de montage et démontage.

Plus de détails dans [Morgan et Stevenson \(2005\)](#).

garantir une gestion de l'information durable

Une information de qualité, accessible et qui perdure dans les générations de bâtiment est une caractéristique nécessaire pour garantir l'utilisation des capacités de transformation et de démontage d'un projet. Les principes à observer sont:

- › garantir la transmission et la conservation des informations dans le temps. La conservation traditionnelle d'un lot imprimé de dessins dans le bâtiment présente des risques, comme l'absence de mise à jour, mais permet d'éviter le stockage énergivore de données sur des serveurs et le risque d'obsolescence des fichiers numériques. Malgré les risques (stockage, obsolescence des formats, prérequis informatiques, gestion des autorisations), utiliser une base de données numérique et les nouveaux outils de conception assistée en 3D présente des avantages en termes d'accessibilité et possibilités de partage et mise à jour. Issu d'un projet de recherche financé par l'Union Européenne, [Madaster](#) est un exemple de plateforme proposant un service de stockage d'informations en ligne pour les bâtiments et leurs composants,

considérant ces derniers comme des dépôts temporaires. Depuis 2020, la plateforme est disponible pour le bâti suisse ([Madaster 2020](#)). En parallèle, des systèmes d'identification permanente des composants et matériaux existent et peuvent par exemple être réalisés avec des gravures complètes ou des *QR codes* appliqués directement sur les composants.

- › garantir l'accès à une information complète de qualité. Celle-ci doit contenir toutes les informations nécessaires à une transformation, un démontage et une réutilisation et perdurer à travers les générations de bâtiments. Il s'agit de garantir l'accès entre autres (1) à un lot usuel de dessins détaillés du projet, avec mise à jour de possibles altérations, (2) à l'inventaire détaillé des matériaux, composants et connexions utilisés, incluant les fournisseurs et une description du système de pose, (3) aux notices de démontage et remontage, incluant le plan de démontage partiel et total, (4) aux spécifications sur les capacités et le fonctionnement structurels, (5) aux informations de garanties et d'entretiens des composants et équipements, (6) aux méthodes permettant l'évaluation de l'état des composants, (7) aux possibles contrats liés à la propriété et à d'éventuelles reprises. Des informations plus détaillées sont disponibles aux pages 15 et 16 du guide édité par l'[Association Canadienne de Standardisation \(Canadian Standards Association et Dwayne 2006\)](#).

réfléchir aux modèles de propriété et responsabilité

Le système économique conventionnel ne soutient pas la mise en circulation de composants ou projets réparables, démontables, réutilisables ou recyclables. [Addis et Schouten \(2004\)](#) soutiennent qu'un système de propriété sur le long terme ou un engagement de reprise de la part des fournisseurs auraient un impact direct sur la conception et la construction et soutiendrait une démarche circulaire. Ils citent en exemple un cinéma installé pour une année à Greenwich (UK) dont la conception a été influencée par le type de contrat: le bâtiment reste la propriété des concepteurs/conceptrices et son démontage est de leur responsabilité. Ainsi, le bâtiment a été conçu de manière modulable et démontable avec des composants interchangeables et un système de ventilation simplifié. Un second exemple de modèle alternatif est celui appliqué pour le projet d'extension de l'*Hôtel de Ville de Brummen* (NL, voir [étude de cas XXIV](#)) où les fournisseurs se sont engagés à reprendre les composants après 20 ans d'utilisation. En parallèle, l'université de *TU Delft* conduit actuellement des recherches multidisciplinaires sur l'application d'un système de location et de maintenance pour des façades. Un projet pilote de leasing de façade a été inauguré en 2016 dans le cadre de la rénovation de l'un des bâtiments du campus. Il permet une exploration plus appliquée des enjeux techniques et financiers des parties prenantes ([Azcarate Aguerre et al. 2018](#)).

Allant dans cette direction, le principe de «responsabilité élargie du producteur» (RPE) selon lequel le producteur reste responsable de la gestion en fin de vie de ses produits est régulièrement discuté depuis les années 1980 ([ADEME 2017](#), [Earle et al. 2014](#)). Dans ces discussions, [Storey et Pedersen \(2014\)](#) sont de ceux qui mettent en garde quant à la complexité de son application aux éléments de la construction. Le binôme de recherche soutient qu'il s'agit d'une notion attrayante mais que son application au secteur de la construction se confronte aux conséquences d'une durée de vie plus longue que pour des biens de consommation courante et donc au risque réel de disparition du fournisseur avant la fin de l'utilisation du composant ou du bâtiment. Ils défendent toutefois que des possibilités d'applications ciblées existent, notamment pour les articles à courte durée d'utilisation. Quelques entreprises d'équipements ont développé des systèmes pionniers de location basés sur le service plutôt que la vente, mettant en œuvre les idées d'une économie «de service» conceptualisés notamment par [Stahel](#) depuis les années 1980 ([Stahel 1982](#)). Par exemple, le programme *pay-per-lux* développé par *Philips* en collaboration avec *Turntoo* propose à la clientèle de payer pour le service d'éclairage plutôt que d'acheter l'équipement. Celui-ci est alors repris par *Philips* à la fin de la collaboration ([Ellen MacArthur Foundation 2020](#)).

Pour l'équipe de conception, les recommandations principales à observer aujourd'hui sont:

- › sélectionner des composants qui disposent d'un fort potentiel de remise en circulation;
- › se renseigner sur les conditions de reprises et les possibilités de location auprès des fournisseurs de produits et services.



figure 21 · les qualités intrinsèques des structures métalliques sont favorables à leur longévité; ici à Lausanne, une structure est démontée pour réutilisation.

Cette revue d'une sélection de techniques réversibles pour le gros œuvre est organisée par matériaux de construction. D'abord, une courte sélection de techniques de maçonnerie accompagnée de recommandations spécifiques est documentée. Deuxièmement, le cas du béton, majoritaire dans la construction suisse et à ce jour difficilement démontable, est présenté par l'intermédiaire de solutions innovantes en cours de développement et progressivement appliquées en Europe. Le cas de systèmes de planchers est présenté à la suite. La construction métallique dont le potentiel réversible est déjà très élevé grâce par exemple au boulonnage des profilés et à l'usage de trames régulières et ponctuelles, est ensuite présenté. Finalement, le cas des structures en bois, qui disposent de bonnes prédispositions en termes de réversibilité, est discuté. Des innovations pour des planchers en bois massif sont également documentées.

principes

Les principes spécifiques au gros œuvre, qui complètent les recommandations générales de la construction réversible, sont:

- › concevoir un système porteur qui permette les changements d'utilisation et de division de l'espace intérieur. La réversibilité de l'espace dépend directement de la disposition du porteur, de son dimensionnement et de son type, ponctuel ou linéaire. Les porteurs linéaires ne sont pas à exclure mais nécessitent une réflexion stratégique pour garantir l'adaptabilité de l'espace;

- › évaluer les capacités d'extension verticale et/ou horizontale du système;
- › considérer la mise en place de fondations capables de supporter des charges plus importantes que les charges d'un premier cycle de vie du bâtiment, utiles en cas de changement d'usage du bâtiment ou de surélévation;
- › préserver les matériaux des sources de contaminations et protéger la structure des dégradations précoces;
- › faciliter les inspections visuelles par l'absence de revêtements fixes.

réversibilité des systèmes maçonnés

La maçonnerie en briques porteuses ou en blocs de pierre naturelle sont des techniques séculaires dont les éléments ont été pendant longtemps pour la plupart remis en circulation après usage. Courante, la réutilisation de ces pièces est illustrée par de nombreux exemples historiques. La stabilité dans le temps de la pierre naturelle, sa mise en œuvre par association, son potentiel de réemploi, avec ou sans retaille, et sa disponibilité locale asseyent à nouveau ce matériau naturel parmi les techniques de construction durable. Malgré les défis logistiques et culturels, son usage est rendu aujourd'hui viable grâce à une machinerie de taille et une production industrielle (Jacquier et Leroux 2019, Zerbi 2019).

La réversibilité spatiale d'un ouvrage en brique ou en pierre, qui nécessite un porteur linéaire, dépendra du soin avec lequel le plan a été dessiné pour accueillir divers usages. Pour la réversibilité technique, les briques et blocs de pierre assemblés par un mortier suffisamment souple peuvent être séparés. Aujourd'hui, les briques assemblées avec des mortiers dits «doux» (à la chaux, à l'argile, etc.) font l'objet de récupération et revente en Belgique, mais sont surtout réutilisées comme parement non-porteur (Billiet et Ghyoot 2014). Les pierres naturelles, pour lesquelles les ciments souples sont gage de protection contre les fissures, peuvent également être séparées les unes des autres puis réutilisées après une possible retaille. Toutefois, leur réutilisation est contrainte par l'unicité de chaque carrière, de ses pierres et des dimensions des blocs, qui ne suivent pas de standards. Inversement, les briques suivent des standards régionaux et sont particulièrement maniables, deux points importants pour leur remise en circulation, mais leurs petites dimensions nécessitent une grande quantité d'éléments et de joints et donc un temps de travail proportionnel. Pour le recyclage, les matériaux non-contaminés peuvent être concassés en grave ou en sable (Division déchets et matières premières 2006, GESDEC 2009).

réversibilité des systèmes en béton

Avec les méthodes de démontage actuelles, les structures en béton coulé sur place sont techniquement difficilement réversibles. De faible épaisseur et simple de réalisation, la dalle pleine en béton armé – système de plancher le plus fréquent dans les immeubles d'habitation et de bureaux en Suisse – est quasiment irréversible et permet peu de changement pour les gaines techniques la traversant. Apportant précision et rapidité aux chantiers, les éléments en béton préfabriqués concurrencent le béton coulé sur place. Les bâtiments construits de manière conventionnelle en éléments préfabriqués, ponctuels ou linéaires, sont souvent hybrides, soit composé d'un mixe de béton coulé sur place et d'éléments préfabriqués. Bien que des expériences de sciage des joints aient montré une possible séparation des éléments sous certaines conditions (Huuha et al. 2019, Salama 2017), les connexions coulées sur place, ne sont pas aisément réversibles. Aucun exemple de construction réversible en béton n'a été recensé à ce jour en Suisse.

Cependant, de nouveaux systèmes constructifs proposent des modèles innovants d'éléments en béton préfabriqué avec des connexions réversibles (voir par exemple l'étude de cas XIX et l'étude de cas XX). Ces nouveaux systèmes en béton préfabriqué pour construction démontable cherchent précisément à faciliter le démontage et augmenter le potentiel de réemploi en développant des connexions réversibles (figure 22). Les innovations actuelles proposent entre autres des systèmes qui

boulonnent les éléments préfabriqués grâce à des plaques et barres en métal encastrées dans le béton. Le boulonnage est réalisé dans des réservations qui sont ensuite scellées au ciment. Celui-ci sera ôté par hydrodémolition au moment du démontage (figure 23)

(Paananen et Suur-Askola 2018). La réversibilité de l'élément préfabriqué implique souvent une trame régulière et une attention particulière doit être portée à son dimensionnement de sorte à ce qu'il soit apte à recevoir des changements d'usage.

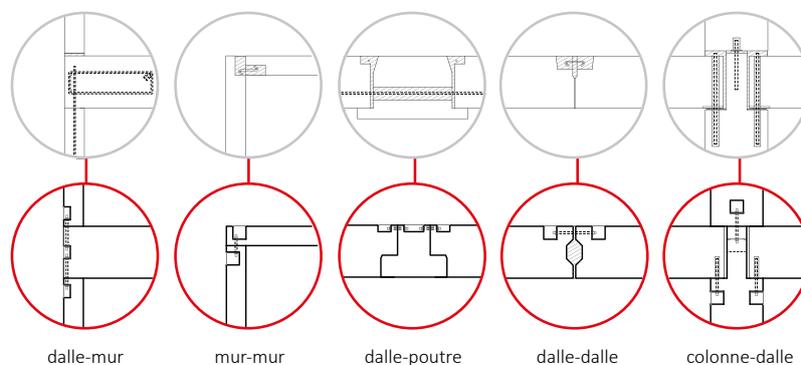


figure 22 · comparaison entre des connexions conventionnelles (gris) et des connexions réversibles (rouge) pour assembler des éléments préfabriqués en béton.

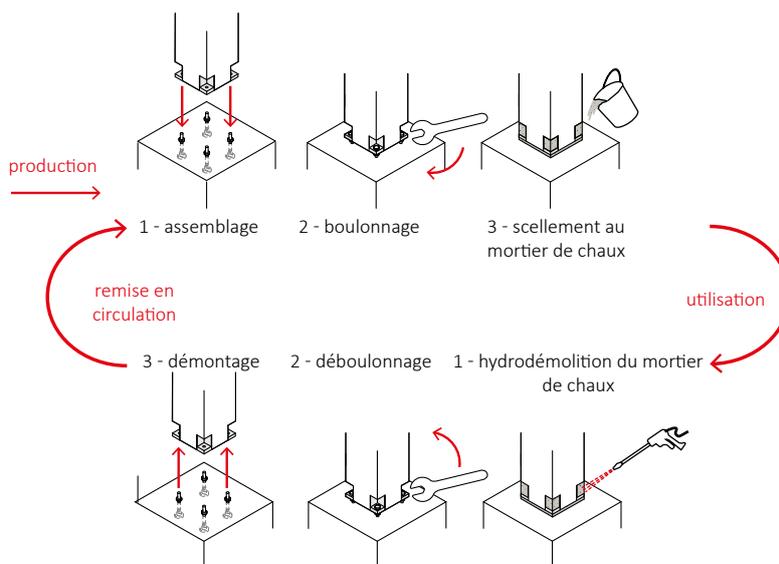


figure 23 · protocole de montage et démontage d'une colonne préfabriquée Peikko.

En parallèle, le béton armé de textile ou de fibres permet des sections plus fines (de 1 à 2 cm d'épaisseur) et des assemblages mécaniques réversibles entre composants. L'architecte brésilien João Filgueiras Lima, dit Lelé (1932-2014), avait saisi les propriétés des mailles d'armatures dans le béton et développé dans les années 1970 des modèles de connexions et bâtiments démontables et transportables en *argamassa armada* (Vilela 2018a), appelé de manière équivalente ferrociment en dehors du Brésil. L'étude de cas XVII revient sur le travail de Lelé pour des écoles nomades démontables et sur les recherches en cours pour adapter les techniques développées pour ce mode constructif aux normes en vigueur actuellement.

réversibilité des systèmes de planchers

Les planchers mixtes acier-béton avec tôles d'acier sont d'usage répandu dans les bâtiments industriels en Suisse. Généralement, ils sont composés d'une tôle profilée en acier sur laquelle est coulée sur place une couche de béton. L'ensemble est fixé à des poutrelles par des goujons connecteurs. Une autre variante de ce type de plancher propose d'abaisser le plancher dans le plan des poutrelles, permettant ainsi une plus grande efficacité statique. Son usage est répandu dans les parkings et les bâtiments commerciaux à étages (Frisch 2014). Ces deux systèmes de planchers mixtes ne sont pas démontables car les goujons connecteurs qui lient la tôle au béton sont soudés à la poutre en acier et noyés dans le béton (figure 24). «Il est donc très difficile de séparer à nouveau

la poutre de la dalle pour réutiliser les deux éléments. Pour pouvoir démonter et réutiliser les systèmes [mixte] à l'avenir, il faudrait trouver une nouvelle façon de concevoir ces systèmes, tout en conservant les avantages de la construction [mixte].» (Braendstrup 2017)

L'Institut Carnot MECD (Matériaux et Équipements pour la Construction Durable) s'est penché sur la question dans le cadre de son projet DEMODULOR sur les systèmes constructifs de gros-œuvre démontables et valorisables (Réseau CTI 2015). A cette occasion, l'institut a développé un système de plancher mixte acier-béton préfabriqué avec connecteur innovant démontable (figure 25). Des armatures sont encastrées dans les dalles préfabriquées en béton. Les poutres en acier sont ensuite boulonnées aux dalles par-dessous via ces armatures (Institut MECD n.d., FCBA et Kouyoumji 2015).

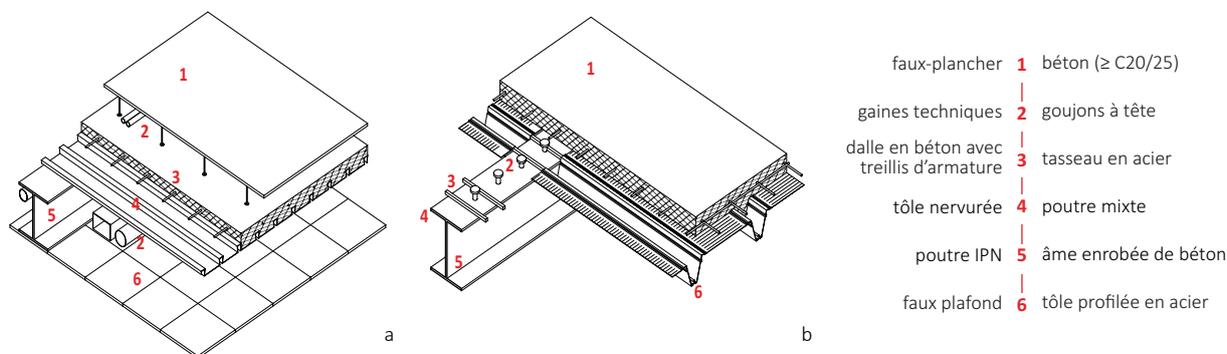


figure 24 · les systèmes conventionnels de dalles mixtes sont peu réversibles.

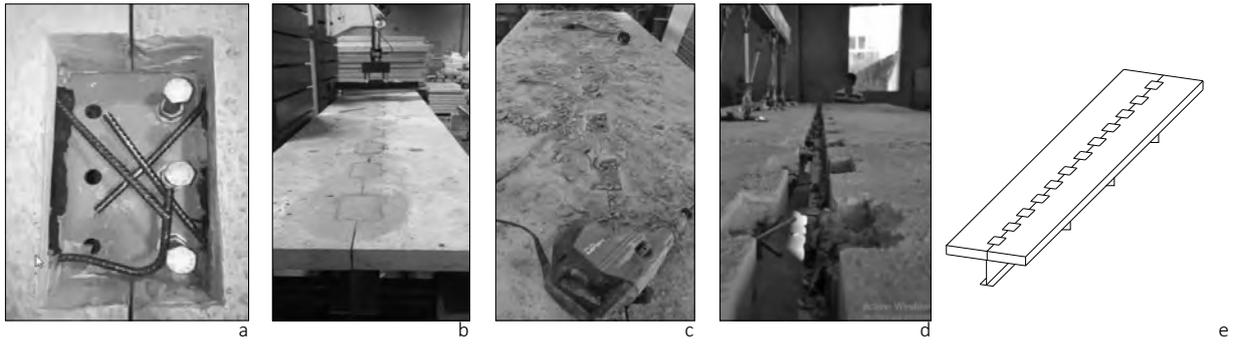


figure 25 · montage et démontage d'un plancher mixte développé dans le cadre du projet DEMODULOR

- 1 rainurage des dalles alvéolées
- 2 installation des ancrages
- 3 bétonnage des rainures
- 4 fixation par boulonnage des dalles à la poutre SFB

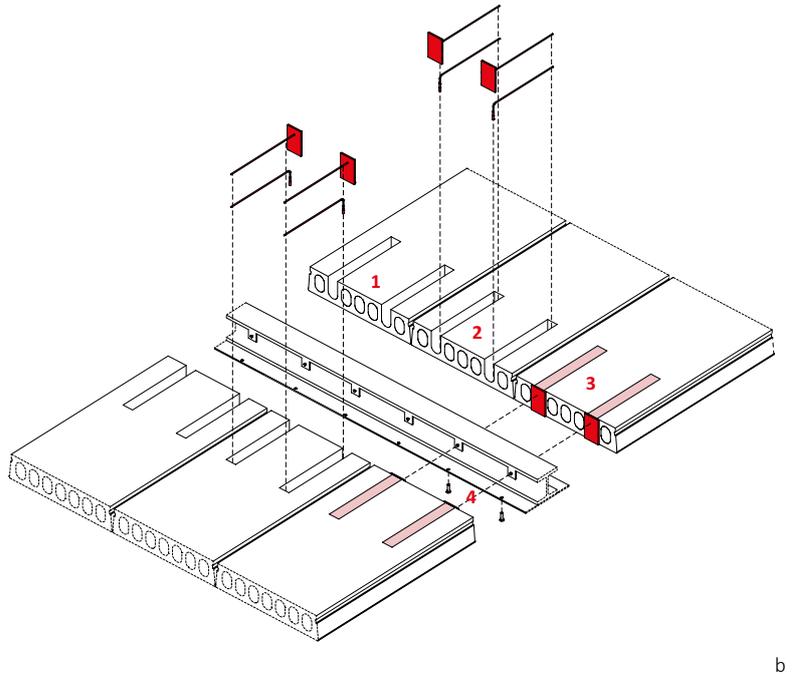
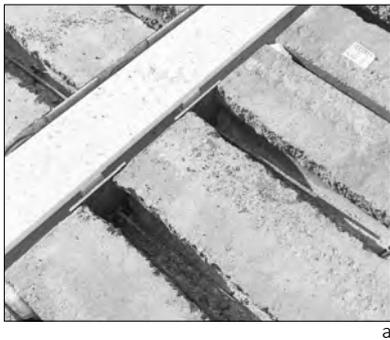


figure 26 · le système de dalles creuses sur poutrelles avec connexions réversibles.

Dans cette quête de planchers en béton réversibles, un système démontable a été développé pour le Palais de Justice Temporaire d'Amsterdam (voir [étude de cas XX](#)). Ce système se compose de dalles alvéolées en béton préfabriqué boulonnées à la membrure inférieure de poutres métalliques. Ces dalles sont de largeur courante (p. ex. de 1,2 m) et ne contiennent pas les gaines techniques, pour lesquelles des traversées verticales doivent être prévues. De récentes innovations ont rendu les connexions entre la dalle et les poutres réversibles. Ces connexions sont réalisées via des réservations dans les dalles à l'intérieur desquelles sont déposées des tiges montées de plaques servant d'ancrage. Une fois les ancrages déposés, les fentes sont bétonnées et les ancrages boulonnés à la poutre métallique ([figure 26](#)). La fixation peut être démontée par hydro-démolition des fentes et déboulonnage des ancrages. En combinaison avec des dimensions standards, la réversibilité des connexions soutient le réemploi de ces dalles.

Dans tous les choix de plancher, pour garantir une flexibilité spatiale, il reste nécessaire de conduire une réflexion sur la capacité du système porteur à accueillir d'autres usages. Cette prise de décision devra discuter des impacts d'un surdimensionnement et des possibles compromis entre flexibilité à long terme et optimisation pour chaque projet. A titre d'exemple, le plancher du *Palais de Justice Temporaire d'Amsterdam* (voir [étude de cas XX](#)) a été surdimensionné pour accueillir d'autres fonctions. Cette décision a pu compter sur le haut degré de certitude quant au démontage du bâtiment à moyen terme et sa réutilisation pour d'autres usages.

Au *smart living lab*, une équipe de recherche a développé, breveté et prototypé un système porteur ultra-adaptable pour immeubles. Avec la modularité de ses composants - grilles de poutres et colonnes -, le système peut être désassemblé et réassemblé dans de nou-

velles configurations spatiales pour de nouveaux cycles de vie, c'est-à-dire permettant de nouvelles portées entre colonnes et de nouveaux cas de charges ([Aeternum 2020](#), [Build-Unbuild-Repeat 2020](#)).

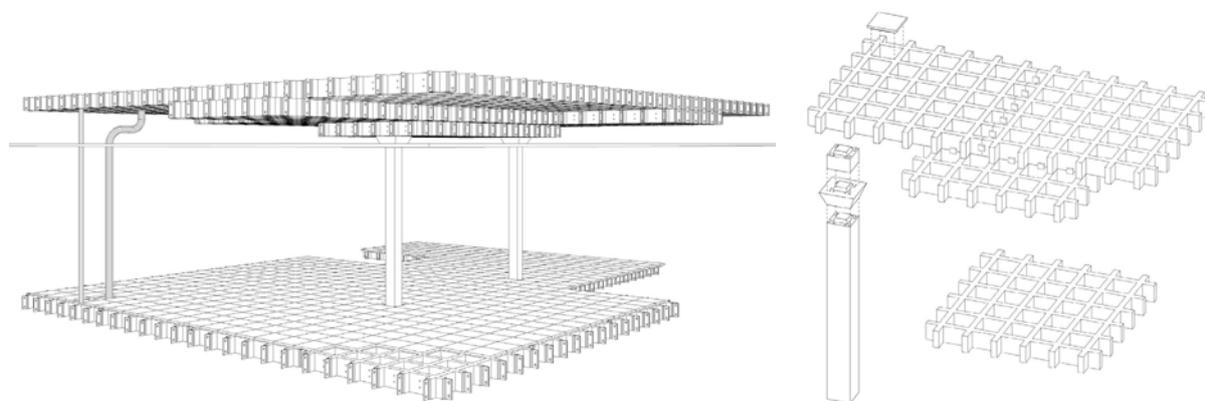


figure 27 · système de plancher réutilisable à portée variable, EPFL.

réversibilité des systèmes métalliques

La standardisation de ses composants, leurs possibilités d'assemblages mécaniques et leurs caractéristiques intrinsèques pouvant se mettre au service d'un plan libre sont parmi les spécificités des structures en métal qui en font de bons candidats pour l'application des principes de la construction réversible. De nombreux exemples de démontage et remontage de structures métalliques existent. L'exemple le plus emblématique reste celui du *Crystal Palace* de Londres: en 1854, trois ans après son inauguration, le hall d'exposition de 92'000 m² construit à Hyde Park fut démonté et remonté sous une forme agrandie (Kihlstedt 1984).

