



cstc

Vers une économie circulaire dans la construction

Introduction aux principes de l'économie circulaire dans le secteur de la construction

Septembre 2018



Réalisé dans le cadre de la Guidance technologique Ecoconstruction et développement durable en Région de Bruxelles-Capitale, un partenariat du CSTC mené avec la collaboration de la CCB-C et le soutien d'Innoviris



Vers une économie circulaire dans la construction

Introduction aux principes de l'économie circulaire dans le secteur de la construction

Auteurs

Ambroise Romnée et Jeroen Vrijders

Septembre 2018

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION

CSTC, établissement reconnu en application de l'arrêté-loi du 30 janvier 1947
Siège social : Rue du Lombard 42 à 1000 Bruxelles

Publication à caractère scientifique visant à faire connaître les résultats des études et recherches menées dans le domaine de la construction en Belgique et à l'étranger.

La reproduction ou la traduction, même partielles, du texte de la présente monographie n'est autorisée qu'avec le consentement de l'éditeur responsable.



Avertissement

La présente monographie doit être considérée comme informative. Même si toutes les précautions ont été prises pour que les informations fournies ne soient ni erronées, ni trompeuses au moment de la publication, le CSTC ne peut en garantir l'exactitude ou l'exhaustivité.

Les exemples qui sont donnés ne sont pas exhaustifs et sont présentés à titre purement illustratif. Les textes renvoient parfois vers des sites Internet ou des données externes sur lesquels le CSTC n'a aucun contrôle et pour lesquels le CSTC décline toute responsabilité.

Ce document a été élaboré par le CSTC à l'intention de ses membres.

Le lecteur est entièrement responsable de l'utilisation du texte, de son interprétation et des décisions découlant de la lecture du document. Le CSTC ne peut en aucun cas être tenu responsable d'éventuels dommages résultant de l'application des principes énoncés.

Cette publication est soumise à la protection du copyright et ne peut être reproduite, traduite, distribuée ou publiée par quiconque, partiellement ou totalement, sans l'accord préalable explicite du CSTC. Tous droits réservés.



Sommaire

<i>Avant-propos</i>	4
<i>Glossaire</i>	5
1. Introduction	6
2. Transition systémique	8
2.1 Caractéristiques du système socioéconomique actuel	8
2.2 Défis pour le secteur de la construction	10
2.3 Politiques européennes et régionales en matière d'économie circulaire	11
2.4 Modèle d'économie circulaire pour la construction	12
3. Concevoir et construire circulaire	15
3.1 Principes d'une conception et d'une construction circulaire	16
3.2 Développements actuels et futurs	45
3.3 Enjeux économiques	53
4. Urban mining	55
4.1 Principes de l' <i>urban mining</i>	56
4.2 Développements actuels et futurs	76
4.3 Enjeux économiques	80
5. Modèles d'affaires circulaires	83
5.1 Principaux modèles d'affaires circulaires	87
5.2 Développements actuels et futurs	106
6. Synthèse et conclusions	109
7. Références bibliographiques	114



Avant-propos

L'économie circulaire fait de plus en plus parler d'elle. Mais de quoi s'agit-il : d'améliorer des pratiques existantes ou, comme certains le disent, se dirige-t-on vers un véritable changement de paradigme ? Est-il question de renforcer les taux de recyclage ou de transformer en profondeur le modèle d'affaire des entreprises ? Comment peut-on appliquer ce concept au secteur de la construction ? Qu'est-ce qu'un bâtiment circulaire ou un chantier circulaire ? Quelles sont les implications pour l'entrepreneur et les autres acteurs de la chaîne de construction ?

La présente monographie donne un aperçu de ce qu'est ou pourrait être l'économie circulaire dans la construction, et des nouvelles opportunités qu'elle suscite (possibilités d'innovation, nouveaux marchés, etc.).

Par une analyse de l'état actuel des connaissances en la matière, des enjeux futurs du modèle circulaire et d'exemples concrets, le professionnel de la construction pourra s'inspirer de cette nouvelle évolution, et l'anticiper proactivement.

Après avoir exposé le contexte socioéconomique qui a présidé à l'émergence de ce nouveau modèle, le document explore l'économie circulaire appliquée au secteur de la construction à travers trois grandes thématiques :

- la conception et la réalisation d'une construction selon les principes de l'économie circulaire
- *l'urban mining*
- les modèles d'affaires circulaires.

Les principaux aspects sont décrits pour chaque thématique. Des exemples techniques et des bonnes pratiques sont exposés. Ces exemples représentent une expression manifeste d'un secteur en transition. Par thématique, une vision prospective sur les développements futurs est proposée; certains enjeux et opportunités économiques de la mise en œuvre d'une construction circulaire seront également abordés.



Glossaire

Adaptabilité	Capacité d'un bâtiment à s'adapter effectivement à l'évolution des demandes et des exigences, et donc à maximiser sa valeur tout au long de sa vie (source : projet BBSM) [86].
Déchet	Toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire (source : EU Waste Framework Directive) [25].
Déconstruction sélective	Extraction soignée d'éléments de construction, afin d'obtenir des flux homogènes de matériaux en vue de leur recyclage, ou des éléments en vue de leur réemploi (source : projet BBSM) [86].
Downcycling	Recyclage d'une matière en tenant compte d'exigences de performance, de qualité et de valeur inférieures à celles d'origine (source : projet BBSM) [86].
Passeport de matériaux	Document mentionnant tous les composants d'un produit ou d'une construction. Il s'agit d'un ensemble de données décrivant les caractéristiques des matériaux composant les produits, qui leur donnent une valeur pour la récupération, le recyclage et la réutilisation (source : Wikipedia, sur base de EPEA et du projet BAMB).
Recyclage	Toute opération de valorisation par laquelle les déchets sont retraités en produits, matières ou substances aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins (source : EU Waste Framework Directive) [25].
Réemploi	Toute opération par laquelle des produits ou des composants qui ne sont pas des déchets sont réutilisés pour un usage identique à celui pour lequel ils ont été conçus (source : EU Waste Framework Directive) [25].
Remanufacturing	Refabrication d'un produit selon les spécifications du produit d'origine en utilisant à la fois des pièces réutilisées, réparées et neuves (source : Johnson, 2014).
Strate fonctionnelle	Élément fonctionnel et indépendant de la conception du bâtiment. Une strate est composée de différents matériaux et éléments qui sont utilisés et assemblés pour assurer une fonction spécifique (structure, enveloppe, services, aménagement intérieur, etc.). Les différentes strates composant un bâtiment ont des durées de vie attendues différentes (source : Brand).
Upcycling	Recyclage d'une matière en tenant compte d'exigences de performance, de qualité et de valeur égales ou supérieures à celles d'origine (source : projet BBSM) [86].
Urban mining	Processus de récupération des composés et des éléments de tout type de stocks anthropiques : bâtiments, infrastructures, industries, produits (en usage ou en fin de vie), etc. Ces matériaux peuvent représenter un stock important de ressources en concentrations souvent comparables ou supérieures aux stocks naturels (source : Mining, 2015).



1. Introduction

Le secteur de la construction fonctionne encore en grande partie selon un **modèle économique** dans lequel les ressources naturelles sont exploitées en vue de produire des matériaux qui, arrivés en fin de vie, ne seront pas valorisés de manière optimale. Ce modèle linéaire suppose que les ressources sont infinies, et que les déchets résiduels peuvent être mis en décharge ou incinérés sans limites. Un tel concept n'est manifestement pas soutenable pour la croissance économique du secteur et pour les générations futures.

Une transition d'un modèle économique linéaire vers un modèle circulaire est donc une opportunité pour le secteur de la construction. L'économie circulaire est envisagée comme un modèle alternatif dans lequel les ressources sont conservées en usage aussi longtemps que possible, dont on extrait le maximum de valeur pendant leur utilisation et dont on récupère et réemploie les produits et les matériaux à la fin de chaque cycle de vie en service.

Grâce à l'émergence de ce nouveau concept d'économie dans la construction, les professionnels disposent de réelles opportunités d'innover. Afin de les aider à y voir plus clair, le présent document met en lumière de manière détaillée les principes et les aspects importants à prendre en considération pour engager le secteur dans une transition vers plus de circularité.

Le **second chapitre** de ce document évoque la nécessaire transition vers un système social, environnemental et économique plus durable pour le secteur de la construction. Cette transition passera par l'adoption d'un modèle d'économie circulaire dont une définition est donnée dans ce chapitre.

Le **troisième chapitre** détaillera les principes essentiels à assimiler pour la conception et la construction de bâtiments respectueux d'un modèle d'économie circulaire :

- adaptabilité
- construction par strates
- choix des matériaux
- assemblages
- et utilisation des déchets/ressources sur chantier.

Le **quatrième chapitre** traite de la manière dont les bâtiments existants peuvent être exploités et valorisés au travers des principes de *l'urban mining* :

- inventaire de pré-déconstruction
- déconstruction sélective
- *remanufacturing*
- réemploi
- recyclage.



Le **cinquième chapitre** présente plusieurs **modèles d'affaires circulaires** favorisant la création de valeurs dans un modèle d'économie circulaire pour la construction : maximisation de l'efficacité des ressources, délivrance d'une performance au lieu de la propriété d'un bien et création de valeur à partir des déchets.

Ce document est le fruit de l'expertise du CSTC dans un domaine en pleine évolution. Il s'agit donc d'un 'instantané' que le CSTC met à la disposition du secteur.



2. Transition systémique

2.1 Caractéristiques du système socioéconomique actuel

2.1.1 Problématique de la globalisation

Le modèle économique de l'ère industrielle considère les ressources naturelles comme quasi inépuisables. Pourtant, non seulement, elles ne sont pas inépuisables, mais surtout, leur consommation n'a fait qu'augmenter en s'accroissant, entraînant un épuisement des réserves et un dépassement de la capacité de la Terre à renouveler ce stock de matières premières.

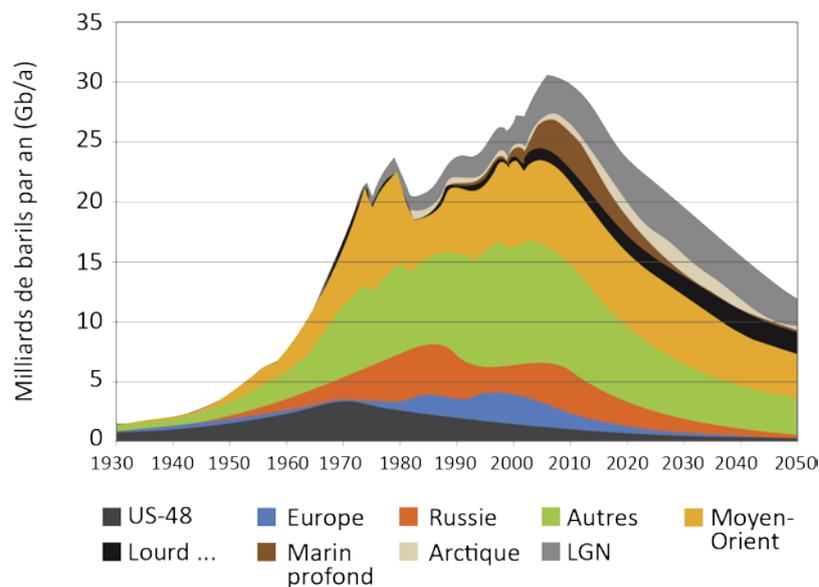


Fig. 1 Évolution et projection de la production mondiale de pétrole et de gaz naturel (source : adapté de The Association for the Study of Peak Oil and Gas) [15].

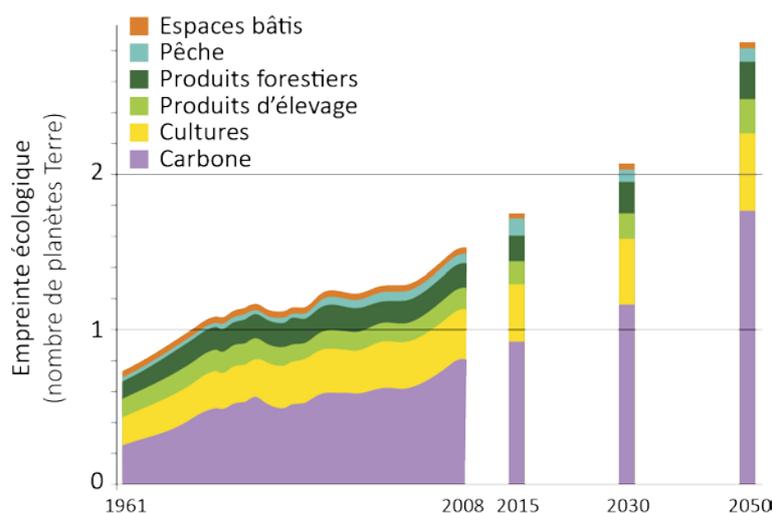


Fig. 2 Évolution et projection de l'empreinte écologique mondiale (source : adapté de WWF, 2012) [31].



Cette consommation des ressources devrait d'ailleurs se poursuivre compte tenu de la croissance démographique mondiale, d'une part, et de la croissance de la classe moyenne et de son pouvoir d'achat, d'autre part. Par ailleurs, cette demande croissante en ressources, la raréfaction de ces dernières et l'émergence de nouveaux marchés globalisés rendent extrêmement volatiles les prix des matières premières. L'exploitation des gisements coûtera en outre plus cher, produira des ressources de moindre qualité, aura un impact plus important sur l'environnement et renforcera encore la volatilité des prix. Enfin, la globalisation des marchés de matières premières, stimulée par une production majoritairement localisée en Asie et au Moyen-Orient, et une consommation majoritairement localisée en Occident, rend l'économie européenne dépendante de l'importation des ressources.

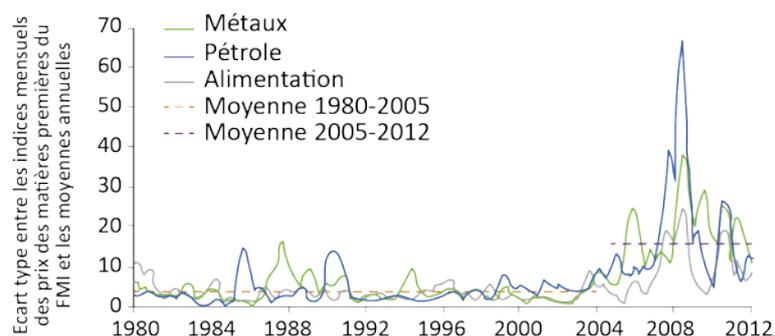


Fig. 3 Volatilité des prix de l'énergie, des métaux et minerais
(source : adapté de Chatham House calculations based on IMF commodity price data) [41].

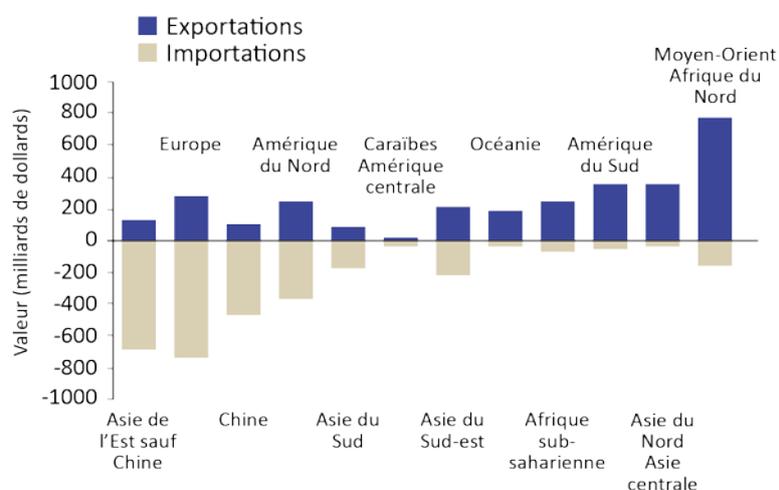


Fig. 4 Importation et exportation mondiales par région
(source : adapté de Chatham House Resource Trade Database) [41].

2.1.2 Modèle d'économie linéaire

Depuis le début de l'industrialisation, notre économie repose sur un modèle linéaire qui consiste à extraire (ou récolter) les matières premières, à fabriquer, à partir de celles-ci, des pièces qui sont ensuite assemblées en composants, eux-mêmes assemblés en produits. Les produits sont enfin commercialisés via un réseau de distribution pour être utilisés par des



consommateurs qui s'en débarrasseront en fin de vie. Notre économie actuelle, dite linéaire, est donc basée sur le modèle 'Extraire – Fabriquer – Consommer – Jeter'.

Ce modèle économique demande, à chacune des étapes de la chaîne de valeur, de l'énergie, une utilisation de ressources et la production de déchets.

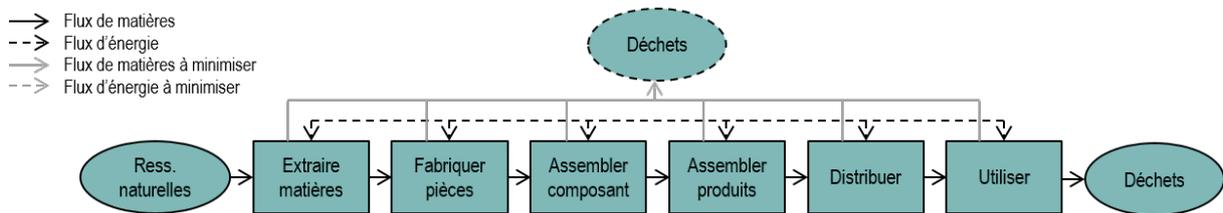


Fig. 5 Modèle d'économie linéaire (source : adapté de Le Moigne, 2014) [42].

2.2 Défis pour le secteur de la construction

Face aux défis évoqués ci-avant en matière de gestion des ressources, le secteur de la construction joue un rôle primordial en tant que consommateur de ressources et producteur de déchets.

D'après la Commission européenne, la construction et l'exploitation des bâtiments dans l'Union européenne représentent environ la moitié de l'extraction de tous les matériaux et environ un tiers de la consommation d'eau. Bien que des progrès énormes en termes d'efficacité énergétique des bâtiments aient été accomplis ces dernières décennies, le secteur de la construction reste un grand consommateur d'énergie : les bâtiments consomment 40 % de la demande en Europe et produisent 36 % des émissions de CO₂.

Le secteur génère également environ un tiers de tous les déchets et est associé aux impacts environnementaux qui surviennent à différents stades du cycle de vie d'un bâtiment, y compris la fabrication de produits de construction, la construction de bâtiments, l'utilisation, la rénovation et la gestion des déchets de construction.

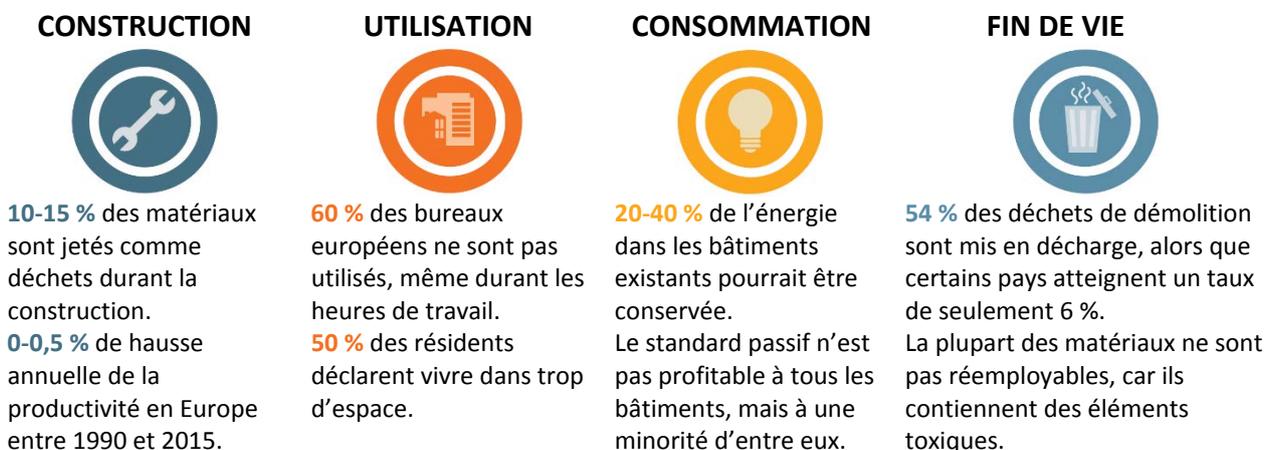


Fig. 6 Production de déchets aux divers stades de vie d'un bâtiment (source : adapté de Ellen Mc Arthur Foundation et Mc Kinsey, 2015) [47].



Toutefois, la Belgique se présente comme un bon élève avec un taux de recyclage des déchets de construction et de démolition avoisinant les 90 % (en masse), notamment grâce au recyclage de la fraction pierreuse.

Le secteur de la construction offre dès lors des opportunités significatives pour devenir plus économe en énergie, moins consommateur de ressources et moins producteur de déchets. Certaines tendances se développent rapidement et redéfinissent déjà de nombreux marchés : partage de l'espace résidentiel, virtualisation et partage des bureaux, production et usage décentralisés d'énergies renouvelables, etc. D'autres ne sont pas nouvelles, mais évoluent plus lentement, comme la modularité et la durabilité ou la planification urbaine intelligente. D'autres encore émergent seulement actuellement, et montrent déjà de grandes promesses.

2.3 Politiques européennes et régionales en matière d'économie circulaire

En 2008, la directive européenne 'Waste Framework Directive' [25] est publiée pour encadrer la gestion des déchets. Cette directive fixe la hiérarchie des modes de traitement des déchets (également connue sous le nom d'échelle de *Lansink*) comme suit : prévention → réemploi → recyclage → incinération → mise en décharge. D'une manière générale, cette directive a ouvert la voie à l'économie circulaire, faisant obstacle à la mise en décharge et favorisant la promotion d'autres modes de valorisation.

Plus tard, en 2015, la Commission européenne a adopté le 'Circular Economy Package' [80] pour aider les entreprises et les consommateurs européens à engager la transition vers une économie plus forte et circulaire, où les ressources sont utilisées d'une manière plus durable. Les actions proposées contribuent à 'boucler la boucle' du cycle de vie des produits grâce à un meilleur recyclage et à la réutilisation, offrant des avantages à la fois pour l'environnement et l'économie. Les mesures prises viseront à extraire la valeur maximale des matières premières, des produits et des déchets, en encourageant les économies d'énergie et la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Les propositions portent sur le cycle de vie complet des produits : de la production et de la consommation à la gestion des déchets et au marché des matières premières secondaires. L'Union européenne entend ainsi passer d'une démarche de gestion des déchets à une démarche de gestion des ressources.

Les mesures présentées dans le plan d'action de la Commission européenne concernant le secteur de la construction visent :

- l'établissement de lignes directrices en matière d'analyse avant démolition
- l'encouragement de la mise en place de protocoles de recyclage volontaire à l'échelle du secteur pour les déchets de construction et de démolition
- le développement d'indicateurs fondamentaux pour l'évaluation de la performance environnementale des bâtiments tout au long du cycle de vie, et de mesures en faveur de leur utilisation.

Si les ambitions générales de la Commission en matière d'économie circulaire percolent depuis décembre 2015, certaines régions et certains pays ont entrepris le changement de paradigme en élaborant des programmes stratégiques de développement. C'est notamment



le cas en Flandre avec le [Vlaams Materialenprogramma](#) ⁽¹⁾ et [Visie 2050](#) ⁽²⁾, en Wallonie avec le [Plan Marshall 4.0](#) ⁽³⁾ et en Région de Bruxelles-Capitale avec le [Programme Régional en Économie Circulaire](#) (PREC) ⁽⁴⁾.

2.4 Modèle d'économie circulaire pour la construction

L'économie circulaire est un système économique et industriel qui vise à maintenir les produits manufacturés, leurs composants et les matériaux en circulation le plus longtemps possible à l'intérieur du système, tout en veillant à garantir la pérennité de leur utilisation. Le concept repose donc sur l'utilisation en boucle des matières et des produits, en encourageant le maintien des produits existants (par un entretien régulier et adéquat, allongeant leur durée de vie), leur réemploi, leur réparation et leur remise à neuf, la re-fabrication et la récupération des composants, le recyclage et la valorisation énergétique des matériaux.

Ce modèle économique requiert, à chacune des étapes de la chaîne de valeur, de l'énergie, l'utilisation de ressources et la production de déchets, mais ces quantités seront d'autant plus faibles que l'action sur le produit conservera la matière qui le constitue. Plus la boucle (voir figure 7) de (ré)utilisation de la matière et des produits est 'serrée', plus on conserve la matière mise en œuvre et moins on dépense d'énergie et de matières nouvelles pour sa valorisation.

L'économie circulaire traite dès lors autant de la question de l'usage des matières, composants et produits en fin de vie que de la manière dont ces éléments sont conçus, fabriqués et mis en œuvre pour favoriser leur (ré)utilisation et pour préserver le capital naturel à toutes les étapes de leur vie.

L'économie circulaire est donc un nouveau modèle économique fondé aussi bien sur des développements techniques et technologiques que sur l'interaction d'acteurs économiques

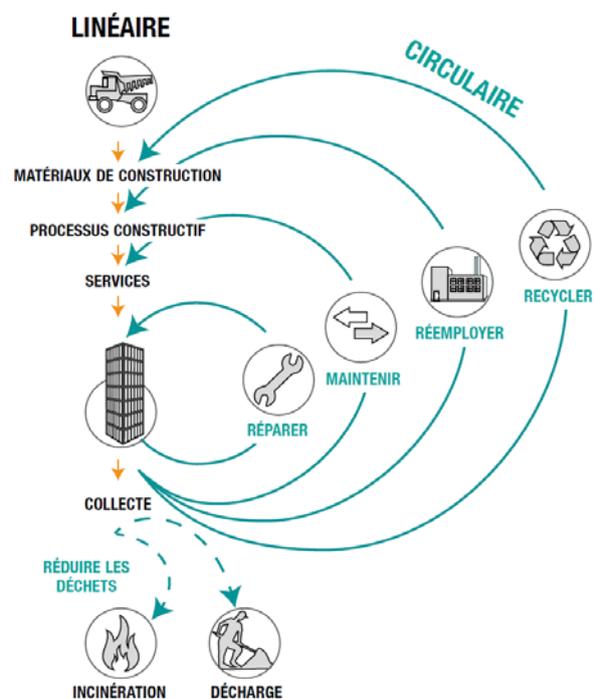


Fig. 7 Principe de l'économie circulaire dans la chaîne de valeur de la construction (source : adapté de World Economic Forum, 2016) [64].

⁽¹⁾ OVAM, <https://www.vlaanderen.be/nl/publicaties/detail/stand-van-zaken-vlaams-materialenprogramma-clusters-en-randvoorwaarden>

⁽²⁾ Vlaanderen, <http://www.vlaanderen.be/nl/vlaamse-regering/visie-2050>

⁽³⁾ Wallonie, Plan Marshall 4.0, <http://planmarshall.wallonie.be/mesures/inscrivez-vous-dans-l%C3%A9conomie-circulaire-et-de-la-fonctionnalit%C3%A9>

⁽⁴⁾ Bruxelles Environnement, http://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/PROG_160308_PREC_DEF_FR



locaux. Les développements techniques et technologiques portent sur la manière de produire, concevoir et construire les produits, composants et matériaux. Quant aux interactions entre acteurs intersectoriels et intrasectoriels, elles sont nécessaires pour stimuler une approche économique locale visant à faire exister les développements techniques et technologiques induits par l'économie circulaire. Ces interactions doivent prendre la forme de nouveaux modèles d'affaires favorisant la création d'emplois locaux et apportant simultanément une valeur ajoutée aux acteurs.

S'engager dans une économie circulaire peut offrir de nombreux avantages comprenant une minimisation de la pression sur l'environnement et une meilleure sécurité d'approvisionnement des matières (au niveau local). La démarche peut en outre se traduire par des solutions innovantes et des emplois non délocalisables.

Les principes de l'économie circulaire dans la construction reposent sur trois piliers principaux qui apportent des opportunités et des défis pour les professionnels du secteur :

- concevoir et construire des bâtiments qui permettent de récupérer les matériaux en fin de vie
- développer des solutions techniques pour extraire et valoriser les ressources matérielles disponibles dans les bâtiments existants (*urban mining*)
- imaginer de nouveaux modèles d'affaires encourageant la création de valeur pendant tout le cycle de vie des bâtiments et des matériaux.

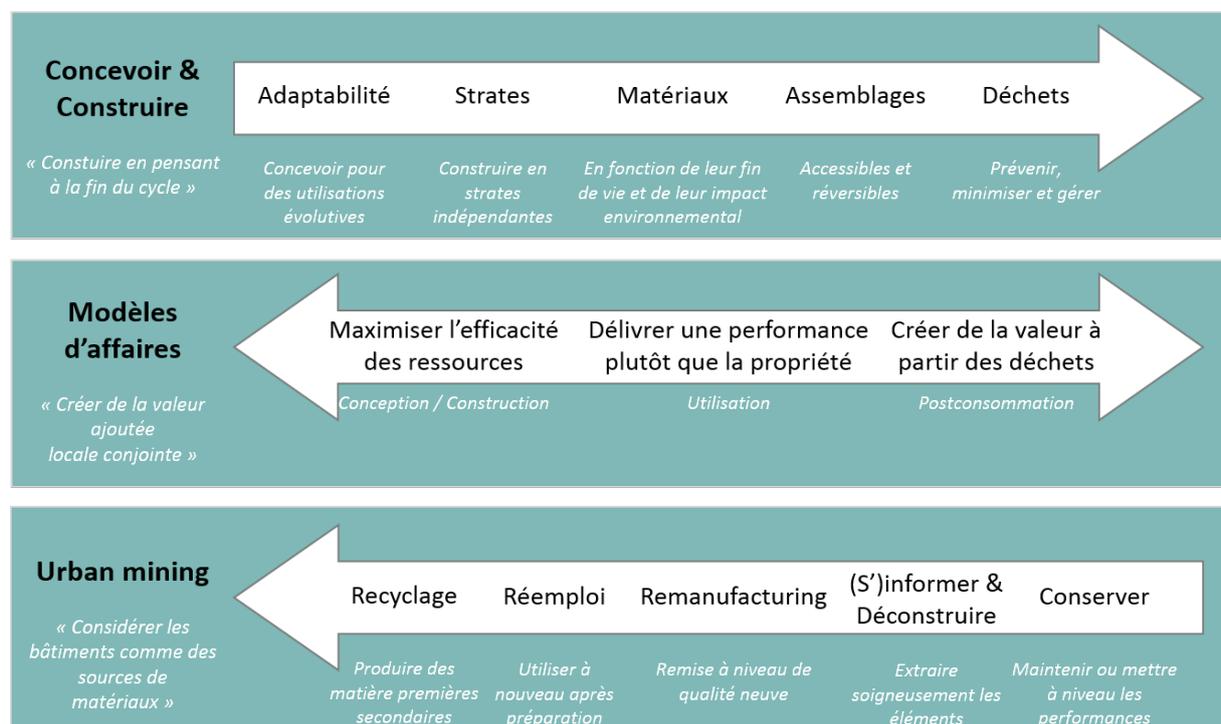


Fig. 8 Les trois principaux piliers de l'économie circulaire dans la construction (CSTC).

La réalisation de nouveaux bâtiments nécessite d'intégrer dès le départ la question de leur devenir en cours de vie et en fin de vie, de manière à accroître la longévité du bâtiment et de



ses composants, et à récupérer les matériaux à la fin du cycle. Ces objectifs s'appuient sur les principes abordés ci-dessous :

- prévoir l'**adaptabilité** des bâtiments en s'assurant qu'ils puissent être convertis à d'autres usages ou fonctions, et qu'ils puissent évoluer selon les besoins de leurs usagers
- les éléments qui constituent les strates bâties ont des durées de vie différentes; construire en **strates indépendantes** les unes des autres donnera la possibilité d'intervenir sur certains éléments sans toucher à d'autres
- sélectionner des **matériaux à faible incidence sur l'environnement**, en encourageant par exemple l'usage des matières recyclées ou en permettant le recyclage ou le réemploi en fin de vie
- utiliser des **moyens d'assemblage accessibles** et réversibles afin que les éléments et matériaux qu'ils assemblent puissent être récupérés sans dommage
- prévenir, minimiser et gérer les **déchets de mise en œuvre**.

L'économie circulaire considère les bâtiments existants comme des mines urbaines de matériaux et les déchets comme des ressources. Récupérer des matériaux dans les bâtiments existants conduit notamment à réduire l'extraction des ressources naturelles. Le recours à un inventaire de pré-déconstruction offre la possibilité de récupérer des informations sur les éléments construits et les matériaux mis en œuvre, et d'évaluer leur potentiel de valorisation. La déconstruction sélective peut ensuite être envisagée, d'une part, pour la création de flux homogènes, qui seront plus facilement recyclés, de préférence en boucle fermée, et d'autre part, pour le réemploi des éléments, c'est-à-dire l'opération par laquelle des produits sont réutilisés pour un usage identique à celui pour lequel ils ont été conçus.

De nouveaux modèles d'affaires émergent également dans l'économie circulaire et permettent de créer de la valeur en se différenciant de la simple construction d'un bâtiment ou de la vente d'un produit. La tendance étant de **vendre la fonction ou l'usage d'un bien** plutôt que le produit lui-même. Le producteur reste alors propriétaire du bien et le consommateur ne paie que pour l'usage du bien. D'autres producteurs de matériaux mettent de plus en plus à disposition des systèmes de collecte des déchets de leurs produits sur chantier comme service, afin d'obtenir des matières premières 'secondaires' et de prolonger ainsi leur vie.



3. Concevoir et construire circulaire

“Begin with the end in mind”

Stephen Covey (The 7 Habits of Highly Effective People, Fireside, 1989)

Les bâtiments sont des assemblages complexes de matériaux. Ils sont actuellement conçus pour être construits et utilisés, sans tenir compte (ou si peu) de la manière dont ils peuvent être adaptés et réaménagés ou déconstruits en fin de vie. Par conséquent, tout changement apporté au cours de la vie d'un ouvrage ou lors de sa démolition génère une grande quantité de déchets qui sont majoritairement réutilisés dans des produits de moindre valeur (*downcycling*) au lieu d'être mieux valorisés. Sans compter que les bâtiments sont souvent démolis avant qu'ils ne soient (ou que leurs éléments ne soient) devenus obsolètes, en ce sens qu'ils ne répondraient plus, techniquement ou sur le plan de la sécurité, à la fonction pour laquelle ils ont été construits.

Les raisons pour lesquelles un bâtiment peut devenir obsolète, et donc être démolie ou subir une rénovation plus ou moins lourde, dépendent de nombreux facteurs, tels que la demande du marché, l'évolution des règlements, des exigences performantielles et des technologies, la qualité architecturale ou les détériorations physiques. Plusieurs recherches montrent que la qualité architecturale et les caractéristiques d'un bâtiment sont des motifs de dépréciation plus fréquents que l'âge de la construction. La qualité architecturale peut être un levier important de maintien de la valeur immobilière d'un bien, alors qu'une qualité médiocre augmenterait les coûts d'adaptation, rendant la construction plus susceptible d'être démolie ou rénovée.

Concevoir des bâtiments flexibles et adaptables devrait permettre de conserver leur valeur sur un plus long terme, en évitant leur obsolescence fonctionnelle. À l'inverse, un bâtiment peut être sciemment conçu pour une courte durée de vie, avec la capacité d'être désassemblé de telle manière que ses éléments puissent être redéployés dans de nouvelles constructions.

Concevoir des bâtiments qui soient réaménageables, facilement remis à neuf ou démontables aide à réduire la demande de matières premières et la production de déchets, mais nécessite d'intégrer, dès la phase de conception, la question de leur devenir en fin de vie.