Le démontage sélectif pour réutiliser des profilés métalliques est soutenu par: l'usage de boulons plutôt que de soudures (pour autant que l'élément ne soit pas raccourci au moment du réemploi, ce qui est difficile à prévoir) et l'usage, autant que possible pour le projet, d'éléments de longueurs similaires, d'un nombre limité de composants différents et de connexions standards.

La prolongation de la durée de vie de la structure est soutenue l'accessibilité des éléments pour les inspections et un environnement sec qui protège les éléments de la corrosion (Addis et Schouten 2004).

réversibilité des systèmes en bois

Les structures en bois, de par leurs caractéristiques intrinsèques, sont pour beaucoup capables d'intégrer sans difficulté majeure une grande partie des principes de la construction durables. De nombreux exemples de structures soigneusement démontables existent. Dans le passé, le réemploi d'éléments porteurs en bois était une pratique courante, motivée par la rareté des ressources et soutenue par l'utilisation de bois massif assemblé par exemple avec de grandes chevilles à bois (Crowther 1999b).

Aujourd'hui, l'application des principes de la construction réversible permettent de conserver cette réversibilité avec plusieurs techniques. Pour commencer, une **structure poteau-poutre** avec des assemblages bois-bois ou des pièces métalliques est une approche traditionnelle qui présente un important potentiel de démontabilité. De par sa ponctualité, elle est apte à soutenir la flexibilité du plan. Traditionnel également, le **plancher en bois sur lambourdes et solives**, peut intégrer les principes de réversibilité. Des connexions réversibles peuvent être choisies selon les appuis: il peut s'agir de pièces de liaison métalliques (sabots, ferrures, etc.) ou des assemblages bois-bois. Si les solives sont des poutres en I, celles-ci peuvent être ajourées et faciliter le passage des gaines au plafond et donc la flexibilité du système. Avec des connexions réversibles et un revêtement démontable, ce type de plancher peut être démonté et déplacé.

Les panneaux de planchers et caissettes

sont des systèmes de planchers préfabriqués puis montés à sec sur le chantier (figure 28). Ils assurent à la fois la reprise des charges et la mise à disposition d'une surface horizontale. L'épaisseur des caissettes permet d'intégrer de l'isolation et le passage des techniques. Les panneaux et les caissettes de plancher sont des systèmes modulaires. Ils peuvent être fabriqués par exemple à partir d'éléments à section rectangulaire, en I ou à âme ouverte. Ces éléments sont préfabriqués et donc faciles à installer. Ils apportent instantanément la stabilité et la planéité d'une plate-forme de travail (Structural Timber Association 2020). Avec des connexions réversibles, les panneaux ou caissettes peuvent être démontés et permettre le déplacement d'espace de circulation ou de double hauteur. La réversibilité des gaines techniques varie d'un système à l'autre. En plus du montage à sec, la modularité et l'application de dimensions standards aux panneaux augmentent leur potentiel de réemploi. Il est également possible d'imaginer une valorisation en pièces détachées.

Le choix du produit et du traitement est déterminant pour assurer la recyclabilité de la structure si celle-ci ne peut être ni conservée ni réutilisée. Son recyclage en sous-produit n'est possible uniquement si les traitements qui lui ont été appliqués (vernis, peinture, colles, etc.) le permettent (Guy et Ciarimboli 2008). En parallèle, l'usage de produits en bois composites à base de colle réduit les possibilités de recyclage. En effet, alors que les produits en bois transformé («*engineered wood products*») ont des propriétés mécaniques plus homo-

gènes, permettent la production de sections plus grandes et plus complexes et sont généralement meilleur marché, ils contiennent des colles qui réduisent les possibilités de recyclage. Pour augmenter la recyclabilité de la structure, il est préférable de sélectionner du bois mas-

sif, idéalement issu d'un circuit court. Si le projet nécessite toutefois une résistance plus grande, des recherches sur le bois lamellé compressé fixé avec des goujons ont permis de développer des structures performantes sans colles (Sotayo et al. 2020).



figure 28 · bâtiment 'Brock Commons Tallwood House', Vancouver, Canada, par Acton Ostry Architects, Fast+Epp (ingénierie), et Hermann Kaufmann Architekten (consultant-e-s construction en bois)

étude de cas XV pierre massive porteuse

A Plan-les-Ouates (GE), le projet retenu pour la construction de 68 logements sociaux est conçu en pierre massive apparente et porteuse. Dessiné par le consortium *Perraudin Archiplein* et en cours de réalisation, le projet dont le mode constructif ne peut compter sur de nombreuses références récentes vise à «démontrer la faisabilité économique d'une opération de logements sociaux en pierre massive structurelle de cette ampleur» (Jacquier et Leroux 2019) et cela malgré les défis logistiques et techniques additionnels liés à la pierre porteuse. Les capacités intrinsèques et les enjeux de la construction en pierre massive pour la conception réversible sont décrits plus haut.

A Plan-les-Ouates, la structure verticale est entièrement réalisée en pierre massive calcaire provenant de deux carrières françaises. Les blocs sont assemblés avec un mortier de chaux et de ciment. La chaux permet de garantir la souplesse nécessaire dans les joints à long terme alors que le ciment est nécessaire pour garantir la rapidité de prise et éviter les tassements des joints lors d'une cadence de pose élevée. Ce mortier de pose est plus souple que la

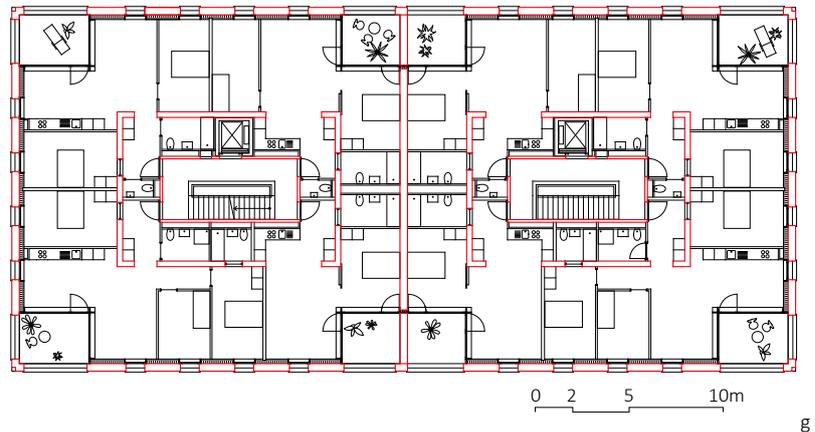
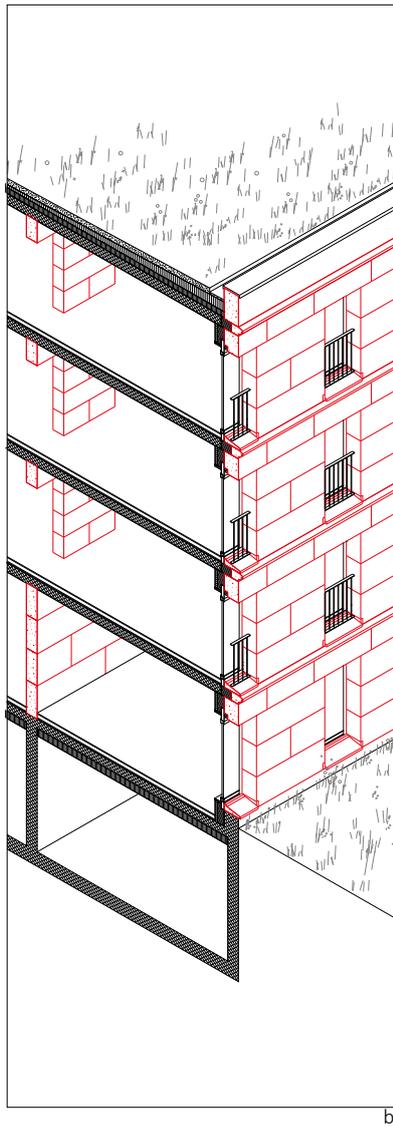
pierre ce qui permettrait de séparer les blocs dans le futur. Le remplacement sur le chantier d'une corniche brisée l'a illustré. Les planchers sont des dalles en béton fixées sur des consoles isolantes intercalées entre deux blocs de pierre et masquées par les corniches.

De par un plan en couronne la structure porteuse soutient une certaine réversibilité spatiale de chaque étage: «une couronne porteuse périphérique constituant la façade, une couronne porteuse intermédiaire qui reprend les efforts du plancher, et la couronne intérieure non-porteuse des communs» (Jacquier et Leroux 2019). Ce dispositif typologique permet de distribuer librement les pièces de vie sur la couronne périphérique et propose de rassembler les éléments techniques au centre en les raccordant aux gaines techniques disposées pour la plupart autour de la dernière couronne. Il est intéressant de noter que deux pièces par étage ont été rajoutées dans la couronne périphérique entre la phase de concours et celle de réalisation sans modifier le principe typologique.

- › concepteurs/trices: *Perraudin Archiplein Consortium*;
- › direction des travaux: *Architech sa*;
- › client: commune de Plan-les-Ouates;
- › lieu: Plan-les-Ouates (GE);
- › statut: en cours (2016-2021);
- › dimensions: 12'500 m²;
- › sources: *Jacquier et Leroux 2019, Jacquier 2020, Zerbi 2019, Archiplein 2020*;
- › figures: maquette des deux immeubles en pierre massive porteuse (a). La flexibilité spatiale est soutenue par le plan en couronne (g). Aux défis logistiques liés à l'extraction en carrière, au calepinage et à la mise en œuvre de blocs apparents (d-f) s'ajoutent les défis techniques, p.ex. des joints suffisamment souples pour transmettre les efforts sans fissure et une cage d'ascenseur détachée du système porteur. Les têtes de dalles en béton avec consoles isolantes sont posées sur le mur porteur en pierre massive (b).



a

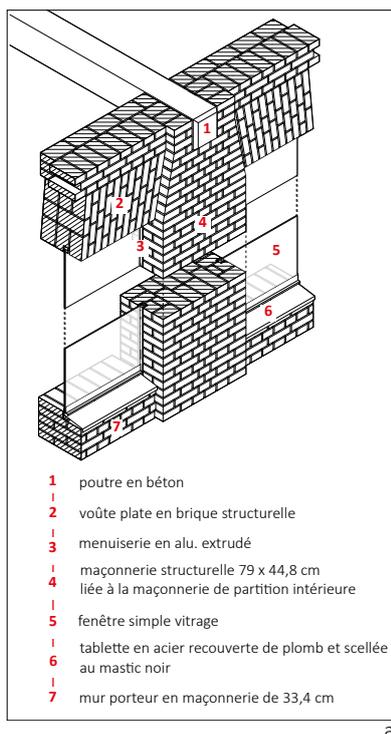


étude de cas XVI **briques porteuses**

Alors répandu jusque dans les années 1850, l'usage de mortier de chaux est aujourd'hui peu courant (Addis et Schouten 2004). Ce mortier, dont la résistance est environ deux fois plus faible que celle d'un mortier-ciment, donne une plus grande souplesse aux joints. Dans le cas de l'*Opéra de Glyndebourne*, le choix d'un mortier à la chaux a été pris précisément pour sa plus grande tolérance au mouvement et donc la possibilité d'exclure des joints de dilatation qui auraient effacé l'effet monolithique

des murs porteurs en brique (Thornton et Turzynski 1997). Ce choix a nécessité des recherches et tests supplémentaires et un travail plus important des ingénier-e-s. Au moment de sa construction, cela faisait longtemps qu'un projet d'une telle envergure avec des murs porteurs en briques assemblées au mortier de chaux n'avait pas été réalisé (Brzeski et al. 1994). Des briques fixées avec ce mortier doux sont plus facilement séparables et réutilisables.

- › concepteurs/trices: *Hopkins Architects*, UK;
- › client: *Glyndebourne Production Ltd*, UK;
- › lieu: Sussex, UK;
- › statut: livré en 1994;
- › dimensions: 12'000 m²;
- › sources: Brzeski et al. 1994, Thornton et Turzynski 1997, Addis et Schouten 2004, Whitby 1994, Davies 1994;
- › figures: photos et axonométrie de la construction porteuse en brique de l'*Opéra de Glyndebourne*.



étude de cas XVII béton fibré boulonné

Au début des années 1980, Lelé conçut des écoles rurales démontables en *argamassa armada* (voir "réversibilité des systèmes en béton"), sur la base de son expérience acquise lors de travaux d'assainissement avec cette technique et du travail sur la préfabrication d'éléments (colonnes, poutres, fondation, etc.). Le système d'écoles «transitoires» pour l'état brésilien de Goiás était un projet social conçu pour les enfants des familles travaillant dans les champs et forcées à se déplacer au rythme des cycles de plantations. «Lié par l'instabilité de la politique agricole de l'État, Lelé a mis l'accent sur la mobilité comme solution principale pour les nouveaux bâtiments, car ils peuvent être démontés et remontés en fonction du déplacement des terres cultivées» (Vilela 2018a).

Le système constructif repose sur une série d'éléments assemblés de sorte à former des portiques avec des poutres en porte-à-faux disposés parallèlement. Des pièces indépendantes en acier galvanisé assurent la réversibilité de l'assemblage entre les pièces en *argamassa armada*. Aidé par le poids relativement léger des éléments, la répétitivité du plan et la simplicité de la séquence de montage, la préfabrication et le montage pouvait être terminé en 45 jours.

Inspirés des connaissances sur l'*argamassa armada* et le ferrociment et dans le but de transférer ce savoir aux avancées techniques les plus récentes en l'adaptant aux normes en vigueur, une équipe de chercheurs et chercheuses de l'EPFL a conçu un pavillon modulaire en béton renforcé par du textile (voir

"réversibilité des systèmes en béton"). Ce matériau permet d'atteindre des hauteurs statiques particulièrement faibles tout en respectant les normes. Démontable et remontable, le pavillon a été dessiné pour que les éléments puissent être transportés et montés par deux personnes. Ils n'excèdent donc pas 60 kg. Pour les coques du toit, la limite a été revue à 100 kg. Un dispositif de levage simple (type chariot élévateur) est encore suffisant (Valeri et al. 2020).

écoles préfabriquées démontables:

- › concepteurs/trices: João Filgueiras
| Lima;
- › lieu: Etat de Goiás, BR;
- › statut: première école en *argamassa armada* achevée en 1984;
- › sources: Vilela 2018a, 2018b;

pavillon TRC:

- › concepteurs/trices: iBETON et ALICE/
| EPFL
- › lieu: Fribourg (FR);
- › statut: première portion achevée en 2019;
- › sources: Valeri et al. 2019, 2020;
- › figures: photos de l'école construite à Abadiânia (a,c) et vues axonométriques des éléments préfabriqués du système (d,e). La «poutre-gouttière», assemblée par boulonnage entre les pièces encastrées sur la tranche de la poutre et fixée à la poutre par un tube qui maintient aussi les rails pour câbles électriques (f,g). Pour le pavillon TRC, la structure est montée manuellement; un chariot élévateur vient en aide pour le levage de la coque (b). Détails constructifs du pavillon (h).



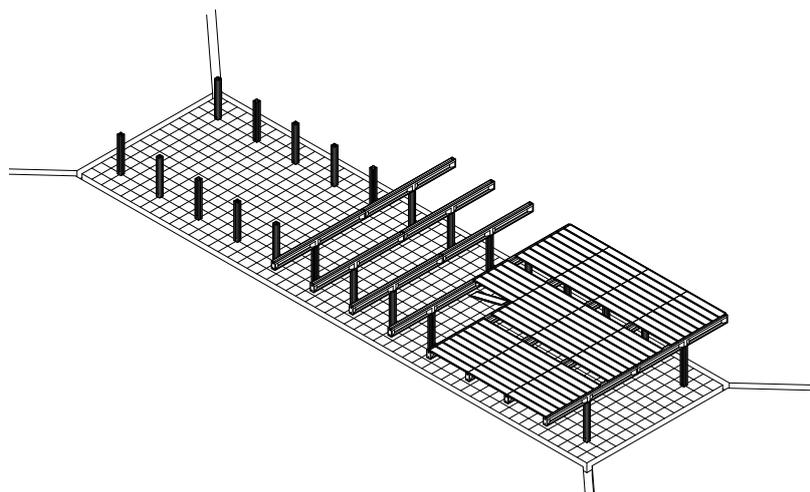
a



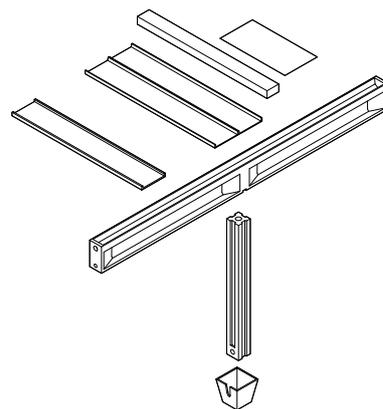
b



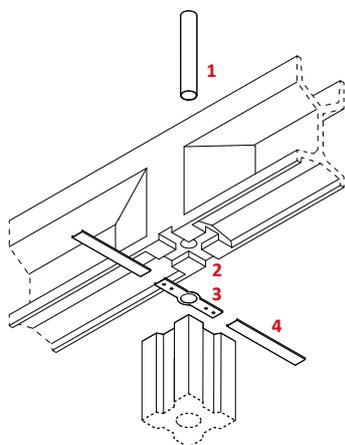
c



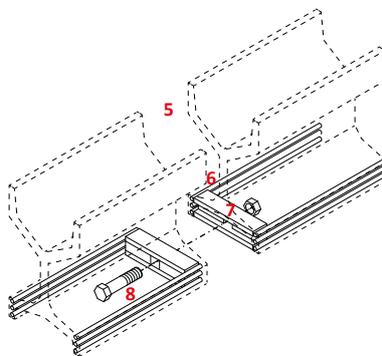
d



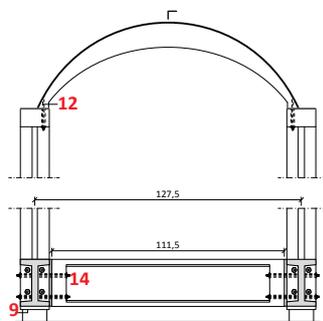
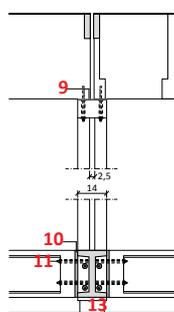
e



f



g



h

- 1 tube en fer galvanisé \varnothing 5 cm
- 2 réservations dans la poutre permettant le passage des fils électriques autour du tube
- 3 pièce métallique pour la fixation des rails pour câbles électriques
- 4 rails pour câbles électriques
- 5 mortier de ciment et de sable entre les poutres
- 6 armatures soudées sur l'assemblage métallique
- 7 barres d'acier galvanisé coulées dans la masse
- 8 vis galvanisées \varnothing 2,5 cm
- 9 feuille de néoprène
- 10 joints de mortier ultra-haute performance
- 11 tige filetée M10 en polymère renforcé de fibres
- 12 tige filetée M10 en polymère renforcé de fibres et mastiquées
- 13 support en mortier ultra-haute performance
- 14 boulons serrés à la main

0 10 25 50 cm

étude de cas XVIII **béton préfabriqué assemblé par contact**

Accueillant dès son inauguration en 1969 des activités d'une grande hétérogénéité, le *Centre de Recherches Agricoles* de St. Aubin (FR) est un parc scientifique dont la plupart des bâtiments sont construits selon un même système constructif démontable en béton armé. Les bâtiments comportent un seul étage et résultent d'un montage à sec de pièces préfabriquées. Les espaces sont éclairés zénithalement le long de bandes que forment les interstices entre des coques en U. Ces coques préfabriquées reposent sur un système poteau-poutre par l'intermédiaire de pièces extrudées emboîtées sur les poutres transversales.

Alors que le devenir du campus est en cours de discussion, ce projet illustre plusieurs des principes de la construction réversible (Fivet 2019): grâce à la versatilité du système, plusieurs programmes ont pu se succéder sur presque 50 ans d'exploitation. Fonctionnant exclusivement en compression, les connexions entre les éléments en béton

sont réversibles et ne nécessitent que le remplacement de minces languettes en caoutchouc. La modularité du système constructif transparait dans la largeur constante des coques, la longueur des poutres qui un multiple de celle des coques et la possibilité d'assembler n'importe quelle poutre sur une paire de colonnes donnée et a permis de déplacer des modules au sein du campus. L'adaptabilité du système a été employée pour étendre les bâtiments dans les deux directions en fonction des nouveaux besoins.

Dans le contexte du rachat du campus et de sa transformation, des étudiant-e-s de l'EPFL (*Studio Fröhlich*) ont exploré le potentiel de réemploi de ces structures. Malgré cela, il ressort que le caractère brutaliste du système le rend difficilement compatible avec les exigences énergétiques en vigueur et que les capacités portantes du système ne permettent pas d'employer ces éléments dans des bâtiments multi-étagés.

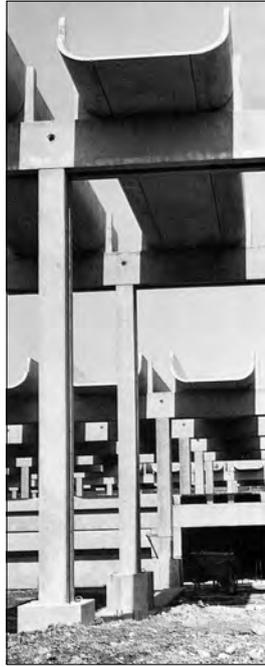
- › concepteurs/trices: Jakob Zweifel et Heinrich Strickler;
- › lieu: St. Aubin (FR);
- › statut: première utilisation en 1969, exploité jusqu'en 2016;
- › dimensions: 16'900 m² lors de la première phase puis 8'200 m² construits ultérieurement;
- › sources: Zweifel 1996, 1969b, Fivet 2019, Conseil d'Etat 2017;
- › figures: vue intérieure (b); construction de la structure démontable en éléments préfabriqués de béton armé (a,c); détails constructifs et coupe (d,e).



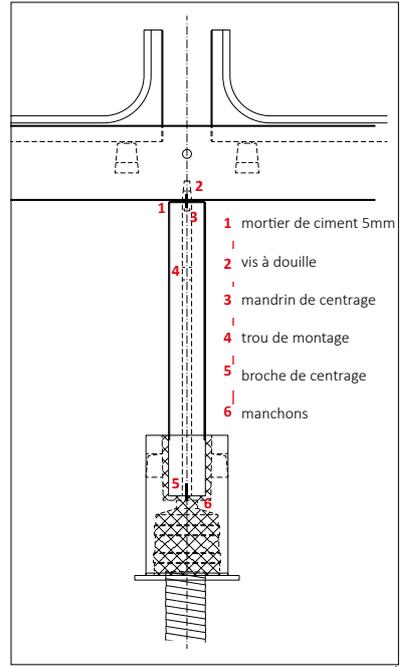
a



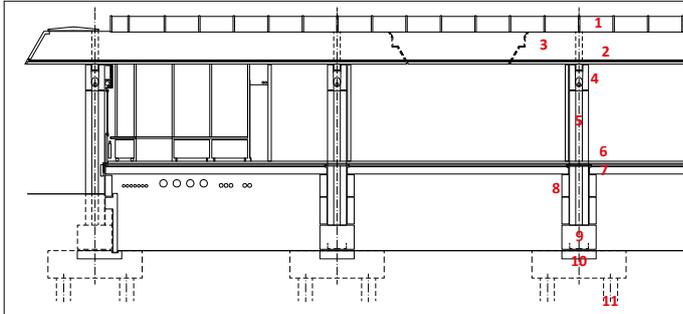
b



c



d



- 1 imposte
- 2 isolation de toiture
- 3 élément de toiture- poutre Gerber
- 4 poutres jumelées
- 5 support
- 6 plancher d'assise
- 7 plaque à nervure
- 8 tirant
- 9 manchon de fondation
- 10 contreventement
- 11 fondation sur pilotis

e

étude de cas XIX béton préfabriqué boulonné

Le *Circle House Demonstrator (CHD)* est un pavillon-test à l'échelle 1:1 pour le projet à grande échelle *Circle House*. Ce projet de 60 logements sociaux est en cours de construction et l'un des objectifs est de rendre réutilisables 90% des composants. Le pavillon-test a été construit pour vérifier la faisabilité d'une série de solutions techniques démontables et d'en évaluer la répliquabilité à grande échelle. La structure est conçue avec un choix limité d'éléments de béton préfabriqués désassemblables.