Différents principes de conception et de construction, développés dans ce chapitre, sont applicables aux bâtiments neufs ou au réaménagement de bâtiments anciens, de manière à réduire la quantité de déchets, à étendre la durée de vie de l'ouvrage et à favoriser la récupération des matériaux en fin de vie.



3.1 Principes d'une conception et d'une construction circulaire

3.1.1 Prévoir l'adaptabilité dans le temps

3.1.1.1 Description

Un bâtiment est adaptable s'il peut être modifié efficacement dans sa conception, sa construction et son exploitation, afin d'être mis en conformité avec les nouveaux besoins et souhaits des occupants, tout en offrant la possibilité de réemployer ses composants et les matériaux constitutifs en fin de vie.

Il est évident que, sur une période de plus de 50 ou même 100 ans, les attentes vis-à-vis d'un bâtiment peuvent changer. Par exemple, les immeubles résidentiels verront leurs occupants vieillir ou leur composition familiale se modifier, nécessitant une adaptabilité bien spécifique des espaces et des accès. Un autre exemple appliqué aux constructions tertiaires pourrait concerner un changement de fonction du bâtiment. Les principes qui seront développés ci-après ne s'appliquent donc pas systématiquement à tout type de bâtiment, mais sont fonction de scénarios d'adaptation prévus dès la phase de conception (vieillesse, changement de fonction, etc.).

Envisager un potentiel d'adaptation plus large peut être prévu au niveau des composants ou des couches du bâtiment, en tenant compte notamment des points suivants lors de la conception et de la réalisation :

- *fondations* :
 - concevoir les fondations pour permettre une extension verticale du bâtiment
 - installer des joints de structure pour éviter le tassement différentiel dû à une surcharge
- *structure* :
 - préférer la réalisation d'une structure flexible (par exemple, en poutres et colonnes) qui autorise le remplacement d'éléments intérieurs ou extérieurs sans affecter l'intégrité structurelle du bâtiment
 - concevoir la reprise de charges par un noyau central; cela autorise des modifications locales de la structure, tout en maintenant l'intégrité structurelle
 - concevoir les trois étages inférieurs pour une charge utile élevée. Cette capacité accrue permettra à l'édifice d'accueillir facilement toutes les conversions possibles sans modification structurelle importante
 - prévoir une hauteur suffisante à tous les étages de façon à pouvoir diversifier les usages
 - choisir un système de plancher structurel susceptible d'accueillir différentes installations techniques
- *enveloppe* :
 - réaliser une enveloppe indépendante de la structure, notamment en plan libre
 - prévoir des moyens d'accès aux composantes de l'enveloppe depuis l'intérieur et l'extérieur du bâtiment
 - concevoir une enveloppe polyvalente capable de s'accommoder aux modifications des espaces intérieurs (par exemple, des éléments de façade modulaires comportant des parties opaques et des parties transparentes interchangeables)



- *systèmes HVAC* : privilégier si possible l'usage d'un système HVAC hybride ⁽⁵⁾ assurant un équilibre entre les éléments centralisés et les éléments distribués, tout en facilitant la mise à niveau
- *espaces intérieurs* :
 - concevoir les espaces pour permettre un ajustement souple plutôt que contraint
 - inclure des espaces multifonctionnels
 - concevoir la partition spatiale au moyen d'éléments démontables, réutilisables et recyclables
 - offrir des dimensions spatiales (surface et hauteur) supérieures aux exigences minimales
 - concevoir l'espace selon un plan libre.

3.1.1.2 Exemples et bonnes pratiques

VAN VOLXEM – Art & Build (Bruxelles – pas construit)

Concept

Intégrer la flexibilité des aménagements dès la conception du projet en anticipant la capacité du bâtiment à changer de fonction ultérieurement. Le bâtiment est prévu au départ pour accueillir des bureaux, mais il est conçu pour pouvoir être affecté à une fonction résidentielle.

Conception

Pour réaliser l'idée initiale, les architectes et le bureau d'étude ont veillé particulièrement aux points suivants :

- supports de terrasses en attente (figure 9 A et B)
- sanitaires ou locaux de services en cas d'affectation en logement (figure 9 A)
- zone de surcharge possible en cœur d'immeuble (figure 9 B)
- grande hauteur sous plafond (3,3 m)
- plancher surélevé important pour le passage des techniques spéciales
- châssis partant du sol offrant un accès à de futures terrasses
- système de chauffage compatible avec des cloisonnements de bureaux ou de logements (figure 9 D).

Commentaires

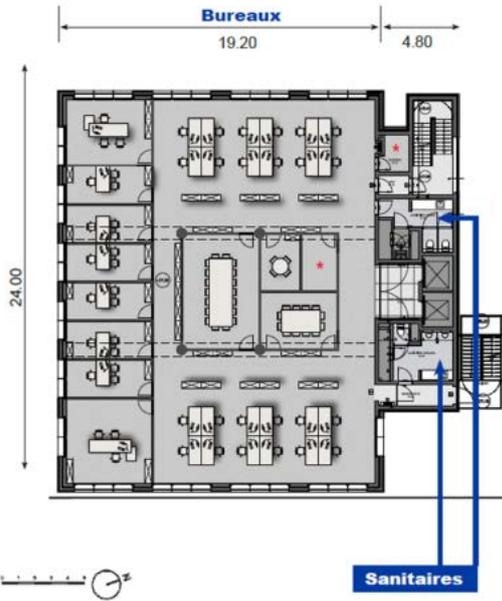
Un tel projet demande certainement un investissement initial plus important qu'un immeuble de bureaux conventionnel. Il présente également le risque que l'immeuble ne soit jamais, ou seulement partiellement, affecté à d'autres usages. Peut-on également s'assurer que les informations seront encore disponibles lors de l'adaptation de l'immeuble ?

⁽⁵⁾ Un système centralisé peut faciliter certains types de changements comme des mises à niveau et une conversion de combustible. Un système distribué peut favoriser les changements d'utilisation primaire au sein du bâtiment ou d'une extension du bâtiment.

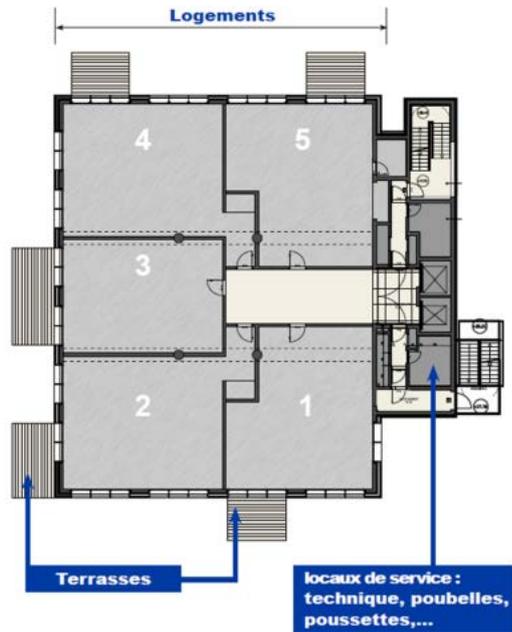


A

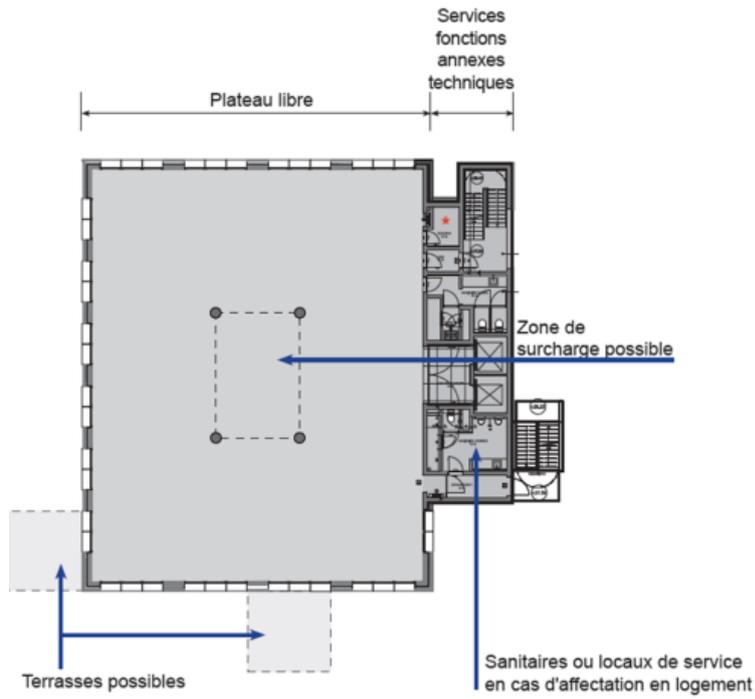
Plan d'un étage type de bureaux



Plan d'un étage type de logements



B



C



D

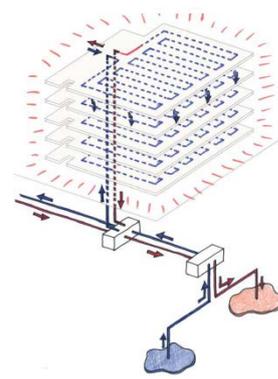


Fig. 9 Concevoir pour l'adaptabilité
(source : Art & Build, Bruxelles Environnement, Formation Bâtiment durable) [93].

HÔPITAL MARTINI – SEED Architects (Groningen, Pays-Bas – 2008)

Concept

Concevoir un établissement hospitalier entièrement modulaire, flexible et démontable de manière à ce qu'il puisse être transformé en immeuble de bureaux ou de logements, et vice versa.

Conception / Réalisation

La conception du bâtiment inclut la standardisation de l'ossature à partir de blocs de construction uniformes. Les panneaux de façade, les parois et la plupart des systèmes sont entièrement préfabriqués. Des extensions de 2,4 m sur 7,2 m peuvent être ajoutées sur la partie extérieure du bâtiment, afin d'accroître la surface de 10 % (figure 10 A, B et C). Les cloisons de partition des espaces sont entièrement démontables; elles sont configurées selon un module de 30 cm et permettent de reconfigurer les espaces ou de les convertir à d'autres usages. Les plafonds suspendus et les revêtements de sol ont été mis en œuvre en conséquence pour pouvoir être compatibles avec les aménagements ultérieurs.

Les tuyauteries techniques et les câbles électriques peuvent être intégrés dans les murs, de sorte que toute combinaison ou tout agencement requis soit possible (figure 10 D). Une attention particulière est apportée aux couleurs, puisque tous les murs ont des couleurs différentes de manière à créer des pièces aux multiples atmosphères (figure 10 E).

Tous les mobiliers sont modulaires et interchangeables. Comme les éléments techniques intégrés dans les modules de base sont amovibles, un changement de fonction peut être réalisé sans avoir à démolir quoi que ce soit.

Commentaire

De tels réaménagements représentent un certain coût et des désagréments pour les utilisateurs durant les travaux. Il serait dès lors intéressant de connaître la fréquence des réaménagements et les raisons qui incitent à réaliser ces extensions au cours de la durée de vie du bâtiment.



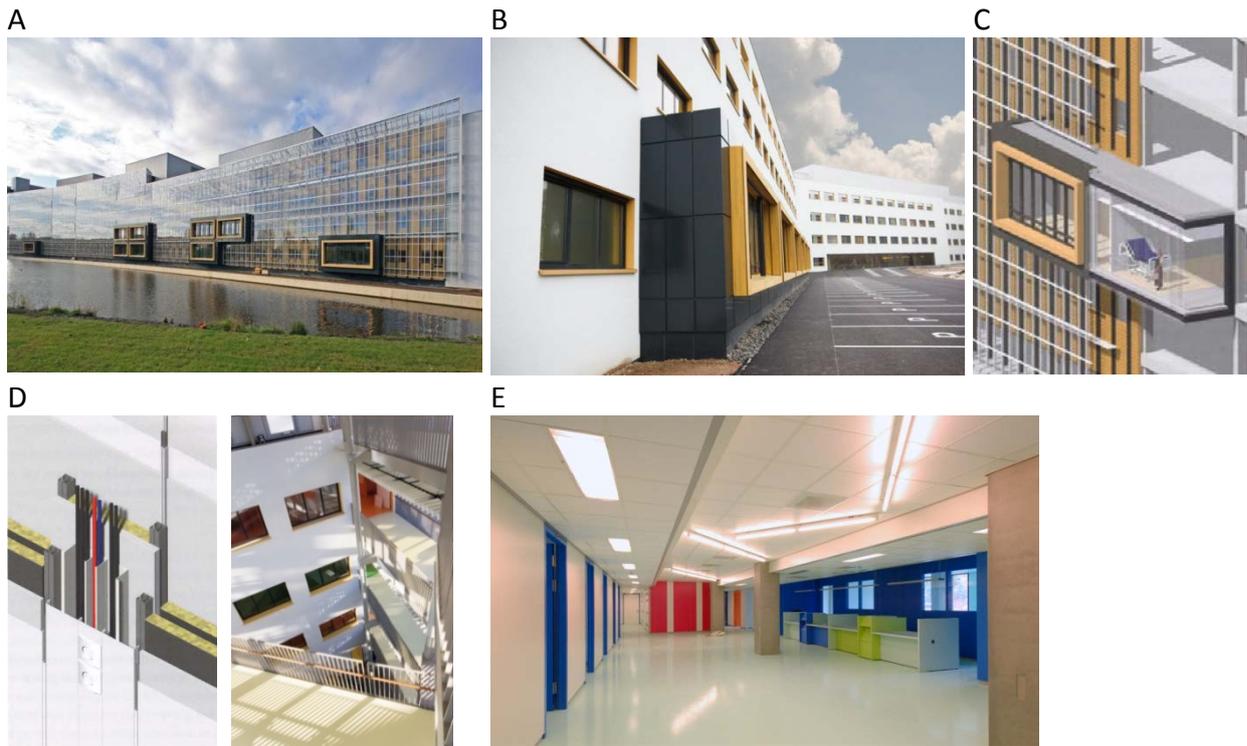


Fig. 10 Établissement hospitalier modulaire, flexible et démontable (source : SEED Architects) [151].

3.1.2 Séparer les strates

3.1.2.1 Description

La superposition des éléments de construction en couches ou strates fonctionnelles séparées physiquement est un critère de conception essentiel pour une construction dynamique, permettant de passer à travers le cycle de vie des bâtiments sans avoir à changer l'ensemble de la composition. Cette superposition contribue à ce que la performance de chaque strate fonctionnelle soit compatible avec l'évolution des besoins tout au long du cycle de vie des bâtiments.

Ces strates fonctionnelles ont des durées de vie techniques différentes pouvant varier de quelques mois à une centaine d'années. La structure d'un bâtiment, lorsqu'elle est construite à partir de matériaux pérennes comme la pierre ou la brique, a prouvé qu'elle pouvait durer des centaines d'années. À l'opposé, des composants nouvellement installés peuvent rapidement devenir obsolètes s'ils ne rencontrent plus les attentes de nouveaux occupants. Il est donc essentiel de concevoir les bâtiments en séparant bien les éléments présentant une durée de vie probable relativement longue et les éléments dont la durée de vie en œuvre serait plus courte. Par exemple, placer ou encastrier des fils électriques dans des murs ou derrière des finitions entraîne une production de déchets lorsqu'ils devront être remplacés ou enlevés.



On peut dès lors identifier dans un bâtiment **différentes strates fonctionnelles** composées de leurs éléments propres et pour lesquelles les durées de vie (technique, fonctionnelle et économique) sont différentes et corrélées les unes aux autres :

- le *meublier* : le mobilier, les fournitures et les équipements présentent la plus courte durée de vie en œuvre dans le bâti
- l'*aménagement spatial* : les éléments de cloisonnement et les revêtements souples (de sol, de plafond et autres finitions) ont des durées de vie en œuvre relativement courtes
- les *systèmes* : cette strate est constituée de tous les réseaux de ventilation, de chauffage et de sanitaire
- l'*enveloppe* est constituée des éléments de façade et des surfaces extérieures telles que la toiture. Pour permettre une adaptation ultérieure du bâtiment, il est notamment souhaitable que la façade soit indépendante de la structure
- la *structure* est la couche portante du bâtiment. Elle comprend les éléments structurels porteurs ainsi que les fondations. La structure est la strate ayant potentiellement la plus longue durée de vie, mais c'est aussi celle qui présente le facteur le plus limitant pour l'adaptation du bâtiment et qui peut libérer la plus grande part des déchets
- le *site* qui correspond à l'emplacement géographique de l'ouvrage est relativement permanent.

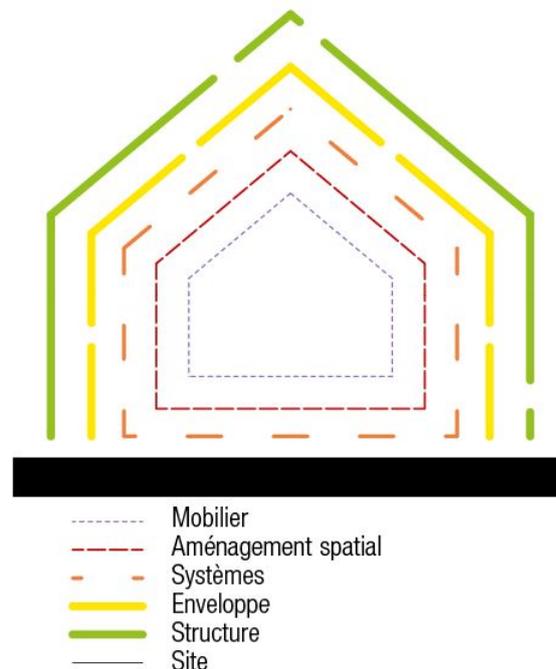


Fig. 11 Construction en strates
(source : adapté de Brand, 1994) [11].

Afin d'assurer l'adaptabilité de la construction aux changements en cours de vie, quelques principes fondamentaux doivent être intégrés dès la phase de conception au niveau de l'identification et de la séparation des strates :

- *principe d'indépendance* : intégrer les éléments de manière à pouvoir retirer ou rénover certaines parties sans affecter les performances des éléments ou des autres strates connectées. De même, les connexions entre les systèmes techniques et les finitions devraient autoriser le remplacement d'un système par un autre présentant les mêmes caractéristiques de performance, sans devoir pour autant remplacer toutes les finitions
- *principe de mise à niveau* : sélectionner des systèmes ou des composants avec lesquels il est possible d'anticiper l'évolution des exigences ou qui peuvent du moins s'y adapter
- *principe de compatibilité* : ne pas encapsuler ou fortement interconnecter des éléments à courte durée de vie avec des éléments à plus longue durée de vie; maximiser l'usage de matériaux pérennes aux endroits où de longues durées de vie sont recommandées



- *principe d'enregistrement* : s'assurer que l'information sur les éléments et les composants du bâtiment soit disponible et explicite (notamment par la création de dossiers 'as built')
- *principe de construction sèche* : éviter l'usage de produits figeant les éléments ou se figeant dans le bâtiment, comme par exemple le béton coulé, les chapes, les stucs, les mastics, le polyuréthane projeté, etc.
- *principe de dimensionnement modulaire et standardisé* : des éléments modulaires et conçus de manière standardisée favorisent la permutation et le réaménagement spatial.

Tenir compte des durées de vie différentes des strates peut présenter des avantages aux différentes étapes de vie du bâtiment :

- lors de la *construction*, cette prise en considération peut aider à séquencer les tâches et, plus largement, à suivre le processus de construction (la structure précède l'enveloppe qui précède elle-même l'aménagement intérieur, etc.)
- durant la phase *d'utilisation*, la séparation claire des composants en fonction de leur durée de vie estimée pourrait aider à rendre les composants de courte durée de vie accessibles pour la maintenance ou le remplacement éventuel
- durant les phases de *renovation* (partielle ou complète), la possibilité de retirer et de remplacer l'une ou l'autre strate permet de s'assurer que les autres strates ne sont pas endommagées.

3.1.2.2 Exemples et bonnes pratiques

SMART PRICE HOUSE – BeL Sozietät für Architektur (Hambourg, Allemagne – 2013)

Concept

La structure portante, la circulation verticale et les connexions techniques sont fournies lors de la phase initiale de construction, et sont mises à la disposition des futurs résidents. L'aménagement spatial est laissé à la charge de l'occupant selon un mode d'autoconstructeur s'il le souhaite.

Réalisation

Le projet consiste en un immeuble de plusieurs étages pour lequel un squelette constitue le cadre de base (figure 12 C); la hauteur libre sous plafond est de 3,2 m (hors isolation intérieure des planchers et des plafonds).

La circulation verticale avec ascenseur et cage d'escalier a été placée au centre du bâtiment (figure 12 D) pour minimiser les pertes de surface et assurer l'accès à un nombre maximum d'appartements.

L'aménagement des plans est indépendant de la structure portante et des étages avoisinants (figure 12 B). Toutes les versions du plan d'étage type abordent différents besoins en matière de logement (nombre de personnes, style de vie, etc.) et de changements de fonction au cours du temps (agrandissement de la famille, vieillissement, changement d'utilisateurs).

Les installations techniques sont centralisées par lot à chaque étage, de sorte que les résidents puissent se connecter au réseau d'assainissement là où ils le souhaitent. Des noyaux techniques centraux donnent la possibilité de connecter les salles de bains et les cuisines de chaque étage. Les colonnes techniques sont situées en cinq points stratégiques le long des colonnes structurelles dans le plan d'étage et en bas de la cage d'ascenseur (figure 12 D et E).



Commentaires

Bien qu'il soit demandé à l'autoconstructeur de faire valider ses travaux par un professionnel qualifié, cet exemple soulève la question de la responsabilité des acteurs quant à la mise en œuvre des éléments de construction.

Des exigences doivent également être respectées au niveau du bâtiment (par exemple, acoustique ou protection incendie, etc.), nécessitant de définir les responsabilités au préalable.



Fig. 12 Immeuble d'appartements Smart Price House (source : Bel et OVAM) [52, 154].

MAISON COMMUNALE DE BRUMMEN – RAU Architecten (Brummen, Pays-Bas – 2013)

Concept

Concevoir et construire un bâtiment en séparant les strates en vue de sa démontabilité.

Réalisation

Un passeport de matériaux (voir § 3.2.5) a été utilisé pour documenter avec précision les matériaux mis en œuvre et leur qualité, mentionnant également leur fabricant ou le propriétaire d'origine. Les matériaux de construction se démontent facilement au bout de vingt ans et sont réutilisables. Les connexions humides sont évitées dans le bâtiment.

La structure portante en bois est conçue de manière à pouvoir être réemployée ultérieurement; elle est dimensionnée avec des sections de bois réutilisables (figure 13 B et C). La structure est conçue selon une trame fixe courante dans l'industrie de la construction en bois. Au niveau de l'enveloppe, le système de façade et la toiture en verre (prémontée en usine), y compris le verre et la structure métallique, peuvent être démontés en vue du réemploi (figure 13 B et C).

Le bâtiment a été conçu de manière à anticiper la nécessité, pour la maison communale, de réduire éventuellement ses effectifs, en permettant au bâtiment d'être démonté au bout de 20 ans et en optant pour l'utilisation de matériaux réutilisables qui, en principe, devraient pouvoir être repris par les fournisseurs après 20 ans (selon Turntoo).

Commentaires

Le risque d'une telle construction est que les acteurs présents lors de la construction (et notamment le fournisseur des matériaux) manquent à l'appel lorsque le bâtiment sera démonté. Les éléments initialement prévus pour être récupérés et réutilisés suivront alors d'autres filières telles que le recyclage ou la mise en décharge.

Il existe de nombreux exemples de bâtiments initialement conçus pour être démontés et réutilisés et qui finissent par être détruits à cause de la disparition d'un acteur initial.

En ce qui concerne plus particulièrement ce projet, toutes les informations techniques sur les composants utilisés et le processus de construction n'ont pas pu être retrouvées par le CSTC. Il est donc difficile de déterminer comment les éléments ont été traités (raccords réversibles) ou quels sont les risques que comportent certains d'entre eux (stabilité, humidité, etc.).

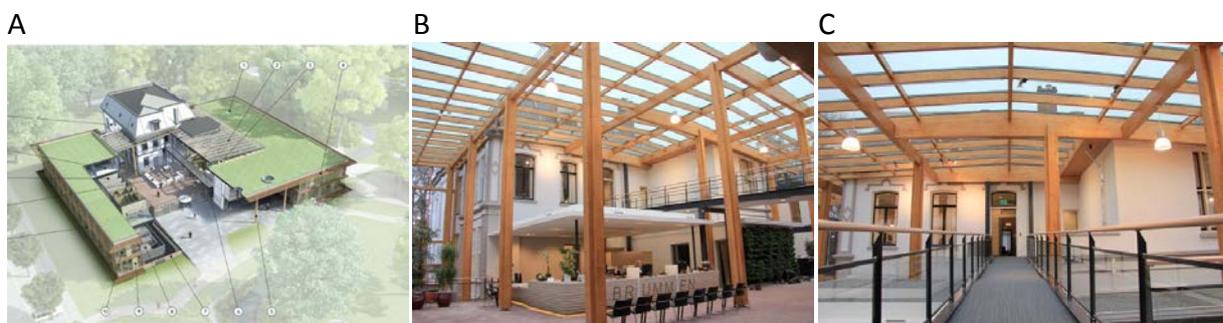


Fig. 13 Conception et construction en strates pour la Maison communale de Brummen aux Pays-Bas (source : RAU Architecten & Bouwwereld, NL) [109, 149].

SÉPARATION ÉLECTRICITÉ ET PAROIS (exemple : CABLE STUD – Gyproc)

Concept

Permettre l'accessibilité permanente de l'installation électrique dans une cloison.

Réalisation

Le cloisonnement spatial au moyen de systèmes de construction secs et démontables offre une alternative aux murs de maçonnerie. De telles cloisons peuvent présenter diverses performances techniques et fonctionnelles de par le grand nombre de combinaisons possibles au niveau du placement, du cadre structural et de la couche d'isolation. Cette solution (figure 14 A) montre les possibilités d'une séparation des fonctions techniques dans les murs. Elle comporte des conduites de câbles techniques démontables situées à hauteur de la plinthe murale (figure 14 A et B).

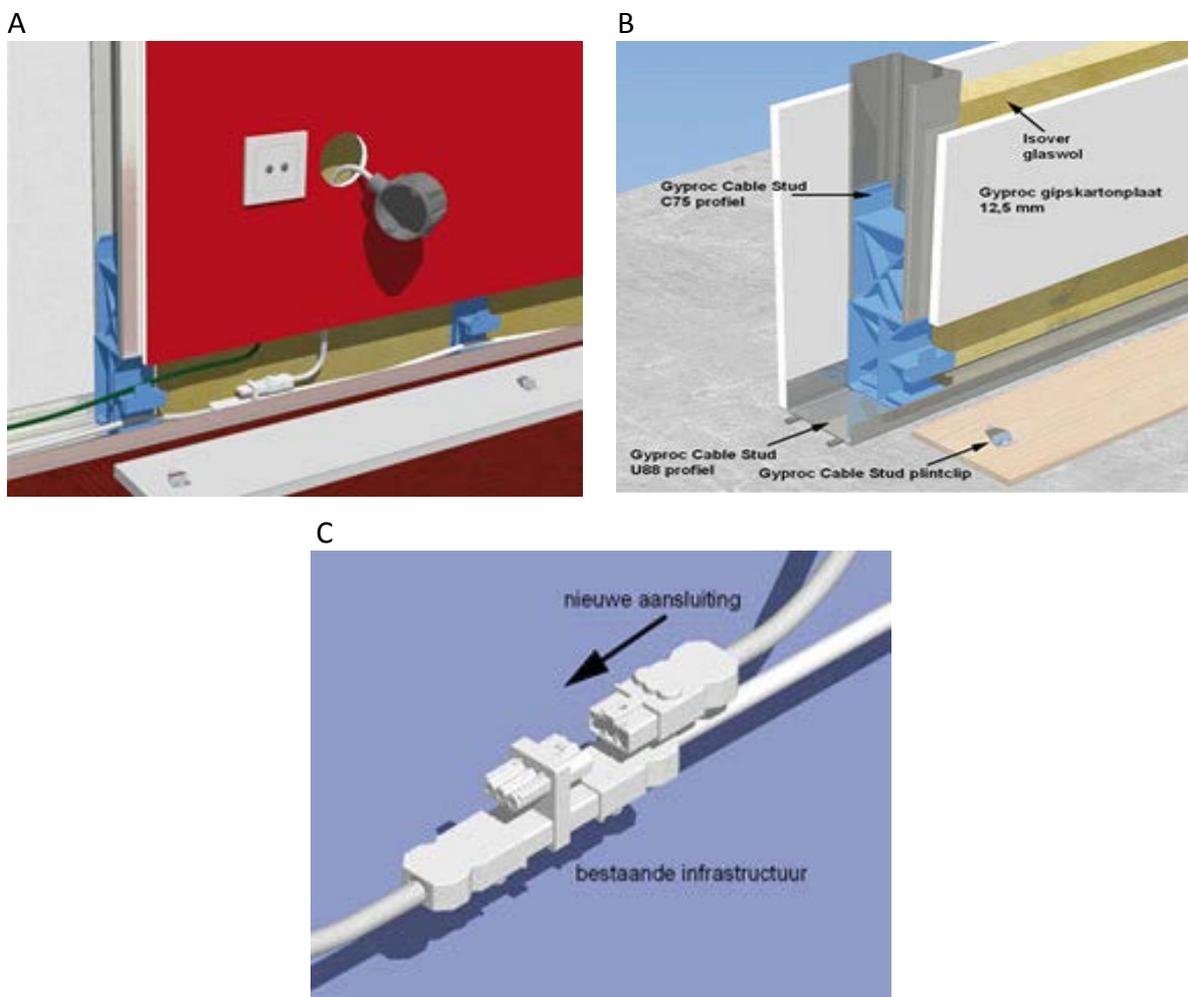


Fig. 14 Démontabilité d'une installation électrique dans une cloison (source : Gyproc et OVAM) [52, 111].

SYSTÈME DE FAÇADE DÉMONTABLE – Corium

Concept

Concevoir une façade ventilée entièrement démontable et indépendante de la structure, sur la base d'éléments modulaires en terre cuite.

Réalisation

La façade ventilée consiste à construire, devant le mur de façade principal, une structure en acier ou en bois sur laquelle est posé un revêtement. Dans ce système, les briques de maçonnerie traditionnelles sont remplacées par des composants en terre cuite 'clipsés' dans des profilés en tôle d'acier (figure 15).

Contrairement à une maçonnerie de parement traditionnelle en briques, la plaque de montage en acier peut, si nécessaire, être démantelée de la couche de façade extérieure; elle permet d'effectuer d'éventuels ajustements ou peut être démontée dans son ensemble afin de réaliser un tri et un traitement sélectif pour le prochain cycle.

Commentaire

Il serait intéressant de quantifier l'impact environnemental d'un tel système et de le comparer à celui d'un système de revêtement de façade équivalent plus conventionnel.



Fig. 15 Système de façade démontable (source : Corium et OVAM) [52, 115].

3.1.3 Choisir les matériaux

3.1.3.1 Description

Lors de la sélection des matériaux de construction, différents aspects doivent être pris en compte simultanément : leur qualité technique, leur aspect esthétique, leur impact environnemental, mais aussi le confort, l'accessibilité, etc. A tous ces aspects s'ajoutent la considération de la fin de vie du matériau et, dès lors, la manière dont il peut réintroduire son cycle de production et de re-mise en œuvre.

Le processus de sélection des matériaux fait intervenir différents acteurs à divers stades de la construction.



Écodesign des produits – Responsabilité du producteur

Pour intégrer la circularité des matériaux dès le début du processus de fabrication, les producteurs doivent pouvoir tenir compte des scénarios de fin vie envisageables pour leurs matériaux. Ces scénarios de fin de vie peuvent notamment favoriser l'émergence de nouveaux modèles économiques encourageant la collecte – peut-être même le maintien de la propriété du matériau dans le chef du producteur – et son recyclage en boucle fermée.

La production des matériaux pourrait privilégier l'emploi de matières premières locales ou renouvelables ayant un **faible impact sur l'environnement et/ou la santé**. Les fabricants devraient ainsi éviter l'usage de contaminants qui empêchent toute valorisation de la matière en fin de vie (par exemple, renoncer aux sulfates dans les bétons cellulaires, aux chlorofluorocarbones dans les isolants synthétiques, etc.). Ils devraient également concevoir les produits de construction composites de manière à ce que leurs composants soient séparables afin de permettre un traitement ultérieur approprié.

Un des principes de l'économie circulaire repose sur la distinction entre matériaux (aussi appelés nutriments) 'biologiques' et matériaux 'techniques'. Les matériaux biologiques, comme le bois (pur) ou les matériaux biosourcés, sont utilisés dans des produits sans contaminants ou substances toxiques, de manière à ce qu'ils puissent retourner à la biosphère à la fin de leur vie par biodégradation ou compostage. Les matériaux techniques, comme le métal ou le plastique, sont idéalement maintenus au maximum dans des cycles industriels. La conception devrait dès lors intégrer ces matériaux de façon à pouvoir les récupérer, les remanufacturer ou les recycler et à ne pas perdre leur valeur économique.

La sélection des matériaux constituant les éléments construits doit parfaitement s'accorder avec la durée de vie estimée de la strate à laquelle ils participent. Les strates pour lesquelles la durée de vie attendue est relativement courte pourraient être composées de matériaux biologiques, alors que les strates de plus longue durée de vie, telles que la structure, devraient être conçues avec des matériaux techniques durables et résilients de manière à s'assurer qu'ils pourront être maintenus, remis à neuf ou désassemblés.

Enfin, des matériaux de seconde main ou des matériaux constitués d'un certain pourcentage de matières recyclées et présentant les mêmes caractéristiques techniques, fonctionnelles, sanitaires et esthétiques qu'un matériau neuf équivalent peuvent être utilisés pour certaines applications.

Choisir les matériaux en fonction de leur impact environnemental (EPD) – Responsabilité du concepteur et de l'entrepreneur

La sélection des produits par les concepteurs et les entrepreneurs devrait tenir compte de leur impact environnemental dans le bâtiment. La comparaison des **déclarations environnementales des produits (EPD)** devrait permettre de choisir, parmi les produits présentant des caractéristiques de performance identiques, ceux induisant le plus faible impact environnemental. Ces EPD sont disponibles dans la base de données fédérale EPD [87].



Disponibilité et transfert d'informations à la fin du cycle de vie – Responsabilité du maître d'ouvrage et du déconstructeur

Pour que les matériaux puissent être valorisés en fin de vie, hormis le fait qu'ils doivent pouvoir être déconstruits, le déconstructeur devrait avoir accès à un ensemble d'informations qui doivent rester accessibles jusqu'à la fin de vie en œuvre des éléments construits via l'établissement de 'passeports de matériaux' (voir § 3.2.5). L'idée est de munir chaque composant ou matériau d'un document (physique ou virtuel) qui regrouperait toutes les informations utiles et serait mis à jour tout au long de son cycle de vie. Les informations reprises dans le passeport concerneraient :

- les aspects techniques et environnementaux (composition, localisation, production, propriétés hygro-thermo-physiques, impact environnemental, etc.)
- le suivi de la maintenance (mise à niveau, renouvellement, changement d'affectation, etc.)
- le traitement en fin de vie (potentiel de réemploi, recyclage, incinération ou mise en décharge).

3.1.3.2 Exemples et bonnes pratiques

THE BIOLOGICAL HOUSE – EEN TIL EEN, 3XN (Middelfart, Danemark – 2016)

Concept

Construire une habitation au moyen de matériaux intégrant des résidus de l'industrie agroalimentaire : herbe, paille, plants de tomate, algues, etc. Ces matériaux, aujourd'hui considérés comme des 'déchets' et brûlés pour produire de l'énergie, sont transformés en matériaux de construction.

Réalisation

La Maison Biologique est conçue selon un ensemble de principes qui permettent la séparabilité des strates et offrent la possibilité de conserver les matériaux, les éléments et les composants dans une boucle fermée. Ainsi, des matières premières utilisées pour la construction du bâtiment ne finissent pas comme déchets.

Les architectes, en collaboration avec des partenaires du secteur agricole et de la fabrication de produits de construction, ont identifié les types, les quantités et la disponibilité des ressources biologiques danoises locales (figure 16 E et F). Les matériaux choisis ont été concassés (figure 16 C), puis amalgamés dans de nouveaux panneaux (figure 16 A et B) et leurs qualités statiques et sensorielles ont été testées.

La Maison Biologique a été construite en utilisant un concept innovant de production numérique (figure 16 D) qui assure une réduction efficace des déchets. La maison est également conçue pour être démontée. La production simplifiée et sa conception modulaire permettent une adaptation plus aisée et moins coûteuse de la construction.





Fig. 16 Production numérique et matériaux récupérés de l'industrie agroalimentaire pour la Maison Biologique (source : EEN TIL EEN & 3XN) [124].

TECHNICAL NUTRIENT PAVILLON – William McDonough (Park 20|20, Pays-Bas – 2012)

Concept

Concevoir un bâtiment expérimental démontrant le potentiel d'utilisation de matériaux certifiés 'Cradle to Cradle' (C2C) ⁽⁶⁾.

Réalisation

Le Pavillon des Nutriments Techniques montre que les matériaux peuvent être 'up-cyclés' dans des boucles fermées au terme de leur durée de vie. Le bâtiment a été conçu en partenariat avec 41 producteurs de matériaux certifiés C2C. Outre le fait qu'il renferme des matériaux inoffensifs pour la santé, il a également été conçu pour être entièrement démontable grâce à l'usage quasi unique d'assemblages mécaniques.

Les matériaux certifiés C2C touchent la plupart des strates bâties du bâtiment :

- enveloppe : divers revêtements de façades (panneaux d'aluminium, verre, panneaux d'habillage) et un revêtement de toiture (membrane bitumineuse)
- systèmes : écrans solaires et éclairage
- distribution et aménagement spatial : systèmes de cloisonnement, revêtements de sol (moquettes et parquet).

⁽⁶⁾ Le label Cradle to Cradle est un label de certification des produits (<http://www.c2ccertified.org/>).



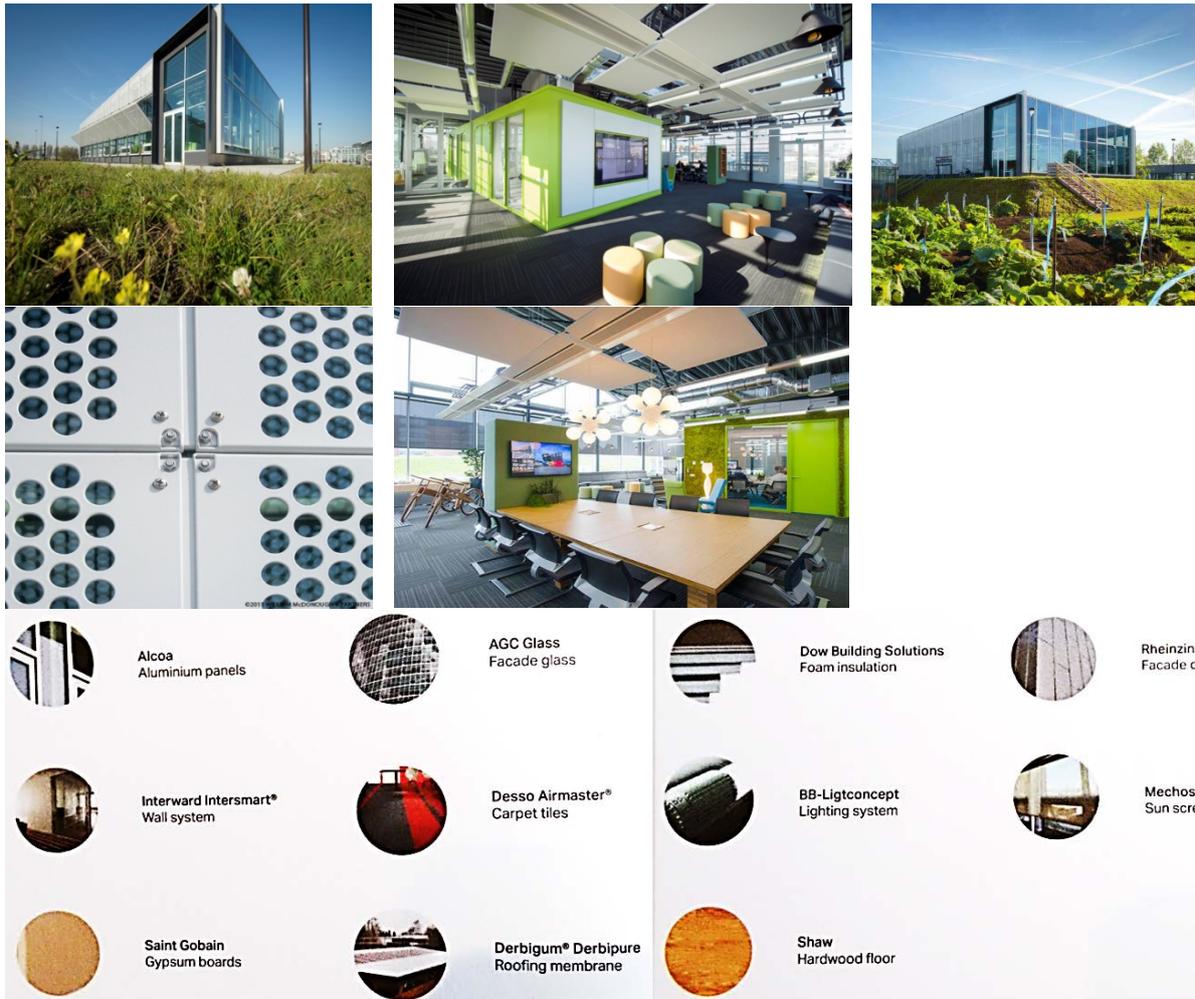


Fig. 17 Pavillon des Nutriments Techniques (source : William McDonough and Partners) [136].

CHAP-YT – Recycler le béton cellulaire

Idée

L'entreprise Chap-yt met en place un système de recyclage du béton cellulaire. Les deux problèmes inhérents au recyclage de ce matériau (grande porosité et lessivage accru des sols par les sulfates) ont trouvé une solution dans la mise au point d'une application en intérieur. Le béton cellulaire est concassé et séparé en deux fractions distinctes : d'une part, du sable 0/4 mm (en remplacement partiel du sable du Rhin pour la réalisation de sable stabilisé) et, d'autre part, des granulats 4/12 mm (comme substituts des grains d'argile expansée pour la réalisation de chapes neuves).

Par ailleurs, l'idée est de produire, selon le principe d'écodesign, une chape de couleur verte en béton cellulaire qui permettrait de reconnaître aisément sa nature lors des travaux de déconstruction et, donc, d'éviter que les matériaux en béton cellulaire ne contaminent le flux pierreux qui serait utilisé en extérieur comme granulats recyclés (risques de lixiviation).

Commentaire

Finalement, il a été décidé de renoncer à la couleur verte pour le mortier de chape et de veiller à ce que celui-ci ait une teneur en ciment suffisante que pour assurer une bonne liaison avec le sulfate et prévenir tout risque de lixiviation après démolition.





Fig. 18 Recyclage de béton cellulaire (source : Chap-Yt) [112].

ALLIANDER HEADQUARTER – RAU Architects (Duiven, Pays-Bas – 2015)

Idée

Isoler les bâtiments au moyen d'un matériau conçu à partir du recyclage des anciens vêtements de travail des employés.

Conception/Réalisation

Le projet Alliander présente des aspects de construction circulaire à bien des égards : rénovation au lieu de démolition, entretien écologique du bâtiment, réemploi de pavés en béton, de la structure, des sanitaires, etc. Le bâtiment a en outre été conçu comme dépôt de stockage temporaire des matériaux en vue de leur déconstruction en fin de vie. Pour ce faire, un passeport de matériaux reprend toutes les caractéristiques des matériaux (préexistants et nouveaux) utilisés dans le bâtiment.

La particularité du projet tient à la mise en œuvre d'un matériau isolant fabriqué à partir d'éléments textiles recyclés (figure 19). L'isolant est fabriqué par la société Métisse [137] à partir de textiles récupérés et d'anciens vêtements de travail des employés d'Alliander. Cet isolant d'origine naturelle se présente sous la forme de rouleaux de laine de coton recyclé ou de panneaux de coton recyclé.

Commentaires

Les informations disponibles sur le matériau ne mentionnent rien au sujet de sa performance à long terme. Nous ne disposons pas non plus de données sur la quantité de déchets nécessaire pour la fabrication d'une certaine quantité de matériau d'isolation, que ce soit pour une production unique ou pour une production à grande échelle.



Fig. 19 Isolants thermiques à base d'éléments textiles (source : RAU & Métisse) [97].

3.1.4 Mettre en œuvre des assemblages réversibles

3.1.4.1 Description

Être capable d'extraire les composants intacts d'un bâtiment est un élément essentiel pour activer la construction circulaire. Les composants qui ont atteint leur fin de vie ou qui nécessitent un entretien ou une réparation doivent pouvoir être accessibles et démontables. Réfléchir à la conception des bâtiments en tenant compte de leur déconstruction ultérieure permet d'une part de prévenir la production de déchets en fin de vie, et d'autre part d'encourager le recyclage et la réutilisation de certains éléments soigneusement désassemblés.

Prévoir le démantèlement des composants et des assemblages requiert de considérer les points suivants :

- *l'accessibilité* : il s'agit de prévoir un accès aisé aux éléments et à leurs fixations
- les *techniques d'assemblage* : il convient de privilégier les assemblages sans moyens de fixation ou avec des fixations réversibles, mais également de restreindre autant que possible le nombre de fixations de type différent
- les *risques* : les éléments doivent être sélectionnés de sorte à minimiser les risques de manutention lors du montage et du démontage, et à pouvoir utiliser des outils simples et courants
- le *temps* : on privilégiera les constructions minimisant le nombre de composants, de fixations et de types de fixations de manière à réduire le temps de déconstruction; on veillera également à concevoir le bâtiment de sorte à ce que son démontage puisse s'opérer en plusieurs points simultanément
- *l'information* : il s'agit de fournir l'information nécessaire au désassemblage correct des éléments, en documentant les matériaux, les composants et leur mode d'assemblage, et éventuellement en fournissant un guide pour la déconstruction
- le *choix des composants* : il y a lieu de privilégier des composants modulaires préfabriqués et aisément manipulables, tout en minimisant le nombre de composants différents dans une même construction.

Habituellement, on distingue deux modes d'assemblage : l'assemblage humide et l'assemblage sec. Cette distinction est essentielle dans une perspective de désassemblage : les fixations humides requièrent souvent plus de travail et d'énergie pour séparer les éléments et provoquent souvent un endommagement des parties ⁽⁷⁾.

■ *Assemblage sec*

Un assemblage sec est un assemblage sans liquide, réalisé :

- soit par un geste particulier (on parle d'*assemblage sec direct*) : pose flottante, tressage, emboîtement, clipsage, etc.
- soit par l'emploi d'éléments de fixation (on parle d'*assemblage sec indirect*) : vis, clous, boulons, tenons et mortaises, plaques de fixation, etc. Le désassemblage des éléments

(7) Toutefois, des matériaux pierreux fixés au plâtre ou au mortier à la chaux sont parfaitement démontables sans dommage.



dépend de la possibilité d'accéder à l'élément de fixation et de l'enlever : une vis ou un boulon sera privilégié par rapport à un clou.

L'élément de fixation d'un assemblage sec indirect peut être relativement dépendant, indépendant ou autonome par rapport aux éléments qu'il associe :

- lorsqu'il est *dépendant*, le composant d'assemblage se fonde dans les éléments assemblés (clous, modules de raccord, par exemple)
- lorsqu'il est *indépendant*, le composant d'assemblage connecte deux éléments sans se fondre avec eux (boulons, vis, par exemple)
- lorsqu'il est *autonome*, le composant d'assemblage requiert un accessoire de type clou, vis ou boulon pour connecter deux éléments (plaques de fixation, équerres, p. ex.); **plus le moyen de fixation est autonome, plus les éléments sont dissociables.**

■ Assemblage humide

Un assemblage humide (ou chimique) est un assemblage nécessitant un liquide pour la mise en œuvre.

- L'*assemblage humide* est le plus souvent *indirect*, car il fait intervenir une matière supplémentaire (un moyen de fixation) pour fixer les éléments entre eux (eau, colle, mortier, terre, etc.).
- L'*assemblage humide direct* procède principalement par fusion d'éléments (par exemple, le soudage de lés d'étanchéité) ou bien par l'utilisation d'un élément matriciel 'englobant' un second élément (par exemple, le coulage du béton sur des armatures).

L'assemblage humide exige un temps de prise *in situ*, un délai de séchage et des conditions climatiques adéquates. L'assemblage humide direct est la méthode de fixation la moins flexible, puisque les éléments sont fusionnés chimiquement; la récupération ou la séparation des éléments originels en vue d'un traitement différencié est pratiquement impossible.

La figure 20 présente les différents modes d'assemblage conventionnel classés selon leur potentiel de réversibilité permettant la séparation ultérieure des éléments qu'ils assemblent.

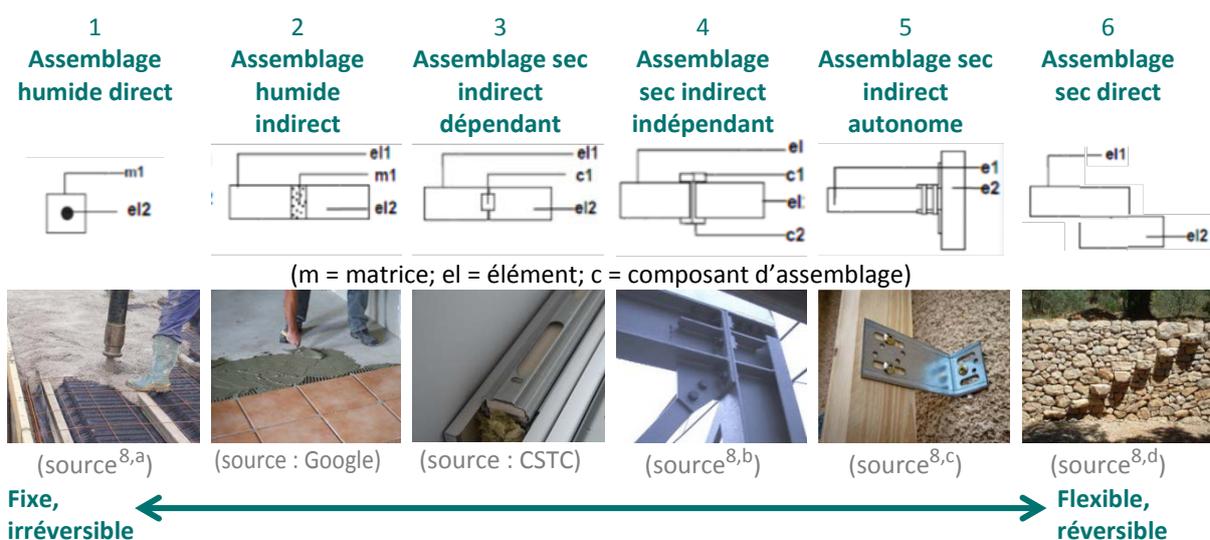


Fig. 20 Classement des modes d'assemblage conventionnel selon leur potentiel de réversibilité (source : adapté de *Chebli*) [16].

(⁸) a : www.batiprobeton.com - b : www.vd.sia.ch - c : www.mur.ooreka.fr - d : www.depierresetdebois.com



3.1.4.2 Exemples et bonnes pratiques

ICEHOUSE – William McDonough and Partners (Davos, Suisse – 2016)

Concept

Construire un bâtiment pouvant être entièrement démonté et reconstruit ailleurs.

Réalisation

En tant que prototype, la ICEhouse illustre l'usage des 'nutriments techniques'. Le bâtiment est conçu à l'aide de trois matériaux : l'aluminium pour la structure, les aérogels pour l'isolation et les polymères pour les façades et le mobilier.

Le schéma structurel consiste en l'assemblage de deux éléments simples produisant une structure tridimensionnelle intégrant le sol, les murs et le plafond. La structure peut être assemblée et désassemblée avec de simples outils, et peut être facilement transportée de manière compacte à différents endroits pour répondre à différentes fonctions. La structure peut ainsi être utilisée pour une habitation, un abri ou un petit pont.

Commentaires

Les nouveaux matériaux tels qu'utilisés dans ce pavillon (aérogels) nécessiteront, eux aussi, une solution de valorisation environnementalement efficace en fin de vie. Il n'est pas clairement établi si un travail de réflexion a été mené à ce sujet.



Fig. 21 Bâtiment entièrement démontable

(source : ICEhouse, in *Building a circular future*, et William McDonough + partners) [35, 135].

CLICKBRICK® – Daas Baksteen (Pays-Bas)

Concept

Produire des briques pouvant être mises en œuvre sans mortier.

Production

Les briques ClickBrick® (certifiées Cradle to Cradle, voir ⁽⁶⁾ p. 29) sont connectées entre elles par des clips en acier inoxydable (figure 22 C), insérés dans des rainures situées dans les angles des briques (figure 22 A et C). Le mur ainsi érigé est maintenu par des attaches murales en acier inoxydable fixées à la face interne des briques (figure 22 A).

Ce système est entièrement démontable en vue d'un réemploi, sans nécessiter de nettoyage. Monter des briques sans mortier présente d'autres avantages tels que la rapidité d'exécution,



une mise en œuvre non dépendante des conditions météorologiques ou la possibilité de recourir à une main-d'œuvre moins qualifiée. La finition du mur est propre, simple et ne nécessite pas de rejointoiement (figure 22 D, E et F). Vu l'absence de joints de mortier, aucun risque d'efflorescence n'est à craindre.

Commentaires

Les exemples d'utilisation de cette méthode d'assemblage concernent des bâtiments de faible hauteur (deux étages maximum). Peut-on considérer qu'il s'agit là d'une limite de la technologie ? Les exemples montrent en outre un usage systématique de la technique pour la réalisation de revêtements de façade. Aucune information n'est disponible quant à sa possible utilisation pour des murs porteurs. Il convient en outre de s'assurer de la pérennité des connexions (métalliques).

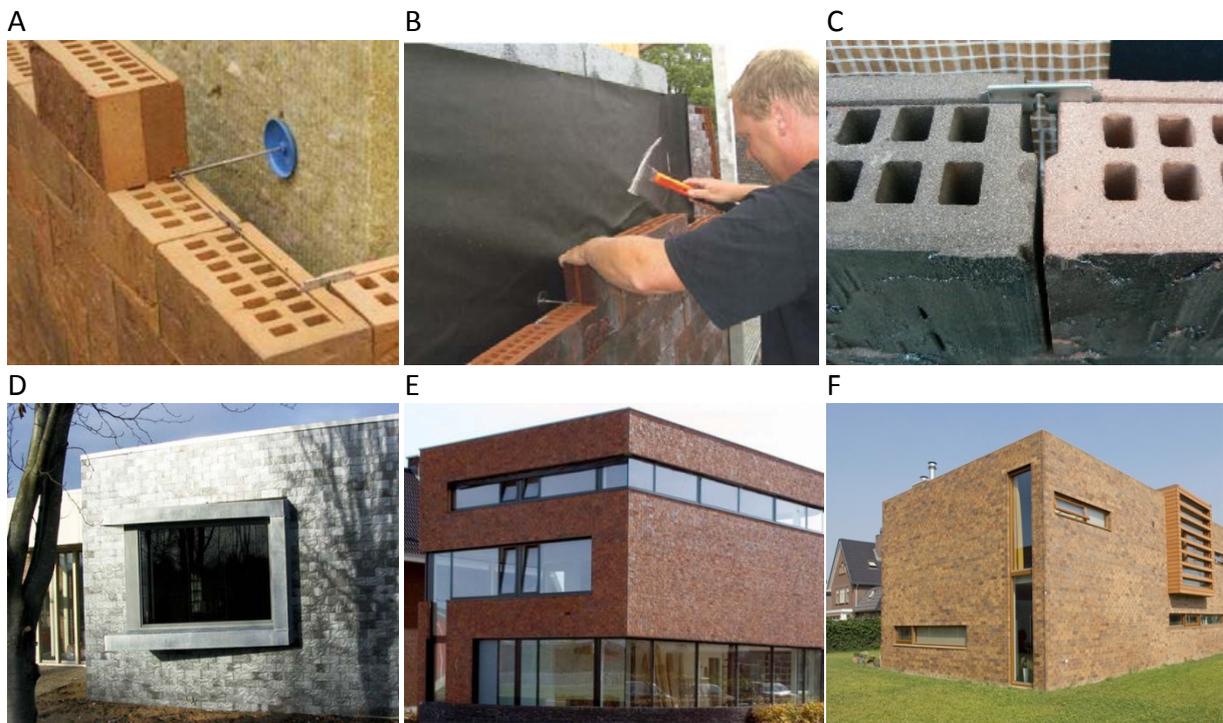


Fig. 22 Montage de maçonneries de briques sans mortier
(source : ClickBrick[®] *In Building Revolutions*, et Seps Matériaux) [17, 152].

PEIKKO – Système d'assemblage d'éléments en béton

Concept

PEIKKO est une entreprise finlandaise spécialisée dans la fabrication de moyens d'assemblage d'éléments de structure en béton. Les systèmes d'assemblage mécanique proposés sont réversibles, ce qui autorise un désassemblage des structures et une réutilisation des composants.

La figure 23 (A et B) illustre un connecteur (le 'Tenloc Panel Connector') permettant d'assembler de manière entièrement réversible de larges structures en béton préfabriqué. Ce connecteur peut également être utilisé pour fixer des parapets sur des façades ou des murs à des colonnes. Le verrou est serré dans la pièce d'ancrage avec une clé à cliquet. Sur place, des éléments en béton avec dispositifs de verrouillage et des éléments en béton avec pièce



d'ancrage sont érigés dans la bonne position et verrouillés l'un dans l'autre par une paire de connecteurs. Les raccords verticaux préfabriqués sont parachevés par jointoiment des boîtes de verrouillage.

La figure 23 C montre un autre système d'assemblage de structures en béton grâce auquel on stabilise la construction sans autre supports que quatre boulons.

Commentaire

Au vu des informations disponibles concernant cette technologie, rien ne permet d'établir avec certitude quelle intensité de charge ce genre de connexions peut tolérer.

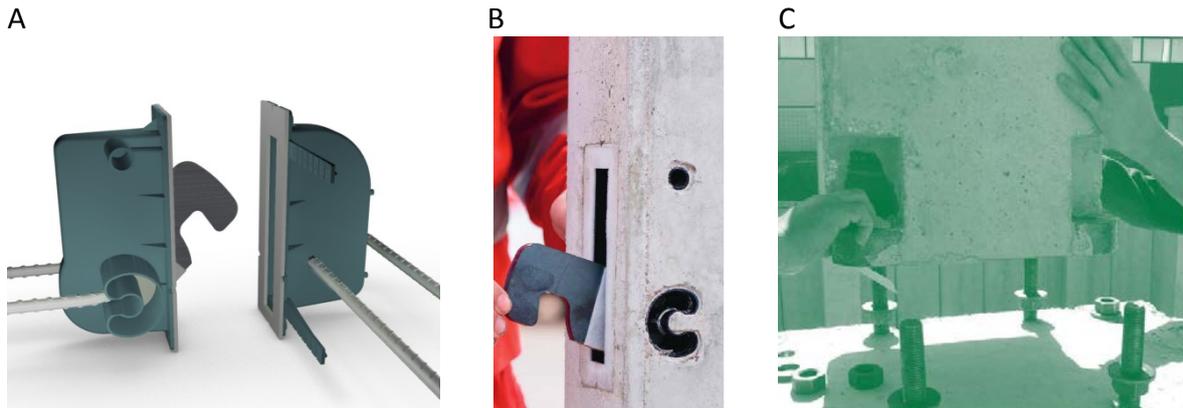


Fig. 23 Système d'assemblage d'éléments en béton
(source : PEIKKO *In Building a circular future* et PEIKKO) [35, 146].

PROTOTYPES D'ASSEMBLAGES RÉVERSIBLES – VIA University College (Finlande)

Les trois exemples évoqués ci-après sont des prototypes issus d'un développement universitaire théorique.

■ *Assemblage d'éléments en bois*

Les éléments de bois font partie d'un système modulaire conçu pour être désassemblé.

Les assemblages entre deux éléments de bois emboîtés sont réalisés par deux boulons vissés dans deux plaques métalliques sur lesquelles sont soudés deux écrous.



Fig. 24 Assemblage réversible en bois (source : GXN *In Building a circular future*) [35].



■ Assemblage d'éléments métalliques

L'assemblage traditionnel par écrous et boulons est remplacé par un assemblage avec mandrin à deux fentes et rondelles stabilisatrices. Ce système permet un assemblage et un démontage rapides et faciles sans nécessiter d'outillage.



Fig. 25 Assemblage réversible en métal (source : GXN *In Building a circular future*) [35].

■ Assemblage d'éléments en béton

Les liaisons entre les éléments sont réalisées avec des boulons de transfert de charge, placés dans des boîtes d'ancrage encastrées dans des évidements préfabriqués. Les assemblages boulonnés sont accessibles par les parties externes des éléments assemblés et sont protégés du feu par l'isolation et l'enveloppe du bâtiment.

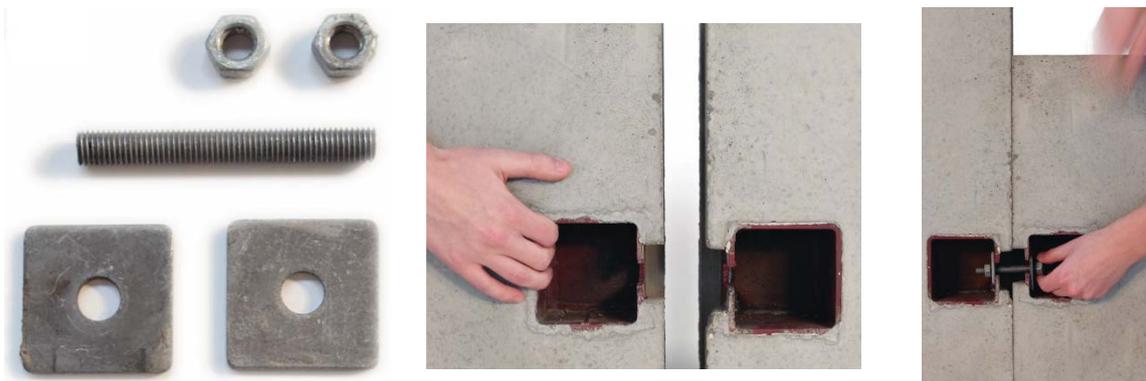


Fig. 26 Assemblage réversible d'éléments en béton (source : GXN *In Building a circular future*) [35].

Commentaires

Ces solutions constituent des prototypes. À notre connaissance, les informations concernant les limites du système (amplitude des forces à reprendre) ou les tolérances de fabrication, par exemple, demandent à être clarifiées.

F87 (Efficiency House Plus) – Werner Sobek (Berlin, Allemagne – 2011)

Concept

Construire un bâtiment témoin qui n'utilise aucune énergie, ne produit aucune émission et est entièrement re(up)cyclable.

Réalisation

La maison F87 [125] a été construite pour deux ou trois ans avant que les matériaux et les composants soient démontés en vue d'un réemploi. Le but est de montrer qu'un bâtiment peut être conçu pour être entièrement déconstruit à la fin de sa vie. Lorsque cela était possible, les matériaux ont été choisis de sorte à pouvoir être compostés ou recyclés en fin de vie. Ainsi, pas moins de 20 types de matériaux différents ont été utilisés pour leur potentiel de recyclage. La façade est constituée d'un bardage en bois, de lamelles d'aluminium, de triple vitrage et de panneaux solaires qui peuvent tous être récupérables et réemployés en fin de vie. La majorité des connexions sont réalisées au moyen de vis et de connecteurs à clips aisément accessibles. Les sols, murs et plafonds sont conçus en strates séparées sans colle entre les composants. Les revêtements de mur et de sol sont posés sans colle de manière à permettre des reconfigurations et un recyclage. En outre, un manuel de recyclage du bâtiment détaille les différents matériaux utilisés et leur potentiel de réemploi et de recyclage.

Commentaire

Le bâtiment n'ayant pas encore été démonté, ses composants (triple vitrage, par exemple) seront-ils réellement réutilisés en fin de vie ?

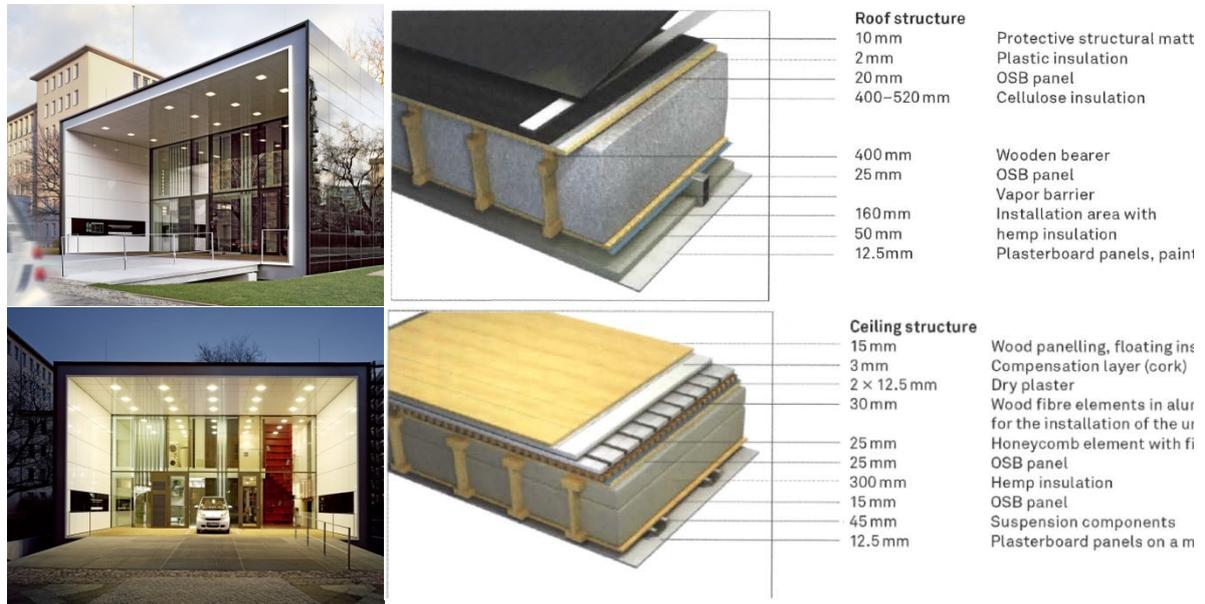


Fig. 27 Bâtiment témoin démontable et recyclable
(source : F87 (Efficiency House Plus) *In* Building revolutions et Werner Sobek) [17, 125].



3.1.5 Éviter les déchets, maximiser les ressources

3.1.5.1 Description

Une étude menée en Grande-Bretagne (Zakar, 2008) [66] montre que le véritable coût des déchets, en tenant compte non seulement de leur élimination, mais aussi du coût des matériaux et de main-d'œuvre liés à la production de déchets, sont 2,3 fois plus élevés que les coûts initialement estimés. Selon cette étude, les principales causes de production de déchets sont les suivantes :

- des méthodes de travail générant des chutes de matières
- une commande surnuméraire de matériaux
- un stockage inadéquat (matériaux non protégés des intempéries et du vol)
- un travail qui doit être recommencé en raison du manque de clarté des dessins ou des plans.

Concevoir et réaliser une construction circulaire ne se résume pas à construire sans déchets, mais bien à transformer les déchets potentiels en ressources. Cela signifie qu'il faut :

- premièrement, empêcher la production de déchets, tant dans la fabrication des produits que lors de leur mise en œuvre sur chantier, en évitant la surproduction, les surstocks, les transports inefficaces, le travail redondant, les temps d'attente, les défauts et refus de produits, les mauvaises exécutions
- et deuxièmement, trouver des opportunités pour transformer les déchets en ressource.

La quantité de déchets générés sur chantier pourrait être réduite considérablement en modifiant la façon dont les bâtiments sont conçus et construits. La manière la plus efficace pour ce faire est de déplacer au maximum les activités de construction hors du chantier et de réserver les activités sur chantier à l'assemblage des éléments plutôt qu'à la coupe et à la mise en œuvre des matériaux. Les déchets qui seraient émis dans la phase de préfabrication seraient moins nombreux et beaucoup plus homogènes que sur chantier. Les techniques traditionnelles de construction offrent, elles aussi, des opportunités de concevoir sans déchets, par exemple : en utilisant des éléments modulaires, en coordonnant la structure portante avec les façades ou bien les finitions internes avec l'aménagement intérieur du bâtiment, etc.

La plus grande partie des déchets provient cependant de la démolition (en cours de rénovation ou de démolition). Le meilleur moyen de s'en prémunir est de se demander s'il est vraiment nécessaire de les produire et donc d'entretenir les bâtiments plutôt que de les démanteler.

Le recours à la conception en 3D et l'emploi de logiciels BIM (*Building Information Modelling*) peuvent s'avérer très utiles pour s'assurer que la conception et la réalisation des éléments (et les acteurs responsables de ces éléments) soient parfaitement coordonnées et éviter ainsi la production de déchets sur site lors de leur mise en œuvre.

Un tri intelligent des déchets devrait pouvoir être réalisé de manière à soutenir le développement de filières de valorisation existantes. De nombreux producteurs de matériaux mettent actuellement en place des chaînes de collecte et de valorisation par recyclage en boucle des chutes de mise en œuvre.



3.1.5.2 Exemples et bonnes pratiques

ENVISAGER LA PRÉFABRICATION – Exemples à Bruxelles

Avantages de la préfabrication

La préfabrication présente de nombreux avantages liés notamment à l'économie des ressources et à la gestion durable du chantier, tels que :

- optimisation du procédé de fabrication
- utilisation rationnelle des ressources
- gestion des risques et maîtrise des sources de pollution
- réduction de la quantité de déchets produite sur chantier
- réduction (en quantité et dans le temps) des nuisances sur chantier (bruit, poussières, charroi, ...)
- méthodes de montage à sec favorisant le démontage ultérieur et le tri en fractions nettes
- gain de temps au niveau de la mise en œuvre sur chantier
- remplacement plus aisé d'éléments ou de leurs composants, à condition de respecter l'ordre d'assemblage des strates
- économie d'échelle (si répétition des modules).

Contraintes de la préfabrication

Si les avantages sont nombreux, des contraintes particulières doivent également être prises en compte :

- trame, calepinage, dimensions structurelles et standardisées : à intégrer dès la phase de conception du projet et à vérifier tout au long de l'élaboration des plans
- interaction étroite avec le fabricant / fournisseur
- étude précise du phasage des travaux
- définition claire des responsabilités
- taille des éléments : tenir compte de la configuration du site (intérieur d'îlot, par exemple) et de la place disponible sur chantier (manipulation, stockage) ainsi que de la largeur des voiries, des rayons de braquage
- recours à un engin de levage
- planning des livraisons et dispositifs de protection si stockage *in situ*.

Le recours aux éléments préfabriqués ne dispense pas d'une évaluation objective de l'impact environnemental du produit. En effet, certains produits préfabriqués se présentant sous forme d'éléments 'tout en un' ne constituent pas un avantage du point de vue environnemental. Les différentes composantes de ce type de produits sont inséparables en fractions nettes en fin de vie, ce qui empêche le tri et la valorisation optimale des déchets.