Le dessin met en place des solutions déjà existantes et développées par les partenaires de *Circle House*. Il s'agit d'éléments en béton préfabriqué de *Spæncom*, de joints mécaniques de *Peikko* et du mortier de chaux de *Kalk*. Les connexions sont réalisées par boulonnage grâce à des plaques métalliques encastrées dans les pièces en béton préfabriqué. La structure repose sur six types de composant et sera démontée pour être réutilisée dans la *Circle House*.

- › concepteurs/trices: collectif d'architectes provenant de *Vandkusten, Lendager Arkitekter, 3XN*, avec la collaboration de *GXN Innovation*;
- › client: *Realdania* et le pôle de développement et de démonstration de l'Agence danoise pour la protection de l'environnement (*MUDP*);
- › lieu: Valby (Copenhague), DK;
- › statut: livré en 2018
- › dimensions: 40 m²
- › sources: [Guldager Jensen et Sommer 2019](#), [GXN 2020](#), [GXN et Responsible Asset 2018](#);
- › figures: construction du prototype (a), détails constructifs réversibles (b,c) et illustration d'hydrodémolition (d), axonométrie du système démontable (e).



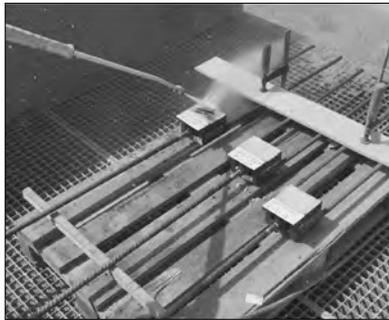
a



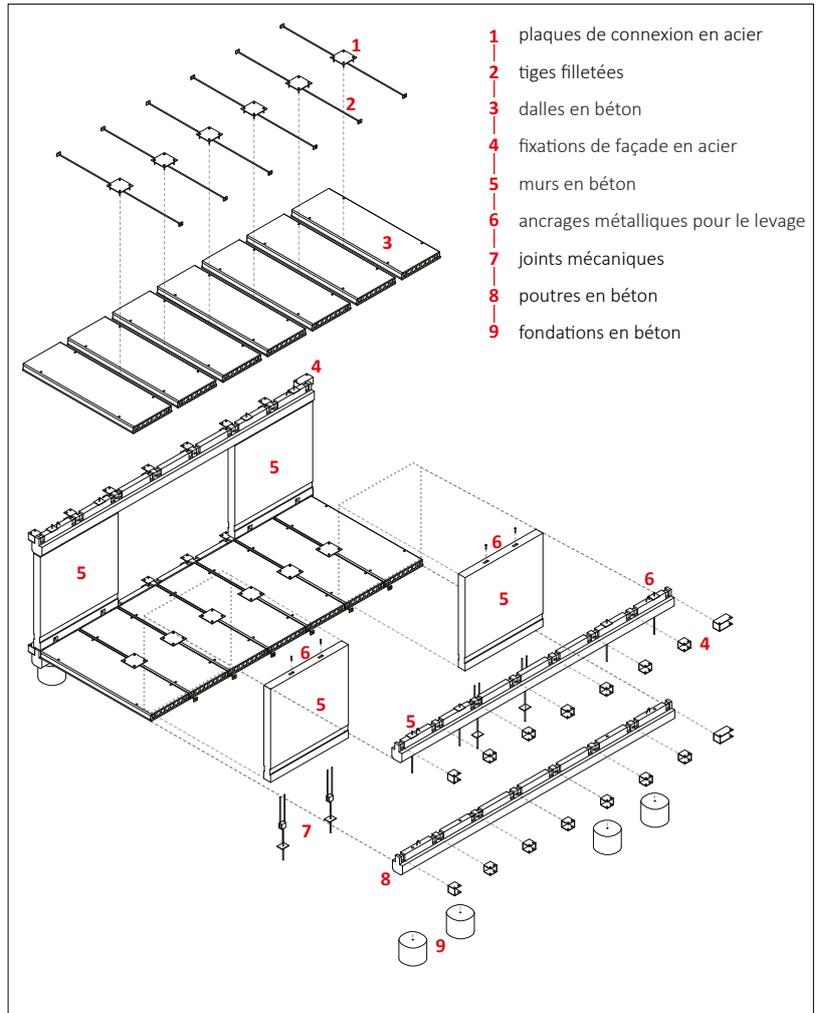
b



c



d



e

étude de cas XX béton préfabriqué avec assemblage cimenté

A Amsterdam, le bâtiment de coopérative d'habitation *CiWoCo* a été construit dans le but de développer un concept spatial qui offre de grande liberté dans l'usage de chaque plateau et d'inclure des solutions techniques permettant de réutiliser et/ou recycler la grande majorité des composants à la fin d'un cycle d'utilisation.

Pour le concept spatial, le programme stipulait que 20% de la surface devait pouvoir être dédiée au télétravail. A partir de ce point, les architectes ont développé un modèle alternatif à celui d'un système sur socle en intégrant ces espaces aux étages d'habitation. Ces espaces de travail disposent d'un accès indépendant depuis la coursive. Ainsi, ces espaces peuvent être utilisés à court terme de manière multifonctionnelle, comme bureau indépendants ou pièce supplémentaire du logement (GAAGA 2020a, GAAGA 2020b).

En parallèle, le processus de conception du projet a montré que l'aménagement final de l'espace avait pu profiter d'une grande indépendance envers le système porteur. Sous réserve d'un projet architectural, il est possible d'imaginer que les typologies profitent à nouveau de cette indépendance et soient modifiées en profondeur. Cette liberté sur les plateaux tient en quatre points principaux, illustré par la figure (e):

- › un nombre d'entrées supérieur au nombre initial de logements, ce qui donne la possibilité de construire un accès indépendant à une pièce le long de la coursive extérieure;

- › un porteur intérieur ponctuel, pour une grande liberté dans la disposition des divisions intérieures;
- › deux façades latérales non-porteuses qui permettent de choisir l'alternance entre portions vitrées ou opaque sans interférence avec le système statique;
- › un regroupement central des gaines techniques qui tend à potentiellement raccourcir et rendre ces circuits indépendants du système porteur.

Pour la réversibilité technique, une particularité du projet est sa structure démontable en éléments de béton préfabriqués. Les ingénieurs civils et fournisseurs d'éléments en béton ont proposé des connexions réversibles, comparables à celles utilisées dans le *Circle House Demonstrator*, dans lequel *Peikko* était également impliqué. Grâce à des réservations dans le béton, des connexions métalliques permettent d'assembler par boulonnage deux éléments avant de cimenter la connexion. Ce système a ici également été mis en œuvre pour des colonnes. Concernant le plancher, il s'agit d'un système à dalles creuses sur poutre, comparable à celui employé dans le *Palais de Justice d'Amsterdam Temporaire* (voir étude de cas XXI). La réversibilité du système repose sur l'hydrodémolition de réservations dans lesquelles ont été cimentées des connexions boulonnées. L'indépendance des parois intérieures et des installations de CVSE envers la structure

porteuse a été travaillée notamment avec un système de faux-plafonds et faux murs qui regroupe les gaines techniques. Une étude approfondie devrait permettre de discuter de la réversibilité du système de chauffage, du revêtement de sol et des divisions intérieures.

Une étude approfondie devrait permettre de discuter de la réversibilité du système de chauffage, du revêtement de sol et des divisions intérieures.

- › concepteurs/trices: GAAGA;
- › client: coopérative *BSH 20E*;
- › lieu: Amsterdam, NL;
- › statut: livré en 2019;
- › dimensions: 1'500 m²;
- › sources: GAAGA 2020a, GAAGA 2020b, VinkBouw 2020, Wind 2019;
- › figures: le bâtiment *CiWoCo* (a) repose sur une structure en béton démontable (b-d) et des principes de réversibilité spatiale (e).



a



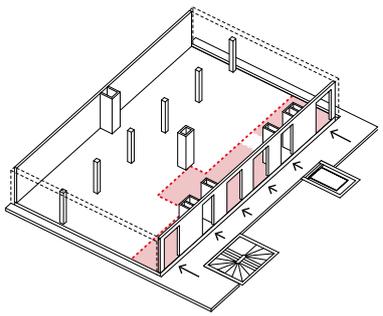
b



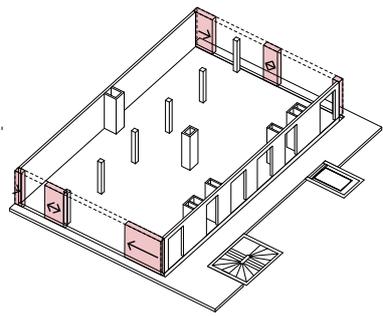
c



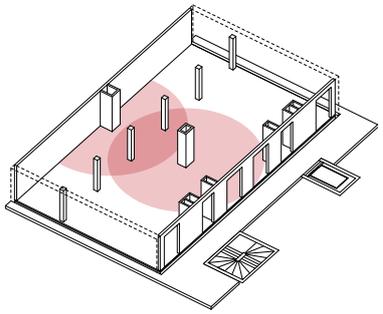
d



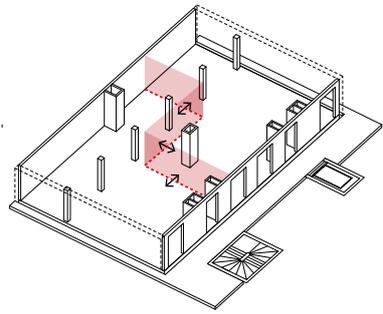
liberté dans le positionnement des entrées



liberté dans le positionnement des ouvertures dans les façades pignons



indépendance potentielle des réseaux techniques



liberté dans le positionnement des divisions intérieures

e

étude de cas XXI structure béton-métal

Le *Palais de Justice Temporaire d'Amsterdam*, inauguré en 2016, est un bâtiment de quatre étages conçu pour être utilisé pendant cinq ans avant d'être entièrement démonté et relocalisé. Il sert de bâtiment provisoire pendant les travaux de démolition de l'ancien tribunal et la construction du nouveau (Froidevaux 2019).

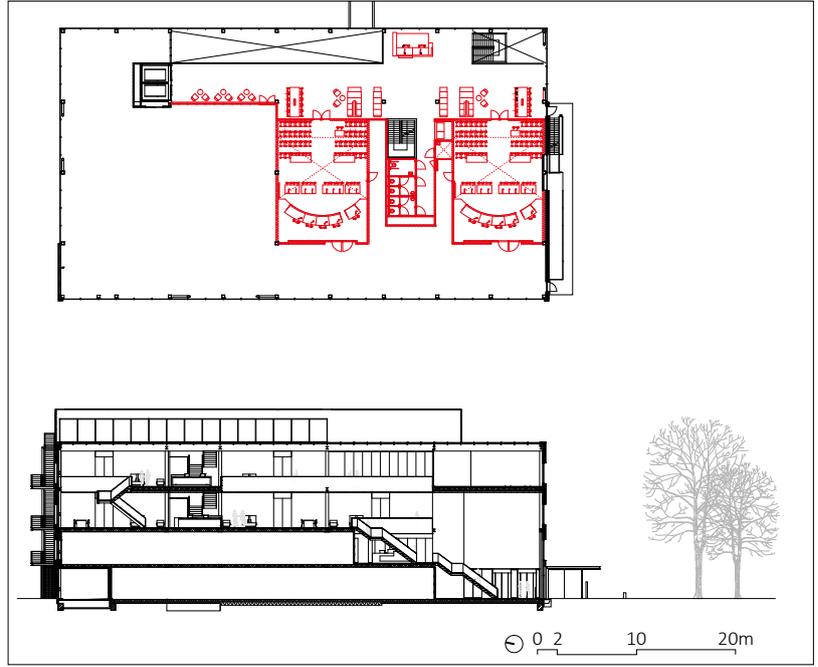
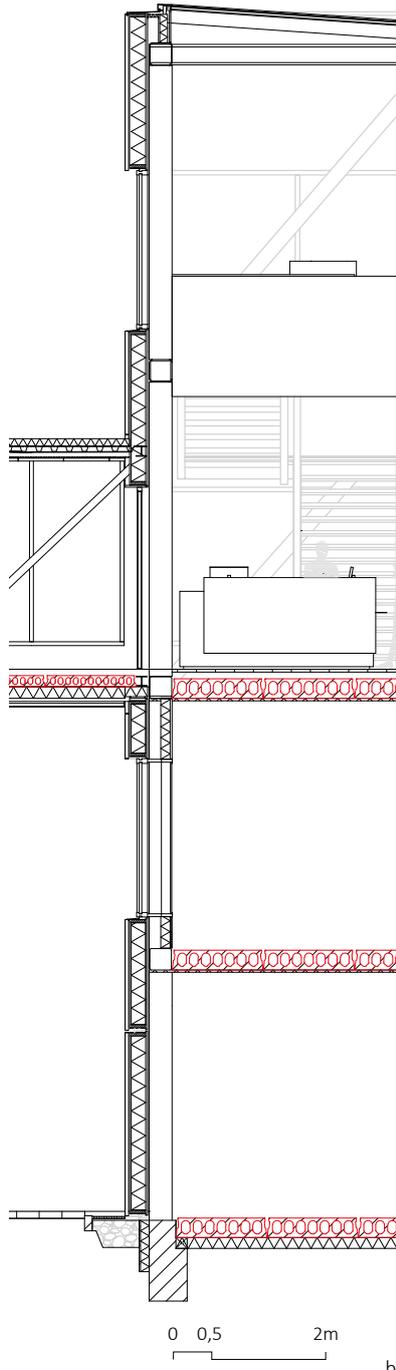
Le bâtiment repose sur ossature métallique poteau-poutre entièrement boulonnée et composée d'éléments allant d'étage à étage selon une trame régulière. Entre les poutres SFB (soit à aile inférieure élargie), des dalles creuses en béton sont fixées de manière démontable (voir "réversibilité des systèmes en béton"). La connexion spéciale entre l'élément en dalle creuse et les poutres métalliques, est réalisée grâce au rainurage de la dalle préfabriquée, puis à l'installation de deux ancrages *DEMU* maintenus par le bétonnage des fentes et le serrage des ancrages par boulons réglables (figure 26) (de Danschutter

et al. 2017). Le démontage se fait par hydrodémolition des fentes puis déboulonnage des pièces métalliques. Les planchers sont complétés par des faux-planchers avec un plancher en bois et un système de chauffage au sol installé à sec. L'enveloppe est complétée par des panneaux en bois remplis d'isolant et le revêtement extérieur consiste en une toile, fixée par des ressorts métalliques (cepezed 2020b).

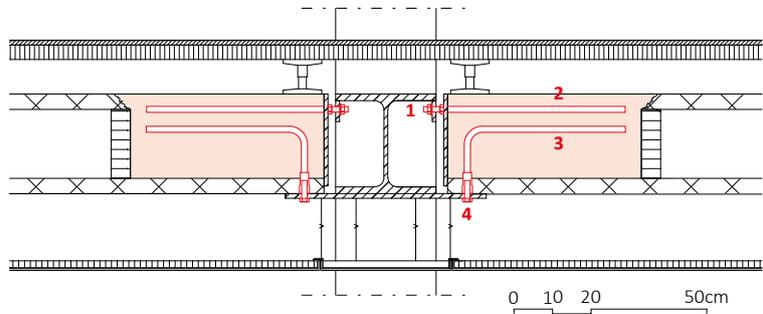
L'accessibilité et la transformabilité des gaines techniques, l'indépendance des couches et la ponctualité du porteur participent à l'adaptabilité du bâtiment. La durée de vie de la structure est également augmentée par un système apte à recevoir les charges nécessaires à d'autres usages: le marché public stipulait précisément que le bâtiment devait être apte à être réutilisé pour d'autres fonctions (Froidevaux 2019).

- › concepteurs/trices: *cepezed*, NL;
- › client: *Rijksvastgoedbedrijf*;
- › lieu: Amsterdam, NL;
- › statut: livré en 2016;
- › surface bâtie: 5'400 m²;
- › programme: bureaux;
- › sources: *cepezed 2020b*, *Froidevaux 2019*, de *Danschutter et al. 2017*, van *Deelen et al. 2017a, 2017b*;
- › figures: au *Palais de Justice d'Amsterdam* (a), le système d'ancrage et de boulonnage des dalles en béton est complété par un faux-plancher et un faux-plafond qui offrent un accès facilité aux gaines techniques (b,d). Les plateaux libres participent à la flexibilité de l'espace (c).





- 1 boulon réglable
- 2 ancrage horizontal
- 3 ancrage vertical
- 4 boulon



étude de cas XXII structure métallique

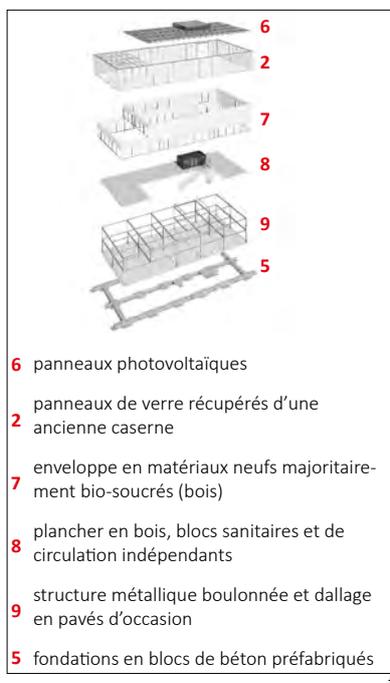
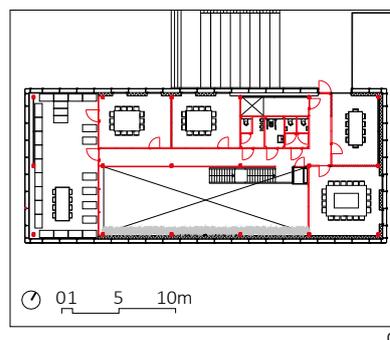
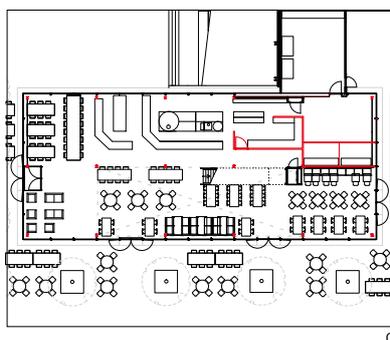
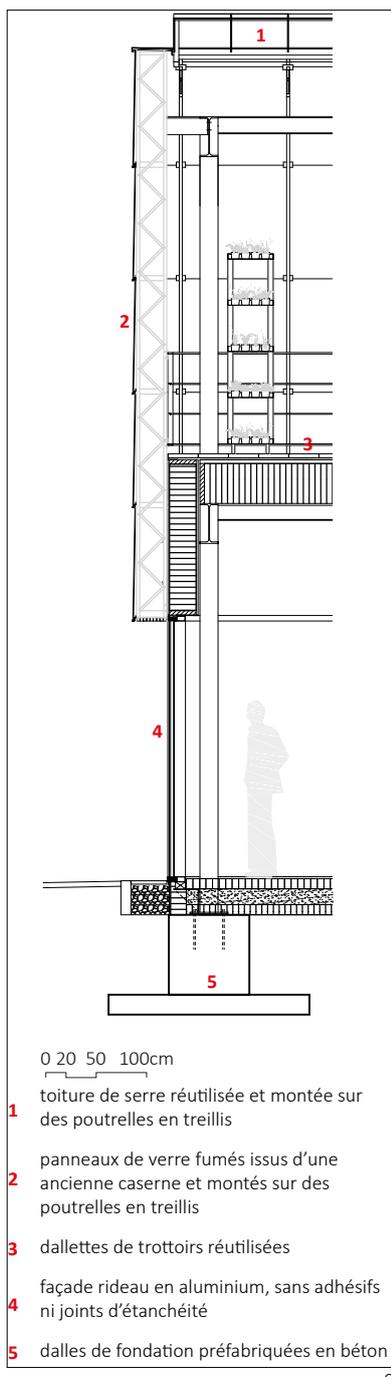
A Utrecht, le début de la revitalisation du centre-ville est planifié dans une quinzaine d'années. Dans l'intermède, *The Green House* occupe un des espaces vacants en intégrant le caractère temporaire de la situation: «Le bâtiment est entièrement démontable – y compris les fondations, réalisées en blocs de béton préfabriqués – et pourra être remonté n'importe où ailleurs dans 15 ans» (Froidevaux 2019).

La réversibilité technique du bâtiment est soutenue par une attention particulière portée à l'indépendance des couches, aux possibilités de préfabrication et standardisation des matériaux ainsi qu'à l'usage d'assemblages réversibles. Pour commencer, les fondations en dalles de béton standard (6) sont théoriquement réutilisables. Au-dessus, sur deux niveaux, la structure métallique boulonnée (5) suit une trame régulière régie par les dimensions des panneaux en verre fumé provenant d'une ancienne caserne démontée à proximité

(2) et réutilisés pour la façade. Des profils galvanisés standards (IPE 400 et HEA 180) forment ensemble un système modulaire régulier. Le dallage du rez-de-chaussée est réalisé en pavés recyclés sur du sable intégrant un chauffage par le sol, sur un isolant solide (5). Le plancher du 1er étage est en panneaux de bois préfabriqués et dispose d'un chauffage au sol monté à sec. Les blocs sanitaires et les éléments de circulation verticale sont des blocs indépendants (4). L'enveloppe est complétée par des cadres préfabriqués en bois contenant de l'isolant (3).

La réversibilité spatiale du bâtiment est soutenue par l'utilisation d'une structure ponctuelle. Dans ce système modulaire, les éléments de plancher préfabriqués, les divisions intérieures et le bloc sanitaire semblent pouvoir être re-disposés en cas de changement majeur d'utilisation.

- › concepteurs/trices: *cepezed*, NL;
- › client: *R Creators*, NL;
- › lieu: Utrecht, NL;
- › statut: livré en 2018;
- › surface utile: 770 m²;
- › programme: restaurant et salle de réunion
- › sources: *cepezed 2020a*, *Froidevaux 2019*, *Pintos 2019*;
- › figures: *The Green House* est conçue en couches démontables (a,b,f). Son plan libre offre une grande liberté dans la disposition des séparations intérieures (c,d) et son système constructif, qui inclut des éléments de réemploi, est largement réversible (e).



étude de cas XXIII structure bois-métal

Le *Projet XX* est un projet pionnier dans l'application contemporaine des principes de la construction réversible. Il s'agit d'un immeuble de bureaux de deux étages conçu pour être spatialement flexible et entièrement démontable après 20 ans d'utilisation. Ce parti-pris initial avait été entre autres motivé par la courte durée de vie des bureaux aux Pays-Bas (30 ans en moyenne) et la rapide obsolescence du parc immobilier (Post et Klomp 1999). Une attention particulière a été apportée à la flexibilité de l'espace, l'indépendance des couches et à la capacité de ses composantes à être réutilisés ou recyclés, après un usage de 20 ans. Inauguré en 1999, le bâtiment est encore en utilisation et un démontage n'est pas prévu. Soulignant au passage les difficultés de prédiction, ce constat qui pourrait sembler contradictoire souligne notamment son aptitude à accueillir des changements d'usage et son aisance d'entretien.

Une trame régulière régit la structure ponctuelle en éléments bois-métal. Celle-ci est composée d'éléments en lamibois (LVL), avec des colonnes d' hauteur constante et de section unique par étage, des poutres avec des membrures inférieures en barres d'acier et des contreventements métalliques. L'assemblage de la structure est réalisé par boulonnage à travers des plaques en acier et la façade en triple-vitrage en est entièrement détachée. Les dimensions de la trame ainsi que le positionnement des blocs sanitaires et des circulations ont été dessinés pour permettre plusieurs divisions de l'espace.

Alors que des dalles préfabriquées de béton à noyaux creux forment le plancher du rez-de-chaussée, le plancher du 1er étage est composé de caissons en bois remplis de sable et d'une couche de feutre pour en améliorer l'isolation phonique. Selon l'architecte, ces panneaux sandwich grincent et se sont révélés trop souples. L'architecte opérerait aujourd'hui pour un autre système de plancher.