Fig. 28 Brasserie et logements publics – R²D² Architecture (source : Batex Bruxelles) [148].



Les éléments de plancher sont entièrement préfabriqués, permettant une répétition d'un étage à l'autre. Par ailleurs, le principe d'attache de la charpente arrière (pattes métalliques) permet l'utilisation du même élément, quelle qu'en soit l'inclinaison. D'autres éléments préfabriqués sont également intégrés au projet, tels que les fermes du bâtiment arrière ou encore l'enveloppe en ossature bois ne nécessitant plus qu'une pose sur chantier.

Fig. 29 École Émile Bockstael – Nimptscharchitekten (source : Batex Bruxelles) [148].



Les murs de ce bâtiment sont constitués de parois massives en bois, préfabriquées et isolées. Le bâtiment atteint la performance passive et le confort thermique est assuré. Il s'agit d'un exemple d'étude poussée, où impact environnemental des matériaux mis en œuvre, choix du système structurel, confort thermique et acoustique et performance énergétique ont été étudiés minutieusement pour aboutir à un bâtiment performant et exemplaire.

GARDIENS DE DÉCHETS DE CHANTIER

BALK VAN BEEL – Stéphane Beel Architects (Louvain – 2013)

Idée

Un gardien de déchets de chantier effectue des tâches de gestion des déchets *in situ*, afin d'assurer la propreté d'un chantier.

Réalisation

Sur le chantier du Balk van Beel (figure 30 A), l'entreprise d'économie sociale *Levanto* a été chargée par l'entrepreneur *Willemen* de maintenir un chantier propre en organisant *in situ* une mini-déchetterie où plus de 20 fractions ont été triées. Cette déchetterie était gérée par les 'gardiens de déchets de chantier' (*werfwachters*) de *Levanto*. Ceux-ci peuvent être considérés comme des manutentionnaires responsables de tâches simples telles que :

- le maintien de la propreté sur chantier : collecte régulière des déchets sur les postes de travail, veille attentive pour préserver la propreté du chantier et nettoyage régulier des zones de passage et de stockage
- des activités propres à la gestion des déchets (figure 30 B et C) : rangement et remplissage des containers, tri des fractions spécifiques, encodage des bordereaux de suivi d'évacuation des containers, etc.
- des activités relatives à la sécurité autour du chantier (figure 30 D, G, H et I) : bâchage des containers en fin de journée, ouverture et fermeture de l'accès aux containers, bâchage des échafaudages, maintien de l'affichage et de la signalisation du chantier, entretien des clôtures, etc.



- des activités d'assistance manuelle à l'entrepreneur (figure 30 E et F) : transport manuel d'éléments modulaires (blocs, briques, etc.), creusement manuel de certaines excavations, mise en place et maintien des protections sur les éléments fragiles, déchargement des camions, etc.

Selon les estimations, l'action de *Levanto*, qui s'est limitée, sur le chantier du Balk Van Beel, aux seules tâches de gestion de déchets, a permis d'économiser jusqu'à un conteneur mixte par semaine. Les autres services présentés dans cet exemple ont été menés sur d'autres chantiers.

Les avantages d'une telle collaboration sont nombreux :

- moins de soucis : les gardiens de chantier s'occupent d'activités permettant aux ouvriers de se concentrer sur les tâches pour lesquelles ils sont spécialisés, c'est-à-dire construire un édifice
- chantier ordonné et sécurisé : grâce au maintien d'un chantier propre, l'efficacité et la sécurité du chantier sont renforcées
- marque de durabilité : une gestion efficace des déchets conduit non seulement à réduire les coûts, mais donne également une image respectueuse de l'environnement pouvant attirer de nouveaux clients
- flexibilité : les gardiens de chantier ne doivent pas obligatoirement être présents en permanence sur le chantier
- rentabilité : les activités des gardiens de chantier sont économiquement viables pour la réalisation de tâches qui ne nécessitent pas de spécialisation.

Commentaires

Les services des gardiens de déchets de chantier sont intéressants pour certains types de chantiers, souvent de grande ampleur. Il existe en Belgique plusieurs entreprises d'économie sociale proposant les services susmentionnés, mais les gardiens de déchets de chantier ne doivent pas obligatoirement être issus du secteur de l'économie sociale.





Fig. 30 Gestion des déchets sur chantier (source : Levanto) [123].

FILIÈRES SPÉCIFIQUES DE RÉCUPÉRATION ET DE VALORISATION DES DÉCHETS Les producteurs ferment la boucle...

Concept

Sur les chantiers de construction, certaines chutes de mise en œuvre constituent des déchets homogènes et propres, valorisables au sein d'une filière de recyclage en boucle fermée auprès des producteurs.

Réalisation

Différents producteurs mettent en place des services de récupération des chutes de mise en œuvre de leurs matériaux dans le but de les réintroduire dans le cycle de production. Les conditions de reprise (état du déchet, logistique, coût, etc.) varient d'un producteur à l'autre et nécessitent une prise de connaissance et de contact préalable. Quelques filières sont brièvement présentées dans le tableau 1.

Tableau 1 Filières de récupération des chutes de matériaux.

Producteur/Fournisseur	Matière	Description
	Laine de roche	Le système Rockcycle encourage la reprise des chutes d'isolants en laine de roche Rockwool. L'entreprise Renewi met à disposition un container de collecte spécifique.
	Laine de verre	Les déchets (de découpe) de laine de verre Isover peuvent être repris dans des sacs de recyclage, à condition de répondre à certains critères de pureté (pas de contamination visible, pas de mélange avec d'autres déchets de construction, pas de revêtements, pas d'humidité, etc.).
	Béton cellulaire	Les déchets de béton cellulaire purs sont collectés et réintroduits dans la chaîne de production comme substitut du sable. Des <i>big bags</i> spécifiques sont utilisés à cet effet.



<p>Gyproc</p> 	<p>Plaques de plâtre</p>	<p>Les déchets de plaques de plâtre purs sont collectés et réintroduits dans la chaîne de production. Les déchets collectés séparément peuvent être transportés à l'usine de production à Kallo (New West Gypsum Recycling).</p>
<p>Val-I-Pac</p> 	<p>Emballages plastiques</p>	<p>Le système 'clean site' permet de collecter les emballages en plastique souple dans des sacs de 400 litres.</p>
<p>KURIO/EMSO</p> 	<p>Canalisations en matière plastique</p>	<p>Les canalisations en PVC-PE-PP sont collectées séparément et gratuitement dans des containers spécifiques chez les collecteurs participants.</p>
<p>Derbigum</p> 	<p>Étanchéité bitumineuse</p>	<p>Les déchets de mise en œuvre ou les déchets de revêtement de toiture peuvent être collectés gratuitement chez les collecteurs participants.</p>
<p>Desso</p> 	<p>Moquette</p>	<p>Desso et Renewi se sont associés pour la reprise des revêtements de sol (moquettes) usagés de Desso.</p>
<p>Armstrong</p> 	<p>Plafonds suspendus</p>	<p>Les revêtements en fin de vie sont collectés et repris sur palette. Les chutes de mise en œuvre sont collectées dans des <i>big bags</i>.</p>

BÂTIMENT M – Malines

Dans le cadre du redéveloppement d'un ancien bâtiment de Belgacom à Malines, le CSTC a calculé quelles économies pouvaient être réalisées en réutilisant la structure en béton existante plutôt que de la démolir et de la remplacer par une nouvelle structure. Au total, ce maintien entraînerait une économie de 2500 m³ de béton armé et de 16,5 tonnes d'acier de construction, ce qui représente 1000 tonnes d'émissions de CO₂. Le gain environnemental ainsi réalisé équivaut à la consommation énergétique liée au chauffage d'un bâtiment (neuf) pendant 50 ans.





Fig. 31 Maintien de la structure en béton d'un bâtiment en rénovation (source : SWECO, ex-Grontmij, Arteum Architects) [102].

3.2 Développements actuels et futurs

Les nombreux exemples présentés ci-avant pour illustrer les différents concepts de construction circulaire démontrent que le secteur doit se préparer à faire face à de nouveaux objectifs et à de nouvelles méthodes constructives. Les enjeux principaux de cette approche sont de concevoir et de construire les bâtiments en ayant une idée relativement précise de ce qu'ils pourraient devenir pendant et à la fin de leur vie, et ce dans le but de réduire au minimum l'exploitation des ressources et de prévenir la production des déchets en encourageant l'adaptabilité, la stratification, le désassemblage et le choix raisonné des matériaux.

Cette partie esquisse quelques évolutions en cours en termes de développement technique et d'innovations pouvant influencer la manière de concevoir et de construire 'circulaire'.

3.2.1 Standardisation

Une des stratégies visant à minimiser les déchets requiert une standardisation des produits et des processus de construction (ou 'mass customisation'). La standardisation est souvent perçue en termes négatifs, mais il est important de se rendre compte que l'industrie de la construction est déjà standardisée à de nombreux égards et que les sentiments de frustration que les individus expriment à différents niveaux de gestion sont souvent liés à une demande de standardisation accrue.

3.2.2 'Lean', systématisation de l'efficacité

Les stratégies de gestion et de mise en œuvre efficaces sur chantier visent notamment à accroître la qualité des ouvrages et sont regroupées sous l'appellation de *lean management*.

Un projet de construction implique généralement la collaboration de plusieurs partenaires. Si les interventions de chacun ne sont pas parfaitement orchestrées, il en résulte des pertes de temps et d'argent.



Le principe du *lean* consiste à créer de la valeur pour le client de manière durable, en éliminant les frais liés aux gaspillages ⁽⁹⁾ dans les processus de l'entreprise et en évitant tout ce qui ne crée pas de valeur ajoutée pour le client (ce qui revient à réduire les coûts et à optimiser les flux). Ces frais ne concernent pas uniquement les vices de construction, mais aussi les stocks pléthoriques, les déplacements excessifs, les capacités sous-exploitées, etc. Les processus deviennent ainsi plus stables, prévisibles et efficaces. La diminution des coûts de défaillance pourrait s'élever à environ 6 % ⁽¹⁰⁾. Les processus *lean* conduisent non seulement à réduire les coûts et les délais de livraison, mais aussi à améliorer la qualité et la sécurité.

Le *lean management* permet donc d'envisager une meilleure efficacité du chantier en réduisant les risques d'erreurs et, partant, la production de déchets, tout en améliorant le planning au travers de la responsabilisation de tous les acteurs.

- Planning collaboratif
- Marquage des zones de trafic, de stockage et de collecte des déchets
- Information et amélioration du tri des déchets
- Signalisation spécifiques des collectes de déchets.



Fig. 32 *Lean management* sur chantier (source : chantier Tivoli) [159].

L'apport du *lean* – bien qu'évidemment quantitatif (réduction des gaspillages et des erreurs d'exécution) en ce qu'il permet de mieux maîtriser l'adéquation des matières apportées, puis retirées d'un chantier donné – est également qualitatif et humain (création d'emplois de qualité dans un environnement de travail assaini, rétention de talents, attractivité des métiers de chantier pour les jeunes, etc.). Le *lean* est avant tout un défi pour la gestion du changement dans le monde de l'entreprise du bâtiment. L'aspect humain et la confiance entre les collaborateurs se trouvent donc au cœur de la réflexion. Les gains matériels qui en découlent sont notamment la réduction des gaspillages et les gains d'efficacité.

⁽⁹⁾ Une étude de Delta Partners montre que 10 % du budget d'un chantier est dépensé à recommencer un travail mal fait, 20 % du temps de travail de chaque ouvrier est consacré à la circulation sur le chantier, 55 % des tâches sont réalisées en retard par rapport au planning initial; de plus, les chefs de projets sont interrompus dans leurs tâches toutes les 6 minutes en moyenne et 99 % des clients s'attendent à être déçus lors de la livraison.

⁽¹⁰⁾ Selon d'autres sources telles que le World Economic Forum, les entreprises de construction qui ont appliqué avec succès une méthode *lean* ont réduit le délai de construction de 30 % et les coûts de 15 %.

3.2.3 'BIM', Building Information Model ou Modelling

Les technologies de l'information et de la communication sont devenues des outils indispensables dans le processus de construction. Travailler avec un modèle BIM ouvre encore un peu plus la porte aux possibilités, en proposant une approche intégrale des informations relatives à un projet, c'est-à-dire en englobant les phases de conception, de mise en œuvre et d'utilisation. Pour ce faire, il est essentiel que les divers acteurs du projet commencent à travailler ensemble le plus tôt possible. Ceci exige une méthode différente, plus orientée 'objet', dont pourra profiter toute la chaîne de construction. Le BIM conduit entre autres de réduire les coûts liés aux erreurs d'exécution, notamment par la **détection des conflits** en amont et l'échange efficace d'informations.

Il s'agit avant tout d'une **approche collaborative** intégrée entre les partenaires d'un projet. Cette approche met en relation les objets qui composent un bâtiment ainsi que leurs caractéristiques, et permet aux utilisateurs d'accélérer l'élaboration et la réalisation des projets, tout en réduisant les coûts de construction et d'exploitation.

Dans un processus BIM optimal, les divers intervenants travaillent en collaboration dès la phase de conception. Les connaissances de chacun peuvent ainsi servir à l'ensemble de la chaîne, ce qui permet d'éviter les modifications dans la conception durant la phase de construction. La quantité de tâches imprévues sera également réduite, d'où un **meilleur contrôle des coûts** de construction.

Pour que l'information circule correctement tout au long du processus, il est nécessaire de veiller à ce que tous les acteurs concernés se soient bien mis d'accord en ce qui concerne le logiciel à utiliser, les procédures d'échange à suivre, les droits de propriété et la manière de communiquer. Ces accords collectifs doivent être établis au préalable dans un **protocole**.

La méthodologie BIM est un processus qui implique la création et l'utilisation d'un modèle 3D intelligent qui contribuera à prendre de meilleures décisions concernant l'ouvrage à réaliser et à mieux communiquer. Les solutions BIM donnent aux équipes la possibilité de concevoir, visualiser, simuler et collaborer plus facilement tout au long du cycle de vie du projet. Elles aident à atteindre plus facilement les objectifs de l'entreprise, tout en optimisant l'utilisation des ressources et l'échange transversal d'informations entre tous les acteurs.

Le *Building Information Model* (ou modèle d'informations du bâtiment) repose sur la représentation numérique d'un ouvrage grâce à un **modèle géométrique** (maquette numérique en 2D/3D) **et informatif** : des informations (valeur U, coûts, matériaux, etc.) sont associées à chaque élément (fenêtre, toiture, mur, lavabo, etc.), structurées et reliées entre elles, celles-ci étant parfois même plus importantes que le modèle proprement dit. Toute modification des éléments revient donc à mettre à jour automatiquement les informations qui leur sont associées. La maquette numérique du BIM permet ainsi de visualiser plus rapidement le résultat final et de contrôler si tous les éléments sont compatibles.



3.2.4 Conception et construction adaptables

Si les principes d'adaptabilité, soutenus par l'utilisation d'assemblages réversibles, permettent de concevoir les bâtiments comme des banques de matériaux réemployables, il arrive souvent que des bâtiments ou des éléments mis en œuvre selon ces préceptes finissent par ne pas pouvoir être réemployés. Hormis une inadéquation à des performances ou des exigences spécifiques, une des principales raisons réside dans l'inadéquation entre l'offre et la demande pour de tels éléments ou bâtiments sur un territoire délimité et dans un délai acceptable.

Ainsi, par exemple, la rénovation d'un immeuble de bureaux fortement cloisonné prévoit la création d'un espace paysager. Cette rénovation engendre le démontage et l'évacuation de plusieurs kilomètres de parois résistant au feu (cloisons et portes). Ces parois sont constituées de centaines d'éléments modulaires aisément démontables et en parfait état de conservation (voir figure 33). Bien qu'ils présentent des qualités technologiques intrinsèques (acoustiques, isolantes et anti-incendie) et un haut potentiel de réemploi dû (notamment) à leur démontabilité, il n'existe pas, sur le territoire où est établi cet immeuble, de marché potentiel pour leur récupération (pas de demande ni de capacité de stockage pour de tels volumes).

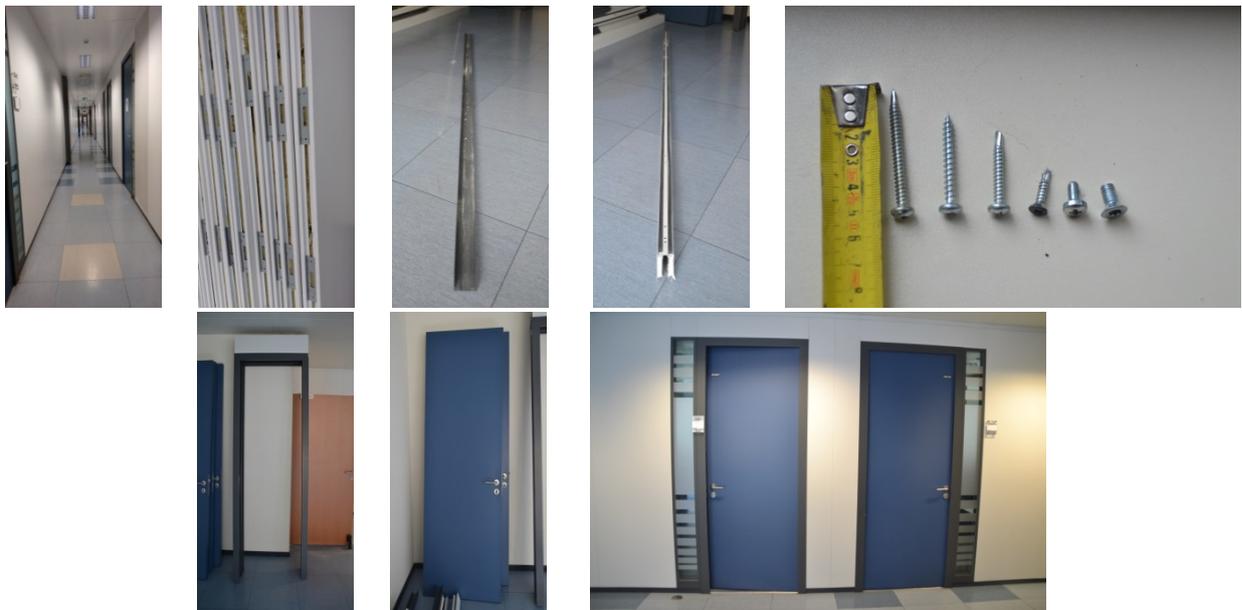


Fig. 33 Démontage de parois modulaires résistant au feu (source : CSTC).

Autre exemple, en 2008, à Amsterdam, une école temporaire [98] bâtie avec des éléments modulaires devait pouvoir être démontée et déplacée après sa première utilisation. Cette construction a néanmoins été mise au rebut récemment, car la démonter et la reconstruire ailleurs a été jugé non viable d'un point de vue pratique et financier. Cette situation s'explique par un certain nombre de raisons et notamment celle du manque d'informations disponibles à propos de l'immeuble (faillite du fournisseur). Une autre raison repose sur l'obsolescence des éléments modulaires utilisés, puisque ces derniers ne sont plus comparables avec les systèmes modulaires actuels.



Fig. 34 Bâtiment modulaire construit pour être intégralement démontable et déplaçable (source : architectenweb) [98].

L'un des premiers enjeux d'une construction adaptable est donc de parvenir à coordonner la planification entre la déconstruction des éléments et leur remise en œuvre. Des outils de planification territoriale, des plateformes d'échange ⁽¹¹⁾ ou des espaces de collecte et de stockage de matériaux pourraient faciliter cette coordination.

Un second enjeu réside dans l'universalité des systèmes adaptables et modulaires qui sont proposés et qui peuvent manifestement rapidement devenir obsolètes. Cette obsolescence des matériaux et éléments de construction peut être liée à une inadéquation avec de nouvelles performances ou exigences techniques, à la disparition d'un acteur (souvent le producteur) ou encore à l'absence (ou la disparition) d'informations sur les éléments réemployables. Il existe de nombreux exemples de systèmes de construction modulaire offrant de grandes possibilités de flexibilité spatiale dont la pérennité technologique est garantie par le producteur. En Belgique, des sociétés telles que Portakabin ou Skilpod proposent des solutions de construction modulaires, adaptables et déplaçables.



(source : Portakabin) [85]



(source : Skilpod) [88]

Fig. 35 Constructions modulaires, adaptables et déplaçables.

⁽¹¹⁾ À titre d'exemple, à Bruxelles, l'entreprise 'hu.bu' relie le monde associatif et le secteur marchand grâce à une plateforme de dons. Celle-ci met en relation des acquéreurs potentiels de mobilier de bureau avec des donateurs, et planifie le déroulement des opérations (Human Business, <https://www.hu-bu.be/>).

3.2.5 Passeport de matériaux

L'économie circulaire considère les bâtiments non plus seulement comme des consommateurs de ressources et d'énergie et des émetteurs de gaz à effet de serre mais également comme source potentielle de matériaux. Le bâti peut être envisagé comme un stock de matières premières secondaires, immobilisé durant un certain temps, qui représente autant de ressources pour le territoire permettant de limiter l'importation de nouvelles matières (et les émissions qui en découlent).

En concevant les ouvrages en vue du désassemblage et de la déconstruction, la valeur résiduelle d'un bâtiment obsolète peut devenir positive, ce qui incite davantage à récupérer les composants et les matériaux.

Certains outils, tels que le BIM et le passeport de matériaux permettent de quantifier et de qualifier ces ressources, mais également de déterminer à quelle échéance la matière sera disponible pour alimenter une construction neuve. Afin de rendre cette récupération opérationnelle, les matériaux doivent être documentés et identifiés dans les bâtiments. L'idée est d'associer à chaque matériau un document (physique ou virtuel) qui regrouperait toutes les informations utiles et serait mis à jour tout au long du cycle de vie de l'élément. Toutes les informations reprises dans le passeport doivent refléter l'état courant des éléments. Cette considération mène à devoir tester le matériau à l'aide d'équipements de mesure. Les informations doivent être certifiées et tenues à jour par une entité responsable pouvant garantir de l'exactitude des données.

La mise en œuvre du passeport de matériaux et du concept de banque de matériaux présente plusieurs défis d'ores et déjà reconnus, à savoir :

- la collecte, la vérification, l'encodage et le traitement des informations relatives aux bâtiments existants qui pourraient constituer des banques de matériaux
- la manipulation et l'organisation d'un grand nombre de données collectées lors de la cartographie des éléments et des matériaux. La principale difficulté consiste à recueillir toutes les informations sur tous les éléments et à les injecter dans une base de données où chaque élément peut être identifié et suivi. Un modèle BIM peut fournir un cadre de traitement et de structuration de ces données
- la mise à jour des informations en fonction des opérations de maintenance des bâtiments et de l'évolution des exigences performantielles.

Des recherches approfondies doivent encore être menées au sujet de la mise à jour des éléments sur de longues périodes, de la responsabilité des acteurs quant aux contenus, du développement de nouvelles solutions, du bâti existant non documenté, etc.

3.2.6 Performances énergétiques, circularité et accessibilité économique

Ces dernières années, les objectifs environnementaux réglementaires ont poussé le secteur à améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments, en optimisant les systèmes de production de chaleur et en renforçant l'isolation thermique des bâtiments. Ce souci d'économie d'énergie a permis l'émergence de solutions techniques et pratiques visant à mieux isoler les



constructions et à les rendre plus étanches à l'air. Citons notamment la projection de produits isolants adhérents (de type polyuréthane) sur des murs ou des dalles. De même, le renforcement de l'étanchéité à l'air a favorisé l'utilisation des mastics, colles et autres mousses expansives. De nouveaux produits tels que des panneaux sandwichs ou des panneaux de mousse isolante recouverts de briquettes sont également commercialisés dans l'optique d'une amélioration de la performance énergétique des bâtiments.

Loin de participer à la différenciation des strates bâties, ces procédés constructifs ont tendance à amalgamer les couches et à les rendre pratiquement indissociables, compliquant le travail des déconstructeurs et des recycleurs. Parallèlement à l'évolution des exigences thermiques et de confort, la croissance des coûts d'approvisionnement en matériaux de construction a stimulé l'usage de solutions rapides et efficaces de construction modulaire, telles que la préfabrication.

Le défi pour l'avenir consistera dès lors à harmoniser les exigences de performances et d'efficacité dans de nouvelles solutions mixtes permettant d'assurer à la fois la performance énergétique des bâtiments et la circularité des éléments construits.

3.2.7 Nouveaux matériaux

Au niveau de la production des matériaux, des innovations fondées sur les principes de l'*écodesign* voient le jour et se développent. Aujourd'hui encore, l'*écodesign* des matériaux est trop peu appliqué et de nombreux matériaux sont mis sur le marché sans considération de leur devenir en fin de vie. L'enjeu pour ce secteur de marché est donc de parvenir à mettre en place des produits et des processus permettant de fermer la boucle des matériaux.

De nombreux producteurs trouvent un avantage à mettre en place une collecte de récupération des déchets de mise en œuvre de leurs matériaux, afin de les intégrer dans le processus de fabrication de nouveaux matériaux. Plus largement, après le réemploi sur site ou hors site, la première manière de boucler la boucle est l'utilisation de déchets de matériaux comme matière première (secondaire).

La production locale de matériaux de construction conduit en outre à diminuer l'impact environnemental de ces derniers en minimisant la charge du transport dans le bilan écologique, tout en encourageant la relocalisation de l'économie par le développement industriel et la création d'emplois.

D'autres industries ont également emboîté le pas du traçage chimique de leurs produits, dans le but d'en assurer une récupération et un recyclage en fin de vie. C'est notamment le cas de la plasturgie et principalement des emballages. L'objectif est notamment d'aider les fabricants et les détaillants à faire face à la sécurité des produits et à la contrefaçon, en gardant trace des signatures uniques dans les emballages plastiques. Un des principes consiste à prévoir un traceur de polymères, qui permet d'identifier le type de plastique à la fin de sa durée de vie [54].



On tente par ailleurs de rendre les matériaux plus efficaces ou plus performants : par exemple, l'utilisation de béton à ultra hautes performances (BUHP) nécessite une moins grande quantité de béton en raison des résistances beaucoup plus élevées atteintes, ce qui réduit l'impact environnemental total. On étudie également la possibilité de combiner un fin voile de ciment à armature en textile avec une isolation épaisse afin d'obtenir des éléments de construction autoportants, légers et efficaces en termes d'utilisation de matières.

Une dernière innovation relative aux matériaux réside dans leur capacité d'autonettoyage ou d'auto-rénovation. Ainsi, des microcapsules peuvent être intégrées au béton et le rendre apte, en cas de fissuration, à 'se reconstituer', prolongeant ainsi sa durée de vie.

3.2.8 Impression 3D

Le concept d'impression 3D dans la construction se réfère à diverses technologies qui utilisent l'impression 3D comme une méthode de base pour fabriquer des bâtiments ou des composants de construction. En raison du coût qui lui est associé, l'impression 3D à l'échelle de la construction exige une conception très minutieuse et peut répondre aux demandes des architectes et des ingénieurs qui souhaitent utiliser des composants de haute valeur ou de haute performance, comme par exemple dans les projets de rénovation ou pour la reproduction d'éléments constructifs d'édifices patrimoniaux. L'impression 3D peut également être envisagée pour la fabrication d'éléments sur mesure qui ne pourraient pas être produits par ailleurs.

Les avantages potentiels de cette technologie sont multiples : construction plus rapide, coûts de main-d'œuvre moins élevés, complexité et/ou précision accrues, plus grande intégration des fonctions et production de déchets réduite.

Il existe une variété de méthodes d'impression 3D utilisées à l'échelle de la construction, qu'il s'agisse de l'extrusion (béton, ciment, cire, mousse, polymères), du collage de poudre (liaison polymère, liaison réactive, frittage) ou du soudage par additif.

La figure 36 présente trois nœuds structurels destinés à porter des câbles au-dessus d'une route à La Haye. La différence visuelle évidente entre les trois objets provient du fait que le nœud à l'extrême gauche a été conçu par un humain, et à l'extrême droite par un ordinateur. Plus important encore, le nœud à l'extrême droite supporte le même poids, mais pèse 75 % de moins et est deux fois plus petit.

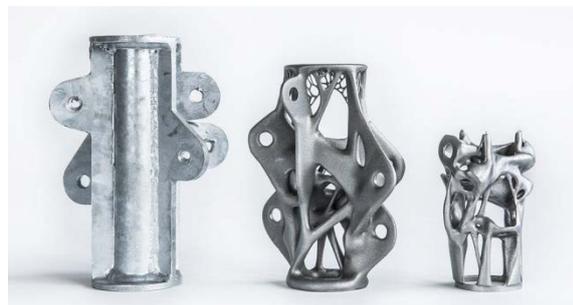


Fig. 36 Nœuds structurels pour support de câbles (source : Arup) [69].

3.3 Enjeux et opportunités économiques

Les enjeux économiques de la conception et de la construction circulaires sont évidemment nombreux en termes d'emploi, de création d'activités nouvelles et de coût. Ce chapitre dresse un premier aperçu de ces enjeux, en établissant un lien avec la viabilité économique des développements techniques mentionnés ci-avant.

3.3.1 Matériaux 'circulaires'

Les défis portent principalement sur l'opportunité économique réelle d'utiliser des matériaux 'circulaires'. De fait, utiliser des produits et matériaux présentant des caractéristiques qualitatives élevées ou des procédés constructifs mettant l'accent sur le potentiel de valorisation en fin de vie peut augmenter les coûts de la construction. Tout l'enjeu serait donc de réaliser une construction qualitative circulaire dont les coûts sont plus ou moins équivalents à ceux d'une construction traditionnelle.

Il existe de nombreux modèles de certification et labels environnementaux pour les matériaux de construction. Ces labels ou certificats peuvent aider les producteurs à se distinguer de leurs concurrents, lorsqu'ils développent des solutions innovantes intégrant moins de matières premières et/ou des matériaux recyclés, en leur permettant de gagner des parts de marché ou d'augmenter leur prix de vente.

Un deuxième aspect soulevé par le développement des passeports de matériaux et le concept de bâtiment en tant que banque de matériaux a trait aux **outils de numérisation**. L'investissement requis pour l'utilisation des logiciels liés au BIM peut s'avérer relativement lourd. La collecte des informations relatives à chaque élément de construction nécessite une formation spécifique, voire l'émergence de nouveaux métiers pour la gestion des bases des données. Ces 'data managers' seraient en charge du développement, du partage et de la gestion des passeports des éléments et composants de construction via un système de gestion de données 'open source'. Ils seraient aidés dans leurs tâches par des développeurs d'identité des matériaux dont le rôle serait d'élaborer les passeports de matériaux proprement dits. Ces deux nouveaux métiers devraient évidemment instaurer, entre les différents acteurs du processus de construction, un dialogue permanent concernant les technologies disponibles, les caractéristiques fonctionnelles et techniques des matériaux recyclés, les innovations au niveau de la conception, des matériaux et des produits, etc.

3.3.2 Stratification et adaptabilité : coût sur la durée de vie

Un autre enjeu économique réside dans l'analyse des coûts de la conception en strates et de l'adaptabilité des bâtiments. L'analyse économique du cycle de vie d'un immeuble de bureaux (figure 37) montre que les frais d'investissement (61 %) et d'entretien (26 %) représentent la majeure partie des coûts. Les principaux frais ne sont cependant pas occasionnés par les mêmes composants du bâtiment au cours de ses différentes phases de vie. Ce sont, par exemple, les installations (HVAC, électricité et éclairage, ascenseurs) (30 %) et la structure (28 %) qui engendrent la plupart des frais d'investissement, alors que les installations



représentent près de la moitié des frais d'entretien (47 %). Les frais de fin de vie (démolition et traitement des déchets) n'ont que peu d'impact sur le coût total du cycle de vie (moins de 1 %); intervenant seulement 60 ans plus tard, ils pèsent en effet moins lourd dans la balance une fois actualisés.

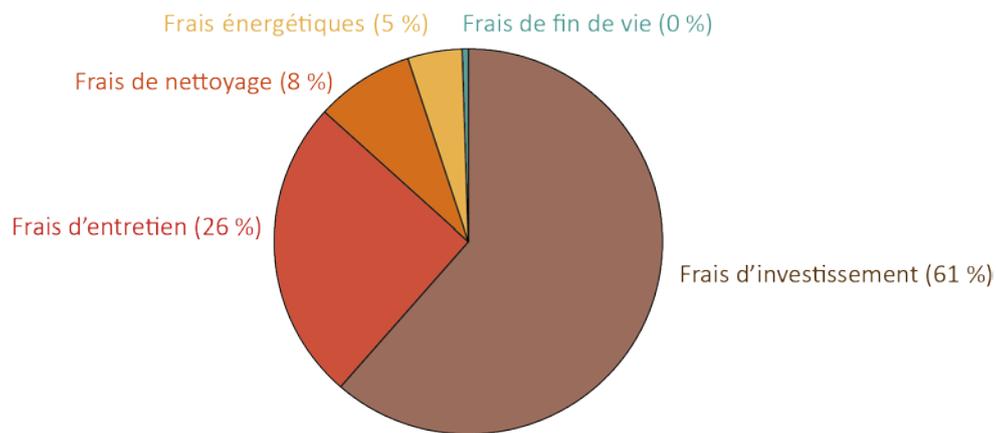


Fig. 37 Répartition des coûts du cycle de vie d'un bâtiment (source : CSTC) [32].

Le CSTC a étudié la mise en œuvre de cloisons intérieures démontables (figure 38), en les comparant à deux variantes (cloisons en blocs de plâtre et cloisons légères non démontables). Pour chaque variante, on a considéré différents scénarios dans lesquels l'aménagement spatial intérieur du bâtiment est modifié après 5, 10, 15 ou 30 ans ou reste inchangé pendant toute la période. En toute logique, l'investissement supplémentaire ne sera amorti que si un nombre minimal d'adaptations sont réalisées. Si on n'effectue aucune adaptation sur l'ensemble de la période considérée ou que l'on n'en réalise qu'une seule (valeurs en vert), il n'est pas intéressant d'investir des fonds additionnels dans des cloisons démontables (coût du cycle de vie plus élevé). Par contre, si l'on adapte le bâtiment au moins une fois tous les 15 ans, le coût des adaptations sera de plus en plus élevé et les cloisons démontables se révéleront rentables (valeurs en rouge).

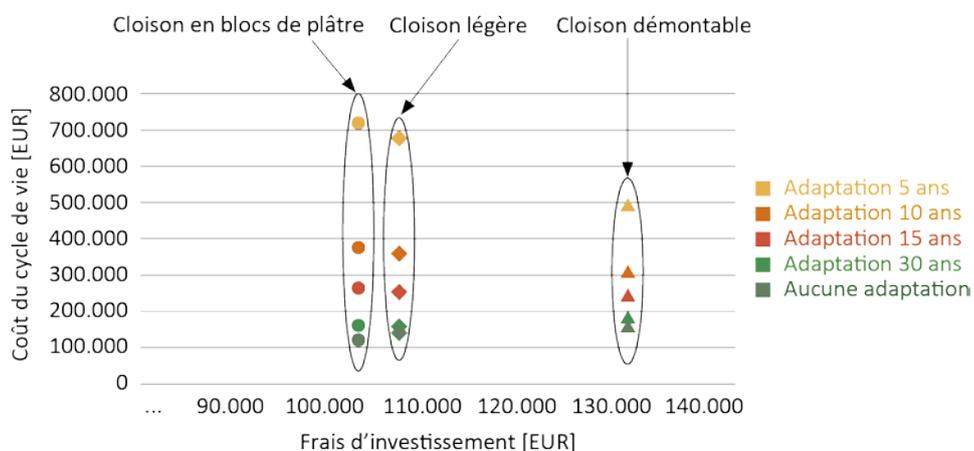


Fig. 38 Comparaison du coût du cycle de vie et des frais d'investissement pour différents types de cloisons en fonction de la fréquence d'adaptation (source : CSTC) [32].