- › concepteurs/trices: *XX Architects*, avec l'entreprise de construction, la maîtrise d'ouvrage et l'*Eindhoven University of Technology* pour les parties techniques;
- › client: *Wereldhave Management Holding*;
- › lieu: Delft, NL;
- › statut: livré en 1999;
- › surface: 2'140 m²;
- › sources: Post et Klomp 1999, Guequierre et Kristinsson 1999, Post 2019, Zeegers et al. 2001, *Boosting platform voor koplopers in bouwinnovatie* 2019, BAZED 2020a, *architectureguide* 2019;
- › figures: inauguré en 1999 et conçu pour être démonté après 20 ans, le *Projet XX* (a-c, e) est encore en usage et aucun projet de démontage n'est planifié. La disposition du porteur ponctuel, des circulations et des noyaux sanitaires permet plusieurs configurations de l'espace (b).



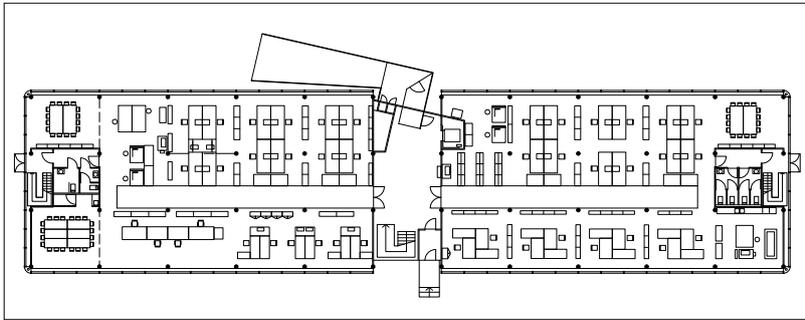
a



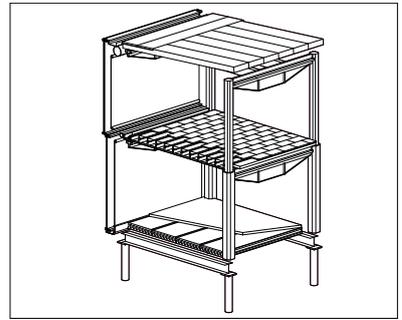
b



c



d



e

étude de cas XXIV structure bois boulonnée

Dans la ville de Brummen au Pays-Bas, les autorités souhaitaient agrandir les locaux de la municipalité de manière semi-permanente pour une durée d'au moins 20 ans. Le projet réalisé conserve la bâtisse existante et l'entour sur trois côtés d'une extension de deux étages. La structure poteau-poutre en bois est détachée d'une façade rideau en verre. Sa disposition permet la modification du plan des bureaux, soumis à des fréquents changements.

Une des particularités du projet tient dans la mise en place d'un système de reprise des composants. En effet, l'équipe de projet s'est assurée qu'à l'issue des 20 ans d'utilisation les composants puissent être repris par leur fournisseur/fabriqueur dans le but d'être réutilisés ou recyclés. Selon les architectes, «plus de 90 % de la conception a été livrée démontable» grâce à la consultation précoce des fournisseurs (RAU 2020).

Une étude approfondie doit permettre de comprendre comment cette stratégie a été affinée pour les éléments dont les durées de vie techniques ne sont pas identiques et de quelle manière une prolongation d'utilisation sur place au-delà de 20 ans est envisageable avec les contrats de reprise.

Cette stratégie de reprise a eu des répercussions sur le choix des composants, notamment pour la structure en bois. Assemblée par boulonnage grâce à des équerres métalliques, celle-ci est réalisée avec des éléments légèrement surdimensionnés. Ce surdimensionnement résulte de la demande du fournisseur qui estime ainsi pouvoir augmenter le potentiel de réemploi (Ellen MacArthur Foundation 2016). En parallèle, un inventaire complet du bâtiment a été réalisé pour chaque composant sous forme de «passeport matériaux». Il indique les destinations prévues des matériaux pour un deuxième cycle de vie.

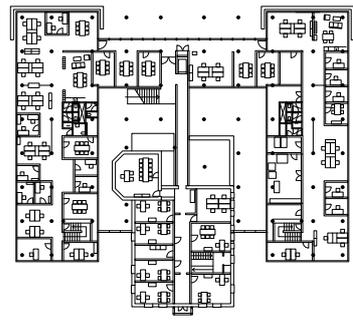
- › concepteurs/trices: RAU;
- › expert en économie circulaire: Turntoo;
- › client: municipalité de Brummen;
- › lieu: Brummen, NL;
- › statut: complété en 2013;
- › surface brute: 3'000 m²;
- › sources: [Ellen MacArthur Foundation 2016](#), [Guldager Jensen et Sommer 2019](#), [RAU 2020](#);
- › figures: avec son système porteur en bois, l'extension semi-permanente pour la municipalité de Brummen (a) est montée à sec autour du bâtiment existant (b) et dispose d'un plan flexible (c,d). La structure est entièrement boulonnée (e,f).



a



b



c



d



e



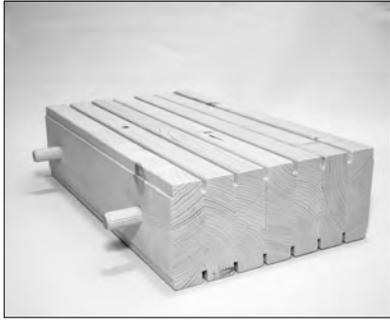
f

étude de cas XXV plancher en bois massif

Développé en 1994 par l'entreprise suisse *Tschopp Holzbau AG*, le système *BRESTA*® est un système porteur en bois massif utilisé pour des murs porteurs et des planchers. Une des caractéristiques clé de ce système est qu'il ne contient ni colle ni clous. Il s'agit de panneaux réalisés à partir d'épaisseurs de chêne compressées et maintenues par des chevilles en bois dur à mi-bois

([Tschopp Holzbau AG 2020](#)). L'entreprise a également développé des systèmes de finitions en bois massif avec fixations mécaniques: la pièce est maintenue sur la longueur par un assemblage bois-bois en queue d'aronde sans colle. Théoriquement, ce système peut être démonté et rassemblé ou, le cas échéant, recyclé.

› source: [Tschopp Holzbau AG 2020](#);
› figures: le système *BRESTA*® en bois massif sans colle est assemblé avec des chevilles en bois (a,b). Les finitions de plancher et plafond en bois massif sont fixées par des assemblages en queue d'aronde (c).



a



b



c

Cette section présente une liste de principes spécifiques aux enveloppes pour un dessin réversible puis discute de techniques établies et innovantes d'enveloppes réversibles. Il s'agit notamment de présenter des alternatives au système de façade le plus courant en Suisse pour les bâtiments de logement suisses, les façades composées d'une isolation périphérique synthétique collée à la structure en béton, souvent enduites de finitions minérales qui rendent le recyclage et la réutilisation difficiles.

principes

Les principes spécifiques à la construction réversible des enveloppes sont:

- › planifier une protection adaptée à l'humidité, à la lumière et aux agressions mécaniques, en particulier pour les quelques matériaux polymères et joints difficiles à éviter et sensibles aux ultraviolets ainsi que pour les pièces d'angle;
- › concevoir un système constructif qui permette de moduler la transparence de la façade et adapter son ouverture vers l'extérieur en fonction de son utilisation;
- › optimiser le rythme de la façade pour qu'il puisse correspondre à plusieurs dispositions des parois intérieures;
- › en cas d'utilisation de modules préfabriqués, veiller à garantir la séparabilité des composants pour le réemploi, le recyclage ainsi que pour leur transformation;

- › veiller aux possibilités de recyclage de l'isolant: les isolants synthétiques, économiques et performants thermiquement, ne sont aujourd'hui pas recyclés. Si les isolants minéraux ou bio-sourcés sont séparables et non contaminés, ils sont potentiellement aptes au recyclage;
- › veiller à démontabilité des étanchéités de toiture (p. ex. des membranes EPDM, un caoutchouc synthétique monocouche, avec fixation mécanique);
- › mettre en œuvre des revêtements démontables.

A noter que l'indépendance des couches est un facteur critique dans les enveloppes puisque s'y rencontrent des composants avec diverses durées de vie. Parmi les points de contrôle, il est important de vérifier que le parement extérieur puisse être enlevé sans endommager l'isolation et celle-ci être démontée sans abîmer la structure.

Des recommandations spécifiques à certains parements ainsi que pour les murs-rideaux et les fenêtres sont disponibles dans [Addis et Schouten \(2004\)](#) aux pages 49-55.

réversibilité des façades

Les **murs-rideaux** sont des enveloppes non-porteuses utilisées dans la construction moderne pour des façades généralement entièrement vitrées. Souvent utilisées dans des bâtiments à vocation commerciale, ces façades reposent sur l'assemblage d'éléments préfabriqués. Les murs rideaux peuvent être généralement démontés en inversant le processus de montage. Une at-

tention particulière doit être portée à la séquence de montage et à l'échelle des composants pour permettre l'entretien, la réparation localisée et un travail en parallèle. [Addis et Schouten \(2004\)](#) répètent l'importance de simplifier les opérations de démontage et minimiser l'usage de mastics pour optimiser la réutilisabilité des composants.

Les **façades ventilées**, porteuses ou non, sont réalisées avec des sous-structures sur lesquelles sont fixés des revêtements surfaciques, linéaires ou structurés en divers matériaux. Les revêtements et les sous-structures peuvent être démontés si les principes de la construction réversibles sont bien appliqués, par exemple en utilisant des connecteurs mécaniques, comme des équerres métalliques et des vis ou des clous. Le mode d'assemblage et le calepinage doivent permettre une réparation locale et proportionnée et le système de fixation de l'isolation doit être réversible. Il s'agit d'alternatives intéressantes aux façades enduites.

Appliqués majoritairement dans des façades non-porteuses, des **systèmes de caissons** ou de cadres ont été développés pour permettre le montage et démontage réversible d'isolants. Ces cadres et caissons sont pour la plupart réalisés en bois pour limiter les ponts de froid et assemblés de manière mécanique. Leur utilisation est répandue dans les bâtiments où la réversibilité est un souhait particulier de la maîtrise d'ouvrage, généralement en association avec un porteur ponctuel et une façade ventilée. Des caissons ou cadres démontables pourraient, sous certaines conditions,

être déplacés si le rapport à l'extérieur nécessitait des modifications. Les cadres ou caissons peuvent généralement être démontés de manière soignée si des connecteurs réversibles ont été utilisés. Leur réemploi sera conditionné par leurs dimensions et la disposition des informations sur les caractéristiques des isolants. L'usage de dimensions standards sera un facteur clé. Un désassemblage des caissons/cadres et une réutilisation partielle de pièce sont possibles.

L'utilisation d'un **isolant apparent** peut être une stratégie réversible intéressante, en particulier lors de la rénovation énergétique de façades porteuses linéaires, qui permet de réduire le nombre de composants et de connexions. Le liège expansé est un matériau recyclable qui peut remplir ces deux fonctions, d'isolation et de parement. Grâce à sa propre résine et de la haute pression, le liège est transformé sans additif en plaques isolantes. L'absence de finitions extérieure permet de conserver ses aptitudes en termes de recyclage. Pour la réversibilité des assemblages, les fixations mécaniques sont aujourd'hui apparentes et demandent une réflexion sur le calepinage. Rendre les fixations invisibles implique, à ce jour, une fixation au mortier de chaux et ciment.

réversibilité des toitures

Pour les toitures, un défi important est celui de l'**étanchéité**. Alors que cette couche est conventionnellement soudée à chaud aux toitures plates de manière irréversible, de nouveaux modes de fixations mécaniques ont été développés. Des systèmes de clips non-perfo-

rants ont été développés pour fixer des membranes en *EPDM*, un caoutchouc particulièrement robuste. L'entreprise suisse *Contec* a développé un tel système de fixations réversibles (*Contec s.d.*) et celui-ci a été notamment utilisé pour le *NeighborHub*, un prototype de bâtiment autonome développé par des universités et hautes écoles romandes et monté et démonté à plusieurs reprises. Les étanchéités des toitures doivent être protégées de manière adéquate pour prévenir un vieillissement prématuré. Il est par exemple possible de lester ces membranes avec des graviers ou un système de végétalisation qui pourra être démonté si besoin. Comme pour les façades, des **matériaux de recouvrement** permettent d'assurer la réversibilité de l'enveloppe. Les tuiles, les dalles sur plots, les ardoises, les tôles sont des exemples d'éléments pouvant être fixées mécaniquement. Les couches végétales des toitures végétalisées pourraient également être compostées et/ou réutilisées. En ce qui concerne la production d'énergie thermique ou électrique, l'installation en toiture de **panneaux thermiques**, technologie *low-tech*, ou panneaux photovoltaïques, système *high-tech*, doit prendre en compte les possibilités de recyclage et considérer les impacts environnementaux des différents produits sur l'ensemble de leur cycle de vie.

étude de cas XXVI façade non-porteuse

Présenté un peu plus haut (voir [étude de cas XXI](#)), le *Palais de Justice Temporaire d'Amsterdam* a été conçu pour être utilisé cinq ans avant d'être démonté et remonté dans un autre site. Face à cette particularité temporelle, des solutions réversibles ont été développées pour la plupart des couches et composant. A propos de l'enveloppe, celle-ci est non-porteuse. Sa fonction isolante est remplie par des caissons préfabriqués.

Ces caissons en bois contiennent l'isolant et le pare-vapeur. Ils sont réalisés avec des planches vissées et sont fixés avec des équerres métalliques. Sur la face extérieure des caissons est fixée de la toile tendue qui sert de revêtement extérieur. Les pièces de toile sont d'un seul tenant pour chaque étage et fixées à des ressorts métalliques tenus eux par de minces profilés en acier.

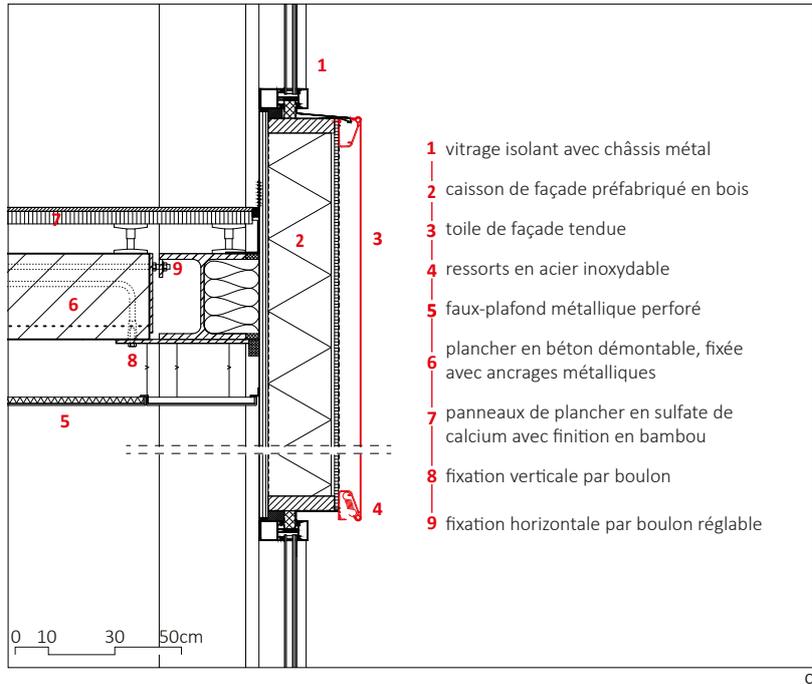
- › concepteurs/trices: *cepezed*, NL;
- › client: *Rijksvastgoedbedrijf*;
- › lieu: Amsterdam, NL;
- › statut: livré en 2016;
- › surface bâtie: 5'400 m²;
- › programme: bureaux;
- › sources: [cepezed 2020b](#), [Froidevaux 2019](#), [Danschutter et al. 2017](#), [van Deelen et al. 2017a](#), [2017b](#);
- › figures: prototype des caissons de façade démontables avec toile tendue attachée à des ressorts (b), photo de la façade (a) et la coupe correspondante (c).



a



b



c

étude de cas XXVII façade métallique

Le siège social de l'entreprise *IGUS* est un bâtiment fréquemment mentionné pour sa capacité à être agrandi et à la flexibilité de son système constructif et de son espace (Crowther 1999c). Pour anticiper le potentiel développement de l'entreprise dont les activités de production évoluent rapidement, le bâtiment a été conçu sans divisions intérieures, avec une façade modulable et de sorte à pouvoir être agrandi latéralement (Grimshaw 2020). Inauguré en 1994, le siège a été étendu en une dizaine d'étapes consécutives sur une période d'une vingtaine d'année. Les extensions successives ont été construites en répliquant le modèle constructif du bâtiment et ne sont presque pas distinguables. Son système de suspentes et pylônes permet des portées allant jusqu'à 33 mètres et donc un nombre restreint de colonnes occupe l'espace intérieur, un grand plan libre. Les dômes sont préfabriqués et conçus pour être transportés sur des camions standards (Fuster et al. 2009).

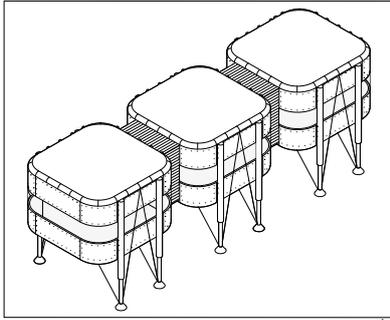
A l'intérieur, le souhait était de garder l'espace aussi flexible que possible, et une série de stratégies mobiles, modifiables et reproductibles ont été mises en place. Les sanitaires et les bureaux sont des blocs sur pieds qui peuvent être assemblés, déplacés et démontés avec une clé standard. Pour en faciliter l'entretien et la modification, les réseaux techniques sont apparents. L'ameublement est conçu à partir d'un nombre restreint d'éléments qui peuvent être reconfigurés selon les besoins (Fuster et al. 2009).

Le système de façade permet d'échanger des éléments opaques, vitrés ou de porte en fonction de l'usage et du développement de l'entreprise. Ces éléments interchangeables peuvent être facilement démontés en desserrant la pièce de fixation à ailettes par une rotation de 90°. L'accès aux ailettes à l'arrière des panneaux est garanti par des découpes dans les supports verticaux. Une étude approfondie devrait discuter des défis liés aux évolutions des normes thermiques.

- › concepteurs/trices: *Grimshaw Architects*, UK;
- › client: *IGUS*, DE;
- › lieu: Cologne, DE;
- › statut: livré en 1994, suivie de sept extensions;
- › surface bâtie: 32'000 m² après la 7^{ème} extension, 90'000 m² aujourd'hui;
- › programme: usine / entrepôt / magasin / bureaux;
- › sources: Fuster et al. 2009, Grimshaw 2020, igus 2019, Moore 1993, Crowther 1999c;
- › figures: la trame structurelle et les modules de façades démontables et interchangeables correspondent (a,c,f,g). Des modules mobiles accueillent les bureaux et unités de laboratoires (b,d,e).



a



b



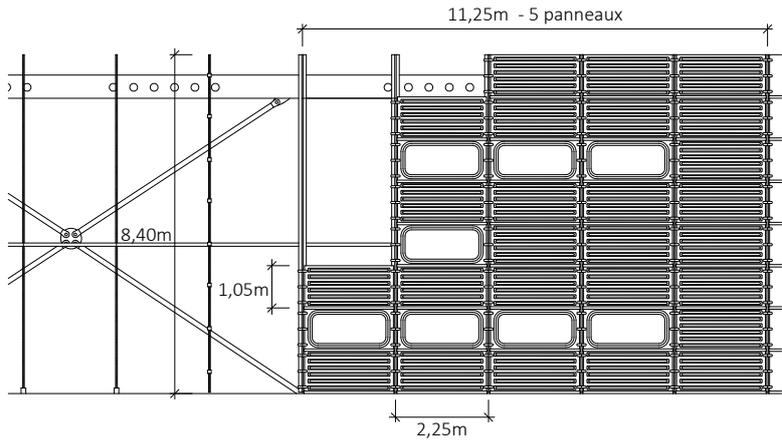
c



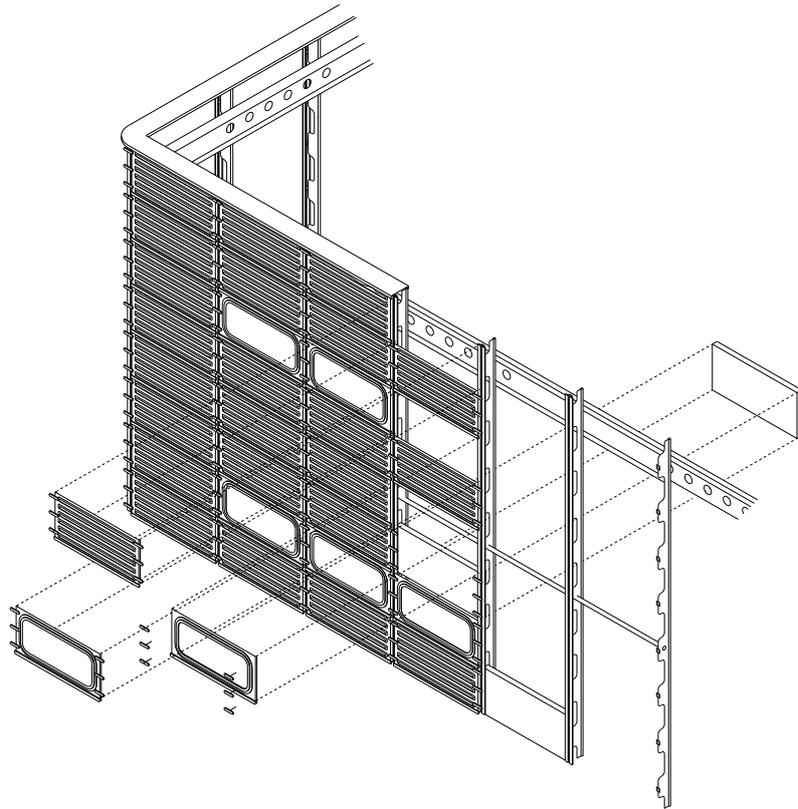
d



e



f



g

étude de cas XXVIII rénovation énergétique de façade

Le *Circular Retrofit Lab (CRL)* est un projet de recherche appliqué dont l'objectif est de matérialiser les principes de la construction réversible en collaborant avec des acteurs/actrices de l'industrie du bâtiment. Le projet doit répondre à différents scénarios d'utilisation et mettre en œuvre des stratégies réversibles tout en réutilisant la structure d'anciens logements étudiants du campus de *Vrije Universiteit Brussel (VUB)* construits dans les années 1970. Cette structure existante est composée d'éléments précontraints préfabriqués et empilables. Ces modules existants sont issus du système *Variel* développé par l'architecte suisse Fritz Stucky. A partir

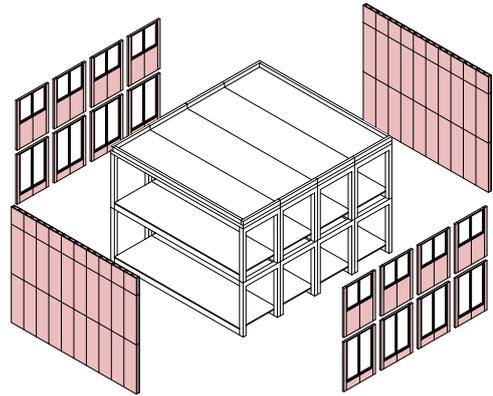
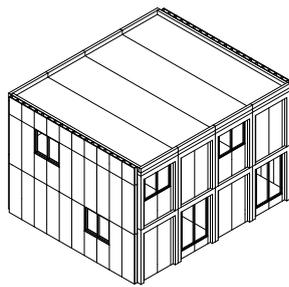
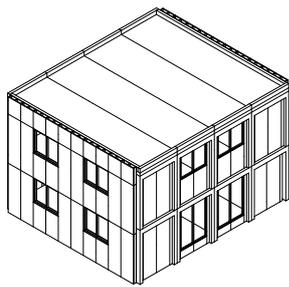
de cela, le projet teste et met en place des stratégies qui permettent d'un côté de l'utiliser en alternance comme espace public, bâtiment de logement et espace de travail et de l'autre d'optimiser sa démontabilité et son potentiel de réutilisation et de recyclage.

La nouvelle est construite à partir d'éléments interchangeableables. Il s'agit de caissons isolés préfabriqués en bois. Ils sont réalisés entièrement à l'aide de fixations mécaniques et sont fixés à la structure par boulonnage sur des équerres métalliques. «Seule la bande d'étanchéité à l'air risque de devenir un déchet après le démontage» ([Brussels Environment et Capelle 2019](#)). Leur modularité permet de changer leur disposition en façade en fonction de l'utilisation. Le revêtement extérieur est réalisé en panneaux de fibrociment pour respecter l'ancienne identité visuelle du bâtiment. Celui-ci est vissé sur la membrane étanche.