4. Urban mining

“Imagine an economy in which today’s goods are tomorrow’s resources, forming a virtuous cycle that fosters prosperity in a world of finite resources.”

Ellen MacArthur (founder of the Ellen MacArthur Foundation, 2012)

À l’horizon 2050, 70 % de la population mondiale devraient vivre en zone urbaine. Concentrant à la fois la population, l’activité économique, la production et la consommation, les villes renferment simultanément les problèmes et les solutions aux enjeux de durabilité : ressources, déchets, climat, etc.

L’urbanisation est en grande partie un processus de développement des stocks bâtis urbains, dans la mesure où les bâtiments et les infrastructures nécessitent de grandes quantités de matériaux pour leur construction, leur entretien ou leur maintenance et leur remplacement, et qu’ils constituent des réservoirs de matériaux qui peuvent être récupérés via l’exploitation minière urbaine. Les villes de l’avenir, véritablement durables, ne différencieront pas déchets et ressources; elles deviendront peu à peu les mines du futur, tandis que les mines traditionnelles se tariront.

La plupart des matières premières nécessaires à la production de matériaux de construction foisonnent dans notre environnement urbain. Par conséquent, l’analyse et l’estimation du volume de stocks bâtis, de leur qualité matérielle et de leur répartition (en particulier dans les zones urbaines) sont une étape essentielle dans la recherche de solutions en vue de relever les défis de la durabilité urbaine.

Redéfinir les déchets comme des ressources et le stock bâti comme source potentielle de matériaux nécessite un changement d’approche de tout le secteur de la construction et de la démolition. Lorsqu’un bâtiment est promis à la démolition ou à la rénovation, il conviendrait de consacrer plus de temps, d’espace et de main-d’œuvre pour concevoir et mettre en œuvre une déconstruction sélective des éléments et des matériaux. Cette déconstruction sélective sera précédée de l’inventorisation des éléments et matériaux à déconstruire.

La création d’un marché actif pour la récupération des matériaux et composants pourrait couvrir les coûts de désassemblage, de stockage et de revente. Pour ce faire, les matériaux réutilisés doivent être disponibles en quantité suffisante, attractifs et certifiés comme étant aptes au réemploi.

La construction circulaire propose de considérer les bâtiments (existants et futurs) comme des stocks de matériaux. Alors qu’actuellement, on estime que la valeur résiduelle des stocks bâtis est négative, puisque nous payons pour leur démolition, un changement de paradigme conduirait à envisager les éléments construits selon leur potentiel de déconstruction, de ‘remanufacturing’, de réemploi ou de recyclage.



Le chapitre précédent a décrit la manière dont les bâtiments peuvent être conçus pour conserver une valeur positive en fin de vie en les rendant adaptables et en s'assurant que les matériaux et les composants qu'ils contiennent puissent être récupérés. Cette aptitude au désassemblage fournit aux bâtiments l'opportunité d'être redéployés dans de nouveaux lieux ou pour de nouveaux usages, et permet de récupérer et de réemployer les composants ou de les remanufacturer.

Ces actions, en retour, réduisent notre dépendance vis-à-vis des matières premières et créent des emplois locaux. S'ils ne sont pas réemployés, les matériaux récupérés ou déconstruits peuvent être recyclés pour réintégrer le cycle de production.

En se focalisant sur les flux de matériaux mis en œuvre et sur les bâtiments existants, ce chapitre définit les principes de l'inventaire de pré-déconstruction, de la déconstruction sélective, du 'remanufacturing', de la préparation au réemploi, du réemploi et du recyclage.

4.1 Principes de l'*urban mining*

4.1.1 Stratégies de conservation de l'existant

4.1.1.1 Description

Les modifications apportées à un bâtiment tout au long de son cycle de vie sont inévitables, puisque les attentes des occupants et les exigences de performances posées aux ouvrages de construction évoluent elles aussi. Il existe dès lors deux grandes stratégies d'intervention : la démolition – on préférera le terme de déconstruction (voir § 4.1.3) – dans le cas où les édifices ne permettraient aucun remaniement ni aucune adaptation, ou la rénovation (plus ou moins lourde) dans les autres cas.

Quelle que soit la stratégie choisie, la décision d'intervenir sur un bâtiment est un processus complexe faisant appel à des valeurs environnementales, culturelles et économiques.

Du point de vue de l'économie circulaire, il est conseillé de conserver autant que possible les bâtiments et les structures existants, et de tirer parti de solutions innovantes pour créer de la valeur ajoutée.

Que l'on privilégie l'une ou l'autre action, il est nécessaire, avant d'envisager toute intervention, d'évaluer l'état de conservation (esthétique, physique, mécanique, etc.) de l'élément (matériau, paroi, bâtiment).



4.1.1.2 Exemple et bonnes pratiques

TOUR À PLOMB – Bureau d'Engineering et d'Architecture industrielle BEAI (Bruxelles, 2017)

Idée

Rénover et changer d'affectation un bâtiment industriel, en préservant le plus possible l'existant.

Réalisation

Le projet retenu pour cet ancien site industriel initialement voué à la démolition comprend la rénovation et la transformation en établissement scolaire couplé d'une salle polyvalente, d'une salle de spectacle, d'un gymnase, de bureaux et d'une bibliothèque; il inclut également la restauration de la tour à plomb (monument classé) ainsi que l'aménagement de la cour de récréation et du jardin.

Le projet se distingue notamment par :

- le réemploi de matériaux existants : réutilisation *in situ* des anciennes briques (30 à 40 m³ de briques ont été récupérées et nettoyées avant remise en œuvre) (figure 39 E et F), renforcement de la charpente existante (figure 39 B et D), transformation de poutres et madriers en mobilier et en portes (figure 39 I), réparation d'anciennes poutres, doublage des planchers en bois par des tirants métalliques (figure 39 B)
- l'adaptabilité des plans et une construction ingénieuse visant à faciliter la reconversion éventuelle du bâtiment : afin d'ouvrir au maximum le plan du rez-de-chaussée et ainsi permettre son exploitation en tant que salle de spectacle, les anciennes colonnes de support intermédiaire ont dû être supprimées; pour conserver le plancher de grande valeur patrimoniale, il a été décidé de suspendre les poutres de support à des éléments métalliques placés entre le deuxième et le troisième étage (figure 39 G)
- l'installation d'une toiture verte sur des éléments structuraux récupérés
- une phase importante de dépollution, de désamiantage et de traitement des matériaux abîmés.

Le projet a démontré que les briques récupérées, anciennement maçonnées à la chaux, pouvaient parfaitement être remises en œuvre au moyen de mortier 'bâtard' (mélange chaux-ciment). Cette technique constructive plus contemporaine offre une alternative à la mise en œuvre classique au moyen de mortier de ciment.

Par ailleurs, certains seuils en petit granit découverts lors de la rénovation seront réutilisés pour l'aménagement de la cour de récréation (figure 39 H).



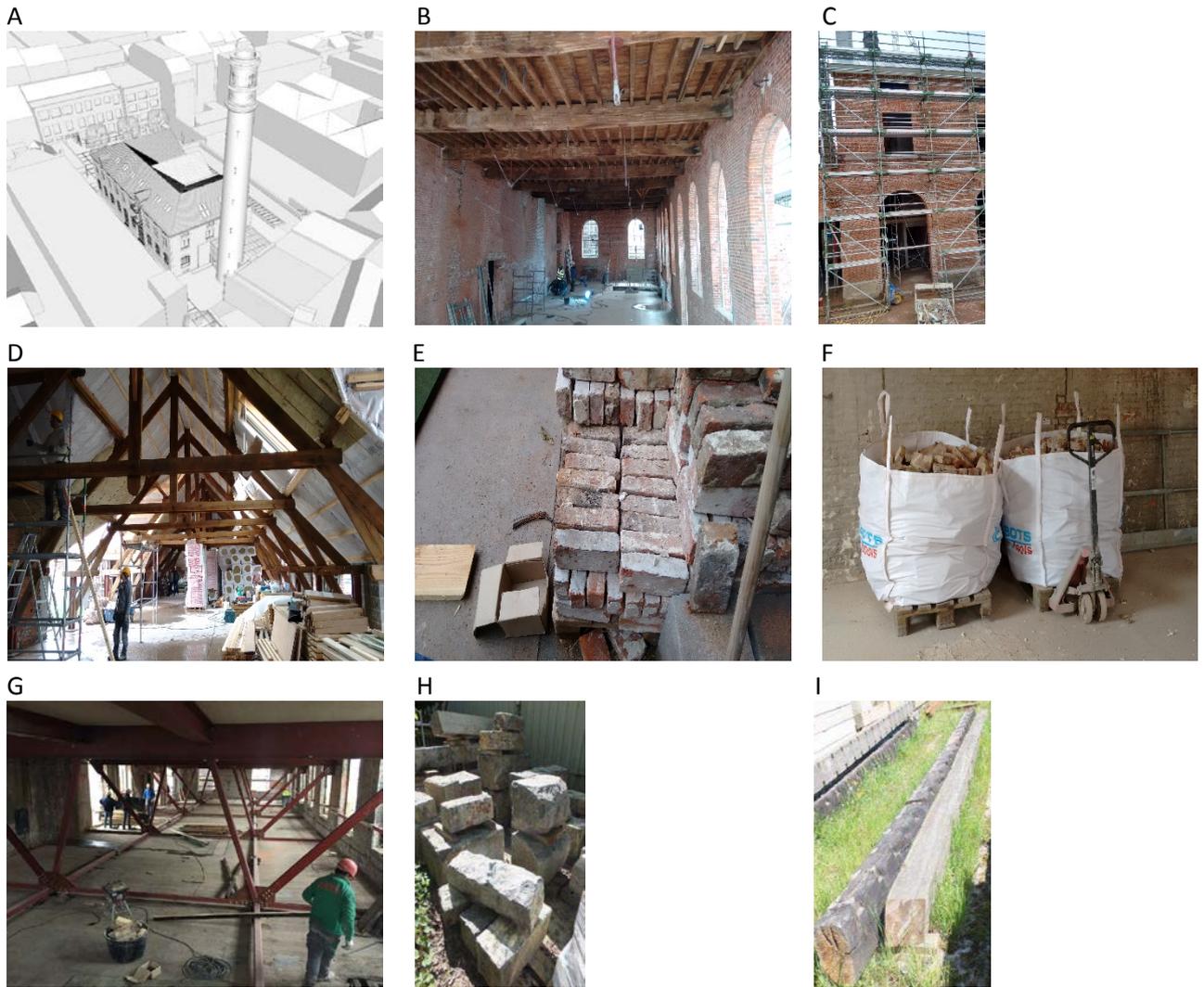


Fig. 39 Rénovation et changement d'affectation de la Tour à Plomb à Bruxelles (source : BEAI, Entreprises Jacques Delens & CSTC) [110].

4.1.2 Inventaire de pré-déconstruction

4.1.2.1 Description

Étape préalable essentielle à la déconstruction sélective ⁽¹²⁾ des éléments de construction (voir § 4.1.3), l'inventaire de pré-déconstruction vise à évaluer les possibilités de valorisation de chaque type de matériau et/ou de produit présent dans le bâtiment. Il se compose d'un relevé détaillé des éléments et des matériaux, et se base sur l'analyse de l'ensemble des documents disponibles concernant le bâtiment (voir point 4.c ci-après). Afin que cet inventaire soit le plus pertinent possible, il doit être pris en charge par le maître d'ouvrage avant de faire appel à un entrepreneur pour la réalisation des travaux. Cet inventaire peut servir à la planification et à l'optimisation des étapes de déconstruction ou de démolition.

⁽¹²⁾ En Flandre, l'inventaire de pré-démolition est une obligation légiférée depuis mai 2009 pour les bâtiments et les installations d'un volume bâti supérieur à 1000 m³ présentant plus qu'une simple fonction résidentielle (<http://www.vlaanderen.be/nl/natuur-en-milieu/afval/sloopinventaris-afvalstoffen>).



Un inventaire de pré-déconstruction peut se réaliser en plusieurs étapes :

1. *inventaire des contaminants* : cette étape consiste à identifier les éléments dangereux (par exemple, amiante, goudron, PCB, huiles minérales, métaux lourds, etc.) et à prévoir leur évacuation adéquate avant la déconstruction
2. *inventaire des réemployables* : il s'agit d'identifier l'ensemble des éléments présentant un potentiel de réemploi (voir § 4.1.5). Cette identification requiert une certaine expertise et une bonne connaissance du marché
3. *test de déconstruction (facultatif)* : celui-ci devrait clarifier le caractère récupérable des éléments identifiés comme réemployables. Il doit informer l'entrepreneur au sujet des difficultés qu'il devrait rencontrer et de l'appareillage dont il aura à se munir lors de la déconstruction
4. *inventaire de pré-déconstruction proprement dit* : il permet de quantifier les matières présentes dans le bâtiment et d'identifier les filières qui seront activées pour leur traitement (mise en décharge, incinération, recyclage ou réemploi). L'inventaire se déroule globalement en quatre étapes :
 - a. *l'étude 'hors site'* : collecte et analyse des documents relatifs au bâtiment (plans, coupes, métrés, cahier des charges de la construction originale, plans *as-built*, permis de bâtir et d'environnement, inventaires préalablement réalisés (amiante, par exemple), interviews des occupants précédents, documents historiques, cartes topographiques, photos aériennes, etc.)
 - b. *l'étude in situ* : visite du bâtiment avec appréciation sur site des points particuliers relevés lors de l'analyse des documents, et réalisation d'observations et de mesures; éventuellement prélèvement d'échantillons pour l'analyse de certains matériaux pouvant être contaminés ou présentant un potentiel de réemploi après prise de mesures caractéristiques (conductivité thermique d'un isolant, par exemple). Cette phase peut également inclure la phase de test de déconstruction
 - c. *l'inventorisation* : mise en tableau de l'ensemble des informations récoltées sur le bâtiment. Plus ces informations seront nombreuses, plus l'analyse pourra être poussée. Les informations à collecter peuvent au moins reprendre les données suivantes : type de matériau, fraction, flux, type d'élément, code Eural ⁽¹³⁾, étage (localisation), nombre, longueur, hauteur / épaisseur, largeur / épaisseur, surface, volume, masse, filière vers laquelle diriger l'élément (réemploi, recyclage, incinération, mise en décharge)
 - d. *l'analyse de l'inventaire* : l'analyse multicritère (économique, technique et pratique) de l'inventaire peut permettre d'aider l'entrepreneur à évaluer la rentabilité, par rapport à une démolition classique, de la déconstruction sélective de tout ou partie du bâtiment.

4.1.2.2 Exemples et bonnes pratiques

Voir les exemples présentés dans la section suivante relative à la déconstruction sélective. Ces exemples reflètent le lien étroit qui existe entre inventorisation et déconstruction.

⁽¹³⁾ La liste européenne des déchets classe l'ensemble des déchets selon l'activité ou le secteur qui les a générés, en précisant leur nature. Chaque déchet possède donc un code EURAL à 6 chiffres, dont les deux premiers permettent d'identifier l'activité ou le secteur de production. Pour les déchets de construction, le code commence par 17.



4.1.3 Déconstruction sélective

4.1.3.1 Description

Pour pouvoir disposer de matériaux et de produits arrivés en fin de vie ou encourager leur retour dans un nouveau cycle de vie, il est essentiel d'agir à la source par un démantèlement soigneux et sélectif des éléments de construction.

Les objectifs principaux de la déconstruction sélective sont de pouvoir réutiliser ou valoriser de manière optimale la plus grande partie des éléments voués à la démolition ou à la rénovation.

Cela passe par une dépose sélective et un tri à la source de la plus grande partie des éléments repris dans l'inventaire (voir § 4.1.2) afin d'obtenir des flux de déchets relativement homogènes, pouvant être valorisés au mieux. La phase de dépose des éléments demande d'utiliser des outils et des moyens de collecte adaptés à l'élément à déconstruire⁽¹⁴⁾ ⁽¹⁵⁾.

La déconstruction sélective poursuit deux objectifs.

1. Un meilleur tri sur chantier

Les taux de recyclage imposés par l'Europe sont élevés. Si la fraction inerte des déchets, la plus massive, est aujourd'hui très bien recyclée en Belgique, on constate cependant que la majeure partie des déchets non pierreux et non inertes ont des taux de valorisation très faibles. Très souvent, ces flux sont mélangés les uns aux autres et leur traitement passe fréquemment par l'incinération ou la mise en décharge.

La déconstruction sélective de ces matériaux devrait favoriser une valorisation optimale et dès lors augmenter encore le taux de valorisation des déchets. Dans un projet de rénovation, la possibilité de récupérer et de réemployer certains éléments ou matériaux doit être évaluée lors de la phase d'inventorisation qui précède la phase de démolition (voir § 4.1.2). Cette étape permet ainsi de maximiser les ressources présentes sur le site et de diminuer la production de déchets.

2. Une déconstruction en vue du réemploi

Plusieurs critères doivent être réunis pour décider si un élément de construction voué à la démolition peut être déconstruit en vue d'une réutilisation :

- *critères économiques* : la valeur économique d'un élément se subdivise en deux grands postes : la fourniture de matières et le prix de la pose. Ce dernier est entièrement consommé lors de la mise en œuvre de l'élément, alors que le poste 'matières' constitue un capital dont la valeur doit être comparée aux investissements nécessaires pour

⁽¹⁴⁾ Des fiches pratiques constituant un manuel de démontage des matériaux de construction sont disponibles sur le site Internet du Centre de référence professionnel bruxellois pour le secteur de la construction (<http://www.cdr-brc.be> et <http://reuse.brussels/>).

⁽¹⁵⁾ Le projet DEMOCLES (<http://www.recylum.com/democles/democles.html>) fournit des fiches pratiques d'indications méthodologiques pour la dépose d'éléments ou d'équipements (moquettes, plinthes, faïence, revêtements de mur en bois, en faïence, plafonnage, menuiseries, sanitaires, goulottes électriques, cloisons, etc.).



préparer son réemploi (démontage, emballage, transport, stockage, etc.) et à la valeur d'un matériau neuf équivalent

- *critères techniques* :
 - toxicité des éléments : un élément contaminé est impropre au réemploi
 - conservation des propriétés mécaniques : des éléments qui seraient fragilisés ou dont le démontage serait risqué ne sont pas aptes à la déconstruction
 - conservation des propriétés esthétiques : l'usure d'un élément peut favoriser ou décourager sa déconstruction (un élément patiné est généralement apprécié, alors qu'un élément griffé est souvent rejeté)
 - capacité à être manipulé, transporté et stocké : certains éléments (comme les matières inertes) ne requièrent pas de conditions de stockage particulières, ce qui peut inciter à leur déconstruction
 - facilité à être remis en œuvre : un travail soigneux lors du démontage peut documenter la manière dont l'élément pourra être remis en œuvre
 - facilité à être démonté : les fixations de l'élément doivent être réversibles et accessibles; l'élément doit pouvoir être facilement déplaçable dans le bâtiment
- *autres critères* :
 - récurrence des éléments : un élément présent en petite quantité dans de nombreux bâtiments peut le rendre potentiellement intéressant à la déconstruction et dès lors constituer un gisement permanent et stable
 - changements normatifs : ceux-ci peuvent exclure la déconstruction d'un élément devenu techniquement obsolète
 - valeur patrimoniale : celle-ci peut inciter à la déconstruction des éléments concernés.

4.1.3.2 Exemples et bonnes pratiques

TIVOLI – BÂTIMENT BELGACOM (Bruxelles – 2016)

Objectif

Soustraire, par déconstruction sélective d'un bâtiment, un ensemble d'éléments initialement voués à la démolition (revêtements de murs et de sol, sanitaires, etc.), en vue de leur réemploi.

Réalisation

L'objectif initial a été atteint en trois étapes : la réalisation d'un inventaire de pré-déconstruction, la déconstruction des éléments identifiés pour le réemploi et le bilan de l'opération.

- *Inventaire* (figure 40 A)

Cette première phase avait pour but d'identifier et de quantifier les éléments susceptibles d'être réemployés sur ou hors site. Le tableau de synthèse à la figure 40 reprend un reportage photographique, le type d'élément et sa localisation, la quantité à récupérer (en superficie) et la masse totale estimée. Dans un second temps, des essais ont été réalisés pour confirmer le potentiel réel de déconstruction des éléments inventoriés. Cette phase permet au déconstructeur de valider les éléments à déconstruire et de planifier son chantier (main-d'œuvre, types d'outillage, durée, etc.).



- *Déconstruction*

Cette seconde phase, qui constitue le travail de déconstruction proprement dit, regroupe plusieurs étapes :

- démantèlement (figure 40 B, C et D) : il s'agit de la phase de désolidarisation des éléments à déconstruire. Lors de ce chantier, cette étape a été réalisée par des ouvriers peu qualifiés à la recherche d'emploi
- préparation au conditionnement (figure 40 E et F) : lors de la phase de démantèlement, une part (parfois significative) des éléments déconstruits sont accidentellement abîmés ou cassés, empêchant toute réutilisation ultérieure. Sur ce chantier, des exemples d'éléments impropres au réemploi ont été montrés aux ouvriers dans le but de les sensibiliser à l'exécution de leur travail et à la préparation du conditionnement des éléments
- conditionnement et évacuation (figure 40 G et H) : les éléments déconstruits propres au réemploi sont conditionnés et disposés dans des contenants facilement manipulables pour l'évacuation
- préparation à la vente ou au réemploi (figure 40 I, J et K) : de retour chez le déconstructeur, les éléments récupérés sont nettoyés, inventoriés et étudiés sur le plan historique afin de les caractériser au mieux en vue de leur revente.

- *Bilan*

Pour l'entrepreneur général, le bilan est relativement neutre, car la quantité de matériaux récupérés et enlevés (dans ce cas) par le déconstructeur représente un (petit) montant qu'il n'aura pas à payer pour la démolition et l'enlèvement dans le cas d'une démolition classique (initialement prévue sur ce chantier). Pour le déconstructeur : bien que la phase de déconstruction soit autofinancée (dans ce cas-ci), l'opération est compensée par la revente de matériaux de construction de qualité et soigneusement démantelés. Quant à l'architecte, il a été sensibilisé au potentiel de réemploi des éléments de revêtement de sol et a pu convaincre ses clients de l'intérêt de les réemployer sur site. Le bilan est dès lors positif à différents niveaux : les revêtements réemployés présentent un prix d'achat comparable à celui de revêtements neufs équivalents (dans ce cas-ci), l'impact environnemental est moindre et l'aspect patrimonial est une valeur ajoutée.

Commentaire

Cette déconstruction sélective en vue du réemploi a été rendue possible grâce à un certain nombre de conditions : concordance de planning entre les entreprises, volonté du maître d'ouvrage, démarche pilote, etc.



A

		Type d'élément	Quantité à récupérer	Masse (éval.)
V		Carrelage céramique 10x10 cm, damier rouge / beige moucheté	200 m ² (>400 m ² en tout dans le bâtiment, ~50 % de perte au démontage)	5600 kg
V		Carrelage mural émaillé jaune	140 m ² (~190 m ² en tout dans le bâtiment)	3100 kg
V		Tablettes de fenêtre en marbre, épaisseur 2 cm	Min. 60 m courants (tout)	850 kg

B



C



D



E



F



G



H



J



K



Fig. 40 Déconstruction sélective et préparation au réemploi (source : CSTC et ROTOR).



Idée et réalisation

Selon les estimations, la démolition du quartier militaire 'Albert I^{er}' à Evere en vue de la construction du nouveau quartier général de l'OTAN devait générer un volume de déchets inertes et de gravats pierreux de 200.000 m³. Dans le cadre du projet de recherche européen IRMA (*Integrated Decontamination and Rehabilitation of buildings, structures and MAterials in urban renewal*), on a examiné dans quel contexte il serait intéressant – sur les plans financier, écologique et pratique – de procéder au recyclage sur site de cette quantité de gravats et de les réutiliser comme matière première neuve.

Si l'inventaire des déchets de démolition sert généralement à identifier les éléments contaminés et à soumettre une demande de devis correcte aux entreprises de démolition (concurrence loyale), il est apparu dans le cas présent que l'établissement d'un inventaire de démolition en bonne et due forme constituait également un point de départ intéressant pour optimiser le processus de démolition et de recyclage.

On a ainsi dressé l'inventaire des matériaux présents dans les bâtiments concernés (plus de 60). Les déchets pierreux ont été subdivisés en différentes catégories de qualité : béton de très bonne qualité, béton de qualité moyenne, gravats pierreux mixtes, asphalte, béton cellulaire, etc. Cette distinction qualitative a permis de rechercher une solution 'sur site' intéressante : utilisation du béton issu d'éléments préfabriqués et de routes pour des granulats de béton neuf, utilisation du concassé dans des sous-fondations, etc. Il faut cependant s'assurer que de telles quantités pourront être réutilisées dans le nouveau bâtiment.

Une évaluation des bénéfices en termes de prix de revient, de transport et d'impact environnemental a par ailleurs été effectuée en cas de maintien des matériaux sur site au lieu d'une évacuation par camion, ce dernier scénario impliquant également l'approvisionnement nécessaire du chantier en matériaux neufs (sable, granulats) pour un volume d'environ 200.000 m³. La comparaison des scénarios s'est appuyée sur les chiffres de l'audit de pré-démolition et a clairement établi que la solution 'sur site' était plus intéressante que l'option 'hors site', à condition que les applications et le temps soient suffisamment disponibles. Le maintien des matériaux sur site permettant d'économiser 2 millions d'euros, mais aussi 350.000 km de transport, ce fut l'option retenue par l'équipe de gestion de projets.

Points de vigilance

Bien entendu, il s'agit ici d'un projet exceptionnel, d'une ampleur, elle aussi, exceptionnelle. Une optimisation est néanmoins toujours possible, même pour de plus petits projets (à partir de 20.000 tonnes de déchets). L'équipe de gestion de projets de l'Armée belge n'a pas considéré la phase de démolition comme une charge et une production de 'déchets', mais plutôt comme une opportunité et une production de matières premières pour le chantier.





Fig. 41 Inventaire de pré-démolition du Quartier Général de l'OTAN à Evere (source : CSTC, NATO PMT, Armée belge).

LA DÉMOLITION SÉLECTIVE : UNE SOURCE DE MATIÈRES PREMIÈRES NEUVES

L'entreprise néerlandaise Dusseldorp tente de se distinguer en assurant un tri approfondi des matériaux sur les chantiers de démolition. Généralement, les travaux de démolition sont réalisés le plus rapidement et le plus efficacement possible, et l'on distingue quatre grands flux de déchets : déchets pierreux, bois, déchets ferreux, autres matériaux. Dusseldorp s'efforce, elle, de créer 24 flux distincts sur le chantier de construction, ce qui lui permet de les évacuer directement vers différents acteurs pouvant utiliser ces matériaux comme matières premières.

Ainsi, par exemple, le bois n'est plus jeté dans un seul grand conteneur, formant un mélange de bois A (bois pur non traité), B (bois traité ou aggloméré) et C (bois imprégné, contaminé) faiblement valorisable, mais fait l'objet d'un tri supplémentaire grâce auquel on peut recycler le bois A, mais aussi réutiliser le bois B. À terme, cet effort devrait être rentable compte tenu de la hausse des prix des déchets de bois.



Fig. 42 Tri du bois sur chantier (source : Dusseldorp) [122].

MAISON DES ASSOCIATIONS À ESNEUX & BÂTIMENT SCOLAIRE À BRAINE L'ALLEUD – Atelier d'architecture Alain Richard

Idée

Bien que ces deux projets de rénovation diffèrent l'un de l'autre, l'architecte a prêté une attention particulière à la déconstruction soignée des éléments pouvant faire l'objet d'un réemploi sur site.

Réalisation

Cette volonté s'est traduite sur les deux chantiers par :

- la réalisation d'un inventaire des éléments à déconstruire soigneusement (figure 43 A à F) : éléments de signalisation, châssis, sanitaires, parois amovibles, dalles de moquette
- la déconstruction sélective de ces éléments et leur conditionnement; les dalles de moquette sont ainsi consignées soigneusement sur des palettes (figure 43 E)
- l'intégration, dans les différents cahiers des charges et les métrés descriptifs, de clauses spécifiques relatives au démantèlement et au réemploi (figure 43 G, H et I).



G

Cahier spécial des charges n°075
CLAUSES ADMINISTRATIVES

CGC Art. 33. : DÉMOLITIONS

L'attention des adjudicataires des lots 1, 2 et 3 est dès à présent attirée sur la nécessité de maintenir au chantier certains éléments issus du démontage, notamment des cloisons, de sorte à les remettre en œuvre dans le cadre du chantier. Ces éléments sont définis au métré descriptif.



C.T. 070 DEMOLITIONS, DEMONTAGES ET PERCEMENTS

Toute démolition implique l'évacuation de tout débris et tout débris, cependant certains matériaux précisés au métré descriptif sont destinés à être remis en œuvre dans le cadre du marché. Ils sont alors soigneusement stockés ou mis en dépôt sur une aire qui leur est réservée, et protégés au besoin.

2 PREMIER ŒUVRE**2.1 DEMONTAGES**

Sauf stipulation contraire,

- les éléments démontés qui ne doivent pas être remis en œuvre deviennent propriété de l'adjudicataire et doivent être évacués hors du chantier. L'évacuation éventuelle est incluse dans le prix de l'article
- les éléments qui doivent être remis en œuvre et qui sont renseignés comme tels sont entreposés et protégés dans un endroit du chantier à soumettre à l'auteur du projet.

Fig. 43 Déconstruction et réemploi d'éléments sur site
(source : aa-ar, Atelier d'architecture Alain Richard) [103, 104].

4.1.4 Remanufacturing**4.1.4.1 Description**

Dans le cas de la refabrication (*remanufacturing*), l'élément de construction usagé est remis au niveau de qualité d'un élément neuf pour satisfaire aux spécifications de l'élément d'origine. Il bénéficie généralement d'une garantie de même durée. La refabrication va donc plus loin qu'une simple remise à neuf (*refurbishment* en anglais) ou qu'une préparation au réemploi (voir § 4.1.5). Dans ce dernier cas, l'élément usagé est remis à un niveau de qualité acceptable et soumis à des traitements moins élaborés, plus 'esthétiques', comme la pose d'un nouveau revêtement ou d'une couche de peinture. Le 'remanufacturing' permet donc de redonner à l'élément une seconde vie identique à la première.

Le processus comprend plusieurs étapes. La première consiste à démanteler le plus soigneusement possible les éléments de construction, puis à les inspecter et les trier de manière à ne retenir que les éléments au plus haut potentiel de remise sur le marché. Les éléments sont ensuite nettoyés, le plus souvent selon un procédé industriel, éventuellement réparés, reconfigurés et reconditionnés. Il est également possible de leur conférer de nouvelles fonctionnalités. Les produits sont soumis à des tests et des contrôles de qualité avant d'être remis en vente. Finalement, ils sont assemblés et éventuellement combinés à des éléments neufs et réparés.



Vu la rapidité de l'évolution technique et la longévité des produits de construction, il est probable que leur potentiel de remise à neuf soit limité. Il existe néanmoins un important marché pour certains produits d'importance architecturale et historique, tels que des fenêtres à guillotine, par exemple; celles-ci s'avèrent en effet très durables et rentables lorsqu'elles sont reconditionnées (réparation et remplacement de certains éléments techniques) et remises en conformité avec de nouvelles exigences (ajout d'un double vitrage, par exemple).

Pour pouvoir être remanufacturé, un produit doit dès lors répondre à plusieurs critères :

- il doit pouvoir être démonté, puis remonté; une notice de montage/démontage est parfois nécessaire et devrait être conservée
- il doit éventuellement être standardisé, et ses pièces et composants doivent être interchangeables
- les technologies qu'il intègre doivent être peu évolutives ou pouvoir s'adapter à l'évolution des normes
- la valeur ajoutée du produit usagé est élevée
- le coût d'acquisition (autrement dit son démantèlement) est faible comparativement à sa valeur ajoutée.

4.1.4.2 Exemples et bonnes pratiques

MODELES DE QUINCAILLERIES DITTO – Rotor

Concept

Faciliter l'utilisation de matériaux récupérés par la mise en place de systèmes de distribution appropriés.

Réalisation

Ditto est un label de qualité pour le matériel récupéré, réparé et reconditionné. Chaque produit est nettoyé et classé (figure 44 A). Seuls les éléments considérés par le fabricant comme d'aussi bonne qualité que le produit neuf sont emballés et étiquetés avec un code-barres (figure 44 B). Les éléments remanufacturés et reconditionnés sont collectés localement, et généralement vendus 30 à 50 % moins cher que les éléments neufs équivalents. Des éléments de quincaillerie sont également reconditionnés et remis en vente aux côtés de pièces neuves (figure 44 C).



Fig. 44 Récupération et reconditionnement d'éléments de quincaillerie (source : DITTO by Rotor DC) [121].



4.1.5 Réemploi et préparation au réemploi

4.1.5.1 Description

Le réemploi désigne toute opération par laquelle des matières ou des produits sont réutilisés pour un usage identique à celui pour lequel ils ont été conçus.

Après la déconstruction des éléments, la phase de préparation au réemploi comporte plusieurs étapes : démontage, emballage, transport, réparation, préparation et nettoyage éventuel, documentation, stockage, promotion et vente. La réparation, la préparation et le nettoyage sont des opérations spécifiques à chacun des éléments déconstruits en vue du réemploi. Ces phases de préparation au réemploi peuvent se réaliser par divers procédés chimiques (solvant), mécaniques (sablage, brossage, rabotage ou grenailage) ou thermiques (chauffage ou choc thermique).

Lorsque les éléments ont été préparés pour le réemploi, il s'agit ensuite de permettre leur utilisation, c'est-à-dire de pouvoir les prescrire, d'assurer leur approvisionnement et de les mettre en œuvre. La prescription des matériaux de réemploi en est encore à ses balbutiements, même si certains maîtres d'ouvrage prescrivent leur usage au travers des cahiers des charges ⁽¹⁶⁾ et des critères de sélection des auteurs de projet. Ceci tient essentiellement au fait que les opérations de réemploi se réalisent la plupart du temps *in situ* lors de la phase de rénovation partielle (ou totale) du bâtiment, à l'initiative d'une concertation entre l'entrepreneur et le maître d'ouvrage, qui y trouve un intérêt économique (et environnemental).

Des plateformes d'approvisionnement de matériaux de réemploi regroupent certains revendeurs : Opalis (annuaire de revendeurs professionnels, catalogues de matériaux, outils et documents pratiques, etc.), Youbric (vente et achat de matériaux de seconde main pour professionnels et particuliers, tutoriels, etc.), eBay et 2^{ème} main (revente de matériaux de seconde main) ⁽¹⁷⁾; certains fournisseurs mettent même en revente des matériaux ou éléments de construction de réemploi dans leurs rayonnages aux côtés de produits neufs.

Le secteur de la revente de matériaux de construction tend actuellement à se concentrer sur les matériaux à haute valeur ajoutée (manufacture remarquable ou valeur patrimoniale). Les matériaux de gamme standard ou de qualité moyenne, tels que des portes, des châssis ou des sanitaires, sont de plus en plus rarement proposés en revente. Certains matériaux, valeurs sûres du patrimoine bâti courant, sont par contre très répandus : pierre bleue, dalles de carrelage en céramique, briques, pavés, etc.

Les matériaux de récupération proviennent essentiellement de chantiers de démolition ou de rénovation, ce qui peut entraîner une altération de leur apparence et de leurs caractéristiques structurelles. Contrairement aux produits neufs, les matériaux de réemploi ne disposent généralement pas d'une garantie attestant de leurs performances. Cela implique une prise de

⁽¹⁶⁾ Voir le 'Vade-mecum pour le réemploi hors site' rédigé par Rotor, en téléchargement : <https://opalis.be/fr/documentation>

⁽¹⁷⁾ Opalis : <http://opalis.be/>; Youbric : <http://beta.youbric.be/fr/>; eBay : <http://www.befr.ebay.be/sch/Maison-Jardin-/11700/i.html>; 2^{ème} main : <http://www.2ememain.be/construction/>



responsabilité de la part des acteurs de la construction (architectes, entrepreneurs et maîtres d'ouvrage). Une bonne connaissance de l'histoire du matériau (origine, usage, mode de démontage, etc.) permet de prendre une telle responsabilité en connaissance de cause.