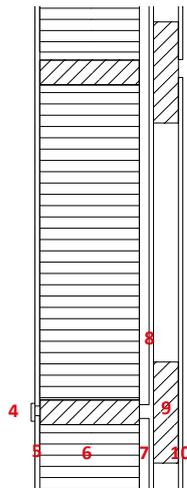
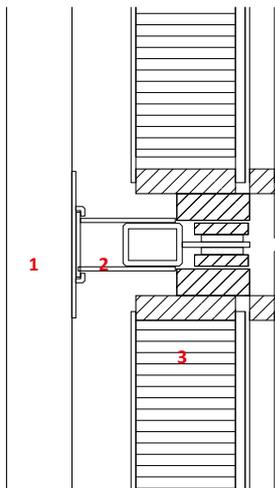
- › architectes: *Kaderstudio*;
- › ingénieur-e-s: *MK Engineering*;
- › consultant-e-s: *Vrije Universiteit Brussel (VUB)* et *Pierre Berger S.A.*;
- › promotrice: *VUB*, BE;
- › lieu: Bruxelles, BE;
- › statut: rénovation complétée en 2019;
- › programme: rénovation de logements étudiants préfabriqués des années 1970 pour 3 scénarios d'utilisation;
- › source: [Brussels Environment et Capelle 2019](#);
- › figures: les éléments empilables en béton précontraint des années 1970 sont récupérés et servent de système porteur au *CRL* (a). Un schéma des possibles configurations de façade en fonction de l'usage (b) accompagne les détails constructifs de la façade et des panneaux démontables et interchangeableables (c).



a



b



0 5 10 20 cm

c

- 1 structure existante- béton précontraint
- 2 fixation métallique vissée
- 3 panneaux préfabriqués
- 4 ruban d'étanchéité pare-vapeur
- 5 panneau de construction avec étanchéité intégrée et pare-vapeur fixé mécaniquement
- 6 isolation et sous-structure en bois
- 7 couche imperméable
- 8 panneau de ciment/fibre de bois 8 mm, fixé mécaniquement
- 9 poutres en bois 45x184mm, tous les 600 mm
- 10 panneau de revêtement de façade en fibre-ciment 8 mm

Les recommandations et études de cas suivantes concernent les éléments et réseaux techniques de chauffage, ventilation, sanitaire et électricité réversibles.

principes

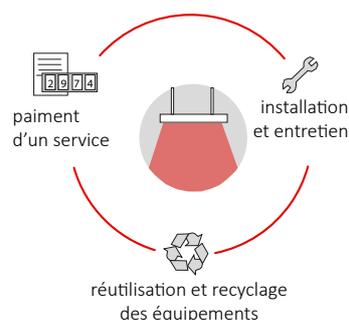
Les principes spécifiques aux éléments techniques sont ici remaniés depuis les recommandations de Addis et Schouten (2004) et l'*Association Canadienne des Standards (2006)*:

- › concevoir un bâtiment pour qu'il ne nécessite qu'un minimum d'installations techniques et simplifier les équipements en préférant les systèmes passifs aux solutions technologiques complexes lorsque cela est possible (p. ex. avec de la ventilation naturelle);
- › rendre les réseaux accessibles, facilement réparables et indépendants des autres couches;
- › éviter de couler les réseaux dans le béton, de les sceller dans une chape ou de les enterrer lorsque cela est possible et préférer un montage sec;
- › sélectionner des équipements réparables (p. ex. des luminaires dont les ampoules sont remplaçables);
- › rendre les réseaux facilement localisables et utiliser des marqueurs visuels pour identifier rapidement les points d'accès et l'identité des circuits;
- › regrouper les gaines techniques et les disposer de sorte à pouvoir modifier l'utilisation de l'espace;
- › utiliser des faux-planchers/faux-plafonds ou/et des plinthes amovibles ainsi que les réseaux apparents;
- › préférer des composants de dimensions standards et des gaines et tuyaux si possible flexibles;
- › maximiser la longueur des tuyaux pour en augmenter les chances d'être réutilisés, éventuellement en pièces plus courtes;
- › évaluer la location de matériel technique (p.ex. ascenseur, luminaires, etc.);
- › pour les équipements de grande dimension, utiliser quand cela est possible plusieurs unités, qui pourront éventuellement plus facilement trouver un repreneur;
- › préférer des équipements dont les composants peuvent être aisément désassemblés et s'assurer de leur recyclabilité auprès des fournisseurs et entreprises de traitement.

étude de cas XXIX système de service d'éclairage

Suivant les principes de l'économie de la fonctionnalité théorisée par Walter Stahel (1982), Philips a développé en collaboration avec Thomas Rau le système *Pay per Lux*. Ce système est notamment installé à l'aéroport de Schiphol aux Pays-Bas. «La logique est la suivante: Philips s'engage à atteindre un résultat donné en matière d'éclairage et reste propriétaire de toutes les installations techniques, tandis que l'aéroport paie uniquement pour l'utilisation du système. Si l'objectif n'est plus rencontré [...], c'est au fournisseur d'intervenir» (Ellen MacArthur Foundation 2020). En

d'autres mots, dans ce système, la clientèle paie pour le service d'éclairage à la place d'acheter le système et Philips reste propriétaire des installations. L'entreprise cherchera alors à optimiser le réseau. Ce type d'engagement participe à la prévention de l'obsolescence des réseaux techniques, puisque le mandataire sera gagnant s'il minimise les interventions et prolonge le temps d'utilisation des installations. Cela tend également à limiter les problèmes de reprise et de certification en cas de démontage.



› sources: Stahel 1982, Ellen MacArthur Foundation 2020;

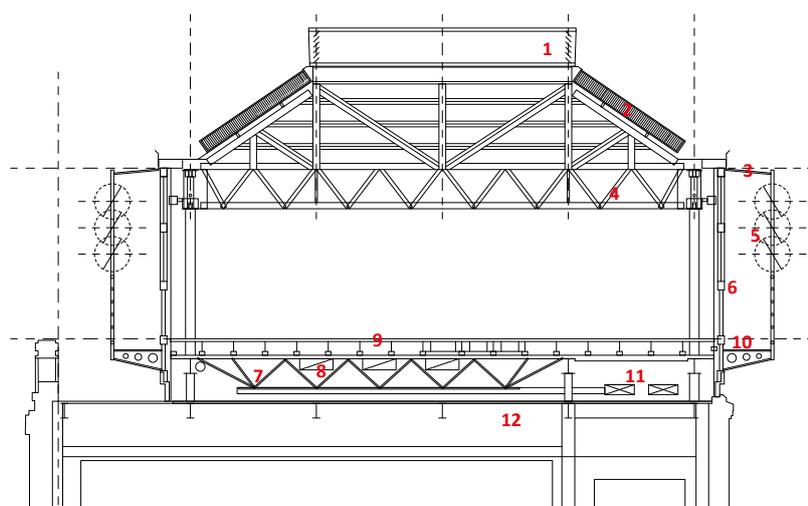
› figure: vendre l'éclairage comme un service et non un bien.

étude de cas XXX surélévation et isolation

L'*Intelligent Workplace* est un projet de surélévation sur le campus de l'*Université Carnegie Mellon*. Ajoutant neuf modules préfabriqués au toit existant d'un bâtiment, le projet était guidé par un souhait de flexibilité et démontabilité. Les réseaux techniques du bâtiment sont accessibles et facilement démontables. L'utilisation d'un faux-plancher démontable permet d'accéder aux réseaux techniques au sol. Les réseaux

au plafond sont apparents et passent dans les fermes ajourées. Les cloisons intérieures ne contiennent aucun réseau électrique et deviennent ainsi plus facilement déplaçables. En parallèle, la structure en acier est boulonnée et entièrement démontable en quatre jours. La géométrie des modules et la disposition des parties vitrées optimisent la lumière naturelle.

- › concepteurs/trices: *Bohlin Cywinski Jackson* et *Pierre Zoell*;
- › client: *The Center for Building Performance and Diagnostics, Carnegie Mellon University*;
- › lieu: Pittsburgh, USA;
- › statut: livré en 1997;
- › surface utile: 770 m²;
- › programme: restaurant et salle de réunion;
- › sources: *Bohlin Cywinski Jackson 2020, BAZED 2020b*;
- › figures: la surélévation du bâtiment *Margaret Morrison* est dessinée en 9 modules et conçue pour être démontable et adaptable (b,d). Le système de ventilation naturelle réduit le nombre de gaines techniques. Celles-ci sont apparentes ou dans le faux-plancher (a,e). Les parois intérieures en sont distinctes et peuvent être déplacées (c).



- 1 passage pour ventilation naturelle
- 2 panneaux de toiture isolants
- 3 dispositif d'ombrage programmable
- 4 structure modulaire en acier recyclé
- 5 persienne en verre rotationnable
- 6 meneaux avec syst.refroidissant/chauffant
- 7 structure métallique
- 8 passage de la tuyauterie
- 9 faux-plancher démontable sur plot
- 10 passerelle de maintenance
- 11 alimentation principale en air
- 12 dalle de toiture existante

a



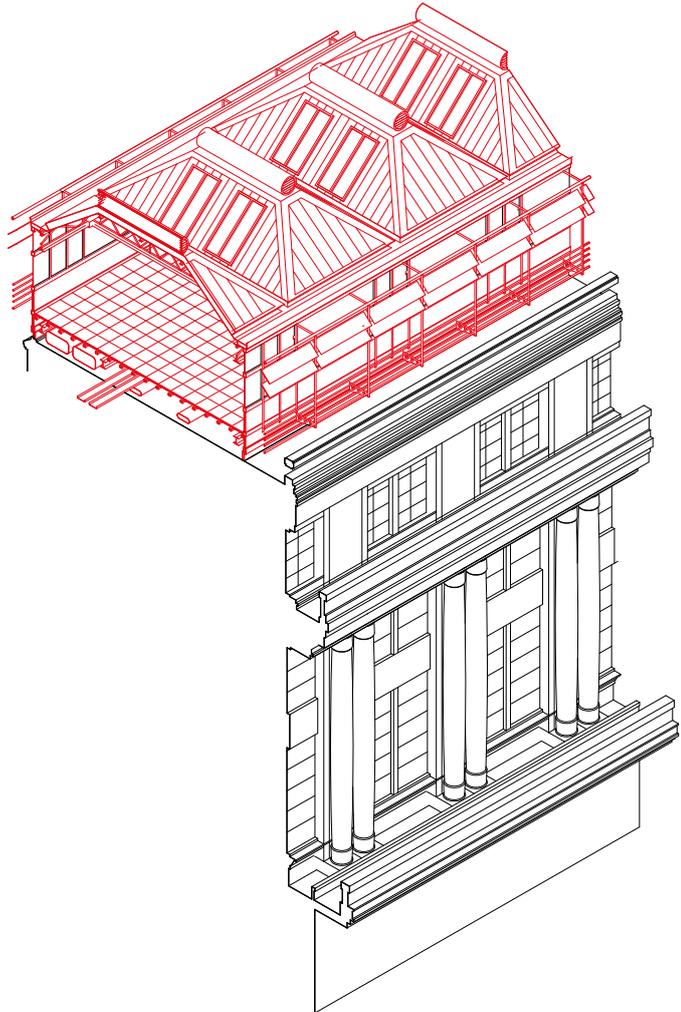
b



c



d



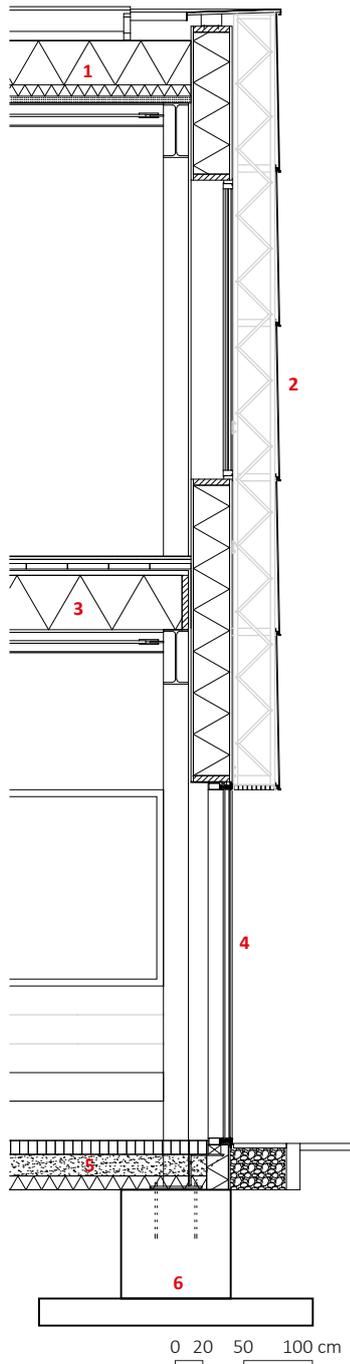
e

étude de cas XXXI système de chauffage pour bureaux

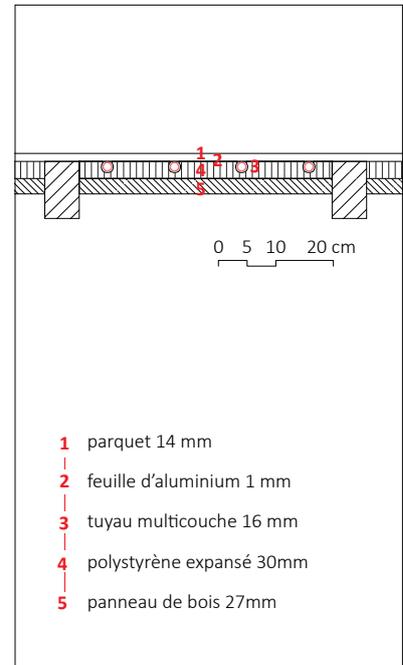
Conventionnellement, le chauffage au sol est monté en une pose humide: il est fixé sur la couche isolante puis scellé dans la chape. Avec cette technique, le réseau ne peut être modifié, réparé ou démonté soigneusement. Alternativement, le chauffage au sol peut être

monté avec une pose dite «sèche». Dans ce cas, les tuyaux sont calés dans des rainures prévues à cet effet sur la face supérieure d'une couche isolante. Cette solution a été mise en place à *the Green House*. Sur la couche isolante ont été placés des pavés d'occasion.

- › concepteurs/trices: *cepezed*, NL;
- › client: *R Creators*, NL;
- › lieu: Utrecht, NL;
- › statut: livré en 2018;
- › surface utile: 770 m²;
- › programme: restaurant et salle de réunion
- › sources: *cepezed 2020a*, *Froidevaux 2019*, *Pintos 2019*;
- › figures: vue intérieure (a). Détails constructifs des planchers et de façade (b). Illustration d'un plancher avec chauffage au sol monté à sec sur une couche isolante rainurée (c).



a



b

c

- 1 tôles de toiture en acier galvanisé, perforées et remplies d'isolant acoustique
- 2 panneaux de verre fumé de réemploi montés sur poutrelles en treillis galvanisées
- 3 planchers préfabriqués en bois couverts de dalles de trottoirs réutilisées contre les bruits solidiens sur plancher chauffant sec
- 4 façade rideau en aluminium, sans adhésifs ni joints d'étanchéité
- 5 pavés de récupération sur sable avec chauffage et refroidissement au sol, isolation résistante à la compression
- 6 fondations en préfabriquées en béton

- 1 parquet 14 mm
- 2 feuille d'aluminium 1 mm
- 3 tuyau multicouche 16 mm
- 4 polystyrène expansé 30mm
- 5 panneau de bois 27mm

Les principes spécifiques aux partitions et revêtements intérieurs réversibles soulignent indirectement les problèmes posés par les cloisons conventionnelles légères en plâtre sur ossature métallique, système le plus répandu en Suisse. Face à ces difficultés, il semble que des innovations soient encore nécessaires pour disposer de cloisons réversibles adaptées à toutes les fonctions. L'étude de cas présente une recherche menée dans cette direction.

Cette sous-partie est directement liée à la sous-partie précédente qui traite des réseaux techniques. Certaines approches présentées pour une couche sont également valables pour l'autre. Par exemple, les faux-planchers et faux-plafonds sont illustrés à travers des études de cas de la sous-partie sur les CVSE.

principes

Les principes spécifiques à la construction réversible des partitions et revêtements intérieurs se réfèrent à la page 38 de Addis et Schouten (2004):

- › concevoir des parois démontables, déplaçables et réparables qui puissent répondre aux normes de sécurité et de confort des différents scénarios d'utilisation;
- › si la hauteur le permet, utiliser des faux-plafonds ou faux planchers et préférer des dimensions standards et des matériaux de qualité, fixés de manière réversible, idéalement sans percement;
- › éviter le passage des services dans les éléments de séparations qui ne peuvent pas être modifiés et les équiper de plinthes;
- › limiter l'utilisation de plâtre de manière conventionnelle et développer des solutions démontables;
- › utiliser un mortier plus faible que les briques pour les éventuelles parois maçonnées;
- › considérer l'utilisation de parois préfabriquées amovibles, notamment dans les espaces de bureau;
- › recourir à des fixations réversibles pour les revêtements de sols;
- › favoriser les matériaux bruts, non enduits, colorés naturellement «et les boiseries internes devraient idéalement être finies avec de la cire ou des teintures naturelles plutôt qu'avec de la peinture» (Morgan et Stevenson 2005).

réversibilité des cloisons

Les **cloisons légères en plâtre** sont les plus répandues en Suisse. Généralement constituées d'une ou deux plaques de plâtre vissées de part et d'autre d'un châssis métallique, ces parois sont aujourd'hui construites de manière quasiment irréversible: les connexions sont dissimulées, les plaques de plâtre fragiles et le pied encastrés en dessous du niveau du revêtement de sol. De plus, la discontinuité du sol et du plafond induite par la pose des semelles avant celle des revêtements est un défi supplémentaire pour la flexibilité de l'espace. Si elle n'est pas trop endommagée au démontage, la sous-construction métallique peut être apte au réemploi.

Les **cloisons conventionnelles légères en bois**, courantes mais moins répandues que les cloisons en plâtre, sont bâties sur des châssis en bois. Dessus sont fixées des planches en bois, de dimensions et natures diverses. Le revêtement peut être réalisé en panneaux (tri-plis, massif, de particules, de fibres, contre-plaqué, etc.) ou en lambris. Les revêtements en bois des cloisons qui ne sont pas encastés peuvent être théoriquement démontés à conditions que leurs fixations soient accessibles et réversibles. La petitesse des pièces facilitera des réparations localisées mais augmentera le temps de montage et démontage. A nouveau, l'interruption du revêtement de sol et de plafond est un défi important pour modifier la disposition des parois. Si les connexions le permettent, les parois démontées et en bon état peuvent théoriquement être réutilisées. Cela reste contraint par les dimensions des parois et le temps additionnel nécessaire. Parmi les facteurs qui augmentent les chances de réemploi sont l'absence de finitions peu communes et l'usage de dimensions standards, notamment en termes de hauteur. La recyclabilité dépend du type de produits utilisés et des possibles contaminations (p.ex. par des colles, peintures ou vernis).

Avec la fréquence élevée des transformations des immeubles de bureaux, des **systèmes de cloisons amovibles** ont été développés par des fabricants. Il s'agit souvent de systèmes modulaires avec des éléments opaques, vitrés et ouvrants interchangeables fixés sur des rails vissés au sol. Ces éléments préfabriqués en usine sont montés à sec et aisément montables et démontables. Ils sont spécifiquement conçus pour pouvoir être déplacés et les éléments interchanger. Bien que les cloisons soient aisément démontables et remontables, leur réutilisation dans un autre bâtiment ou une autre fonction reste conditionné par la hauteur fixe de ces parois et leurs caractéristiques physiques, isolantes et résistantes. En effet, aujourd'hui ces systèmes ne sont pas conçus pour recevoir d'autres fonctions que celles de bureaux; leurs capacités, par exemple phoniques, ne permettent généralement pas de séparer deux logements.

réversibilité des revêtements

Dans l'analyse d'une sélection de revêtement pour plafonds par Sassi (2002) (figure 29), les faux-plafonds suspendus en dalles de laine de verre ou en dalles métalliques ainsi les panneaux de bois fixés à une poutraison ont le plus haut potentiel de réemploi. Les faux-plafonds présentent l'avantage supplémentaire de permettre le passage indépendant des circuits techniques. A l'inverse les plafonds en plâtre sont fragiles et difficilement démontables soigneusement.

Sassi a conduit une analyse similaire pour les revêtements de sol (figure 29). Il en ressort que les dalles de moquette non-collées, éventuellement montée sur des dalles de faux-planchers et les planchers en bois présentent le plus haut potentiel de réemploi parmi les techniques évaluées. Les paragraphes suivants reviennent sur certaines techniques.

Selon leur mode de montage, les **dalles de moquette** peuvent être facilement déposées. Si fixées par emboîtement, elles sont faciles à soulever et empiler. Leur standardisation soutient leur réemploi. Les moquettes posées en rouleau sont plus difficiles à réutiliser et celles collées plus difficiles à déposer. Les zones les plus utilisées demandent un remplacement régulier.

Les dalles de moquette peuvent être couplées à un système de **dalles de faux-plancher**. Ces dalles de support, souvent en bois et/ou métal, sont montées sur des systèmes de petits plots vissés. L'ensemble est aisément démontable et remontable. L'entreprise Mobius s'est par ailleurs spécialisée dans la récupération et revente des faux-planchers avec moquette. La hauteur des plots permet aux réseaux techniques de circuler entre la dalle porteuse et les dalles de faux-planchers.

Les **parquets** demandent un entretien important mais ceux fixés mécaniquement (par exemple par emboîtement) sont techniquement démontables et réutilisables. Leur démontage soigneux reste conditionné par un temps de démontage supplémentaire important.

Les **carrelages** demandent un faible entretien et peuvent recevoir des usages variés. Bien qu'ils disposent d'une grande longévité, ils ne permettent pas de modifications et un réseau de gaines réversible ne pourrait alors passer au sol. Même si des méthodes de sciage et nettoyage avec pour objectif une réutilisation ont été développées, ce procédé reste très chronophage.

Un **sol en linoléum** demande un faible entretien. Le linoléum peut être éventuellement utilisé comme revêtement sur des dalles de faux plancher et ainsi participer à l'indépendance des réseaux techniques. Même si le linoléum peut aujourd'hui être fixé sans colle et soigneusement démonté, les marques d'usure contraignent les opportunités de remise en circulation.

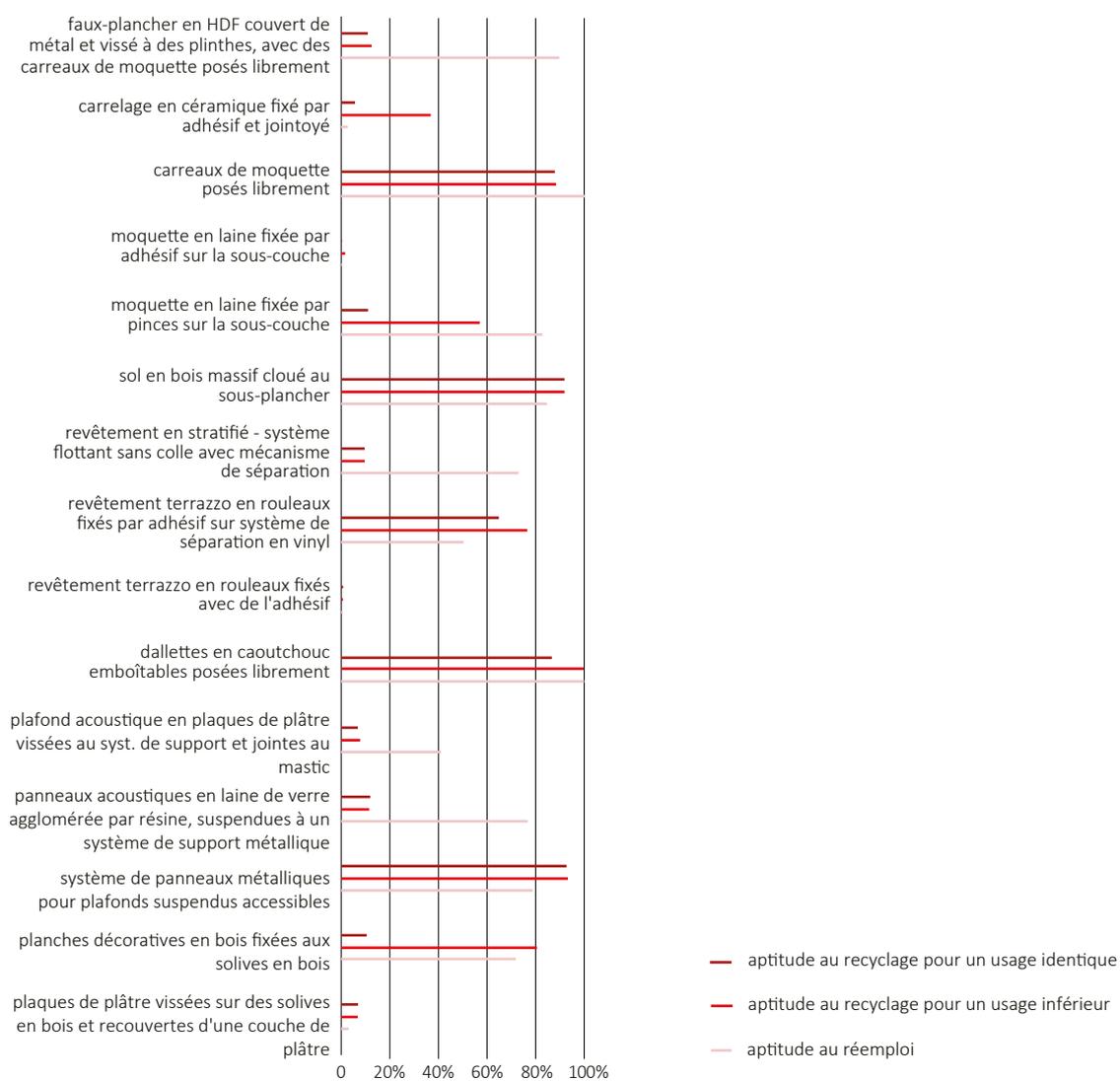


figure 29 · évaluation de l'aptitude au réemploi ou au recyclage d'une sélection de finitions de sols et de plafond selon Sassi (2002).