4.1.5.2 Exemples et bonnes pratiques

VILLA WELPELOO – 2012 Architecten & Superuse Studio (Enschede, Pays-Bas – 2010)

Concept

Réaliser une habitation à partir d'éléments de réemploi.

Réalisation

Le bureau 2012Architecten aspire à utiliser autant de matériaux de récupération que possible. Ils recherchent des matériaux en surplus disponibles à proximité de sites de construction en phase de conception (voir Harvestmap, § 5.1.3.2). Les matériaux sélectionnés reçoivent une forme nouvelle et donnent naissance à de nouveaux modes de construction.

L'agence Superuse Studio, de son côté, utilise le processus de PlatoWood [147] pour améliorer la qualité des bois récupérés. Le bois tendre constituant les bobines de câble est traité thermiquement pour améliorer sa qualité et lui conférer une durée de vie cinq fois supérieure, ainsi que de bonnes conditions de stabilité et d'isolation thermique. Le bois est nettoyé, chauffé, séché et conditionné au moyen de la vapeur provenant d'une centrale de cogénération voisine. Le procédé constitue ainsi un bon exemple de symbiose industrielle. Aucun traitement chimique n'est appliqué au bois durant le processus et celui-ci ne requiert pas d'autres moyens de protection lors de sa seconde vie en œuvre.

A



B



C



D



E



Fig. 45 Bâtiment d'habitation réalisé à partir d'éléments de réemploi (source : Villa Welpeloo – Building Revolutions et SuperUse Studios) [17, 156].



BEDZED – Bill Dunster (ZEDFactory) (Wallington, Angleterre – 2002)

Concept

Construire un écoquartier ‘zéro déchet’ dans lequel le réemploi des matériaux est privilégié.

Réalisation

Bioregional [108] a réussi à récupérer des poteaux de charpente métallique et des cloisons en bois résineux de sites de démolition locaux pour les transformer en nouveaux composants structurels (figure 46 B, D et E). La structure en acier des bâtiments est constituée de 98 tonnes de profils métalliques structurels de réemploi. Les cloisons intérieures sont des poteaux de bois revêtus de plâtre (figure 46 C) issus à 90 % du réemploi.

Tous les matériaux de construction utilisés proviennent en outre des environs dans un rayon maximum de 65 km.

Les aciers de construction et le bois de construction récupérés, moins chers que des produits neufs, offrent respectivement 96 % et 83 % d'économies d'impact environnemental. BedZED a produit 3.404 tonnes de matières réemployées et recyclées, soit 15 % du total des matériaux. Les matériaux récupérés utilisés étaient moins coûteux ou d'un prix équivalent à l'option conventionnelle, compte tenu du temps de travail consacré à l'approvisionnement du matériel.



Fig. 46 Constructions réalisées à partir d'éléments et de matériaux récupérés et recyclés (source : ZEDFactory & BioRegional) [108].

4.1.6 Recyclage

4.1.6.1 Description

La déconstruction sélective des éléments de construction poursuit deux objectifs visant la meilleure valorisation matière des matériaux : le réemploi ou le tri en vue du recyclage.



Toutefois, par rapport à la quantité de matériaux présents et déconstruits, le réemploi reste marginal dans la valorisation des éléments de construction. La majeure partie des matériaux déconstruits doivent dès lors trouver un autre mode de valorisation. Une solution consiste à encourager le recyclage des éléments de construction, si possible en boucle fermée.

Le recyclage en boucle des matières inertes, réalisé depuis de nombreuses années, atteint en Belgique un taux élevé de 90 % ⁽¹⁸⁾. La plupart du temps, les matières inertes sont concassées en granulats pouvant servir à la production de béton ou aux fondations de voirie.

On observe actuellement un intérêt croissant pour le recyclage des autres fractions, non pierreuses, telles que le gypse, le béton cellulaire ou les revêtements bitumineux.

Le recyclage est le retraitement, dans un processus de production, de matières (matières premières secondaires) contenues dans les déchets, aux mêmes fins que l'usage prévu à l'origine (conservation de la qualité originelle) ou à d'autres fins.

En théorie, les matières peuvent être recyclées à l'infini, mais les processus de recyclage dégradent souvent les propriétés des matériaux. Le procédé qui dégrade les propriétés des matières est appelé *downcycling*. La fabrication, à partir d'objets ou de matériaux de récupération, de produits de plus haute valeur que les objets ou matériaux d'origine est appelée *upcycling*. Le recyclage peut être en boucle ouverte (recyclage dans une autre application; par exemple, concassage des inertes pour utilisation en fond de fondation) ou en boucle fermée (recyclage dans la même application; par exemple, recyclage du gypse).

Pour qu'une matière soit recyclable, plusieurs conditions doivent être rencontrées :

- les matériaux doivent être techniquement recyclables selon des procédés validés
- les composants doivent être facilement accessibles et non contaminants
- l'opération de recyclage doit être rentable économiquement.

Un processus de recyclage se déroule généralement en quatre ou cinq étapes, mais présente des variantes particulières en fonction des matériaux recyclés (le recyclage du béton, du verre ou des métaux n'est pas identique) :

- *contrôle des déchets* : les déchets dont la teneur en contaminants est trop élevée sont écartés
- *désassemblage et broyage ou concassage* (mécanique ou manuel) : le broyage est pratiqué à la fois pour faciliter le tri (étape suivante) et la transformation (par exemple, en réduisant la granulométrie)
- *tri des déchets* : manuel (souvent le cas), assisté par des machines ou automatique (aéroulrique, granulométrique, magnétique, optique, électrostatique, densimétrique)
- *transformation* : les déchets sont ensuite transformés en (sous-)produits (ou matières premières secondaires) par un traitement mécanique, chimique ou thermique.

Nombre de matériaux issus de la démolition ou de déchets de construction sont à l'heure actuelle :

- *bien recyclés* : inertes, métaux, bois non traités, terre, emballages en papier et en carton

⁽¹⁸⁾ La Commission européenne impose dans sa directive EU 2008/98CE un taux de recyclage de 70 % (en masse) des déchets de construction et de démolition (<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32008L0098>).



- *moyennement recyclés* : profilés de châssis, béton cellulaire, conduites et câbles en PVC, verre, emballages en bois et en plastique
- *peu recyclés* : plastiques en PP ou PE (hors emballages), films PVC, plâtre, produits composites en bois (MDF, OSB, etc.) et petits déchets dangereux
- *pas ou très peu recyclés* : isolants (XPS, EPS, PUR, PIR, organiques, etc.), couches de finition, éléments composites, revêtements de toiture (élastomères ou bitumes) et bois imprégnés.

4.1.6.2 Exemples et bonnes pratiques

Recyhouse – CSTC (Limelette, 1999)

Idée

Construire une maison unifamiliale uniquement à partir de matériaux de construction neufs issus du recyclage répondant aux exigences d'une construction moderne, sans nécessairement nuire aux performances finales, ni augmenter le coût.

Réalisation

La Recyhouse ⁽¹⁹⁾ est un bâtiment témoin (maison unifamiliale avec cave, un étage et trois annexes) construit sur le site de la station expérimentale du CSTC, à Limelette. Ce bâtiment intègre une large part de matériaux provenant, en premier lieu, du recyclage des débris de construction et de démolition du bâtiment et du génie civil et, en second lieu, de la valorisation des déchets et sous-produits issus d'autres secteurs industriels. Il s'agit de matériaux nouveaux, réalisés à partir d'un processus industriel de traitement des déchets, et non pas de matériaux de récupération.

L'objectif n'était pas de mettre en œuvre le produit le plus performant ou le meilleur pour une certaine application, mais de montrer un maximum de matériaux différents, commercialisés en Europe et fabriqués à partir de déchets recyclés.

Le bâtiment est conçu de telle façon que seule l'ossature est portante; tous les murs, y compris les façades, peuvent être démontés sans nuire à la stabilité de l'ensemble. Cette approche permet d'appliquer un large assortiment de produits très différents.

Au final, plus de 150 matériaux issus du recyclage de déchets de construction et de démolition ont été utilisés. Pour chacun d'entre eux, une fiche technique d'information a été rédigée en collaboration avec le fabricant. Cette fiche reprend :

- les coordonnées du fabricant
- une présentation du produit (schéma de pose, photos, ...)
- la composition du produit et l'origine des déchets utilisés
- le processus de fabrication
- le domaine d'utilisation
- les agréments et certificats obtenus
- l'identification (format, couleur, masse volumique, ...)
- les performances (résistance, pouvoir isolant, comportement au feu, à l'humidité, ...)
- la méthode de mise en œuvre
- une indication du prix

⁽¹⁹⁾ La Recyhouse qui a nécessité cinq années de travail a bénéficié de l'appui de la Commission européenne, dans le cadre de l'instrument financier *Life* (DG Environnement).



- s'il y a lieu, la mention d'autres produits recyclés, de composition similaire, fabriqués par la même entreprise.



Fig. 47 Maquette du sol d'un local de l'étage : on aperçoit la sous-chape en déchets de polyuréthane, la chape en déchets de polyuréthane et de ciment ainsi que le revêtement constitué de deux panneaux de dureté différente, à base de déchets de bois.



Fig. 48 Vue éclatée dans une cloison d'une pièce de l'étage, révélant l'isolation en polyéthylène recyclé, un panneau à base de cellulose recyclée et de paille recouvert d'une plaque en sulfogypse peinte. Le sol est en panneaux de déchets de bois.



Fig. 49 Cloisons de l'étage : à l'avant-plan, panneaux à base de sulfogypse et de phosphogypse recouverts d'un isolant en mousse de polyéthylène recyclée, cloison du fond en panneaux de gypse avec papier recyclé.

(source : CSTC) [118]

STONE CYCLING – Tom van Soest (Design Academy Eindhoven)

Idée

Pulvériser des matériaux de construction recyclés issus de sites de démolition, pour créer un nouveau type de pierre pouvant être transformé en produits tels que des revêtements de surface.

Réalisation

StoneCycling [155] produit des briques à partir d'éléments inertes recyclés provenant de la démolition de matériaux tels que carrelage, verre et pierre. Cette brique recyclée (figure 50 E) est cuite à une température inférieure de 300 °C par rapport à la température de cuisson d'une brique classique, permettant ainsi de réduire les émissions de CO₂.

Cuire une brique n'est évidemment pas de la haute technologie. StoneCycling a développé des compositions dans lesquelles les différents types de débris de construction sont mélangés dans les bonnes proportions (figure 50 A et B), de manière à modifier l'apparence et les propriétés de la brique, telles que la dureté, la stabilité dimensionnelle et la résistance aux intempéries.

À Rotterdam [99], une habitation unifamiliale de quatre étages (figure 50 D et F) a récemment été construite avec ces briques recyclées placées en parement de façade. Ce ne sont pas moins de 15 tonnes de déchets qui ont donc été recyclés dans de nouveaux matériaux pour la réalisation de cette maison.



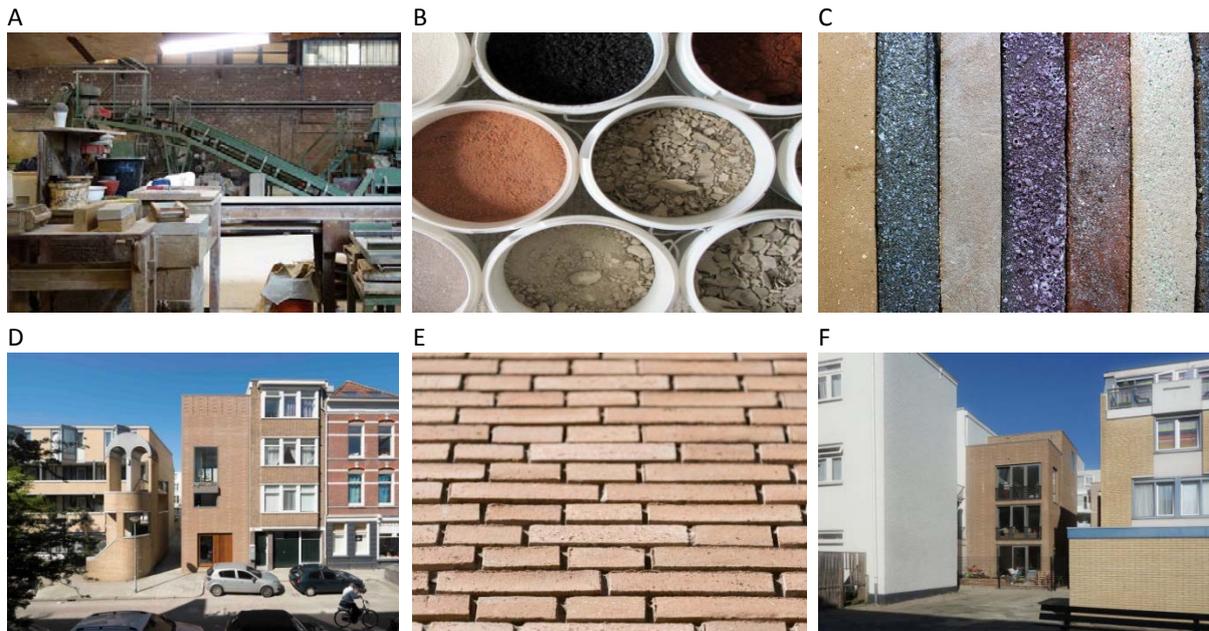


Fig. 50 Briques produites à partir de matériaux de démolition (source : StoneCycling) [155].

PÉPINIÈRE D'ENTREPRISES – Atelier d'architecture Alain Richard (Liège, Belgique – 2008)

Idée

Réalisation d'un mur d'enceinte en éléments préfabriqués en béton cyclopéen.

Réalisation

L'architecte a profité de la démolition d'une construction localisée à proximité (figure 51 A) pour concevoir un mur préfabriqué issu du recyclage des briques de terre cuite du bâtiment. Les briques ont été concassées sur site (figure 51 B) avant d'être mélangées à une matrice de ciment pour en fabriquer un élément autoportant massif constituant 'l'enceinte' d'une partie du bâtiment (figure 51 C, D, E et F). Différents tests ont été réalisés sur site pour obtenir l'aspect final désiré par le maître d'ouvrage (figure 51 C). Une clause spécifique du cahier spécial des charges prescrit dès lors à l'intention de l'entrepreneur l'utilisation de blocs (murs préfabriqués en béton cyclopéen) strictement conformes à l'échantillon déposé à l'atelier d'architecture et approuvé par tous les partenaires (figure 51 G).



D



E



F



G

Cahier spécial des charges n°046

CLAUSES TECHNIQUES ADDITIONNELLES

C.T. 038 BLOCS – MURS PREFABRIQUES EN BETON CYCLOPEEN

Les blocs murs sont des éléments préfabriqués en béton vibré, massifs.

Sur les faces apparentes apparaîtront des agrégats de gros calibre (30/80 ou 30/90) principalement en terre cuite, constitués de briquillons tout venant issus de démolition.

Les blocs seront strictement conformes à l'échantillon déposé à l'atelier d'architecture et approuvé par tous les partenaires.

Avant fabrication des éléments, l'adjudicataire soumettra à l'auteur du projet un prototype satisfaisant à la description ci-dessus, ainsi que des échantillons significatifs du type d'agrégat qu'il compte mettre en œuvre et en préciser la provenance.

Fig. 51 Éléments préfabriqués en béton réalisés à partir de briques concassées
(source : Atelier Architecture Alain Richard) [105].

4.2 Développements actuels et futurs

Pour que le bâti ne soit plus uniquement consommateur de ressources et émetteur de gaz à effet de serre, le secteur de la construction est amené à le considérer comme source potentielle de matériaux ou comme stock de matières premières secondaires. Des stratégies et des outils divers permettant de valoriser ce stock sont en cours de développement ou mériteraient d'être développés.

4.2.1 Monitoring, numérisation et inventarisation

Des méthodes de monitoring et de mesure de l'état des éléments sont en cours de développement. Elles devraient faciliter le déploiement de la déconstruction sélective et l'inventarisation des stocks bâtis.

Les méthodes de monitoring automatique et numérique sont de deux types : passifs ou actifs.

- La *monitoring passif* est une méthode automatisée dans laquelle chaque élément est muni d'un capteur qui mesure en permanence ses éventuelles variations d'état et permet de détecter si l'élément est altéré ou endommagé. Ces capteurs ⁽²⁰⁾ sont déjà utilisés pour évaluer l'état de certains emballages. Dans la construction, le monitoring passif est adopté

⁽²⁰⁾ Ce type de capteurs est commercialisé par des entreprises telles que Shockwatch (<http://shockwatch.com/>).



pour déterminer l'état de la structure des bâtiments au moyen de jauges de contrainte ou de fibres optiques ⁽²¹⁾.

- Le *monitoring actif* est une méthode automatisée qui repose sur le passeport de matériaux pour le suivi de l'ensemble d'un bâtiment; elle enregistre en permanence l'état des matériaux et communique en temps réel les résultats de mesure (exposition à l'humidité des façades, altération physique ou contamination du béton, etc.). Ce suivi est réalisé par des capteurs intégrés au bâtiment et connectés au passeport numérique de matériaux; les données relevées sont ainsi mises à la disposition du propriétaire ou de l'entité responsable de la maintenance du bâtiment. Au moment de la déconstruction, le passeport de matériaux contiendra toutes les informations sur l'état et les propriétés des éléments, qui permettront au déconstructeur d'évaluer leur potentiel de réutilisation ou de réparation. Une contrainte majeure de cette méthode concerne le stockage et la distribution d'énergie pour alimenter les capteurs tout au long de la durée de vie du bâtiment : les batteries actuelles ont une durée de vie insuffisante et le câblage est encombrant. Des recherches sont toutefois en cours aux États-Unis pour équiper les bâtiments de capteurs sans fil.

Pour que la masse d'informations contenues dans le passeport de matériaux puisse être constamment mise à jour et reste accessible aux acteurs concernés tout au long de l'exploitation du bâtiment, le monitoring doit passer par la numérisation des éléments. Pour ce faire, la plupart des bâtiments devraient être conçus et planifiés au moyen des technologies BIM (*Building Information Model/Modelling*) qui permettent de collecter toutes les informations dans une base de données au sein de laquelle chaque élément peut être identifié et suivi. Le modèle BIM peut ensuite être utilisé pour planifier les opérations de maintenance des éléments, assurant ainsi un rôle de 'conciergerie' du bâtiment. Le 'concierge BIM', responsable de la gestion du passeport de matériaux, deviendrait dès lors un nouveau métier.

L'exactitude des données saisies doit en outre être vérifiée et/ou garantie.

4.2.2 Identification des contaminants

L'identification des contaminants et la décontamination du bâtiment sont un préalable essentiel à la déconstruction. Cette étape peut s'appuyer sur le développement de techniques de scannage particulières.

- Bien que son utilisation soit interdite en Europe depuis plus de 20 ans, de nombreux bâtiments renferment encore de l'**amiante** sous différentes formes. À l'heure actuelle, les matériaux susceptibles d'en contenir doivent être prélevés, puis analysés dans des laboratoires spécialisés, engendrant des coûts et des délais souvent peu compatibles avec les exigences de chantier. Des méthodes de détection fiables sur site sont en cours de développement et d'expérimentation : détection par infrarouge ou par biotechnologie.
 - L'application de la **méthode par infrarouge** à l'amiante-ciment semble fiable, mais est limitée aux matériaux suffisamment réfléchissants; ses possibilités d'utilisation sur les chantiers de construction sont donc restreintes.

⁽²¹⁾ Le site Internet www.thesensorsguide.com inventorie et décrit un certain nombre de capteurs 'passifs'.



- La **biotechnologie** repose sur l'utilisation de biomolécules, de protéines ou de peptides, qui, en se liant aux fibres d'amiante et en induisant un changement de couleur, révèlent leur présence.
- L'état des **bois** présents dans un bâtiment à déconstruire diffère selon les traitements qu'il a subis ou non. Le bois imprégné est considéré comme dangereux et ne peut en aucun cas être recyclé avec d'autres catégories de bois. Dans l'état actuel des techniques de tri, l'hétérogénéité des déchets de bois représente un défi majeur pour les recycleurs. Etant donné les difficultés de distinguer et de collecter les bois non imprégnés, les déchets ligneux sont actuellement majoritairement valorisés sur un plan énergétique. Il importe dès lors de développer et d'optimiser la collecte, le tri et les processus de recyclage de ces produits, pour pouvoir maintenir plus longtemps leurs flux en cycle fermé dans la chaîne de production.
- De même, les différents types de **plastiques** (LDPE, HDPE, PP, PVC, etc.) sont particulièrement difficiles à différencier visuellement, que ce soit sur chantier ou dans les centres de tri. Des scanners portatifs sont de plus en plus utilisés pour déterminer le type de plastique [91].

4.2.3 Valorisation des stocks déconstruits

Lorsque les contaminants ont été extraits du bâtiment, la déconstruction sélective permet d'identifier les divers flux pouvant être traités dans les différentes filières de valorisation.

4.2.3.1 *Remanufacturing*

Certains installateurs ou producteurs de systèmes (chauffage, électricité, pompes à chaleur, etc.) seraient intéressés de pouvoir récupérer leurs produits, afin d'analyser la manière dont ils ont été utilisés et améliorer ainsi la performance de certains composants.

4.2.3.2 *Réemploi*

Les évolutions attendues en matière de réemploi des matériaux de construction portent principalement sur :

- la mise au point de méthodes et d'outils d'évaluation du potentiel de réemploi des éléments. Nous avons déjà expliqué ci-avant (§ **Error! Reference source not found.**) qu'il était nécessaire de développer des outils de monitoring des éléments présents dans un bâtiment. Bien que l'évaluation du potentiel réel de réemploi nécessite une expertise (voir les aspects 'emploi et économie circulaire' au § 4.3.4), il convient de développer des outils et des méthodes visant à acquérir l'information nécessaire à la déconstruction en vue du réemploi. Ces outils simplifieraient le travail d'inventaire, de relevé et d'acquisition des données. Il s'agit de logiciels d'inventorisation qui compilent et organisent les informations collectées lors de la visite sur site, de capteurs de mesure, de testeurs de matière permettant de réaliser une analyse qualitative et quantitative des matériaux, de détecteurs d'amiante, de détecteurs de couleurs, etc.



- la collecte d'informations et la mise au point de méthodes offrant la possibilité d'évaluer l'impact environnemental du réemploi. Les outils existants d'analyse du cycle de vie utilisés pour les éléments de construction devraient pouvoir intégrer des scénarios de réemploi. Pour ce faire, des informations relatives au travail préparatoire au réemploi (déconstruction, transport, nettoyage, emballage, etc.) doivent être collectées afin d'en estimer l'impact environnemental. Dans l'évaluation de cet impact se pose par ailleurs la question du 'positionnement de la fin du statut de déchet' (*end-of-waste point*). Cet aspect n'est toutefois pas spécifique au réemploi, mais intervient également dans d'autres formes de valorisation
- la mise en place de processus pour soutenir et/ou garantir la qualité des matériaux de réemploi. La question de l'obligation du marquage CE sur les éléments de réemploi n'est pas encore tranchée : certains membres de l'UE affirment que ce marquage est seulement requis pour les nouveaux matériaux et non pour les matériaux de seconde main. Le contrôle de la qualité des matériaux de réemploi (y compris la sélection d'échantillons représentatifs pour tester leurs propriétés) requiert de nouvelles procédures ainsi que des amendements aux normes de produits. Par ailleurs se pose la question de l'adéquation des matériaux actuellement mis en œuvre dans des bâtiments qui, une fois en phase de déconstruction, seront peut-être devenus techniquement obsolètes en raison de l'évolution des exigences performantielles
- la création d'un véritable marché du réemploi; ceci nécessitera d'identifier et de fédérer les acteurs du secteur, de recenser les projets réussis, de mettre en place un label du réemploi et de former les futurs acteurs à l'identification, la déconstruction, la préparation au réemploi et à la revente des éléments de construction. Ce marché pourrait également se développer grâce à une réglementation sur les déconstructions qui imposerait des filières de réemploi à certaines matières ou prescrirait la réalisation d'un inventaire de pré-déconstruction pour certaines typologies de bâtiments.

4.2.3.3 Recyclage

Sur le plan du recyclage des matériaux, les développements actuels et futurs concernent :

- la mise au point de nouvelles technologies de tri des déchets permettant d'obtenir des flux plus homogènes. Ces technologies portent principalement sur l'automatisation des chaînes de tri. Un bon exemple de cette évolution est l'émergence de robots de tri entraînés par intelligence artificielle [96]
- l'amélioration des procédés de recyclage; la plupart d'entre eux dégradent les propriétés des matériaux (*downcycling*). C'est le cas, par exemple, des plastiques recyclés à partir d'un mélange de plusieurs types de plastiques, conduisant à un produit de moindre qualité. Un enjeu important du recyclage consiste donc à atténuer la perte de valeur des matériaux liée au recyclage
- l'identification de flux problématiques, difficilement valorisables en raison de leur gros volume; leur filière de traitement est soit inexistante, soit inadaptée d'un point de vue environnemental. Ces flux peuvent également être soumis aux lois du marché globalisé dictant la viabilité ou non d'un modèle de recyclage et favorisant l'achat de matières premières. L'enjeu pour le secteur du recyclage est de pouvoir renforcer ou créer de nouvelles filières pour de tels flux.



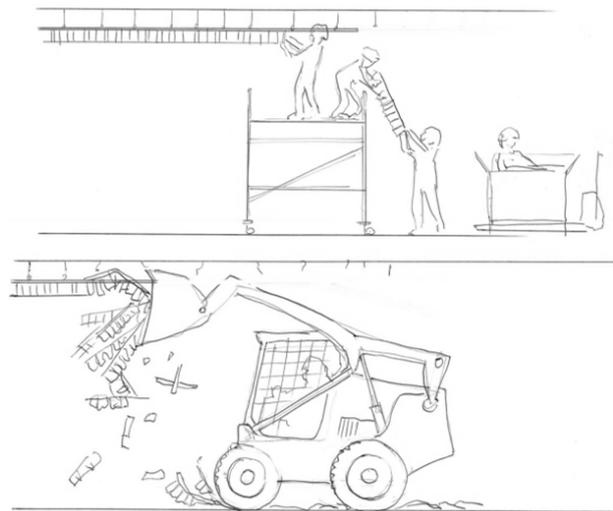
4.3 Enjeux et opportunités économiques

Les enjeux économiques de l'*urban mining* portent principalement sur la mise en place ou le renforcement de filières de valorisation et de marchés (locaux, de préférence) ainsi que sur la création d'emplois et de nouveaux métiers.

4.3.1 Déconstruction sélective et réemploi

On cite souvent un rapport de 7/1 pour comparer le taux de main-d'œuvre lié à la déconstruction sélective d'un élément de construction et celui induit par la démolition 'classique' d'un même élément ⁽²²⁾. Cela signifie que, sur un chantier d'égale importance, la déconstruction nécessite à peu près sept fois plus de main-d'œuvre que la démolition.

Ce rapport s'explique par l'importante part de mécanisation dans la démolition classique, laquelle mobilise par conséquent beaucoup moins d'ouvriers qu'une déconstruction sélective.



(Dessin : Lionel Billiet, Rotor)

Un exemple bruxellois de déconstruction de carreaux de ciment en vue de leur réemploi a permis de mettre au travail pendant deux semaines cinq ouvriers peu qualifiés demandeurs d'emploi.

C'est précisément le coût élevé de la main-d'œuvre et le développement de la mécanisation qui ont poussé vers le modèle de démolition classique. Dans le contexte belge actuel, il semble dès lors difficile de privilégier la déconstruction sélective.

Cependant, le marché de la déconstruction en vue du réemploi pourrait être développé, vu la rareté des acteurs. La création d'un marché actif pour la récupération des matériaux et composants permettrait de couvrir les coûts de désassemblage, de stockage et de revente. Cela implique que les matériaux réutilisés soient disponibles en quantités suffisantes, attractifs et entièrement certifiés comme étant aptes à l'emploi.

Les éventuels coûts supplémentaires liés à la déconstruction (par rapport à une démolition classique) peuvent être compensés au travers d'une re-conception et d'une refonte du processus de démolition et de rénovation. Ces coûts concernent :

⁽²²⁾ 'Job ratio is 7:1, recycling vs. traditional disposal' cité par Deb Stone [60].

- la dépose des éléments; ces frais intègrent le prix des prestations des acteurs de la déconstruction. Ceux-ci varient en fonction des outils utilisés et des éléments à déconstruire, qui dépendent eux-mêmes de la typologie du chantier
- le préconditionnement et l'évacuation des déchets, y compris les frais de collecte liés à la séparation des fractions sur site
- l'acheminement et l'évacuation des déchets du chantier, y compris les prestations et les outils utilisés pour acheminer les déchets du lieu de production au lieu d'évacuation du chantier ⁽²³⁾
- le traitement des filières; il est à noter que les filières dont le coût de traitement est supérieur au prix de mise en décharge peuvent être compétitives si l'on prend en compte les coûts de dépose et d'acheminement avant évacuation.

4.3.2 Recyclage

Une fois la transformation des déchets accomplie, la vente des matériaux recyclés est confrontée à deux difficultés : les inquiétudes des clients quant à la qualité des matériaux recyclés et la volatilité des prix de vente.

Les entreprises hésitent à recourir à des matières premières secondaires pour la fabrication de leurs produits, craignant une baisse de qualité et un rejet de la part du client. Des normes (sur les déchets, les matières recyclées ou les procédés de recyclage) et des labels ont ainsi été mis en place pour encourager et faciliter l'utilisation des matières recyclées.

Les prix des matières premières secondaires sont souvent plus volatils que ceux des matières premières vierges [50]. Cette volatilité est principalement due à la variabilité de l'offre et de la demande : les recycleurs doivent traiter des flux de déchets dont ils ne maîtrisent pas toujours le volume et la qualité; quant à la demande, elle ne cesse de fluctuer en fonction du prix des matières premières vierges. Quoiqu'il en soit, la vente de matières recyclées est en croissance, qu'il existe ou non un marché pour écouler ces matériaux.

4.3.3 'High volume, low value'

Le défi principal posé par de nombreux flux de matériaux et de déchets de construction tient à leur faible valeur intrinsèque, comparée à celle des métaux de terres rares, des alliages métalliques, etc. Il n'est donc pas simple d'élaborer un modèle intéressant pour valoriser ces flux, d'autant plus que la plupart des matières premières entrant dans la fabrication des matériaux de construction ne sont ni épuisées ni rares. L'option 'naturelle' ou primaire constitue toujours une possibilité rentable.

Les flux de déchets se trouvent de surcroît fort dispersés, qu'il s'agisse de chantiers de construction et de démolition différents ou de périodes différentes, ce qui ne facilite pas leur collecte ou leur centralisation lorsqu'on entend procéder par lots d'un certain volume. En ce qui concerne plus particulièrement les matériaux isolants, le transport joue également un rôle

⁽²³⁾ Sur un chantier de déconstruction, il semblerait que ce poste représente le coût le plus important [74].



important : 95 % des isolants sont constitués d'air. Centraliser ces matériaux en un même lieu n'a dès lors pas de sens d'un point de vue économique et écologique. Il est cependant nécessaire de disposer de volumes importants pour justifier les investissements engendrés, par exemple, par les installations techniques. À défaut, des solutions décentralisées ou mobiles s'imposeront.

4.3.4 Urban mining et création d'emplois

Le réemploi et l'économie circulaire en général sont souvent présentés comme des activités potentiellement créatrices d'emplois locaux ⁽²⁴⁾. De fait, le réemploi des éléments de construction, notamment par le reconditionnement et l'extraction de matières, promet la création d'emplois dans un secteur consommateur de main-d'œuvre. Dans les régions où la production de matériaux de construction et la valorisation des déchets sont délocalisées et quasi inexistantes (comme en Région de Bruxelles-Capitale, par exemple), le réemploi des matériaux ouvre en outre la porte à la relocalisation de l'économie dans ce secteur.

Si la phase en amont du réemploi, c'est-à-dire la phase de déconstruction, présente un fort potentiel de mise au travail de personnes peu qualifiées, la phase située en aval nécessite un grand nombre d'opérations requérant quelques qualifications : manutention, stockage, reconditionnement, documentation, promotion et revente. De même, la mise sur le marché d'éléments de réemploi s'organise autour de plusieurs fonctions : logistique (magasiniers, transport, etc.), documentaire (description et recherche d'informations sur le produit), technique (réparation et remise en état, documentation technique) et commerciale (vente, commande, comptabilité, service après-vente, etc.). L'économie circulaire ouvre donc des perspectives d'emplois correspondant principalement à une **économie servicielle** qui suppose certaines qualifications et compétences.

La remise en œuvre d'éléments de construction demande par ailleurs un travail important en vue de leur trouver une destination. Cette tâche est d'autant plus délicate que le modèle circulaire favorise la relocalisation de l'économie, en privilégiant les circuits courts et en minimisant l'impact environnemental des matériaux. Dès lors, les activités de circularité reviennent dans bien des cas à faire correspondre l'offre et la demande, souvent très particulières lorsqu'on parle de réemploi. De plus, même si la demande et l'offre coexistent, il est fréquent que les capacités de stockage (même transitoire) fassent défaut et mettent à mal les possibilités réelles de réemployer certains éléments. Cette difficulté d'immobilisation illustre la nécessité de **concordance de planning** qui doit exister entre un chantier de démantèlement d'éléments en vue de leur réemploi et un chantier de remise en œuvre de ces éléments. Le développement de matériauthèques physiques ou virtuelles proposant des matériaux de seconde main à la vente est dès lors à encourager.

⁽²⁴⁾ Concernant la refabrication, les prévisions de croissance sont prometteuses. Selon une étude européenne récente, le chiffre d'affaires de l'industrie européenne du *remanufacturing*, tous secteurs confondus, devrait tripler d'ici 2030 (atteignant les 90 milliards d'euros), tout comme le nombre d'emplois (jusqu'à près de 600.000).



5. Modèles d'affaires circulaires

'I drink water but I don't have a reservoir in my basement'

Frank van der Vloed, general manager de Philips Lighting Benelux

Le modèle d'économie linéaire actuel est basé sur la fabrication de produits, composants et éléments, et sur la vente de ceux-ci à un consommateur qui est chargé de s'en débarrasser après leur consommation. Un tel contexte n'incite guère à engager une réflexion sur le prolongement de la durée de vie ou sur la situation de fin de vie des produits.

L'économie circulaire a donc besoin de nouveaux modèles d'affaires, afin de conserver une valeur aussi élevée que possible aux produits et aux matériaux, et de promouvoir les circuits fermés, de telle sorte que la croissance ne soit plus liée à l'extraction des ressources naturelles.

Pour convertir les flux de déchets en flux de matériaux et en retirer de la valeur, les modèles d'affaires circulaires se fondent sur quatre principes de conception et de valorisation postconsommation des produits :

- la *compacité du cycle* : plus le cycle de transformation des produits en fin de vie est compact, c'est-à-dire moins ils subissent de transformations pour les maintenir dans la sphère des produits, plus ils conservent de la valeur. Pour le secteur de la construction, cela signifie, par exemple, que le réaménagement et la remise en état confèrent plus de valeur aux éléments que la démolition et la reconstruction
- la *durée du cycle* : plus le cycle de vie en œuvre est long ou plus le produit suit des cycles consécutifs, moins il faudra utiliser de matières premières pour compenser les pertes dues aux transformations. Cela signifie que les bâtiments devront être réaménagés, adaptés et remis à neuf au lieu d'être démolis et, idéalement, qu'en fin de vie, ils devraient être désassemblés en modules susceptibles d'être réassemblés dans d'autres configurations
- l'*utilisation en cascade* : plus un produit permet des usages diversifiés, plus son cycle sera long. Il existe ainsi des cascades d'usages entre diverses industries et le secteur de la construction dans lesquelles les déchets de l'une deviennent des produits utiles pour l'autre et, inversement, des déchets de construction deviennent des matières premières secondaires pour d'autres secteurs
- la *pureté des matériaux* : moins un produit concentrera de composants toxiques, plus grand sera son potentiel de récupération et de recyclage. Les matériaux de construction devraient donc être le plus pur possible pour pouvoir être réutilisés ou recyclés à la fin de leur vie dans des produits d'égale valeur ou de valeur supérieure.