étude de cas XXXII partitions internes

Présenté dans l'étude de cas XXVIII, le *Circular Retrofit Lab (CRL)* est un projet de recherche appliqué dont l'objectif est de matérialiser les principes de la construction réversible en collaboration avec des acteurs/actrices de l'industrie du bâtiment. A travers un projet de rénovation, le bâtiment doit être capable de recevoir des usages variés (espace public, logement, bureaux) tout en minimisant les déchets et la consommation de matériaux neufs lors de ces transformations. Cinq systèmes de parois intérieurs ont été développés à partir de produits existants disponibles sur le marché et présentant «un fort potentiel pour atteindre les objectifs de circularité tels qu'ils sont envisagés dans le cadre du *BAMB*» (Brussels Environment et Capelle 2019). Ces systèmes et leurs propositions d'amélioration ont été testés selon 12 critères:

- › la réversibilité des connexions;
- › la vitesse et simplicité de montage;
- › la possibilité d'utiliser des matériaux d'occasion;
- › la résistance aux dégradations;
- › l'esthétique des connexions;
- › le confort acoustique;
- › la flexibilité dans l'intégration des systèmes techniques;
- › la remplaçabilité des composants;
- › le coût initial;
- › l'impact environnemental;
- › la démontabilité et réutilisabilité;
- › l'efficacité énergétique.

Un premier produit étudié est le système *Saint-Gobain 2*, système de paroi légère en panneaux de fibre montés sur une ossature métallique remplie d'isolant. Les améliorations apportées aux systèmes sont l'usage de profilés en U qui permettent de boulonner les panneaux de revêtements et l'ajout d'une plinthe pour rendre indépendant le réseau électrique. Les difficultés persistantes sont le temps de démontage et les dommages aux rails inférieurs.

Le second système discuté est le système *Geberit GIS*, un système d'éléments préfabriqués développé initialement pour les cloisons sanitaires à partir de trois éléments de base. L'objectif d'étendre à d'autres fonctions le système, avec des pièces entièrement démontables. Le projet de recherche s'est attardé sur le développement de connecteurs réversibles, de connexions invisibles et de solutions d'étanchéité à l'air pour augmenter le confort acoustique. Sauf pour les zones humides, les plaques en plâtre ont été remplacées par des panneaux plus résistants en bois.

Un troisième produit étudié est le système *JuuNoo*, un système développé en Belgique qui repose sur des cadres métalliques préfabriqués rempli d'isolant et dont la hauteur est adaptable. Une caractéristique clé de *JuuNoo* est la fixation au sol et au plafond ainsi que des panneaux à l'aide d'attache *Velcro*. «Différentes versions des systèmes ont été développées par le fabricant pour améliorer les performances acoustiques, la résistance aux chocs, l'efficacité de l'installation et réduire le coût. Le dernier prototype qui a été installé dans le

[CRL] est constitué de profils sigma avec une acoustique améliorée. La forme allongée en H des éléments permet de réduire l'utilisation de matériaux par rapport à la version précédente et peut être stockée et transportée de manière plus compacte.» (Brussels Environment et Capelle 2019) Une difficulté persistante est la résistance des bandes *Velcro* qui endommagent encore les plafonds au démontage et la fragilité des angles des panneaux en fibres.

- › architectes: *Kaderstudio*;
- › ingénieur-e-s: *MK Engineering*;
- › consultant-e-s: *Vrije Universiteit Brussel (VUB)* et *Pierre Berger S.A.*;
- › promoteur/promotrices: *VUB*, BE;
- › lieu: Bruxelles, BE;
- › statut: rénovation complétée en 2019;
- › programme: rénovation de logements étudiants préfabriqués des années 1970 pour 3 scénarios d'utilisation;
- › source: *Brussels Environment et Capelle 2019*;
- › figures: prototypes à partir des systèmes *Geberit GIS* (a), *JuuNoo* (b,d) et *Saint Gobain 2* (c,d).



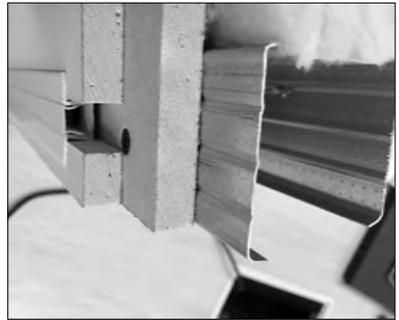
a



b



d



c



e

Les principes de la construction réversibles peuvent également être appliqués à l'ameublement intérieur. La revue de la littérature architecturale a par exemple montré plusieurs initiatives à l'échelle de bâtiments, comme le mobilier interchangeable du *Martini Hospital* (Architizer 2013, Molenaar 2013, SEED architects 2020) ou des blocs de cuisine mobiles et alimentables grâce à des flexibles dans la *Maison du Projet* (Hamburger Umweltinstitut 2018, Le Off du DD 2019). Le texte ci-dessous liste les principes spécifiques à cette couche du bâtiment et les illustre dans quelques exemples.

principes

Les principes spécifiques à la construction réversible de l'ameublement intérieur sont:

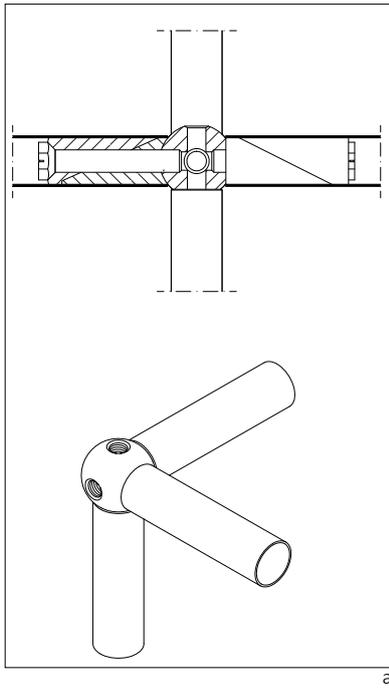
- › concevoir des éléments facilement nettoyables et réparables (p.ex. canapé déhoussable);
- › louer des meubles, en particulier pour des besoins de courte durée;
- › utiliser du mobilier modulable et extensible qui pourra s'adapter à de nouvelles configurations;
- › favoriser les meubles dont les des faces peuvent être interchangeables, pour des questions d'usures, visuelles ou d'usage;
- › conserver les notices de montage de manière sécurisée et durable et maintenir une base de données des meubles lorsque la quantité est élevée;
- › fixer le mobilier de manière démontable et réversible.

exemples

Emblématique du mobilier modulable, le système de mobilier *USM Haller* est imaginé à partir du travail de Fritz Haller pour la nouvelle halle de production de l'entreprise bernoise *USM U. Schärer Söhne AG*, pour laquelle il dessine un bâtiment à ossature d'acier à la fois modulable et extensible (figure 30). Transposant les principes mis en place à l'échelle de l'usine dans du mobilier, Fritz Haller et Paul Schärer conçoivent ensemble le système *USM Haller* composé de trois éléments: la pièce de connexion sphérique, les tubes d'assemblage et les plaques d'habillage (U. Schärer Söhne 1965, USM 2020, Grandjean 2014). Grâce au nombre presque infini de combinaisons, aux dimensions standardisées et aux matériaux de qualité, les meubles *USM* sont rarement éliminés. Ils sont souvent revendus sur le marché de l'occasion et possiblement alors reconfigurés. La pérennité du système est directement liée à la longévité de l'entreprise de production et à la disponibilité internationale du système.

Rejoignant la même lignée que *Philips* et son système *pay-per-lux*, un système de location pour certaines pièces d'ameublement a été mis en place dans le parc d'activités néerlandais *Park 20/20* (Cheshire 2016, Gorgolewski 2017). Ce projet de parc d'activités est inspiré par les principes de *Cradle to Cradle* et l'objectif est d'appliquer autant que possible des stratégies d'économies circulaires pour conserver la qualité des matières premières sur plusieurs cycles de vie. En parallèle, des contrats de location ont été mis en place avec plusieurs entre-

prises pour divers éléments: le mobilier de bureau est loué auprès de *Ahrend*, les dalles de moquette auprès de *Desso* et l'éclairage auprès de deux autres entreprises. Cela devrait garantir un meilleur entretien et optimiser le service de reprise.



b



c

figure 30 · détails issus du brevet du système (a). Le système modulaire s'inscrit dans la lignée du travail de Fritz Haller pour l'usine *USM* (b). La disponibilité internationale sur le long terme du système de mobilier participe à sa pérennité.

Les recommandations formulées dans cette partie ont pour but de d'accompagner l'intégration concrète de la réversibilité parmi l'ensemble des stratégies nécessaires à la construction durable et à la réduction des déchets du secteur. Ces recommandations cherchent à participer de manière complémentaire à la mise en pratique des principes de réversibilité à large échelle et ainsi contribuer à la valorisation des ressources à disposition et à la réduction de l'obsolescence des bâtiments.

former et diffuser les bonnes pratiques

La diffusion des bonnes pratiques en termes de réversibilité doit apporter des références de qualité aux architectes, maîtrises d'ouvrage et législateurs/législatrices. Une présentation objective et précise de ces exemples doit permettre de sensibiliser les parties prenantes aux enjeux et au potentiel de la construction réversible. En parallèle et au même titre que pour la déconstruction, des formations doivent transmettre aux acteurs/actrices du secteur les connaissances pratiques et théoriques sur la réversibilité. Celles-ci doivent être à la fois enseignées dans les cursus de formation post-obligatoires et universitaires liés aux bâtiments et au territoire, de la production à la gestion, et dans des modules de formation continue qui permettent de former les praticien-ne-s de ces domaines.

qui peut agir? Les centres de formations sont les mieux placés pour mettre en place des formations. Les organisations professionnelles telles que la SIA peuvent également mettre en place des formations spécifiques. Le canton, la confédération, les organismes professionnels et les centres de formation (écoles polytechniques, hautes écoles, etc.) peuvent initier la diffusion des bonnes pratiques en collaborations avec des praticien-ne-s et du personnel académique.

des exemples: les universités sont de plus en plus nombreuses à proposer des modules d'enseignement facultatifs traitant de la construction réversible, comme *TU Delft* (TU Delft 2020), *l'EPFL* (EPFL 2020), *l'ETHZ* (DARCH 2020, Hebel et al. 2017) et la *Cornell University* (Cornell AAP 2020).

rendre progressivement obligatoires les passeports des matériaux/bâti-ments

La réversibilité d'un bâtiment et la circularité de ses composants sont soutenues par des informations accessibles et de qualité qui perdurent à travers le temps. Les passeports numériques des matériaux/bâti-ments sont des bases de données digitales regroupant les informations sur les composants et la géométrie du projet (voir "garantir une gestion de l'information durable"). En association avec une ou plusieurs technologies de l'information (p.e. les modèles numériques de bâtiments *BIM*, une gestion géoréférencée des données *GIS*, les services de stockage *Cloud*, etc.), il peut s'agir d'outils bien adaptés à une gestion durable des données (Gorgolewski 2017, Guldager et al. 2016, Heinrich et Lang 2019, Luscuere 2016, Mulhallet al. 2017). En rendant obligatoires les passeports dans des mandats publics, les autorités publiques pourraient conduire une pratique de référence. A partir d'une certaine taille de projet, ces passeports pourraient également devenir

un critère pour l'obtention de certifications durables. Il est toutefois important de rester attentif aux risques d'obsolescence des formats numériques et à l'impact environnemental du stockage informatique lors du développement de tels outils.

les précédents: présentée plus haut, *Madaster* est une plateforme en ligne qui propose le stockage des informations de bâtiments et de leurs composants. Elle a profité d'un fond de recherche de l'Union européenne. Il s'agit d'une base de données sur les matériaux employés qui cherche à garantir la conservation et l'accessibilité des données. La plateforme a été récemment lancée en Suisse ([Madaster 2020](#)).

normaliser les systèmes de construction réversibles et modulaires

La réutilisation d'un système de construction réversible et modulaire peut être renforcée par l'usage répandu et courant de ce dernier. Comme pour les pièces d'ordinateur, la normalisation de certains types de connexions peut dans une certaine mesure renforcer la transformabilité du projet, la réutilisation et l'interchangeabilité de composants. Le boulonnage des profilés en acier en est un premier exemple. Sans porter préjudice à l'intégration des projets dans leurs sites et contextes ni à la flexibilité architecturale nécessaire à la transposition du concept du bâtiment, la concertation entre producteurs doit permettre une normalisation mesurée de connecteurs réversibles et de certains composants.

les précédents: la construction modulaire dispose d'un potentiel certain pour les environnements urbains en constante évolution. Le système suisse *Variel*, présenté dans la [figure de l'étude de cas XXVIII](#), est un exemple développé dans les années 1950. Pour des exemples plus récents et des renseignements additionnels, *Modulart* est une vaste plateforme d'information sur la construction modulaire, son potentiel de développement et ses applications ([Modulart 2020](#)). Une série d'articles et de projets est présentée sur leur [page internet](#).

ajuster la place de la réversibilité dans les labels de construction durable

Pour commencer, une récente étude sur les méthodes d'analyse de cycle de vie ([De Wolf et al. 2020](#)) a démontré l'inégalité des outils actuels d'analyse dans le cas du réemploi de composants architecturaux et la difficulté d'intégrer les incertitudes liées à la réutilisabilité. L'attribution des impacts entre les cycles de vie n'a, à ce jour, pas été clairement définie et reste un point de discussion important. La distinction et la répartition des impacts entre le premier cycle de vie, les cycles intermédiaires et le dernier cycle doit être un support pour une évaluation plus solide et adapté aux caractéristiques de l'économie circulaire.

Ensuite, l'analyse de six labels de construction durable parmi les plus utilisés en Suisse et à l'international ([suissetec 2016](#)) a montré que les critères de flexibilité et démontabilité étaient inégalement intégrés dans ces systèmes de certification. En parallèle, la majorité d'entre eux fonctionne avec des systèmes de moyenne couplés à des exigences minimums qui traitent peu de réversibilité spatiale et/ou technique. Ainsi, la réversibilité reste souvent un critère facultatif qui peut, dans la plupart des cas, être compensé par la complétion d'un autre ou plusieurs critères de la construction durable. Par conséquent, il est aujourd'hui possible de certifier par un label de durabilité un bâtiment sans que celui-ci ne soit flexible ou adaptable. Un ajustement de la place de la réversibilité dans certains de ces labels pourrait participer à l'accélération de la mise en pratique des principes.

Le label allemand **DGNB** (*Société allemande pour la Construction durable*) est aujourd'hui proposé dans une version adaptée au contexte suisse. Pour obtenir une telle certification, les projets doivent respecter des exigences minimales dans certains critères. Le barème de certification est fonction à la fois du degré de réalisation globale et du degré de réalisation partiel. Par degré de réalisation partiel, on entend un taux minimal de complétion de tous les critères d'un des cinq thèmes, qui sont «qualité socio-culturelle et fonctionnelle», «écologie», «économie», «qualité technique» et «qualité du processus». Par exemple pour obtenir une certification particulière, le score global doit dépasser 80% et score de chaque thème ne peut être inférieur à 65%. Des principes associés à la réversibilité apparaissent dans plusieurs critères (par exemple «facilité de nettoyage des éléments de construction (TEC1.5)», «facilité de démontage et de recyclage (TEC.1.6), ou «documentation pour la gestion durable (PRO1.5)»). Dans le thème «économie», les principes de réversibilité sont directement évalués avec le critère «flexibilité et adaptabilité». Celui-ci vaut 7,5% de la note finale pour toutes les typologies certifiables hormis pour les bâtiments

de production (9,6%). Les paramètres de ce critère portent notamment sur l'efficacité et les dimensions des espaces, les accès verticaux, la flexibilité des plans, structure, partitions intérieures, systèmes techniques et les possibilités d'extension et transformation. *sources*: [DGNB 2020](#), [SGNI 2018](#).

Le label suisse **SNBS** (*Standard Construction durable Suisse*) dérive du standard du même nom. Issu d'une initiative de l'Office Fédéral de l'Énergie (OFEN), ce standard est basé entre autres sur la norme SIA112/1 «Construction durable-Bâtiment» ainsi que les labels *Minergie* et *EcoBau*. Pour obtenir une certification SNBS, le projet doit obtenir une moyenne générale minimale de 4 (moyenne des moyennes des trois domaines) ainsi que remplir l'ensemble des 45 indicateurs individuellement, répartis entre les domaines «société» (17), «économie» (12) et «environnement» (16). Pour les constructions neuves, chaque indicateur doit respecter au minimum 50% des paramètres. Dans le domaine «société», le critère 105.1

«flexibilité et variabilité d'affectation» fait directement référence aux principes de la construction réversible. La première moitié des points est attribuée au concept et la seconde à sa transposition en plan. *sources*: [NNBS 2020a](#), [NNBS 2020b](#), [SNBS 2016](#).

Minergie-ECO est un label suisse issu de la collaboration entre l'Association *Minergie* et *Ecobau*. Cette certification est systématiquement combinée à un autre label *Minergie* (*Minergie*, *Minergie-P* ou *Minergie-A*). Elle repose sur six critères répartis en deux domaines: d'un côté le domaine «santé» avec trois critères et de l'autre le domaine «écologie du bâtiment» avec les critères «concept du bâtiment», «matériaux et processus de construction» et «énergie grise matériaux». Pour obtenir la certification *Minergie-ECO*, toutes les exigences *Minergie* doivent être remplies, tous les critères d'exclusion doivent être atteints, les six critères doivent être complétés à plus de 50% et au minimum deux critères d'un même domaine doivent être remplis à 70% ou plus. Le score d'un critère est obtenu par moyenne des différents indicateurs. Le critère «concept du bâtiment» compte parmi ses 14 indicateurs des points d'évaluation

spécifiques à la conception réversible, comme la «flexibilité d'utilisation offerte par la structure porteuse pour les changements d'affectation» (BNG2.010/GN2.0120), «la flexibilité d'utilisation assurée par la conception de la façade» (BNG2.030), «l'accessibilité des installations techniques verticales/horizontales» (BNG3.010/GNG3.020), «la possibilité de remplacer les appareils et machines de grande taille» (BNG 3.030), «l'aptitude à la déconstruction de l'enveloppe et de la structure secondaire/des installations techniques et de la structure tertiaire» (BNG4.010 et BNG4.020) ainsi que «la possibilité d'agrandir/réserve» (BNG8.010). Les critères de matériaux et d'énergie grises incluent également des points liés à la durabilité des matériaux. *sources*: [Minergie 2020a](#), [2020b](#), [Minergie et eco-bau 2020](#), [Minergie-ECO et eco-bau 2020](#).

Le label **LEED** (*Leadership in Energy and Environmental Design*) est un label développé par l'*U.S. Green Building Council* qui permet de labéliser des projets à partir d'une certaine surface. Pour être certifié, un projet doit répondre à des exigences minimales et gagner un minimum de 40 points sur les 110 disponibles, sans distinction de domaine.

Des certifications plus élevées (argent/or/platine) sont attribuées pour les projets obtenant un nombre de point plus grand. Les indicateurs rapportent différents nombres de crédits en fonction du degré de complétion. En lien avec la réversibilité, les exigences minimales nécessitent de «planifier la gestion des déchets de construction et de démolition» cherchant ainsi à «réduire les déchets de construction et de démolition éliminés dans les décharges et les installations d'incinération en récupérant, réutilisant et recyclant les matériaux». Les indicateurs qui font référence aux principes de la construction réversibles sont beaucoup regroupés dans le domaine «matériaux et ressources». Parmi eux se trouvent par exemple l'indicateur «produits écologiquement préférables» qui intègre la notion de Responsabilité Élargie du Producteur et l'indicateur «réduction de l'impact du cycle de vie des bâtiments» qui soutient la réutilisation d'éléments existants. La certification **LEED** permet aussi d'acquérir des crédits «d'innovation». Parmi eux, le crédit «*design for flexibility*» permet d'obtenir un point additionnel. Le but de ce crédit est de conserver les ressources

liées à la construction en concevant des composants et espaces flexibles et faciles à adapter dans l'avenir et qui fasse usage de toute la durée de vie des composants et systèmes. *sources*: [U.S. Green Building Council 2019](#), [2020a](#), [2020b](#), [2020c](#).

Le label **BREAAM** (*BRE Environmental Assessment Method*) a été développé par l'organisme britannique *Building Research Establishment*. Pour être certifié, un nouveau projet doit répondre à des standards minimums qui concernent 15 critères variés et disposé d'un score global suffisant. Les exigences minimales augmentent en fonction du degré de notation souhaité. Elles ne concernent pas directement la réversibilité hormis le critère «*Wst 01 Construction Waste Management*» («Gestion des déchets de construction») pour lequel un crédit est obligatoire pour obtenir la plus haute certification («*outstanding*»). Parmi les critères non-obligatoires, «*Man 02 Life cycle cost and service life planning*» («coût du cycle de vie et planification de la durée de vie utile») s'adresse notamment à la réparabilité et remplaçabilité de certains composants et «*Wst 06 Functional adaptability*» («capacité d'adapta-

tion fonctionnelle») est un critère dont le but est d'identifier et encourager les prédispositions prises pour s'adapter aux futurs changements d'utilisation du bâtiment. Ce critère ne peut être évalué pour les bâtiments résidentiels. *sources*: BRE 2017, 2016.

qui peut agir? Les organismes en charges de labels sont en bonne position pour donner une place plus adaptée à la réversibilité technique ainsi qu'à la réversibilité spatiale. Une inclusion plus importante de ces aspects dans les labels doit pouvoir compter sur une méthode d'évaluation accessible, simple d'utilisation, contextuelle et objective. Le sous-point suivant ("poursuivre la recherche sur l'évaluation de la réversibilité") revient sur ces enjeux.

poursuivre la recherche sur l'évaluation de la réversibilité

Utiles pour établir des objectifs, comparer des variantes, reconnaître les qualités et faiblesses d'un projet, les indicateurs de réversibilité font l'objet de recherches depuis les années 2000. Ces travaux ont souligné les difficultés de quantifier objectivement les caractéristiques des projets, via une méthode accessible qui permette de comparer

projets et indicateurs. Il est nécessaire de poursuivre ces recherches pour des outils d'évaluation complets, aptes à intégrer le contexte local, objectifs et faciles d'utilisation. Ceux-ci soutiendront l'intégration de la réversibilité de manière objective dans les labels de construction durable.

En 2001 et 2002, deux systèmes d'évaluation ont été développés pour quantifier la réversibilité technique uniquement. En 2001, la chercheuse Catarina Thormark (Thormark 2001) a proposé une grille d'indicateurs répartis en fonction du but de la déconstruction (à savoir réutiliser, recycler ou incinérer) avec des scores établis en fonction du degré de complétion du paramètre. Celle-ci soulignait alors déjà les difficultés de pondération et de comparaison entre les paramètres. En 2002, Paola Sassi (Sassi 2002) publiait un autre système d'évaluation de techniques constructives. Le système proposait une pondération plus importante des critères techniques par rapport aux

critères économiques. L'outil proposait de calculer une moyenne des scores de tous les paramètres dans le but de comparer les solutions constructives et d'aider la prise de décision lors du choix d'un matériau et de sa technique de pose.