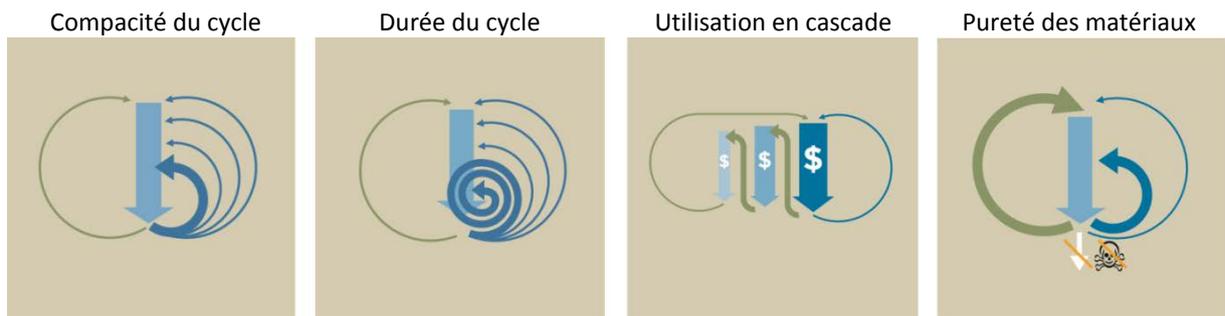


Fig. 52 Les quatre principes de conception et de valorisation postconsommation des produits (source : Ellen Mc Arthur Foundation) [46].

Quel que soit le modèle circulaire mis en œuvre, les fondamentaux restent les mêmes, à savoir : premièrement, conserver l'efficacité globale du système, c'est-à-dire ne pas optimiser les parties d'un processus ou d'un projet de conception en négligeant l'impact des modifications sur le système dans son ensemble, et deuxièmement, conserver la valeur des ressources en convertissant les flux de déchets en sous-produits.

Un modèle d'affaire se définit comme un ensemble de structures fondamentales grâce auxquelles une entreprise crée, fournit et capte la valeur d'un bien ou d'un service [51]. Trois étapes sont nécessaires à cet effet :

- *la proposition de valeur* : quelle offre de produits et de services pour générer un rendement économique ?
- *le procédé de création de valeur* : quels partenaires, activités, ressources, technologies, canaux pour fournir l'offre de produits et de services ?
- *et la manière dont la valeur est captée* : comment gagner un revenu en fournissant ses produits ou services aux clients ?

Les modèles d'affaires sont créés pour la valorisation commerciale d'une innovation ou d'un nouveau concept au sein d'une entreprise. En économie circulaire, ces innovations ou concepts appartiennent à trois familles principales :

- *technique ou technologique* : ensemble de procédés industriels de fabrication de produits ou d'offres de services maximisant la productivité des ressources, leur efficacité et la réduction des déchets
- *sociale ou collaborative* : ensemble des modifications et adaptations des moyens de fourniture des produits et services (offre) aux changements de comportement des consommateurs (demande)
- *organisationnelle* : ensemble des adaptations internes des entreprises sur le plan financier, des investissements, etc.

Dans une logique d'économie circulaire, des modèles d'affaires différents sont requis à différentes étapes du cycle de vie du bien (conception, usage, postconsommation) et peuvent fonctionner de manière indépendante ou intégrée. La réussite de la mise en œuvre de ces modèles d'affaires nécessite la collaboration de tous les acteurs de la chaîne de valeur : concepteur, fournisseurs, fournisseurs de services, entrepreneurs, etc.

Trois modèles génériques d'affaires sont ainsi proposés. Le tableau 2 à la page suivante reprend pour chacun d'entre eux les trois étapes fondamentales du modèle d'affaire (proposition de valeur, procédé de création de valeur et captation de la valeur) (25) :

- maximiser l'efficacité des ressources lors de la phase de conception ou de fabrication du produit
- délivrer une performance plutôt que la propriété d'un bien lors de la phase d'utilisation du produit
- créer de la valeur à partir des déchets lors de la phase de postconsommation.

La réalisation d'un modèle d'affaire nécessite la mise en place de stratégies, c'est-à-dire d'objectifs et de moyens qui orientent à moyen ou à long terme les activités de l'entreprise. En économie circulaire, ces stratégies peuvent être classées en trois groupes principaux [73] :

- stratégies de *gestion 'circulaires' des ressources* : ces stratégies agissent directement sur les ressources et sont au cœur du modèle d'affaire
- stratégies de *commercialisation* (des produits ou des services) : ces stratégies visent à fournir de la valeur au client
- stratégies de *réseaux de valeur* : ces stratégies impliquent la mise en place d'un réseau d'acteurs pour créer de la valeur partagée.

Les différents modèles d'affaires circulaires (non exhaustifs) peuvent dès lors être classés selon l'étape du cycle de vie et selon la stratégie principale sur lesquelles ils se fondent (voir figure 53).

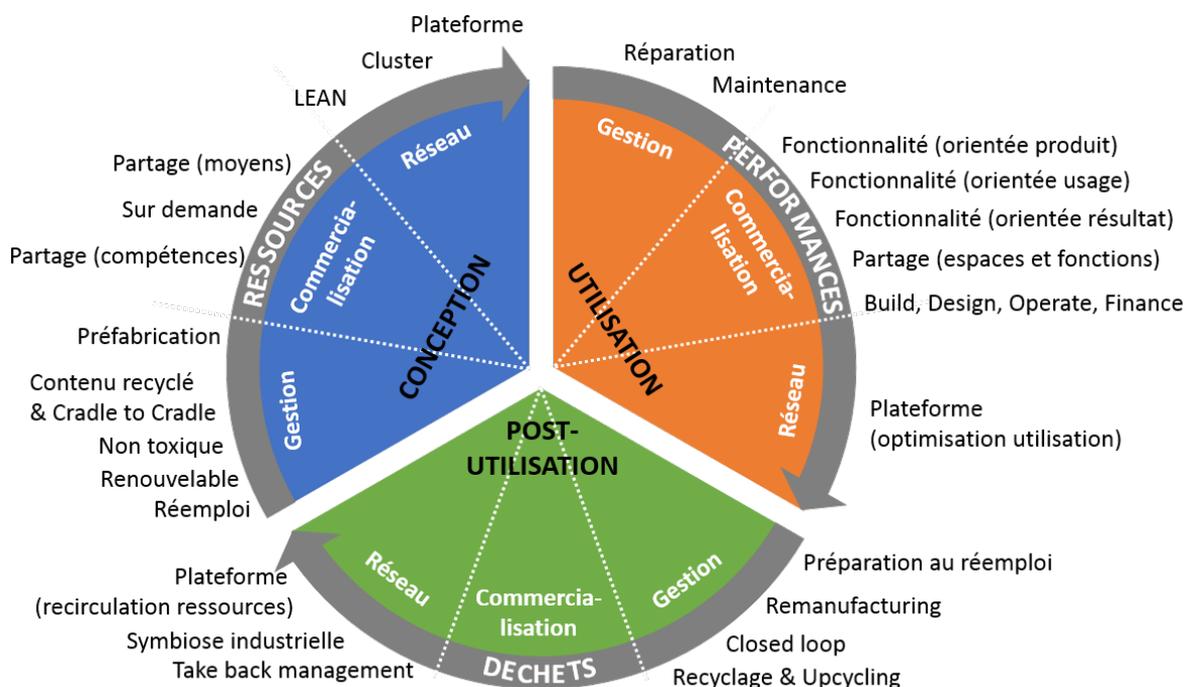


Fig. 53 Classement de quelques modèles d'affaire circulaires en fonction de la phase du cycle de vie considérée et de la finalité visée (source : CSTC).

(25) Adapté de Bocken N.M.P. *et.al.* [10].



Tableau 2 Trois modèles génériques d'affaire (source : adapté de Bocken N.M.P. *et al.*) [10].

Étapes nécessaires	CONCEPTION Maximiser l'efficacité des ressources	USAGE / UTILISATION Délivrer des performances plutôt que la propriété d'un bien	POSTCONSOMMATION Créer de la valeur à partir de déchets
Proposition de valeur	Créer des <i>produits</i> ou proposer des <i>services efficaces</i> , c'est-à-dire qui utilisent peu de ressources naturelles, dont les ressources sont renouvelables et/ou locales, et qui génèrent peu de déchets.	Fournir des services ou des solutions produits-services qui satisfassent les demandes des utilisateurs sans que ceux-ci aient à posséder les services ou produits. Passer de la production de biens à la <i>maximisation de l'utilisation du bien</i> .	<i>Éliminer la notion de déchets</i> en transformant les flux de déchets en flux utiles et valorisables pour la fabrication d'autres produits.
Procédé de création de valeur	Créer des activités et des partenariats pour utiliser moins de ressources naturelles, générer moins de déchets et améliorer l'efficacité tout en réduisant les nuisances de la chaîne d'approvisionnement. Le focus est notamment mis sur les <i>innovations de produits et les processus de fabrication</i> .	La livraison du produit/service nécessite des changements significatifs au sein de l'entreprise et peut inciter à revoir la conception pour plus de durabilité, de réparabilité et d'évolutivité. Des contacts plus directs et une éducation du consommateur doivent l'encourager à ne plus être propriétaire du bien.	Créer des activités et des partenariats pour éliminer les déchets, <i>fermer les boucles</i> de matériaux, faire un meilleur usage des ressources sous-exploitées et introduire de nouveaux partenariats, éventuellement entre secteurs industriels différents, pour capter et transférer les flux de déchets.
Captation de valeur	Les coûts sont réduits grâce à l' <i>utilisation optimisée des matériaux et à la réduction du gaspillage</i> , conduisant à des profits accrus et à un avantage concurrentiel en matière de prix. La contribution sociétale et environnementale est positive par la réduction de l'empreinte écologique.	Le consommateur/utilisateur paie pour l'usage du service, et non pour l'acquisition (propriété) du produit. Les coûts de propriété des produits sont supportés par l'entreprise et/ou les partenaires. Cela peut permettre aux consommateurs d'accéder à des produits coûteux, élargissant ainsi le potentiel commercial des innovations.	Les coûts environnementaux et économiques sont réduits par le réemploi des matériaux et la transformation des <i>déchets en valeur économique</i> . La contribution sociétale et environnementale est positive par la réduction de l'empreinte écologique, de la production de déchets et de l'exploitation des matières premières.



5.1 Principaux modèles d'affaires circulaires

5.1.1 Maximiser l'efficacité des ressources

5.1.1.1 Description

Comme le tableau 2 le décrit (voir page précédente), les modèles d'affaires visant à maximiser l'efficacité des ressources tendent à faire mieux avec moins de ressources et à générer moins de déchets. Ces modèles contribuent donc à atténuer l'impact environnemental du secteur de la construction, en réduisant la demande en énergie et en matériaux, l'extraction des matières premières et l'épuisement des ressources, tout en diminuant la production de déchets.

Afin de maximiser la valeur des produits, de nouveaux matériaux peuvent être développés et fabriqués. Les matériaux de construction pourraient par exemple contenir des matières biosourcées ou intégrer un pourcentage élevé de matières premières secondaires (issues du recyclage), tout en étant entièrement recyclables en fin de vie. Certains produits sont d'ailleurs labellisés pour reconnaître ce potentiel.

Les matériaux devraient aussi être le plus pur possible, car moins un produit concentre de composants toxiques, plus grand sera son potentiel de récupération et de recyclage.

La **préfabrication** est, quant à elle, un procédé permettant de mieux gérer les flux de matières et de diminuer la quantité de ressources utilisées pour un produit donné.

Dans le même contexte, de nouveaux procédés sont développés pour augmenter le potentiel de réutilisation et la recyclabilité des produits de construction. Le réemploi se présente dès lors comme une alternative soutenable pour la mise en œuvre des matériaux.

D'autres procédés de production et de commercialisation reposent sur l'**économie collaborative**. Celle-ci renvoie à la double création matérielle et immatérielle, autrement dit à la production de biens et au développement de plateformes de partage des ressources, des compétences ou des moyens; le processus de production est démocratisé grâce à la mise en commun de connaissances, d'infrastructures et d'outils.

Le modèle de l'économie collaborative est basé sur le développement d'une dynamique d'intelligence collective entre différents acteurs, dans le but de concevoir et de produire de nouveaux biens et services. En collaborant avec différents acteurs (consultants, fournisseurs, sous-traitants, pouvoirs publics, consommateurs, etc.), une organisation augmente le nombre de sources d'innovation auxquelles elle a accès et élargit ainsi son champ de possibilités.

La mise en réseau des différents acteurs est donc un levier de création d'un modèle d'affaire. Les concepteurs ont la possibilité d'interagir avec des partenaires susceptibles d'être intéressés par le développement des produits. Les partenaires peuvent alors s'organiser en *cluster* pour acquérir et partager des compétences et des savoir-faire, développer des synergies avec des partenaires clés, évoquer les barrières à leur développement et résoudre collectivement leurs problèmes.



Parmi les procédés de mise en réseau des acteurs, le *lean management* permet d'organiser la chaîne d'approvisionnement pour minimiser toute utilisation indésirable des ressources. Il permet également d'identifier et de réduire la production de déchets et le gaspillage des ressources dans les processus de production.

Enfin, la production sur demande est une stratégie de commercialisation visant à ne produire que ce qui est demandé par le client, tout en valorisant les stocks inutilisés sans consommer de nouvelles ressources.

5.1.1.2 Exemples et bonnes pratiques

CONCEPTION DE PRODUITS – CONTENU RECYCLÉ

REBORN PAINTS

Idée

Valoriser les fonds de peinture.

Réalisation

La gamme de peintures REBORN [150] contient 28 couleurs différentes de haute qualité, à faible teneur en carbone. Chacune d'elles est mélangée à partir de restes de peintures non utilisés, d'où le nom de la marque. Newlife Paints collecte les déchets de peinture dans des centres de recyclage et les remanufacture dans une nouvelle peinture écologique. Chaque pot contient entre 50 et 95 % de peinture recyclée. En utilisant un procédé unique de mélange, la qualité de ces produits égale celle des peintures non recyclées. Ce concept permet de réduire les quantités de peintures inutilisées, qui se retrouveraient autrement dans une décharge ou dans le réseau d'égout.



Fig. 54 Peintures recyclées (source : Newlife Paints) [139].



ÉCONOMIE COLLABORATIVE – PLATEFORMES OUVERTES & PARTAGE DE MOYENS

WIKIHOUSE

Idée

Rendre accessible à tout un chacun la réalisation de bâtiments préfabriqués par l'échange de plans en 'open source'.

Réalisation

WikiHouse [162] est un projet collaboratif international qui s'inscrit dans le mouvement 'do-it-yourself' visant à promouvoir un mode constructif libre de droits, qui peut être partagé, modifié et amélioré. Il permet aux utilisateurs de télécharger des plans de construction sous licence dite 'Creative Commons' [116], de les personnaliser à l'aide de SketchUp, puis de les utiliser pour créer des pièces de puzzle en bois contreplaqué (de 18 mm d'épaisseur) à l'aide d'une fraiseuse numérique (machine à découper les planches de contreplaqué, contrôlée par ordinateur). La construction des structures ne nécessite aucun accessoire spécial, les pièces en bois étant assemblées principalement par emboîtement et verrouillées par clavetage. Toute la technicité est contenue dans la forme des pièces. La structure d'une WikiHouse peut être assemblée en moins d'une journée. Elle doit ensuite être parachevée par la pose d'un revêtement, de l'isolation, du câblage et de la plomberie. La découpe des pièces se réalise grâce au réseau des 'FabLabs', ateliers coopératifs mettant un outillage numérique et une assistance à la disposition du public.

Toute personne intéressée peut télécharger les fichiers 2D représentant l'ensemble des pièces constitutives de la maison et les découper à l'aide d'une fraiseuse numérique (le plus souvent, dans un FabLab). Elle peut ensuite apporter des modifications au modèle et les mettre en ligne au bénéfice de la communauté. Si WikiHouse est né à Londres en 2011, le concept s'est rapidement développé partout dans le monde où différents '*chapters*' nationaux ont développé leurs propres prototypes.

Commentaires

Le développement de ce modèle constructif nécessite un accès, pas toujours évident, à des outils dont l'utilisation requiert en outre une certaine expérience. Le modèle pose par ailleurs de nombreuses questions : obligation de vérification et de certification de la conformité de l'assemblage, assurance sur la stabilité de la construction et la responsabilité en cas de défaillance de celle-ci, mise en place des fondations, stabilité au vent, résistance au feu, etc.





Fig. 55 Réalisation de bâtiments préfabriqués sur la base de plans en accès libre (source : Google - WikiHouse) [162].

OPENSTRUCTURES

Idée

Concevoir des éléments de construction selon des dimensions standardisées et modulaires permettant une grande variété d'usages et une réutilisation des composants.

Réalisation

Le projet OpenStructures [53, 143] explore les possibilités d'un modèle de construction modulaire où chacun conçoit pour tout le monde sur la base d'une grille géométrique partagée. Il initie une sorte de 'Meccano' de collaboration auquel chacun peut contribuer et dans lequel il peut partager des pièces, des composants et des structures (voir l'illustration du principe à la figure 56 A). Il s'agit d'une plateforme ouverte commune qui stimule l'échange de pièces, de composants, d'expériences et d'idées. Un système modulaire ouvert de ce type a la capacité de créer des structures flexibles et dynamiques plutôt que des entités modulaires uniformes, d'introduire de la variété dans la modularité, de stimuler les cycles de réutilisation des différentes pièces et composants, et de générer une innovation collaborative (et donc exponentielle) dans la construction matérielle.

Le modèle OS est basé sur l'utilisation d'une grille dont la forme et les dimensions des mailles sont standardisées, offrant une souplesse dans la conception des objets. Ceux-ci comprennent une série de composants standardisés qui, bien que fabriqués à partir d'une large gamme de matériaux, sont tous compatibles et interchangeables. Cette approche donne la possibilité de développer une panoplie de solutions constructives standardisées et d'encourager la réutilisation des multiples sous-composants de la construction.

Toutes les OS doivent être développées comme des puzzles dynamiques et interdépendants. Cela signifie qu'elles doivent être conçues pour le démontage et selon le même cadre



dimensionnel (la grille OS). Des règles empiriques doivent être prises en compte lors de la conception de tout composant :

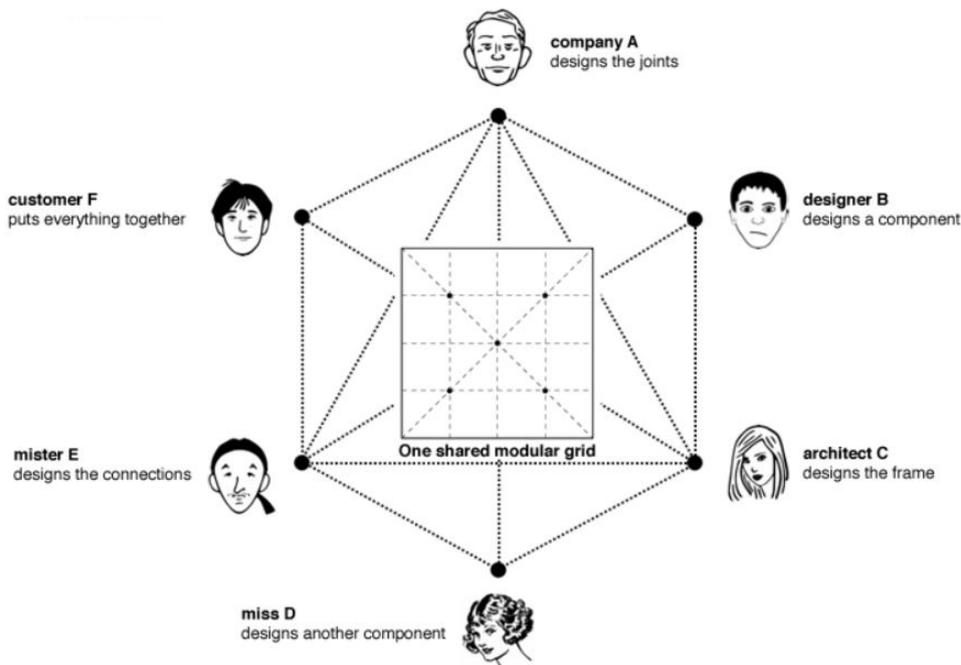
1. **concevoir pour la déconstruction**, c'est-à-dire favoriser les techniques d'assemblage qui permettent la déconstruction sans dommage ni perte, afin de faciliter la réutilisation des composants
2. **concevoir avec des matériaux recyclables**, c'est-à-dire privilégier autant que possible les matières recyclées à 100 % pour les pièces et composants
3. **concevoir à partir de la grille OS** (figure 56 B), c'est-à-dire utiliser la grille comme outil de conception pour choisir des dimensions, des points d'assemblage ou des diamètres d'interconnexion, de manière à rendre les pièces des uns compatibles avec celles des autres.

Le principe de construction repose sur l'assemblage des structures ouvertes à partir de pièces, selon les quatre étapes suivantes (figure 56 D) :

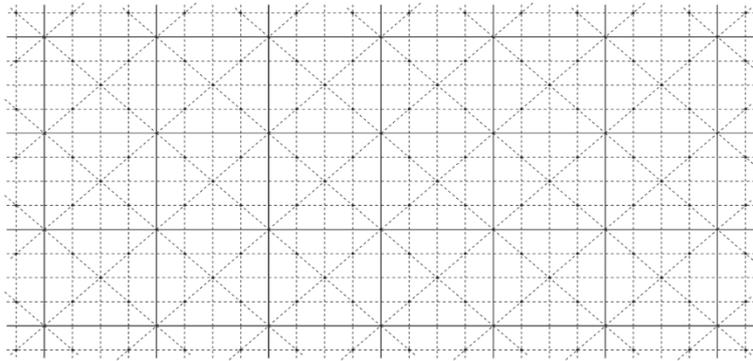
- créer des pièces de 4 × 4 cm
- les assembler en composants fonctionnels (réfrigérateurs, tiroirs de cuisine, par exemple)
- assembler les composants en structures (cuisine, salle de bain, par exemple)
- combiner les structures en superstructures (maison, par exemple).

Des catalogues de pièces (près de 200), de composants (46) et de structures (55) sont disponibles et partagés.

A



B



C



D

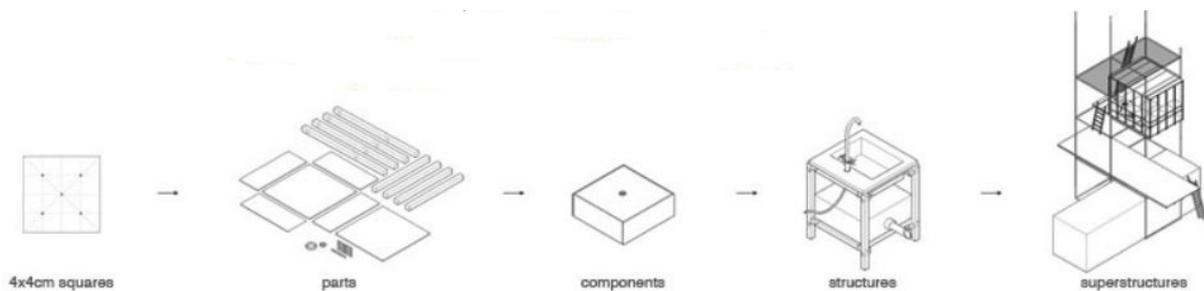


Fig. 56 Conception d'éléments de construction modulaires sur la base d'une grille géométrique (source : OpenStructures) [143].

ÉCONOMIE COLLABORATIVE – CLUSTERS

ONE STOP SHOP – Collaboration d'entreprises en vue d'une entrée sur le marché

Un 'One Stop Shop' (littéralement 'guichet unique') [141] réunit des entreprises qui souhaitent 'partager' leurs clients et leurs projets, afin d'aider leurs homologues à être mieux armés pour faire leur entrée sur le marché. Le marché de la rénovation de logements constitue un segment typique en la matière : chaque acteur y a sa spécialité (toitures, façades, isolation, menuiserie, chauffage, ventilation, ...), mais de nombreux clients sont à la recherche d'une 'solution intégrale' les dispensant de se mettre eux-mêmes en quête de chaque intervenant. Cette idée est mise en pratique par un certain nombre de professionnels. La société Sy-Bo de Wingene est ainsi constituée d'un *cluster* d'entreprises individuelles (électricité, gros œuvre, ...) et d'une coordinatrice représentant l'enseigne vis-à-vis du client. Les différentes entreprises collaborent de manière semi-formelle à des projets divers, générant une ligne continue de travail et de revenus, ainsi qu'une plus-value réalisée grâce à leur capacité à mieux coordonner leurs activités et à travailler plus efficacement.

Commentaires

La mise en place d'une telle collaboration se heurte à quelques obstacles liés à la mentalité belge qui veut qu'un entrepreneur reste 'indépendant' et se débrouille seul. La répartition des coûts et des bénéfices suscite aussi parfois des discussions. Le fait qu'une entreprise décide de suivre un itinéraire différent d'une autre entreprise du *cluster* pourrait également créer



des difficultés. Cette forme de collaboration doit tenir compte de ce que les projets de construction nécessitent des relations évolutives entre les partenaires.

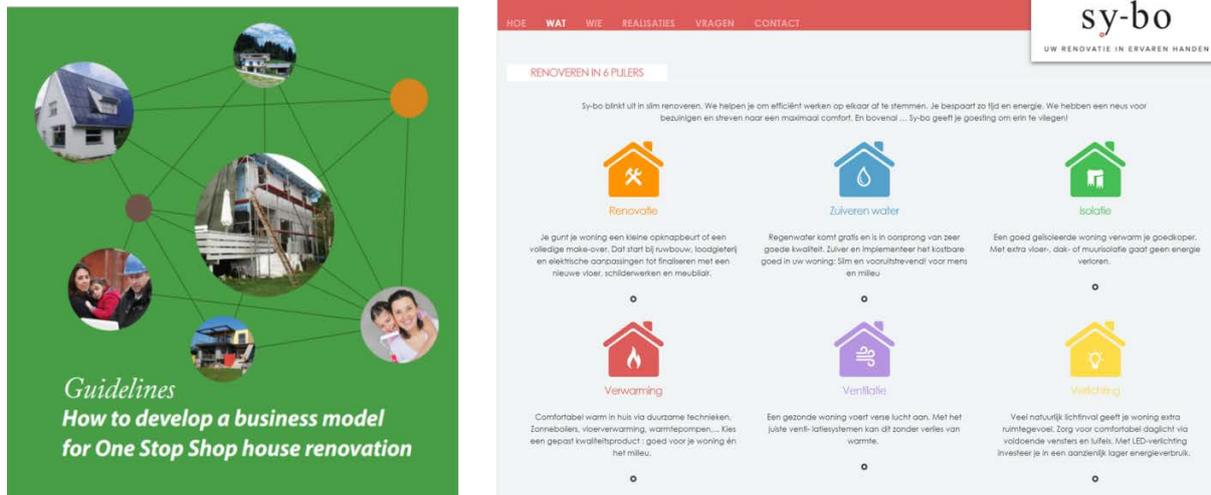


Fig. 57 Collaboration d'entreprises au sein d'un cluster (source : CSTC, One-Stop-Shop, Sy-Bo) [142, 157].

5.1.2 Fournir une performance plutôt que la propriété d'un bien

5.1.2.1 Description

L'idée d'une 'économie de la performance', développée par Walter Stahel dans les années '70, insiste sur l'importance de **vendre des services plutôt que des produits** . Grâce à ce concept, les fabricants peuvent conserver un plus grand contrôle sur leurs produits ainsi que sur l'énergie et les matériaux qui y sont incorporés, permettant un meilleur entretien, un nouveau conditionnement et une meilleure récupération. Les clients bénéficient également de ce processus, car ils ne paient que pour le service dont ils ont besoin, service qui de surcroît devrait être supérieur, puisque le fabricant a davantage intérêt à fournir un produit durable.

Dans un tel modèle économique, le fabricant ou le fournisseur reste responsable de la maintenance, de la réparation et de la gestion de son produit durant tout son cycle de vie – il a dès lors tout avantage à prévoir une durée de vie adéquate et à rendre ses produits plus robustes et plus facilement démontables pour en faciliter la réparation. Le modèle prône donc la durabilité comme facteur essentiel et rejette l'obsolescence programmée. L'utilisateur / consommateur ne paie plus pour posséder le produit, mais pour en faire usage : le client n'est plus propriétaire de certains éléments de construction, mais il les loue dans le cadre d'un contrat de services à long terme.

Différentes formes de services peuvent être proposées :

- les services axés sur l'*usage* (usage versus propriété) : le produit ou l'équipement conserve un rôle important, mais sa vente n'est plus intégrée au modèle. L'équipement reste donc la propriété du producteur, il est mis à la disposition du client de différentes façons et c'est l'usage qu'il en fait qui lui est facturé. Il s'agit par exemple des modèles de *leasing* ou de location



- les services axés sur le *résultat* (performance *versus* produit) : ce modèle n'intègre pas de produits ou d'équipements prédéfinis. Il se base plutôt sur un accord entre le client et le fournisseur quant à un résultat à obtenir
- les services axés sur le *produit* : celui-ci reste au centre du modèle et fait partie de la commercialisation, mais des services étendus y sont greffés (service d'entretien ou de réparation, extension de garantie, etc.).

Ces différentes formes d'association de produits et de services sont regroupées sous un modèle d'affaire dit d'*économie de la fonctionnalité*. Celle-ci consiste à passer de la notion de vente d'un bien à celle de mise à disposition du bien (avec, par exemple, une tarification fondée sur son usage). C'est l'utilisation du produit qui se place au centre du modèle de création de valeur. La valeur ajoutée du produit ne dépend plus du volume physique de production, mais réside dans sa fonction. En résumé, ce modèle d'affaire relève de la production et de la vente d'une solution (ou d'un système) combinant de manière intégrée et non décomposable des produits et des services basés sur le changement de comportement des consommateurs et de nouvelles offres dématérialisées.

Puisque ce modèle d'affaire requiert que le consommateur se soustraie de la propriété du bien dont il souhaite faire usage, des logiques d'économie de partage ou collaborative peuvent émerger.

L'*économie collaborative* rassemble toutes les formes d'échanges de services entre acteurs organisés en réseau, le plus souvent autour de plateformes numériques ⁽²⁶⁾, mais pas exclusivement. Le citoyen devient 'consom'acteur'. Ces modèles (partage, troc, échange, location ou don) permettent d'optimiser le taux d'utilisation des équipements, tout en satisfaisant les besoins.

Durant la phase d'utilisation d'un bâtiment, des modèles d'affaire de *partage des espaces et des fonctions* émergent et se développent. Ce sont des espaces de proximité partagés, multifonctionnels, flexibles, efficaces pour l'accès à des services essentiels, pour le travail et l'entrepreneuriat, les projets collectifs, la création et l'innovation. Un lieu 'partagé' accueille des usagers ayant besoin d'accéder à des services, des compétences, des locaux, des équipements, des outils. Il permet de répondre à des aspirations, à des pratiques ou à des besoins individuels. Il favorise également la rencontre et les collaborations, qui se déroulent dans un cadre personnel, professionnel ou associatif.

Les *espaces partagés* sont principalement de trois types, mais quel que soit le modèle de partage, il s'agit presque toujours de maximiser le taux d'occupation du lieu et l'utilisation de ses ressources techniques, et d'imaginer d'autres sources de revenus (services aux utilisateurs, hébergement de services, accueil ou organisation d'événements, etc.).

- Les *lieux de création* offre la possibilité à des projets, personnels ou collectifs, d'éclorre, de progresser, de se développer, de se faire connaître et de se confronter à d'autres projets.

⁽²⁶⁾ À titre d'exemple, la plateforme numérique Airbnb met en réseau des personnes cherchant à utiliser un lieu de résidence pour une courte période avec des personnes qui mettent tout ou partie de leur logement en location pour une courte période.



De tels lieux doivent inciter à l'apprentissage de pair à pair, ou par le biais de médiateurs et de formateurs.

- Les *espaces partagés de travail* sont des espaces de bureaux partagés par des personnes travaillant pour leur propre compte ou sur des projets indépendants. Ces espaces comprennent le nécessaire à la pratique d'un travail de bureau. Il s'agit également d'espaces de chantier ou de lieux spécifiques partagés par un ou plusieurs entrepreneurs, afin de *mutualiser une partie de leurs ressources* (personnel, machines, espaces communs, etc.). Ces centres apparaissent comme des solutions innovantes pour la logistique des chantiers.
- Les *lieux de cohabitation* peuvent revêtir plusieurs formes :
 - l'*habitat coopératif* : un bâtiment ou un ensemble de bâtiments appartenant à une coopérative se compose d'un certain nombre d'unités privées autonomes. Les résidents paient une quote-part pour devenir membres ainsi qu'une taxe mensuelle fixée par la coopérative destinée à couvrir le coût réel du logement plutôt qu'à générer un bénéfice. Les membres de la coopérative ont aussi généralement accès à certaines commodités partagées
 - la *cohabitation* diffère des logements coopératifs par le fait que les participants des unités privées paient une partie des installations communes et partagées. Les commodités partagées sont plus étendues que celles de la plupart des coopératives d'habitation
 - la *colocation* est un mode d'habitat locatif d'un appartement ou d'une maison. Les éléments 'nouveaux' sont ici l'échelle (très grandes maisons louées au taux du marché), le type de locataire (jeunes professionnels), l'importance du partage et les raisons qui poussent à partager un grand espace.

5.1.2.2 Exemples et bonnes pratiques

ÉCONOMIE DE LA FONCTIONNALITÉ – LE PRODUIT COMME UN SERVICE

'PAY PER LUX' de Philips

Idée – 'Pay per lux'

'Pay per lux' est le fruit d'une collaboration entre l'architecte Thomas Rau et Philips [145], qui cherchent à vendre la lumière en tant que service, les consommateurs payant en fonction de la performance (l'éclairage fourni, mesuré en lux) plutôt qu'en fonction des objets que sont l'ampoule ou la lampe. La solution du 'paiement au lux' permet au client de réaliser d'importantes économies tant sur le plan énergétique et financier, puisqu'il ne paie plus que pour la quantité de lumière réellement consommée. Philips conserve le contrôle sur les articles qu'il produit, ce qui facilite leur entretien, leur reconditionnement et leur récupération.

Réalisation – Bureaux NUS à Londres [131]

Les bureaux londoniens du syndicat national des étudiants NUS sont équipés d'un éclairage à LED Philips, fourni au titre d'un bail avec paiement au forfait. Si le NUS dépasse la consommation d'énergie prévue, Philips lui verse une compensation. Il y a donc pour ce dernier une incitation financière à fournir le service le plus 'éco-énergétique' possible. Quant



au client, il a non seulement l'avantage de ne pas avoir à payer d'avance, mais également l'assurance d'un contrat à prix fixe pour toute la période convenue, en l'occurrence 15 ans.