En 2006, la chercheuse Elma Durmisevic (Durmisevic 2006) présentait un premier modèle multi-scalaire d'«évaluation de la capacité de transformation». Ce modèle avait pour but d'évaluer à la fois l'indépendance et l'interchangeabilité pour chaque échelle d'application des principes. Le modèle, qui proposait d'évaluer un projet jusqu'à son échelle la plus grande de système, débouchait sur une méthode de pondération hautement détaillée. En 2019, dans le cadre du projet de recherche «*Buildings as Material Banks*», Elma Durmisevic publiait les résultats d'une recherche pour un simulateur virtuel de réversibilité (Durmisevic 2018). Le but de celui-ci était de fournir une aide à la décision lors des phases initiales de conception et ainsi de proposer des améliorations pour augmenter la réversibilité spatiale et technique du projet.

En 2006, l'Association Canadienne de Normalisation (Canadian Standards Association et Dwayne 2006) discutait des possibilités et difficultés de quantifier l'ensemble des critères de démontabilité, recyclabilité, réutilisabilité et adaptabilité. Le rapport, réalisé comme un support à la conception, ne proposait pas de système d'évaluation qui pût rendre comparables les 14 principes retenus. Le travail, qui concernait toutes les échelles, suggérait à la place des méthodes d'évaluation propres à chaque principe, usant de différentes formes d'indicateurs: questions fermées, pourcentages, échelles de complétion, etc.

Une proposition complémentaire consisterait à former des groupes humains à l'appréciation et l'évaluation de la réversibilité d'un bâtiment. Avec une expérience et une formation appropriée, ces personnes devraient disposer des aptitudes nécessaires à l'évaluation du potentiel de longévité d'un bâtiment et de ses composants au cas par cas. Cette

approche permettrait d'apprécier les particularités contextuelles et architecturales de chaque projet, d'inclure dans l'évaluation l'intégration des ressources déjà disponibles sur un site et de ne pas marginaliser des approches émergentes de construction durable.

soutenir les modèles économiques circulaires

La construction réversible invite à développer de nouveaux modèles économiques circulaires. Ceux-ci peuvent concerner, par exemple, les activités de location ou de vente avec service de reprises des matériaux/composants, les activités de service pour une fonction du bâtiment (ventilation, chauffage, etc.), les activités de gestion de l'information ou encore les nouveaux modèles d'occupation alternée de locaux. Un soutien financier pour la définition et le démarrage de nouveaux modèles et/ou une adaptation fiscale de ces activités en lien direct avec l'économie circulaire pourrait leur servir de levier.

des exemples: voir "adapter la fiscalité pour les activités de déconstruction".

systématiser la déconstruction sélective

Avec l'objectif global de diminuer les déchets de chantier et de systématiser une utilisation prolongée et multiple des matériaux et composants, les recommandations pour la construction réversible doivent être complétées par la mise en application des stratégies de développement énoncées pour la déconstruction sélective.

Pour rappel, ces stratégies sont:

- › mettre en place des formations sur la déconstruction sélective;
- › inclure la déconstruction sélective et le réemploi dans les marchés publics;
- › adapter la fiscalité pour les activités de déconstruction;
- › soutenir l'innovation.

- Addis W., Schouten J. / 2004** Design for reconstruction, principles of design to facilitate reuse and recycling-C607. Construction Industry Research & Information Association, Londres.
- ADEME / 2017** Les filières à responsabilité élargie du producteur, Panorama. ADEME et le Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, Angers.
- Aeternum / 2020** Aeternum [en ligne]. URL <https://www.aeternum-tech.com> (consulté le 13.10.20).
- Archiplein / 2020** PLO- Pierre massive [en ligne]. Archiplein.com. URL <http://www.archiplein.com/index.php?p=projects.show&id=115> (consulté le 06.07.20).
- architectureguide / 2019** Office Building XX, XX architecten, Delft [en ligne]. URL http://www.architectureguide.nl/project/list_projects_of_architect/arc_id/1942/prj_id/1830 (consulté le 13.12.19).
- Architizer / 2013** Martini Hospital [en ligne]. Architizer. URL <https://architizer.com/projects/martini-hospital-2/> (consulté le 11.12.20).
- Azcarate Aguerre J.F., Klein T., den Heijer A.C., Vrijhoef R., Ploeger H.D., Prins M. / 2018** Façade Leasing: Drivers and barriers to the delivery of integrated Façades-as-a-Service. Real Estate Research Quarterly.
- Barles S. / 2014** Le métabolisme urbain, dans: Matière grise: matériaux/réemploi/architecture. Pavillon de l'Arsenal, Paris, 41–46.
- BAZED / 2020a** XX Office Building [en ligne]. BAZED. URL <https://www.bazed.fr/projet-exemplaire/xx-office-building> (consulté le 05.07.20).
- BAZED / 2020b** Intelligent Workplace at Carnegie Mellon University [en ligne]. BAZED. URL <https://www.bazed.fr/projet-exemplaire/intelligent-workpalce-at-carnegie-mellon-university> (consulté le 05.07.20).
- Billiet L., Ghyoot M. / 2014** La brique belge, de réemploi, dans: Matière grise: matériaux/réemploi/architecture. Pavillon de l'Arsenal, 205–210.
- Bohlin Cywinski Jackson / 2020** Intelligent Workplace [en ligne]. URL <https://www.bcj.com/projects/intelligent-workplace> (consulté le 07.07.20).
- Boosting platform voor koplopers in bouwinnovatie / 2019** Totaalverslag Activiteit 20 jaar Project XX [en ligne]. URL <https://boosting.nl/news/show/id/1303> (consulté le 05.07.20).
- Boothroyd G., Alting L. / 1992** Design for Assembly and Disassembly. CIRP annals 41, 625–636.
- Braendstrup C. / 2017** Conceptual design of a demountable, reusable composite flooring system: Structural behaviour and environmental advantages. Mémoire de Master. TU Delft.
- Braunart M., McDonough W. / 2011** Cradle to Cradle, Créer et recycler à l'infini. Editions Alternatives- Paris.
- BRE / 2017** Scoring and rating [en ligne]. URL https://www.breem.com/communitiesmanual/content/00_introduction/05_scoring_and_rating_proposals.htm (consulté le 07.07.20).
- BRE / 2016** BREEAM International New Construction 2016, Technical Manual, SD233 2.0.
- Brussels Environment, Capelle T / 2019** D14 Testing BAMB Results Through Prototyping and Pilot Projects (No. D14). Buildings As Material Banks.
- Brzeski S, Sugden D, Thornton J, Turzynski J / 1994** Engineering an opera house: the new Glyndebourne. The Arup Journal 29, 3–9.
- Build-Unbuild-Repeat / 2020** [en ligne]. URL <https://www.smartlivinglab.ch/fr/projects/bur-build-unbuild-repeat/> (consulté le 13.10.20).
- Canadian Standards Association, Dwayne T., 2006** Guideline for design for disassembly and adaptability in buildings.
- Canal architecture, Rubin P. (Eds.) / 2017** Construire Réversible. Paris.
- cepezed / 2020a** The Green House Utrecht [en ligne]. cepezed.nl. URL <https://www.cepezed.nl/nl/project/the-green-house/22172/> (consulté le 05.07.20).
- cepezed / 2020b** Tijdelijke Rechtbank Amsterdam.
- Cheshire D. / 2016** Building Revolutions : Applying the Circular Economy to the Built Environment. RIBA Publishing, Newcastle upon Tyne.

- Conseil d'Etat / 2017** Message 2017-DAEC-6 du Conseil d'Etat au Grand Conseil accompagnant le projet de décret relatif à l'acquisition des immeubles de la société Elanco.
- Contec / s.d.** Feuille technique Contec fix.
- Cornell AAP / 2020** ARCH 4605/6605 Design for Disassembly [en ligne]. Cornell AAP Architecture Art Planning. URL <https://aap.cornell.edu/arch-46056605-design-disassembly> (consulté le 07.07.20).
- Crowther P. / 1999** Design for Disassembly: An Architectural Strategy. Design for Sustainability. Proceedings of the 1998 QUT Winter Colloquium, 27–33.
- Crowther P. / 1999** Design for Disassembly to Recover Embodied Energy. The 16th International Conference on Passive and Low Energy Architecture.
- Crowther P. / 1999** Historic Trends in Building Disassembly.
- DARCH / 2020** Resource City [en ligne]. ETHzürich Department of Architecture. URL <https://arch.ethz.ch/news-und-veranstaltungen/lehre-forschung/ressource-stadt.html> (consulté le 07.07.20).
- Davies C. / 1994** Glyndeborune. The Architectural Review 194, 35–49.
- Debacker W., Manshoven S., Peters M., Ribeiro A., De Weerd Y. / 2017** Circular Economy and Design for Change within the Built Environment: Preparing the Transition. International HISER Conference on Advances in Recycling and Management of Construction and Demolition Waste, 114–117.
- de Danschutter M., Noomen P.A., Oostdam B. / 2017** Tijdelijke Rechtbank Amsterdam (3): Constructief ontwerp, Tijdelijke rechtbank met permanent karakter. Bouwen meet Staal 257, 14–19.
- De Wolf C., Hoxha E., Fivet C. / 2020** Comparison of environmental assessment methods when reusing building components: A case study. Sustainable Cities and Society, 61, 102322.
- DGNB / 2020** New construction, Building criteria set, Version 2020 international.
- Division déchets et matières premières / 2006** Directive pour la valorisation des déchets de chantier minéraux. OFEV, Berne.
- Durmisevic E. / 2006** Transformable Building Structures, Design for disassembly as a way to introduce sustainable engineering to building design & construction. Thèse de doctorat. TU Delft.
- Durmisevic E. / 2018** Reversible building design, dans: Designing for the Circular Economy. Routledge, New York, 344–359.
- Earle J., Ergun D., Gorgolewski M. / 2014** Barriers for Deconstruction and Reuse/Recycling of Construction Materials in Canada. Barriers for Deconstruction and Reuse/Recycling of Construction Materials, 20–37.
- Ellen MacArthur Foundation / 2020** Philips & Tuntoo, Selling light as a service [en ligne]. URL <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/case-studies/selling-light-as-a-service> (consulté 05.07.20).
- Ellen MacArthur Foundation / 2016** Circular in the Built Environment: Case Studies, A compilation of Case Studies from the CE100.
- EPFL / 2020** Building design in the circular economy [en ligne]. URL <https://edu.epfl.ch/coursebook/fr/building-design-in-the-circular-economy-AR-497> (consulté le 07.07.20).
- FCBA, Kouyoumji J.-L. / 2015** DEMO-DULOR: une démarche de mixité des matériaux pour favoriser la démontabilité.
- Fivet C. / 2019** Design of Load-Bearing Systems for Open-Ended Downstream Reuse. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 225, 012031.
- Fivet C., Muresan A., Redaelli D., Brütting J. / 2020** Ultra-versatile slab-and-column system for buildings. EP119206090.
- Frisch E. / 2014** Multifonctionnel – nouvelles dimensions pour planchers d'étage. Steeldoc 01+02.
- Froidevaux C. / 2019** Deux exemples aux Pays-Bas, Construire, déconstruire, reconstruire. Steeldoc 02/19. Zurich, 26–30.
- Fuster A., Gibb A., Austin S., Beadle K., Madden P. / 2009** Adaptable buildings: Three non-residential case studies. eds. H. Wamelink, M. Prins & R. Geraedts, TU Delft, Netherlands 5–9.
- GAAGA / 2020a** CiWoCo 1.0, circular live-work housing block. Leiden.
- GAAGA / 2020b** CiWoCo Amsterdam [en ligne]. gaaga.nl. URL <https://www.gaaga.nl/projecten/ciwoco-amsterdam> (consulté le 06.07.20).

- GESDEC / 2009** Valorisation des déchets minéraux de chantier, Fiche d'information GESDEC n°5. Service de géologie, sols et déchets, Office cantonal de l'environnement, République et canton de Genève).
- Gilliard D. / 1992** Le théâtre de Vidy à Lausanne. Une construction provisoire faite pour durer? *FACES* 26.
- Guldager Jensen K., Sommer J. / 2019** Building a Circular Future - 3rd edition. Danish Environmental Protection Agency.
- Gorgolewski M. / 2017** Resource Salvation: The Architecture of Reuse. John Wiley & Sons.
- Grandjean E. / 2014** Comment le mobilier USM a été inventé [en ligne]. Bilan. URL https://www.bilan.ch/entreprises/comment_le_mobilier_usm_a_ete_invente (consulté le 11.12.20).
- Grimshaw / 2020** igus Headquarters [en ligne]. URL <https://grimshaw.global/projects/igus-headquarters/> (consulté le 06.07.20).
- Guequierre N.M.J., Kristinsson J. / 1999** Product features that influence the end of a building. 8th international Conference on Durability of Building Materials and Components, 2021–2032.
- Guldager K., Sommer J., Wingsø Falk N., Krusholm Nielsen G., Hastrup A., Sørensen H., Merrild H., Ostergaard Christensen C., Kristensen R., Vesterager Gothelf S. / 2016** Building a Circular Future. Danish Environmental Protection Agency.
- Guy B., Ciarimboli N. / 2008** DfD Design for Disassembly in the built environment: a guide to closed-loop design and building. Hamer Center for Community Design, State College.
- GXN / 2020** Information- Circle House Demonstrator [en ligne]. gxn.3xn.com. URL <https://gxn.3xn.com/project/circle-house-demonstrator> (consulté le 06.07.20).
- GXN, Responsible Assets / 2018** Circle House- Denmark's first circular housing project.
- Habraken N.J. / 2005** Open Building as a condition for industrial construction. ISARC2003 The Future Site, 37–42.
- Habraken N.J. / 1961** Supports: an alternative to mass housing, Second English Edition 1999. Urban International Press.
- Hamburger Umweltinstitut / 2018** Maison du projet de la Lainière [en ligne]. c2c-buildings.net. URL <https://c2c-buildings.net/projects/maison-du-projet-de-la-lainiere/> (consulté le 07.07.20).
- Hebel D., Chladek P., Fibicher A., Heisel F., Jorisch P., Rufe H.-C., Wisniewska M. / 2017** BUILDING FOR DISASSEMBLY- Design Studio Spring 2016- Professorship Dirk E. Hebel- ETH Zürich.
- Heinrich M., Lang W. / 2019** Materials Passport- Best Practice. Technische Universität München et BAMB.
- Hirt M.A., Crisinel M. / 2005** Conception des charpentes métalliques. PPUR Presses Polytechniques Universitaires Romandes.
- Huuhka S., Naber N., Asam C., Caldenby C. / 2019** Architectural Potential of Deconstruction and Reuse in Declining Mass Housing Estates. NA 31.
- igus / 2019** The flexible igus® factory by Nicholas Grimshaw [en ligne]. URL <https://www.igus.eu/info/company-flexible-igus-factory-in-cologne> (consulté le 06.07.20).
- Institut MECD / n.d.** Démodolor: les systèmes constructifs de gros œuvre démontables et valorisables.
- Jacquier F. / 2020** Immeubles en pierre massive, entretien par Kùpfer C.
- Jacquier F., Leroux M. / 2019** L'aventure de la construction en pierre massive, entretien par Sonnette S. Tracés 07.
- Kendall S. / 2017** Four Decades of Open Building Implementation: Realising Individual Agency in Architectural Infrastructures Designed to Last. *Architectural Design* 87, 54–63.
- Kendall S., Teicher J. / 2000** Residential Open Building. E & FN Spon, New York.
- Kihlstedt F.T. / 1984** The Crystal Palace. *Scientific American* 251, 132–143.
- Le Off du DD 2019 / 2019** Maison du projet de la Lainière (Roubaix)- 14 minutes [en ligne]. URL <https://www.youtube.com/channel/UC-TE3oMVgPqZ-hvySbHY97FA/featured> (consulté le 06.07.20).
- Leupen B. / 2006** Frame and Generic Space. 010 Publishers, Rotterdam.

- Luscuere L.M. / 2016** Materials Passports: Optimising value recovery from materials. Proceedings of the Institution of Civil Engineers- Waste and Resource Management 170, 25–28.
- Madaster / 2020** Circular innovation: Swiss Madaster platform for real estate is launched [en ligne]. URL <https://www.madaster.com/en/news-room/press-releases/launch-madaster-switzerland> (consulté le 11.12.20).
- Minergie® / 2020a** Certification Minergie online [en ligne]. Minergie® Online Plattform. URL <https://online.minergie.ch/home> (consulté le 07.07.20).
- Minergie® / 2020b** Le complément ECO [en ligne]. MINERGIE Schweiz. URL <https://www.minergie.ch/fr/certifier/eco/> (consulté le 07.07.20).
- Minergie®, eco-bau / 2020** Règlement du produit MINERGIE-ECO® Version 2020.1.
- Minergie-ECO, eco-bau / 2020** Catalogue de prescriptions Minergie-ECO, Nouvelles constructions Administration, Version du justificatif 1.5 ME-ECO Online 2020.
- Modulart / 2020** Le laboratoire de la construction modulaire. Modulart [en ligne]. Modulart. URL <https://www.modulart.ch/fr/la-mission/> (consulté le 22.10.20).
- Molenaar C. / 2013** The colours at Martini Hospital in Groningen. Hospital Build & Infrastructure 1, 16–18.
- Moore R. (Ed.) / 1993** Structure, Space and Skin: The Work of Nicholas Grimshaw & Partners. Phaidon Inc Ltd, London.
- Morgan C., Stevenson F. / 2005** Design for Deconstruction- SEDA Design Guides for Scotland: No. 1. Scottish Ecological Design Association.
- Mulhall D., Hansen K., Luscuere L., Zanatta R., Willems R., Boström J., Elfström L., Heinrich M., Lang W. / 2017** Framework for Materials Passports. Buildings as Materials Banks (BAMB).
- Nauser M. / 2018** La politique climatique suisse, Mise en œuvre de l'Accord de Paris. OFEV, Berne.
- NNBS / 2020a** Standards et labels de construction durable [en ligne]. NNBS. URL <https://www.nnbs.ch/fr/standards-et-labels> (consulté le 07.07.20).
- NNBS / 2020b** Onlinetool SNBS Bâtiment [en ligne]. NNBS. URL <https://www.nnbs.ch/fr/online-tool-snbs-batiment> (consulté le 7.7.20).
- Nordby A.S. / 2009** Salvageability of building materials, Reasons, criteria and consequences regarding architectural design that facilitate reuse and recycling. Thèse de doctorat. NTNU, Trondheim.
- OFEV / 2020** Rapport à l'attention du Conseil fédéral- Mesures de la Confédération pour préserver les ressources et assurer l'avenir de la Suisse (économie verte). Confédération suisse, Berne.
- Paananen T., Suur-Askola P. / 2018** In Search of a Bright, Circular Future! Peikko and the Circular Economy, Practical Considerations. Peikko Group Corporation, Lahti.
- Pintos P. / 2019** The Green House / architectenbureau cepezed [en ligne]. ArchDaily. URL <https://www.archdaily.com/915728/the-green-house-architectenbureau-cepezed> (consulté le 05.07.20).
- Post J. / 2019** Als je geen afval meer mag storten, krijgt een gebouw een andere waarde. Bouwwereld 9, 51–55.
- Post J., Klomp H. / 1999** Levensduur = Gebruiksduur, XX, Een Gebouw als Prototpye can eenn nieuw Milieuconcept, Stuurgroep Experimenten Volkshuisvesting. Rotterdam.
- RAU / 2020** Gemeentehuis Brummen [en ligne]. URL <https://www.rau.eu/portfolio/gemeentehuis-brummen/> (consulté le 7.5.20).
- Réseau CTI / 2015** Nouveaux systèmes constructifs Démontables en Rénovation ou déconstruction pour valorisation et recyclage simplifiés et attractifs des produits et matériaux - Projet DEMODULOR- Synthèse non confidentielle. ADEME, Paris.
- Salama W. / 2017** Design of concrete buildings for disassembly: An explorative review. International Journal of Sustainable Built Environment 6, 617–635.

- Sassi P. / 2002** Study of current building methods that enable the dismantling of building structures and their classifications according to their ability to be reused, recycled or downcycled. The International Conference for Sustainable Building, Oslo.
- SEED architect / 2020** MARTINI ZIEKENHUIS [en ligne]. URL <https://seedarchitects.nl/en/projects/icon-martini-ziekenhuis/> (consulté le 07.07.20).
- SGNI / 2018** Planifier, construire, utiliser et exploiter de façon durable. Les bâtiments certifiés de la SGNI ouvrent la voie. DGNB Système suisse.
- SNBS / 2016** SNBS 2.0 Bâtiment, Fiches-critères Types d'affectations: bureaux, administration, logements, commerces et services au rez-de-chaussée.
- Sotayo A., Bradley D.F., Bather M., Oudjene M., El-Houjeyri I., Guan Z. / 2020** Development and structural behaviour of adhesive free laminated timber beams and cross laminated panels. Construction and Building Materials 259, 119821.
- Stahel W.R. / 1982** The product life factor. An Inquiry into the Nature of Sustainable Societies: The Role of the Private Sector (Series: 1982 Mitchell Prize Papers), NARC.
- Storey J.B., Pedersen M. / 2014** Overcoming the barriers to deconstruction and materials reuse in New Zealand. Barriers for deconstruction and reuse/recycling of construction materials, 130–145.
- Structural Timber Association / 2020** Floor Systems [en ligne]. URL <https://www.structuraltimber.co.uk/timber-systems/floor-systems> (consulté le 05.07.20).
- suissetec / 2016** Notice technique, Principaux labels et standards de construction sur le marché suisse. Association suisse et liechtensteinoise de la technique du bâtiment, Zurich.
- Thormark C. / 2001** Recycling potential and design for disassembly in buildings. Thèse de doctorat. Lund Institute of Technology.
- Thornton J.A., Turzynski J.G. / 1997** A new Glyndebourne Opera House. The Structural Engineer 75, 17–25.
- Tingley D.D., Davison B. / 2011** Design for deconstruction and material reuse. Proceedings of the institution of civil engineers-energy 164, 195–204.
- Tschopp Holzbau AG / 2018** Bresta, l'élément de construction en bois pour plafonds, murs et toits.
- Tschopp Holzbau AG / 2020** BRESTA® [en ligne]. URL <https://www.tschopp-holzbau.ch/2/BRESTA> (consulté le 05.07.20).
- TU Delft / 2020** IO3075- Towards Circular Product Design [en ligne]. TU Delft. URL <https://www.tudelft.nl/studenten/faculteiten/io/praktische-zaken/aanmelden-voor-vakken/keuzevakken-in-de-bachelor/towards-circular-product-design/> (consulté le 11.12.20).
- U. Schärer Söhne / 1965** Rohrverbindung für den Gestellbau- Hauptpatent. 11472/65.
- U.S. Green Building Council / 2020a** Innovation: Design for flexibility [en ligne]. URL <https://www.usgbc.org/credits/new-construction-schools-new-construction-retail-new-construction-data-centers-new-constru-1> (consulté le 07.07.20).

U.S. Green Building Council

/ 2020b LEED rating system [en ligne]. URL <https://www.usgbc.org/leed> (consulté le 07.07.20).

U.S. Green Building Council

/ 2020c LEED Credit library [en ligne]. URL <https://www.usgbc.org/credits> (consulté le 07.07.20).

U.S. Green Building Council

/ 2019 LEED v4 for BUILDING DESIGN AND CONSTRUCTION.

USM / 2020 Roots In Architecture [en ligne]. URL <https://www.usm.com/en/commercial/about-usm/roots-in-architecture/> (consulté le 07.07.20).

Valeri P., Guaita P., Baur R., Fernández Ruiz M., Fernández-Ordóñez D., Muttoni A. / 2020 Textile reinforced concrete for sustainable structures: Future perspectives and application to a prototype pavilion. Structural Concrete.

Valeri P., Guaita P., Baur R., Fernández Ruiz M., Muttoni A. / 2019 The potential of textile reinforced concrete for design of innovative structures, in: Proc. of the International Fib Symposium on Conceptual Design of Structures.

van Deelen P., Orsel H., Pauw M.

/ 2017a Tijdelijke Rechtbank Amsterdam (4): Uitvoering, Het bouwpakket. Bouwen meet Staal 257, 20–21.

van Deelen P., Orsel H., Pauw M.

/ 2017b Tijdelijke Rechtbank Amsterdam (2): Tenderfase, Warmlopen voor circulariteit. Bouwen meet Staal 257, 12–13.

Vilela A. / 2018a Architecture without Applause, The Manufactured Work of João Filgueiras Lima, Lelé. Thèse de doctorat. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.

Vilela A. / 2018b Education on the production chain: Lelé's transitory schools in Brazil. 6th International Congress on Construction History (6ICCH 2018), 1329–1337.

VinkBouw / 2020 BSH 20 E [en ligne]. Vink Bouw. URL <https://www.vinkbouw.nl/> (consulté le 06.07.20).

Whitby M. / 1994 STRUCTURE: Glyndebourne's innovative structure brilliantly exploits traditional materials. The Architectural Review 194, 50–53.

Wind H. / 2019 Demontabele verbindingen. Bouwwereld 75–77.

Zeegers A., Hermans M., Ang G.

/ 2001 In search for design criteria for the delivery of industrialised, flexible and demountable building: a performance based model. CIB World Building Congress, 335–344.

Zerbi S. / 2019 Poser la première pierre, entretien par Sonnette S. Tracés 07.

Zweifel J. / 1969 Centre de Recherches Agricoles in St. Aubin (Fribourg). Bauen + Wohnen 23, 242–256.

Zweifel J. / 1996 Jakob Zweifel Architekt, Schweizer Moderne der zweiten Generation. Verlag Lars Müller, Zurich.





Déconstruction sélective et construction réversible, c'est-à-dire le fait de garantir d'une part le démontage d'une construction pré-existante ou future et d'autre part la potentielle valorisation de ses espaces et éléments au-delà d'un premier cycle d'utilisation de ladite construction, sont **deux conditions nécessaires – mais non suffisantes** – à l'adoption, par l'industrie de la construction, d'une économie circulaire durable complète. Opposées aux pratiques usuelles de démolition et reconstruction, ces deux approches encouragent une attitude sécuritaire et responsable vis-à-vis des ressources et des écosystèmes naturels. A leur échelle, elles proposent une meilleure valorisation des espaces et éléments de construction en fin de cycle d'utilisation, une diminution drastique des déchets de démolition, une atténuation de l'extraction de matières premières, une contribution à la réduction du réchauffement climatique de source anthropique et une garantie de sécurité d'emploi locale.

L'application d'une économie circulaire durable requiert avant toute chose, **l'utilisation et le maintien** de la construction et ses composants en l'état, le plus longtemps possible, c'est-à-dire **l'absence de démolition**, grâce à une **utilisation prolongée**, un entretien adapté et, si besoin, des travaux de rénovation ou transformation. L'application des principes de la construction techniquement et spatialement réversible doit participer à cette nécessité en augmentant autant que possible la durabilité des matériaux employés, leur facilité d'entretien et les

possibilités de transformations successives de l'espace, alors que l'application des principes de la déconstruction sélective doit permettre autant que possible de valoriser les éléments de construction lorsque la démolition est le dernier recours possible.

Déconstruction sélective et construction réversible se profilent comme deux stratégies dont la faisabilité technique, l'application effective et dans une certaine mesure les risques économiques sont entièrement **contrôlables aujourd'hui**. Alors que la déconstruction sélective est nécessaire au **réemploi présent** du composant lorsque la démolition est inévitable et la construction réversible est essentielle à l'usage prolongé de l'espace et au **réemploi futur** des composants, ces réemplois – autres boucles d'une économie circulaire – ne seront effectifs que si le composant démontre son utilité dans la nouvelle application.

Par ailleurs, maintien dans le temps et garantie de réemploi sont extrêmement dépendants de **l'obsolescence fonctionnelle et technique** du système construit et de ses composants, sur des périodes de temps trop longues pour être prédites de manière objective. Au vu de l'histoire de la construction et de l'évolution passée des modes d'habiter, il semble pertinent de postuler d'une part, que tôt ou tard, malgré les efforts de réversibilité, un système construit peut devenir en tout ou en partie obsolète, et d'autre part que de nombreux compo-

sants déconstruits resteront obsolètes, n'intéresseront pas d'acquéreurs de réemploi, et aboutiront tôt ou tard dans l'une des ultimes filières de valorisation de composants en fin de vie: recyclage, incinération avec récupération d'énergie, ou enfouissement.

De plus, plusieurs inconnues freinent encore l'application d'un réemploi à grande échelle, comme par exemple celles liées aux nouveaux processus d'acquisition ou aux certifications de performance, le tout devant encore être testé, légiféré, et finalement adopté.

Par ailleurs, une application systématique de déconstruction sélective et construction réversible peut constituer **une épée à double tranchant**. En effet, le premier objectif d'une économie circulaire durable, consistant à garantir le maintien dans le temps de tout produit, prohibe tout potentiel accroissement du taux de renouvellement du bâti, entre autres pour limiter les émissions de gaz à effets de serre, les déchets résiduels et les demandes en matières premières inhérents aux processus de transformation. Des techniques plus réversibles de déconstruction et construction ne doivent pas augmenter le taux de renouvellement du bâti mais leur diffusion constituer un contexte favorable pour de nouveaux modèles économiques de revalorisation et réemploi. Les pouvoirs publics et les consommateurs auront probablement ici un rôle majeur afin de valoriser davantage l'utilisation prolongée du produit que son sous-cyclage prématuré.

Le présent recueil n'est **ni conclusif, ni définitif**. Il n'est pas conclusif car il amène autant de questions que de réponses. Il a été conçu comme une porte d'entrée pour tou-te-s les acteurs et actrices de la construction désireux de réduire, à la source, la production de déchets de bâtiment. C'est un document qui sélectionne, rassemble et redirige vers les nombreuses références écrites et construites sur le sujet. C'est un document qui veut autant provoquer des réactions qu'offrir des solutions.

Aussi, ce recueil n'est pas définitif car il ne constitue qu'un premier panorama des principes et pratiques actuels de déconstruction sélective et de construction réversible. Issu d'une recherche bibliographique poussée et fort d'une trentaine d'études de cas, principalement récents et situés sur le territoire Suisse et nourris d'entretiens et de visites sur sites, ce document cherche à passer en revue tous les éléments du bâtiment et à identifier l'ensemble des opportunités et défis les concernant. Cependant, la sélection des principes et études de cas rassemblés ici reste subjective et incomplète. Malgré tous les efforts mis dans sa conception et son caractère pionnier, ce recueil reste lacunaire.

Deux raisons expliquent ces caractères non-conclusif et non-définitif. Tout d'abord, il est probable que de nombreuses pratiques de déconstruction sélective ou de construction réversible n'aient pas été citées ici car elles sont peu ou pas diffusées. L'histoire de la construction avant industrialisation nous apprend en effet que de telles pratiques étaient généralement banales, tombaient tellement sous le sens qu'elles faisaient rarement l'objet d'une mention écrite ou d'une médiatisation. Il en est probablement de même aujourd'hui.

La seconde raison est que le champ des possibles de déconstruction sélective et de construction réversible est en grande partie encore à explorer. De nombreuses techniques et pratiques restent à inventer, à perfectionner, et à valider. De telles innovations pourront s'appuyer sur au moins trois nouvelles prises de conscience dans le chef des différents acteurs et actrices, et en particulier des concepteurs et conceptrices du bâtiment: la **légitimation du projet de déconstruction (et de réemploi) comme acte créatif** à part entière; la **nécessité d'une intégration intime des aspects constructifs** tout au long, et donc dès le début, du projet de conception ou de transformation; et la **valeur primordiale d'une critique du projet** en cours d'élaboration **vis-à-vis de son comportement et de son utilisation** durant son futur cycle de vie et au-delà.

L'application des principes d'une économie circulaire dans le bâtiment est une affaire de tous les jours. Elle concerne tous les composants du bâti, à des rythmes de réparation et de remplacement parfois très différents. Elle concerne tou-te-s les acteurs et actrices, depuis les occupant-e-s utilisant et usant le produit quotidiennement, aux promotrices/promoteurs immobilier ou urbanistes projetant des opérations de transformation à grande échelle, en passant par les fabricant-e-s de meubles ou de produits de construction, les architectes spécifiant les détails techniques d'une rénovation ou nouvelle construction, et les pouvoirs publics légiférant l'accès, la mise en place, l'utilisation, et le retrait du matériau.

Il est à espérer que cette évolution de la pratique se fasse le plus rapidement possible, de sorte à relever les défis environnementaux locaux liés à la gestion des déchets de construction, et de sorte à contribuer de manière efficace à la mitigation globale du réchauffement climatique.

lexique

la déconstruction sélective

la construction réversible

la réversibilité
la réversibilité spatiale
la réversibilité technique

l' économie circulaire
le circuit court
le cycle de vie
la durée de vie
la longévité
l' interchangeabilité
la construction durable
l' obsolescence fonctionnelle
et technique

l' inventaire
le «diagnostic ressource»
le passeport des matériaux/bâtiments
le démontage
la bourse de matériaux / la «ressourcerie»

l' utilisation
le maintien
le réemploi, la réutilisation
le recyclage
le sous-cyclage
valoriser
la filière exutoire

le matériau
le composant
la connexion
le système
le bâtiment

la couche (de Brand 1994)

l' ameublement intérieur
la partition et le revêtement intérieur
les éléments techniques
l' enveloppe
le gros œuvre
le site

der selektive Rückbau

die rückbaubare Konstruktion

die Rückbaubarkeit
die räumliche Rückbaubarkeit
die technische Rückbaubarkeit

die die Kreislaufwirtschaft
der lokale Kreislauf
der der Lebenszyklus
die die Lebensdauer
die die Langlebigkeit
die die Austauschbarkeit
das nachhaltige Bauen
das funktionelle und
technische Veralten

das Inventar
die „Ressourcendiagnose“
der Bauteil-/Gebäudepass
das Abbauen
die Bauteilbörse

die Nutzung
die Wartung
die Wiederverwendung
das Recycling
das Downcycling
aufwerten
die Verwertungsstrategie

das Material / das Bauteil
die Komponente
die Verbindung
das System
das Gebäude

die Schicht (nach Brand 1994)

die Einrichtung und die Möblierung
die Trennwand und die Innenverkleidung
die Gebäudetechnik
die Gebäudehülle
die Tragkonstruktion
der Standort

abréviations et acronymes

ADEME Agence de la transition écologique	EEA European Environment Agency - Agence européenne pour l'environnement	OFEV Office Fédéral de l'Environnement suisse
BAMB Buildings as Material Banks- Les bâtiments comme banques de matériaux	EMAF Ellen MacArthur Foundation	OLED Ordonnance sur les déchets
BSA-FAS Fédération des Architectes Suisses	EPFL École Polytechnique Fédérale de Lausanne	OSB Oriented stand board- panneau de grandes particules orientées
BIM Building Integrated Model – Modélisation des données du bâtiment	ETHZ Eidgenössische Technische Hochschule Zürich- École Polytechnique Fédérale de Zurich	PVC polychlorure de vinyle
BRE Building Research Establishment	FCRBE Facilitating the circulation of reclaimed building elements in Northwestern Europe- Faciliter la circulation des éléments de construction récupérés dans le nord-ouest de l'Europe	RPE responsabilité élargie du producteur
BTP bâtiment et travaux publics	HEA poutrelle métallique européenne à larges ailes	SIA Société suisse des ingénieurs et architectes
BUR Build-Unbuilt-Repeat	IEA International Energy Agency- Agence internationale de l'énergie	SNBS Standard Nachhaltiges Bauen Schweiz- Standard Construction durable Suisse
CFF Chemins de fer fédéraux suisses	IPE poutrelle métallique normale européenne	SXL Structural Xploration Lab- Laboratoire d'Exploration Structurale
CHD Circle House Demonstrator	ISO International Organization for Standardisation- Organisation internationale de la normalisation	TRC textile reinforced concrete- béton renforcé par du textile
CIO Comité Olympique International	LEED Leadership in Energy and Environmental Design	TU Delft Delft University of Technology
CRL Circular Retrofit Lab	LVL Laminated Veneer Lumber- lamibois	TVA Taxe sur la Valeur Ajoutée
CSTB Centre Scientifique et Technique du Bâtiment	OFEN Office Fédéral de l'Énergie suisse	USGBC U.S. Green Building Council - Conseil états-unien du Bâtiment durable
CVSE chauffage, ventilation, sanitaire et électricité		VUB Vrije Universiteit Brussel
DfD Design-for-Disassembly- Conception démontable		
DGNB Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen- Société allemande pour la construction durable		
EAST Laboratory of Elementary Architecture and Studies of Types- Laboratoire d'architecture élémentaire et d'études des types		

remerciements

Les auteurs/autrices remercient chaleureusement les personnes ayant apporté leur soutien à la réalisation de ce document et en particulier:

pour les entretiens et les visites de chantier

Atelier Archiplein (Genève, GE)

Francis Jacquier (associé, architecte EPFL/SIA/AGA et architecte du patrimoine DSA)

Marlène Leroux (associée, architecte EPFL/SIA/MA et Docteur ès Sciences EPFL)

FAZ architectes (Genève, GE)

Véronique Favre (associée, architecte EPFL-SIA)

Marco Gonçalves (architecte FALCH-ULB, technicien en génie civil)

Perrin Frères SA (Gland, VD)

Francisco Vicente (technicien ES en bâtiment et génie civil, conducteur de travaux)

ProTravail (Renens, VD)

Samuel Cuendet (responsable des démontages, charpentier)

Syphon AG (Bienne, BE)

Michel Zwahlen (directeur, dessinateur en bâtiment, maçon)

Rolf Rieder (responsable des démontages, graphiste)

pour l'accompagnement et le financement

Office Fédéral de l'Environnement

Dr. David Hiltbrunner

ainsi que toutes les personnes ayant collaboré à l'octroi des permissions de reproduction d'image et de leur version en haute définition.

crédits des figures

Les sources des figures sont listées ci-après. Lorsqu'une date apparaît après un nom, la source complète est accessible dans la bibliographie. Dans les autres cas, l'ayant droit est simplement indiqué.

Lorsque les ayants droits ont pu être identifiés, une demande d'autorisation de reproduction leur a été adressée. Au moment de la publication du présent rapport, quelques demandes n'ont malheureusement pas reçu de réponses. Si un-e ayant droit se reconnaît, il/elle peut se manifester auprès des auteurs/autrices et nous ne manquerons pas de le/la mentionner dans une éventuelle prochaine version.

figure 1 Corentin Fivet/SXL/EPFL

figure 2 Maxence Grangeot/SXL/EPFL

figure 3 169 architecture/Elioth- redessin SXL/EPFL

figure 4 adapté de Brand 1994- redessin SXL/EPFL

figure 5 Jan Brütting- redessin SXL/EPFL

figure 6 Bibliothèque de Genève

figure 7 Bibliothèque de Genève

figure 8.a baubüro insitu/Martin Zeller

figure 8.b Kaspar Thalman (www.gruss-aus-uster.ch)

figure 8.c baubüro insitu

figure 9 adapté de Gauch et al. 2016- redessin SXL/EPFL

figure 10 Célia Küpfer/SXL/EPFL

figure 11 Célia Küpfer/SXL/EPFL

figure 12 RCC Riedtwil

figure 13 Célia Küpfer/SXL/EPFL

figure 14 Rotor/Opalis

figure 15 baubüro in situ/ Martin Zeller

figure 16 Pascal Bois

figure 17 CDR Construction/ Julien Holef/Reuse brussels

figure 18 Bohlin Cywinski Jackson, photo par Karl A. Backus

figure 19.a Berthoud

figure 19.b Dominique Gilliard

figure 20 SXL/EPFL- inspirée de Durmisevic 2006

figure 21 Célia Küpfer/SXL/EPFL

figure 22 GXN – redessin SXL/EPFL

figure 23 adapté de Peikko Group Corporation – redessin SXL/EPFL

figure 24.a adapté de Hirt et Crisinel 2005, republié dans Frisch 2014- redessin SXL/EPFL

figure 24.b adapté de Hoesch, republié dans Frisch 2014- redessin SXL/EPFL

figure 25.a,b FCBA INFO

figure 25.c,d FCBA, Jean-Luc Kouyoumji

figure 25.e FCBA, Jean-Luc Kouyoumji – redessin SXL/EPFL

figure 26.a Leon van Woerkom/cepezed

figure 26.b adapté de cepezed – redessin SXL/EPFL

figure 27 issu de Fivet et al. 2020

figure 28.a Seagate Structures

figure 28.b Acton Ostry Architects

figure 29 adapté de Sassi 2002, republié dans Addis et Schouten 2004 - redessin SXL/EPFL

figure 30.a U. Schärer Söhne 1965

figure 30.b,c 2020 USM- redessin SXL/EPFL

figure 31 Célia Küpfer/SXL/EPFL

- étude de cas I** Célia Küpfer/SXL/EPFL
- étude de cas II.a,c** Fondation ProTravail
- étude de cas II.b** CDR Construction/
Max Stockmans/Julien Holef
- étude de cas III.a** adapté de Rotor-
redessin SXL/EPFL
- étude de cas III.b-h** Rotor
- étude de cas IV.a** issue de Bach 2017/
photo EPFL-Rotor
- étude de cas IV.b** CIO
- étude de cas IV.c** issue de Bach 2017
- étude de cas V** Célia Küpfer/SXL/EPFL
- étude de cas VI** issue de Bach 2017
- étude de cas VII.a,c,d** baubüro in situ/
Saskia Witmer
- étude de cas VII.b,e** baubüro in situ
- étude de cas VII.f-i** baubüro in situ/
Martin Zeller
- étude de cas VIII.a,c,d** Farel événe-
ments GmbH
- étude de cas VIII.b,g,h** Célia Küpfer/
SXL/EPFL
- étude de cas VIII.e** Farelhaus AG et
0815 architekten n.d.- redessin SXL/
EPFL
- étude de cas VIII.f** Lia Wagner
- étude de cas IX.a,b** Kantonale Denk-
malpflege Zürich
- étude de cas IX.c** Jan Brütting/SXL/EPFL
- étude de cas X.a** PERROT&RICHARD
architectes/Caroline RICHARD
- étude de cas X.b** GTG/Samuel Rubio
- étude de cas X.c,i** Célia Küpfer/SXL/
EPFL
- étude de cas X.d-h** Charpente Concept
SA
- étude de cas XI.a,b** baubüro in situ/
Martin Zeller
- étude de cas XI.c-e** baubüro in situ
- étude de cas XII.a** Bellastock/photo
Alexis Leclercq
- étude de cas XII.b-f** Ingeni
- étude de cas XII.g** FAZ architectes
- étude de cas XII.h,i** Célia Küpfer/SXL/
EPFL
- étude de cas XII.j** adapté de Ingeni-
redessin SXL/EPFL
- étude de cas XIII.a,d,e** réimprimée à
partir de Coenen et al. 1990, avec la
permission de IOS Press
- étude de cas XIII.b,c** Nanda Naber
- étude de cas XIII.f,g** issue de Mettke
2008
- étude de cas XIII.h** adapté de Coenen
et al. 1990, avec la permission de IOS
Press- redessin SXL/EPFL
- étude de cas XIV.a,b** architektenge-
meinschaft Rolf Mühlethaler- mrh
Architekten Bern
- étude de cas XIV.c** Elisabeth Bäschli
- étude de cas XIV.d-g** Alexander Gem-
peler Architekturfotografie
- étude de cas XV.a** Atelier Archiplein/
consortium perraudinarchiplein
- étude de cas XV.b,g** Atelier Archiplein/
consortium perraudinarchiplein-
redessin SXL/EPFL
- étude de cas XV.c-f** Célia Küpfer/SXL/
EPFL
- étude de cas XVI.a** adapté de Whitby
1994- redessin SXL/EPFL
- étude de cas XVI.b,c** Hopkins Archi-
tects
- étude de cas XVII.a,c** Lelé/Arquivo João
Filgueiras Lima
- étude de cas XVII.b** Sergio Ekerman
- étude de cas XVII.d,g** Lelé/Arquivo
João Filgueiras Lima – redessin SXL/
EPFL
- étude de cas XVII.e,f** João Filgueiras
Lima – redessin SXL/EPFL
- étude de cas XVII.h** adapté de Valeri et
al. 2020- redessin SXL/EPFL
- étude de cas XVIII.a-c** Estate Leonardo
Bezzola

- étude de cas XVIII.d** Hünerwadel
Häberli Ingenieurbureau- redessin
SXL/EPFL
- étude de cas XVIII.e** adapté de Zweifel
1969- redessin SXL/EPFL
- étude de cas XIX.a,b** GXN
- étude de cas XIX.c,d** Peikko Group
Corporation
- étude de cas XIX.e** adapté de GXN-
redessin SXL/EPFL
- étude de cas XX.a-d** GAAGA
- étude de cas XX.e** adapté de GAAGA-
redessin SXL/EPFL
- étude de cas XXI.a** Leon van Woerkom/
cepezed
- étude de cas XXI.b-d** cepezed- redessin
SXL/EPFL
- étude de cas XXII.a,b** Lucas van der
Wee/cepezed
- étude de cas XXII.c-f** cepezed- redessin
SXL/EPFL
- étude de cas XXIII.a-c** Jouk Post/XXar-
chitecten
- étude de cas XXIII.d,e** Jouk Post/XXar-
chitecten- redessin SXL/EPFL
- étude de cas XXIV.a** RAU
- étude de cas XXIV.b,e,f** Woodteq
- étude de cas XXIV.c** RAU- redessin SXL/
EPFL
- étude de cas XXIV.d** Petra Appelhoof
- étude de cas XXV** Tschopp Holzbau
- étude de cas XXVI.a,b** cepezed/Léon
van Woerkom
- étude de cas XXVI.c** cepezed- redessin
SXL/EPFL
- étude de cas XXVII.a,c-e** Grimshaw
2020
- étude de cas XXVII.g** Grimshaw 2020-
redessin SXL/EPFL
- étude de cas XXVII.b** Bryden Wood
Technology Ltd. Reproduit avec per-
mission- redessin SXL/EPFL
- étude de cas XXVII.f** adapté de Fuster
et al. 2009- redessin SXL/EPFL
- étude de cas XXVIII.a** Variel, issu de
Brussels Environment et Capelle 2019
- étude de cas XXVIII.b-c** VUB/CRL team-
redessin SXL/EPFL
- étude de cas XXIX** adapté de philips-
redessin SXL/EPFL
- étude de cas XXX.a,e** Bohlin Cywinski
Jackson- redessin SXL/EPFL
- étude de cas XXX.b-d** Bohlin Cywinski
Jackson, photo par Karl A. Backus
- étude de cas XXXI.a** lucas van der wee/
cepezed
- étude de cas XXXI.b** cepezed- redessin
SXL/EPFL
- étude de cas XXXI.c** SXL/EPFL
- étude de cas XXXII** CRL- TRANSFORM-
VUB- issues de Brussels Environment
et Capelle 2019

table des matières détaillée

abrégé	4
panorama des études de cas	6



réduire les déchets du bâti suisse / constats et leviers **8**

le bâti, source de déchets	11
séparer pour valoriser	12
coordonner pour fermer la boucle	15
documenter et transmettre	17
références	18



DS **déconstruction sélective** **20**

objectifs / soin et valorisation	25
activités en Suisse / opportunités gaspillées et freins systémiques	26
préparation au démantèlement / le diagnostic ressource	28
ameublement intérieur	30
étude de cas I aménagements intérieurs à Berne	32
partitions et revêtements intérieurs	34
étude de cas II plancher à Lausanne	35
étude de cas III le collectif Rotor	36
étude de cas IV sols de bureaux à Lausanne	38
éléments techniques (CVSE)	40
étude de cas V installations techniques à Berne	42
enveloppes	44
étude de cas VI graviers de toiture à Lausanne	45
étude de cas VII façades à Zurich et Winterthour	46
étude de cas VIII mur-rideau à Bienne	48
gros œuvre	50
étude de cas IX structure en bois à Rheinau	52
étude de cas X théâtre en bois à Paris et à Genève	54
étude de cas XI structures métalliques à Bâle et Zurich	56
étude de cas XII dalles en béton à Genève	58
étude de cas XIII éléments coulés en béton en Europe	60
étude de cas XIV logements en béton à Berne	62
stratégies de développement	64
références	68



construction réversible

72

activités en Suisse / opportunités gaspillées et freins systémiques	77
défis et acteurs/actrices	78
principes génériques	79
principes pour la gestion du projet	82
gros œuvre	85
étude de cas XV pierre massive porteuse	92
étude de cas XVI briques porteuses	94
étude de cas XVII béton fibré boulonné	96
étude de cas XVIII béton préfabriqué assemblé par contact	98
étude de cas XIX béton préfabriqué boulonné	100
étude de cas XX béton préfabriqué avec assemblage cimenté	102
étude de cas XXI structure béton-métal	104
étude de cas XXII structure métallique	106
étude de cas XXIII structure bois-métal	108
étude de cas XXIV structure bois boulonnée	110
étude de cas XXV plancher en bois massif	112
enveloppes	114
étude de cas XXVI façade non-porteuse	116
étude de cas XXVII façade métallique	118
étude de cas XXVIII rénovation énergétique de façade	120
éléments techniques CVSE	122
étude de cas XXIX système de service d'éclairage	123
étude de cas XXX surélévation et isolation	124
étude de cas XXXI système de chauffage pour bureaux	126
partitions et revêtements intérieurs	128
étude de cas XXXII partitions internes	132
ameublement intérieur	134
stratégies de développement	136
références	142
perspectives	150
lexique	152
abréviations et acronymes	153
remerciements	154
crédits des figures	155
table des matières détaillée	158