Réalisation – Lounge 2 Terminal aéroport de Schiphol [132]

Dans ses terminaux, Schiphol a opté pour la 'lumière en tant que service' dans le cadre d'un accord avec Philips et la société de services énergétiques Cofely. Ceux-ci sont conjointement responsables de la performance du système, de sa durabilité, de sa réutilisation et du recyclage en fin de vie. Philips a travaillé avec le bureau d'architectes Kossmann.dejong en vue de développer des luminaires spéciaux qui, de par leur facilité d'entretien, devraient avoir une durée de vie 75 % plus longue que des luminaires classiques. Leurs composants sont en outre remplaçables individuellement, ce qui réduit les coûts d'entretien et dispense de recycler l'ensemble de l'appareil. La compagnie aéroportuaire est facturée pour la lumière utilisée, tandis que Philips reste propriétaire de tous les équipements que Schiphol loue pour la durée du contrat. À l'expiration de ce dernier, les luminaires seront remis à niveau et réutilisés ailleurs. Grâce à une présence 24h/24 de Cofely à Schiphol, Philips et Cofely peuvent assurer la gestion en temps réel du système d'éclairage pour générer une expérience optimale et pérenne.



Fig. 58 La lumière en tant que service à l'aéroport de Schiphol (source : Turntoo & Netherlands Circular Hotspot) [92, 138].

LES FAÇADES COMME SOLUTION DE 'PRODUIT-SERVICE' – TU DELFT

Idée

Créer une façade intégrale assurant toutes les fonctions attendues d'une enveloppe, à savoir l'étanchéité, l'isolation thermique, la ventilation, l'isolation acoustique, etc. L'idée est d'encourager un modèle économique circulaire basé sur l'utilisation de façades multifonctionnelles en tant qu'éléments performantiels.

Réalisation

L'accélération du rythme et de l'ampleur de la rénovation énergétique est l'un des plus grands défis auxquels l'industrie de la construction est aujourd'hui confrontée. La plupart des bâtiments susceptibles d'être rénovés sont constitués de façades et de systèmes constructifs bien en deçà des normes actuelles. Le processus actuel de réhabilitation d'un bâtiment existant ou d'amélioration de la performance énergétique d'une construction neuve est difficile et implique une collaboration étroite entre plusieurs partenaires aux intérêts commerciaux bien souvent opposés. En externalisant la gestion et la mise à niveau des systèmes technologiques vers les fournisseurs responsables de leur développement, on peut accélérer l'adoption de nouveaux systèmes plus efficaces, tout en réduisant les investissements initiaux des développeurs et des propriétaires d'immeubles.



La location de façades repose sur deux types d'innovations :

- d'une part, une innovation technologique générée par les *façades multifonctionnelles*, qui permettent de construire des enveloppes assurant un confort intérieur grâce à l'intégration de systèmes décentralisés qui remplacent les installations traditionnelles. Ces technologies décentralisées comprennent des systèmes de production d'énergie, de traitement de l'air, des infrastructures électriques et de communication, des éléments tels que des écrans de contrôle, des systèmes de filtrage de l'air comme des composants végétalisés, etc.
- d'autre part, une innovation en matière de *pratiques commerciales et de gestion* – nouvelles méthodes de financement, de sous-traitance et d'exploitation de ces systèmes de construction novateurs très complexes – qui pourrait faciliter la transition requise tout au long du processus de construction : depuis la conception de composants pouvant être facilement entretenus et remplacés, jusqu'à une production de haute qualité basée sur la durabilité plutôt que sur le coût initial, mais surtout lors de l'exploitation grâce à une collaboration plus étroite entre les fournisseurs de technologies et les clients (ou les utilisateurs).

En septembre 2016, un consortium d'entreprises constitué de fournisseurs de composants et de fabricants de façades a mis en place un projet pilote visant à remplacer provisoirement une partie de la façade d'un bâtiment de la Faculté de Génie électrique de l'université TU Delft au profit d'une façade intégrée.

Commentaires

Le projet étant toujours en phase d'expérimentation, il n'est pas encore possible d'évaluer la performance à long terme d'une telle façade, ni d'en cerner les implications juridiques et les coûts réels.



Fig. 59 Façade multifonctionnelle à l'université de Delft (source : TU Delft) [161].

DESIGN-BUILD-FINANCE-MAINTAIN

Des magasins comme solution de produit-service – Beneens (concept)

Idée

Concevoir et construire des magasins selon le principe DBFM (une méthode similaire au partenariat public-privé) : conception (*Design*), construction (*Build*), financement (*Finance*) et maintenance (*Maintain*).

Réalisation

Selon le principe DBFM, un seul opérateur (Beneens, en l'occurrence) est responsable de la conception, de la construction et de la maintenance des locaux pendant une certaine période. Cet opérateur (pré)finance le projet et le loue au client pour une durée convenue, à l'issue de



laquelle celui-ci prend le relai. Le concept du magasin comme solution de produit-service repose sur le principe d'une production sans déchets par une réutilisation maximale des matériaux dans un circuit de distribution fermé. Beneens a réussi à réunir quatre entreprises autour de la table – Sustenuto (responsabilité sociale des entreprises et support 'Cradle to Cradle'), Helbig (sous-traitant de matériaux pour l'ameublement de magasins), Gyproc (producteur de plaques de plâtre) et Xandres (chaîne de vêtements et client) – et les a convaincus d'adopter le principe de la durabilité dans la conception et l'aménagement des magasins. Ensemble, ils ont opté pour un système d'éclairage réutilisable ainsi que pour des revêtements de sol et de plafond amovibles pouvant être déposés et reposés ailleurs.

Les caractéristiques de la méthode DBFM sont énumérées au tableau 3.

Tableau 3 Caractéristiques de la méthode DBFM.

Design	Build
Longue durée de vie Valeur résiduelle potentielle Faible consommation d'énergie Faibles coûts de maintenance 'Cradle to Cradle' Systèmes de murs modulaires et flexibles Conception 'Box in the Box'	Construction sur place Principes de construction durable Nécessité d'une bonne préparation du travail Temps d'installation du chantier réduit Réduction des transports Coopération avec les sous-traitants Recyclage des déchets
Maintain	Finance
Entretien des installations (électriques et HVAC) Gestion quotidienne du bâtiment Coopération avec les sous-traitants pour réduire les coûts de transport	Relation avec les institutions bancaires Établissement de contrats de location

Cette manière de travailler présente de nombreux avantages, tant pour l'exploitant (coût réduit des travaux, hausse de la compétitivité, gestion des installations en sous-traitance et possibilité de consacrer davantage de temps à la vente) que pour le constructeur (fidélisation de la clientèle, revenus plus constants et offre de services complémentaires).

Commentaires

Bien que l'idée semble intéressante, le projet demeure au stade de projet pilote. La viabilité du modèle n'est pas encore clairement établie (coût/bénéfice, intérêt du marché, etc.).

ÉCONOMIE COLLABORATIVE – PARTAGE DES ESPACES ET DES FONCTIONS

NOORD4US

Idée

Créer un habitat convivial, durable et économique au travers d'une collaboration intelligente.

Réalisation

NOORD4US [140] réalise cette idée au bord de l'IJ, dans le district nord d'Amsterdam, au travers d'une forme effective d'économie collaborative. 'Plus tu partages, plus tu possèdes', tel est le credo de NOORD4US. Ce partage porte sur toute une gamme de services et



d'espaces : appartements (7 types d'appartements proposés), jardins, machines à laver, voitures électriques, vélos, etc.

Les résidents ont toute latitude pour prendre des initiatives tant individuellement que collectivement. Selon l'agencement et le choix opéré, dix à quinze ménages sont susceptibles de partager les lieux et définissent ensemble ce qu'ils veulent partager. Ce mode de vie innovant permet de disposer de beaucoup plus d'espace et de vivre de manière respectueuse de l'environnement, tout en réalisant des économies.

La collectivité a opté pour un bâtiment durable dont la production d'énergie est assurée par des panneaux solaires, les locaux étant chauffés par la chaleur résiduelle du système de ventilation et par un système de stockage thermique.

JUSTPARK

Idée

Faciliter l'accès aux aires de stationnement individuelles, tout en partageant les espaces sous-utilisés selon un concept collaboratif.

Réalisation

JustPark [129] est une solution qui propose des places de stationnement alternatives, locales et moins coûteuses, tout en assurant un revenu à leurs propriétaires et en leur permettant de maximiser l'utilisation de leur espace. Une application mobile détecte automatiquement les emplacements libres, évitant ainsi de devoir parcourir inutilement des kilomètres pour garer sa voiture. Les places de stationnement disponibles à proximité des arrêts de transport public relèvent d'une logique de mobilité multimodale intégrée, dans laquelle une première partie du trajet est effectuée en voiture et le reste par les transports en commun.

5.1.3 Créer de la valeur à partir des déchets

5.1.3.1 *Description*

Plutôt que de réduire la production de déchets, ce modèle générique d'affaire vise à créer de la valeur à partir de ce que l'on considère couramment comme déchet.

Il tend donc à atténuer l'impact environnemental de l'industrie en réduisant la demande de ressources, en fermant la boucle des matériaux et en utilisant les flux de déchets pour fabriquer d'autres produits, limitant ainsi l'extraction des matières premières et l'épuisement des ressources naturelles.

Les fabricants peuvent, sous certaines conditions, mettre en place une **boucle de collecte** ('take back management') et de remise en état de leurs produits ou des déchets de mise en œuvre de leurs produits. Comme ceux-ci réintègrent le cycle de production, le fabricant prolonge la durée de vie des produits qu'il peut en quelque sorte vendre plusieurs fois. Afin de pérenniser son modèle économique, l'industriel doit parfois mettre en place des mesures incitatives ou des accords contractuels avec ses clients pour s'assurer du retour des produits et déchets de mise en œuvre. Ceux-ci, au lieu d'être perdus ou gaspillés, sont dès lors



maintenus dans le cycle, voire améliorés par la réparation, la remise à niveau ou la refabrication.

Ce modèle offre plusieurs avantages au producteur :

- en prolongeant la durée de vie au travers du recyclage de matières premières secondaires, il réduit sa consommation (d'énergie notamment) et sa dépendance vis-à-vis de matières premières aux prix fluctuants
- grâce à la revente des produits, il augmente son chiffre d'affaires
- enfin, la remise en état de ses produits lui apporte de précieuses informations sur leur durabilité et leur fiabilité, qu'il pourra mettre à profit pour concevoir de nouveaux biens.

Les revenus sont générés par la transformation des produits existants en produits neufs à valeur ajoutée et par la réduction des coûts. Le développement de plateformes collaboratives pour améliorer la logistique inverse est essentiel. Ces plateformes qui relient l'offre et la demande sont des lieux de partage et d'accès à des ressources, des compétences ou des informations.

Dans le cas particulier de la *symbiose industrielle* , le fabricant peut établir des partenariats en vue de remplacer tout ou partie de ses matières premières (issues de l'exploitation de ressources naturelles) par des déchets industriels provenant d'une entreprise partenaire. Ce concept repose sur une collaboration et des synergies d'échange rendues possibles par la proximité géographique et la mise en place de circuits économiques courts. Les synergies d'entreprise sont souvent créées au sein de parc dits éco-industriels ⁽²⁷⁾.

Les échanges répondent avant tout à des impératifs d'ordre économique, qu'il s'agisse de maîtriser les dépenses ou de réduire la consommation de matières premières. En contrepartie, ils contribuent à réduire les pressions induites par l'approvisionnement de matières premières et la dépendance vis-à-vis des ressources. Les bénéfices environnementaux sont évidents et constituent l'un des moteurs du modèle (réduction des volumes de déchets, des émissions de CO₂ et de la consommation d'eau).

Un producteur désireux de mettre en place une symbiose industrielle doit identifier les partenaires susceptibles d'utiliser ses déchets comme matières premières. *A contrario* , il doit repérer les entreprises qui produisent des rebuts substituables à ses matières premières. Pour faciliter cette recherche, il peut participer à une plateforme qui met en relation des entreprises productrices de déchets avec celles susceptibles de les utiliser. En Flandre, ce type de plateforme s'est organisé autour du projet Symbiose [89].

⁽²⁷⁾ Voir à ce sujet la 'Symbiose de Kalundbord', exemple originel du concept de symbiose industrielle (notamment sur <http://www.symbiosis.dk/en>).



5.1.3.2 Exemples et bonnes pratiques

BOUCLE DE COLLECTE & CIRCUIT FERMÉ

DERBIGUM – Collecte et recyclage de membranes d'étanchéité

Idée

Réintroduire dans le cycle de production des membranes bitumineuses provenant d'anciennes toitures ou de chutes de coupe.

Réalisation

Confronté à la fluctuation des prix du prix du pétrole, Derbigum [119] a développé une politique de recyclage en boucle des membranes d'étanchéité bitumineuses. L'évolution du prix du pétrole définit le modèle économique de reprise : plus le prix est élevé, plus il est intéressant pour le fabricant de récupérer les déchets de membranes.

Quant aux chutes de coupe (quelle que soit la marque du produit), ils peuvent être déposés gratuitement dans des *big bags* auprès des distributeurs participants et des applicateurs en Belgique.

Pour ce qui est de ces derniers, Derbigum collabore étroitement avec le secteur de la démolition et les collecteurs de déchets pour arriver à réaliser un recyclage de près de 2000 tonnes par an.



Fig. 60 Récupération et collecte d'étanchéités bitumineuses (source : Derbigum & CSTC) [119].

TARKETT

Idée

Mettre en place une approche de conception des revêtements de sol en boucle fermée.

Réalisation

L'approche en boucle fermée inclut le choix de matériaux recyclables, la minimisation de l'empreinte écologique lors de la production (utilisation de l'eau en cycle fermé, recours à la biomasse pour la production d'énergie, par exemple), la fabrication de produits à teneur minimale en composés organiques volatils, et la transition d'un concept de fin de vie vers un concept de fin d'utilisation des produits.

Le producteur de revêtements de sol [158] vise à réduire et à optimiser l'usage des ressources tout au long de son processus de fabrication, ce qui contribue à limiter l'épuisement des



matières premières. L'objectif est de transformer les déchets en ressources ou en produits neufs de qualité équivalente, voire supérieure.

Pour réaliser cet objectif, le fabricant a mis au point un programme de reprise de ses déchets (ReStart) en Amérique du Nord et en Europe en vue de recueillir et de recycler ses revêtements arrivés en fin d'utilisation grâce à plusieurs centres de recyclage internes.

DESSO

Idée

Mettre en place une boucle fermée de valorisation des déchets de dalles de moquette.

Réalisation

Pour boucler la boucle, il faut pouvoir reprendre les produits usagés et les recycler ou les réutiliser. Le fabricant [120] a donc développé une méthode de reprise et de recyclage de ses matériaux. En Belgique, il s'est associé à un collecteur de déchets pour récupérer des dalles de moquette en fin de vie et les réintroduire dans son processus de fabrication. Les dalles sont collectées de trois manières : sur RollerDoc, sur propre palette ou en conteneur. Les RollerDoc (figure 61, à droite) et les conteneurs sont livrés en 48 heures et laissés pour la collecte pour une durée de deux semaines. L'enlèvement par le collecteur s'opère dans les 48 heures.

Le fabricant sépare le fil, les fibres et la sous-couche des dalles. Ce processus crée deux grands flux de matériaux : le fil, qui est rapporté aux fournisseurs de l'entreprise pour être recyclé, et le bitume – principal composant des sous-couches actuelles –, qui est revendu comme matière première pour la construction routière et la fabrication de revêtements de toiture.



Fig. 61 Valorisation des déchets de dalles de moquette (source : DESSO) [120].

ARMSTRONG

Idée

Mettre en place une boucle fermée de valorisation des déchets de revêtement de plafonds suspendus.

Réalisation

Le fabricant [100] propose deux principes pour récupérer les déchets de ses revêtements de plafond en laine minérale. Le premier concerne les chutes de mise en œuvre de plafonds neufs; ces déchets sont stockés sur chantier par l'installateur dans des sacs spécifiques qui sont ensuite récupérés par le producteur. Le second principe concerne les éléments de



plafonds suspendus arrivés en fin de vie. La dépose et la collecte sont identiques à celles des plafonds neufs. Les éléments récoltés par le fabricant sont ensuite acheminés vers l'usine de production où ils réintègrent un nouveau cycle de production, réalisant ainsi un recyclage en boucle fermée.



Fig. 62 Valorisation des déchets de revêtements de plafonds (source : Armstrong) [100].

SYMBIOSE INDUSTRIELLE

PHOSPHOGYPSE LOCAL – Knauf ECOGypsum

Idée

Produire du plâtre durable et local en valorisant les déchets d'une entreprise dans le processus de production d'une autre.

Réalisation

Les enduits au plâtre sont composés à 99 % de matières premières minérales et principalement de sulfate de calcium. Le plâtre apparaît sous différentes formes : gypse naturel (extrait en carrière), plâtre REA (issu de la désulfuration des gaz de combustion des centrales thermiques) ou phosphogypse (issu de la production de phosphates).

À Engis, près de Liège, Knauf [130] dispose d'une usine de fabrication de plâtre située à quelques centaines de mètres d'une entreprise produisant des déchets de phosphate d'une quantité et d'une qualité telles que Knauf s'y est intéressé pour sa production de plâtre. Les déchets sont acheminés par bande transporteuse au-dessus de la Meuse sans aucun moyen de transport lourd. L'entreprise partenaire de cette symbiose est SILOX [153], une société produisant des agents réducteurs à base d'hydrosulfite de sodium ainsi qu'une gamme étendue d'oxydes de zinc.

Un système d'approvisionnement intégré au niveau local permet de réduire considérablement l'énergie consommée à la source pour l'acheminement et la livraison des matières premières et des produits finis.

Commentaires

Les difficultés de toute symbiose industrielle résident dans la dépendance envers un acteur externe pour l'approvisionnement d'une matière première essentielle. Il convient dès lors d'établir un contrat de partenariat à long terme en vue d'assurer un approvisionnement suffisant et efficient, et d'éviter qu'une entreprise en difficulté n'en entraîne d'autres avec elle.





Fig. 63 Symbiose industrielle entre un fabricant de plâtre et une entreprise produisant des déchets de phosphate (source : © 2017 Google).

ÉCONOMIE COLLABORATIVE

PLATEFORME DE COLLECTE DE RESSOURCES – Harvestmap (SuperUse Studios)

Idée

Offrir une représentation géographique pour aider à identifier des déchets produits à proximité d'un chantier de construction et pouvoir les réutiliser dans un nouvel ouvrage.

Réalisation

Superuse Studios a créé une 'carte de collecte' (*harvestmap*) pour la ville de Rotterdam [127] en vue d'établir des connexions entre la demande de matériaux et l'offre présente sur le territoire. Les matériaux récupérés sont référencés sur une plateforme web qui fournit une bibliothèque de matériaux et mentionne leur localisation. La plateforme est alimentée par une équipe spécialisée qui localise et référence les stocks potentiels de matériaux. L'outil peut être utilisé par les constructeurs pour identifier des 'déchets' à proximité de leur chantier. L'idée est de donner une valeur nouvelle à ce qui est déjà disponible et de créer de nouveaux flux de matériaux. Superuse Studios considère qu'il est plus intéressant de valoriser les déchets d'une industrie dans un autre secteur que de maintenir les matières en boucle fermée. Cette 'carte de collecte' a été expérimentée dans le projet de la Vila Welpeloo (voir § 4.1.5.2). D'autres cartes de collecte ont depuis lors émergé dans des villes telles que Glasgow [126] ou Utrecht [128].





Fig. 64 Cartes de collecte de ressources (source : Superuse Studios) [127].

PARTAGE DE COMPÉTENCES ET CRÉATION DE VALEUR – Une chaîne forte et courte pour un recyclage de haute qualité et une répartition des coûts/bénéfices – Roadmap RecyBet

Dans un processus de démolition classique, l'entreprise de démolition évacue tous les matériaux et livre les flux de déchets pierreux à un concasseur qui les transforme en granulats recyclés. Or, ces granulats ne présentent pas toujours une qualité suffisante pour servir de matière première dans l'industrie du béton préfabriqué.

Cependant, si le producteur de béton s'engage à reprendre les granulats de haute qualité chez le concasseur (à un prix inférieur à celui des granulats naturels), celui-ci sera incité à répondre à la demande. Pour ce faire, il importe que le démolisseur procède à un démontage sélectif des ouvrages et assure une livraison soignée de la fraction de gravat la plus adaptée. Les frais qui en résultent pour le démolisseur peuvent être compensés par la redistribution des coûts/bénéfices à travers la chaîne et par l'établissement d'accords adéquats. En principe, tous les intervenants – démolisseur, concasseur, producteur de béton et entrepreneur de construction – peuvent apporter une plus-value au processus, si chacun est disposé à partager une partie du surplus avec les autres (et principalement avec le démolisseur).

Commentaires

Élaboré sur la base d'un certain nombre d'hypothèses et d'études de cas, ce modèle doit encore être validé dans la pratique. Une solution pourrait consister à produire des granulats de qualité supérieure et à alimenter une certaine fraction de la production de béton. En principe, un système analogue pourrait fonctionner avec d'autres flux (verre, par exemple) à condition qu'il existe un incitant clair à l'extrémité de la chaîne.

■ Roadmap RecyBet

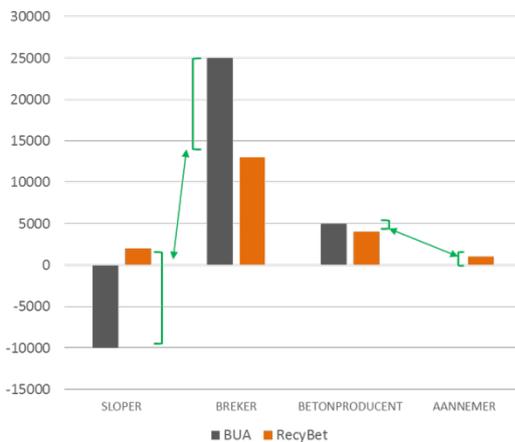


Fig. 65 Modèle de partage de compétences (source : CSTC).



Possibilités d'une chaîne à circuit court :

- Démolition sélective pointue (*cherry picking*) : fraction de béton de qualité livrée séparément et proprement
- Flux de concassage distinct pour obtenir un granulats recyclés de qualité supérieure
- Producteur de béton : remplace le granulats naturel
- Entrepreneur : meilleure image, pas de recettes supplémentaires

5.2 Développements actuels et futurs

5.2.1 Industrie 4.0

Le secteur de la construction est entré dans l'ère de la 4^e révolution industrielle. L'Industrie 4.0 est caractérisée par le développement de technologies au service de l'acte de construire, de gérer, d'entretenir et de rénover nos bâtiments : intelligence artificielle, robotique, Internet des objets, impression 3D, drones, réalité virtuelle, BIM, etc. vont révolutionner le secteur.

5.2.2 Coût du cycle de vie

Aujourd'hui, la plupart des ouvrages bâtis sont conçus dans une optique de réduction des coûts de construction. Dans des modèles économiques plus avancés, la conception d'un bâtiment est optimisée non seulement sur la base des coûts de construction, mais également sur la base d'une estimation des coûts de maintenance générés au cours de sa durée de vie. L'accent est donc mis davantage sur les concepts de *Total Cost Ownership* (TCO) ou de *Life Cycle Costs* (coût du cycle de vie), qui sont intégrés ultérieurement dans d'autres modèles d'affaires.

Dans une logique d'économie circulaire, une troisième dimension mérite cependant d'être prise en considération. Cette dimension concerne les coûts de démolition ou de déconstruction. Il conviendrait également d'accorder plus de temps à la planification de la déconstruction sélective afin de mieux valoriser les matières libérées. Selon les principes de l'*urban mining* évoqués au chapitre 4, ces frais de démolition pourraient être considérés non plus comme un coût, mais comme une source de revenu.



5.2.3 Économie de la fonctionnalité

La transposition du principe de fonctionnalité au secteur de la construction n'est pas toujours chose aisée. La durée de vie particulièrement longue des matériaux par rapport à d'autres biens de consommation ne permet pas aux fabricants d'évaluer facilement leur capacité de récupération.

Certains éléments tels que les composants d'installations et d'équipements techniques pourraient aisément être adaptables : chaudières, luminaires, panneaux solaires, systèmes de ventilation et pompes à chaleur pourraient être présentés par les fabricants comme autant de services et donc loués plutôt que vendus aux clients.

Le développement d'un tel modèle d'affaire pose toutefois la question de la propriété des éléments de construction compte tenu des changements possibles d'utilisateurs et de l'évolution, voire la disparition des entreprises. La mise en œuvre généralisée d'une structure de transfert de propriété induirait un changement de paradigme dans la construction. Bien que les propriétaires et investisseurs immobiliers attendent une certaine rentabilité sur leurs placements, le besoin primaire à satisfaire ne consiste pas à posséder un bien, mais à disposer de locaux pour héberger des utilisateurs.

Le modèle traditionnel consistant pour l'entrepreneur à 'construire' ou à 'concevoir-construire' pourrait évoluer vers un modèle 'concevoir-construire-exploiter'.

5.2.4 Symbiose industrielle

Dans le cadre d'une symbiose industrielle, il est essentiel que les contrats de partenariat soient bien encadrés et courent sur une longue échéance, de manière à éviter qu'une entreprise en difficulté n'en entraîne d'autres avec elle. Malgré son intérêt économique, la symbiose industrielle reste parfois difficile à mettre en œuvre. L'économie de marché, dans laquelle les entreprises sont mises en concurrence, ne favorise pas la création de synergies et l'échange d'informations.

5.2.5 Extension de la durée de vie

Exposés à la croissance constante du prix des matières premières et aux risques d'approvisionnement, certaines entreprises instaurent une gestion des matières premières en boucle fermée. Dans une logique d'économie circulaire, elles peuvent développer des partenariats pour mutualiser des compétences (par exemple, en matière de gestion des déchets ou de logistique inverse) ou des ressources (financières, matérielles). À cette fin, elles collaborent souvent avec des sociétés spécialisées dans la collecte (ou le recyclage) des déchets, puisqu'il s'agit de capter des déchets issus de produits qu'elles ont mis sur le marché. Cette alliance entre entreprises productrices et entreprises gestionnaires de déchets peut s'étendre à un partenaire logistique ou à un distributeur.



Le changement d'économie promis par la circularité des produits a notamment pour conséquence de responsabiliser le fabricant sur l'ensemble du cycle de vie de ses produits. D'un point de vue réglementaire, la responsabilité élargie du producteur vise à lui faire supporter le coût du traitement de ses produits polluants arrivés en fin de vie. À l'heure actuelle, en Belgique, il n'existe pas de cadre réglementaire en matière de responsabilisation des acteurs de l'industrie de la construction, mais certains fabricants se sont déjà positionnés face à cette problématique en inscrivant dans leur modèle d'affaire la prolongation de la durée de vie de leurs produits.



6. Synthèse et conclusions

La construction est un **secteur industriel clef** pour le développement de l'économie circulaire en Europe, mais également en Belgique.

Notre pays peut être cité en exemple pour son taux important de recyclage des déchets de construction. Cependant, ce recyclage engendre souvent une dépréciation des propriétés de la matière et une réutilisation de celle-ci pour des fonctions de moindre valeur (*downcycling*).

En Europe, on estime que près de la moitié des bâtiments sont trop vastes pour les besoins de leurs occupants. Par ailleurs, la construction est grande consommatrice de matières premières produites à partir de ressources naturelles. Le secteur est ainsi responsable d'une large part des émissions de gaz à effet de serre, non seulement pour l'exploitation des bâtiments, mais également pour l'approvisionnement et le transport des matières premières.

Le secteur fonctionne encore essentiellement selon un modèle d'économie classique dit linéaire. Les ressources naturelles y sont exploitées pour produire des matériaux qui ne sont la plupart du temps pas valorisés en fin de vie. Ce système suppose que les ressources sont infinies et que les déchets peuvent être stockés sans limites et sans impact environnemental ou financier.

Le secteur de la construction est donc à la fois **grand consommateur de ressources et gros producteur de déchets**. Les enjeux principaux auxquels il doit faire face sont :

- la réalisation (conception et construction) de bâtiments durables qui portent en eux les principes de circularité
- l'usage efficace des ressources matérielles présentes dans le bâti existant, notamment au travers de l'entretien des bâtiments, du réemploi des composants et de leur recyclage
- l'élaboration de nouveaux modèles d'entreprise reposant, par exemple, sur la vente de services à valeur ajoutée plutôt que sur la vente de produits.

La transition du modèle économique linéaire vers le modèle circulaire constitue ainsi une opportunité pour le secteur de la construction. L'économie circulaire est envisagée comme un modèle alternatif dans lequel les ressources sont maintenues en usage aussi longtemps que possible, afin d'en extraire le maximum de valeur et de les régénérer ou de les récupérer en fin de vie. Cette transition s'envisage sur deux plans parallèles :

- par le biais d'une **évolution technique et technologique** tendant à optimiser la valeur des produits, éléments et matériaux de construction tant en phase de conception et de construction qu'en phase d'exploitation et en fin de vie, par exemple via l'écodesign, les connexions réversibles et la disponibilité des informations tout au long de la vie des produits et matériaux
- par le biais d'une **évolution économique** incitant le secteur à trouver de nouveaux modèles d'affaire, notamment en passant du rôle de producteur de techniques à un rôle de



fournisseur de services susceptibles de favoriser la croissance et la compétitivité. Cette évolution économique peut répondre aux besoins du marché en instaurant de nouvelles relations à long terme avec le client.

Ces deux évolutions amènent à faire reposer le secteur de la construction sur trois piliers principaux intégrant l'ensemble du cycle de vie d'un bâtiment :

- application des principes de la **conception** et de la **construction circulaires** : adaptabilité des ouvrages, choix des matériaux et des assemblages et réduction des déchets
- développement des principes de l'**urban mining** dans lequel les bâtiments constituent une réserve de matériaux : ce concept passe par l'inventorisation, la déconstruction sélective, le 'remanufacturing', le réemploi et le recyclage des éléments et matériaux
- l'élaboration de **modèles d'affaires circulaires** qui maximisent l'efficacité des ressources, délivrent des performances plutôt qu'une propriété ou créent de la valeur à partir des déchets, de manière à maintenir les produits et les matériaux le plus longtemps possible en usage et à en extraire le maximum de valeur.

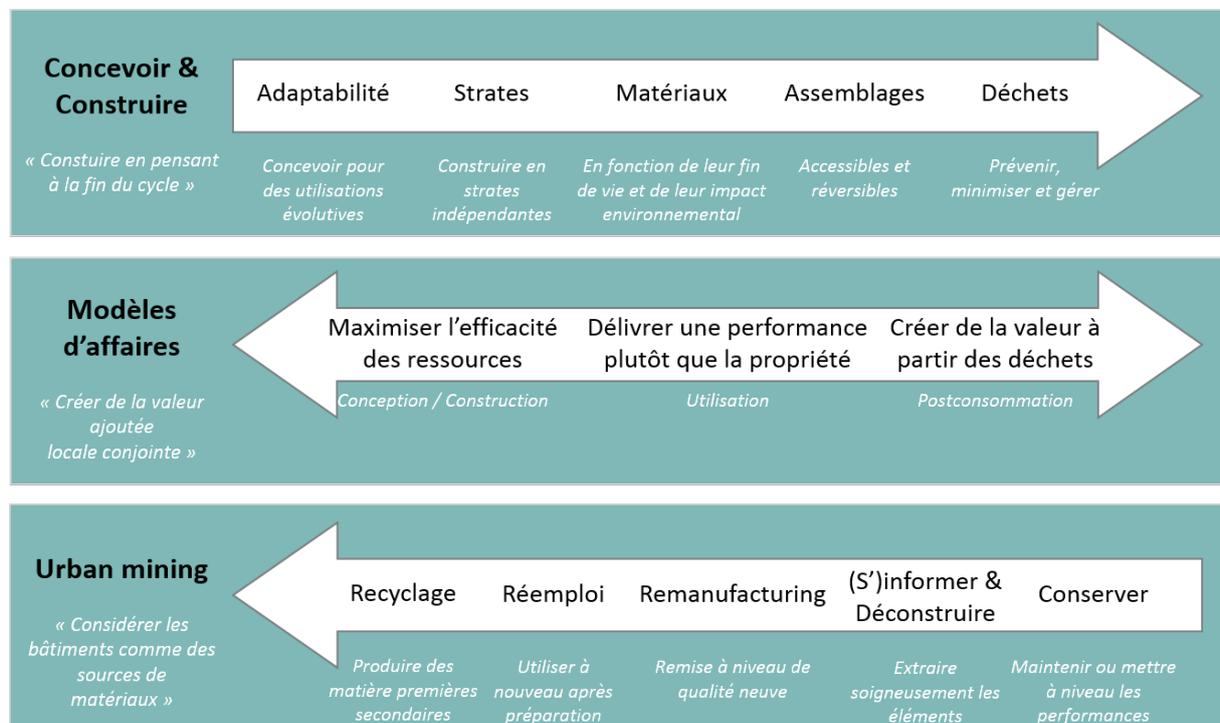


Fig. 66 Les trois principaux piliers de l'économie circulaire dans la construction (source : CSTC).

Dans cet esprit, l'économie circulaire considère les bâtiments non comme des structures permanentes, mais comme des compilations temporaires de matériaux susceptibles d'être valorisés ultérieurement dans d'autres ouvrages selon des modèles d'échange et de collaboration particuliers.



Il est dès lors important de planifier la manière dont un bâtiment peut être désassemblé, afin de prolonger la durée de vie de ses composants. Cette façon de concevoir en vue du désassemblage ou de la déconstruction suppose un certain nombre de préalables, à savoir :

- le choix de matériaux dotés de propriétés telles qu'ils pourront être réutilisés : matériaux de qualité présentant des cycles de vie multiples et un degré de pureté favorisant leur recyclage, produits inoffensifs pour les êtres vivants et pour l'environnement, etc.
- la prise en compte de toute la durée de vie du bâtiment au moment de la conception : possibilité d'adapter ou de remplacer aisément les éléments ayant une plus courte durée de vie sans impacter les autres éléments, flexibilité du bâtiment de manière à faciliter un changement de fonction et une adaptation tout au long de sa durée de vie, etc.
- l'élaboration de systèmes constructifs simples basés sur l'emploi d'éléments modulaires ou préfabriqués permettant une déconstruction aisée
- la mise en œuvre de connexions sèches, réversibles et accessibles qui tolèrent un assemblage et un désassemblage répétés.

La **valorisation des éléments de bâtiment** en fin de vie implique le respect des principes suivants :

- les informations sur la valeur et la qualité des éléments construits doivent être collectées dès la phase de conception (notamment pour les nouvelles constructions) et rester accessibles à tous les partenaires. La propriété des données et la responsabilité de leur mise à jour doivent être clairement établies. Si tel n'est pas le cas, pour les constructions existantes, il convient de recueillir les données avant la démolition
- le bâtiment doit être correctement entretenu afin d'en pérenniser les éléments et de s'assurer de leur valeur (surtout en fin de vie)
- la numérisation des informations et leur insertion dans un passeport de matériaux est essentielle. Ce passeport devra être actualisé chaque fois que le bâtiment fera l'objet de modifications ou de rénovations. Des instructions devront accompagner les éléments de sorte à informer les utilisateurs sur la manière de les (re)mettre à niveau ou de les désassembler
- les éléments de construction vétustes ou usagers devront être, dans l'ordre, réemployés, sur site ou hors site, remanufacturés ou recyclés, de préférence en boucle fermée.

De **nouveaux modèles d'affaires** montrent qu'en adaptant notre concept d'accès à la propriété, il est possible de conserver la valeur des ressources et de les maintenir en circuit. Pour fermer la boucle, d'autres modèles sont toutefois nécessaires. Certains ont déjà fait leur apparition; ils sont basés sur les principes suivants :

- au lieu de simplement mettre des produits sur le marché, les entreprises peuvent fournir des services à l'utilisateur (qui n'est plus un simple consommateur). Cette manière de concevoir les échanges commerciaux modifie l'approche de la propriété et encourage à profiter de l'usage d'un produit plutôt qu'à l'acquérir. Les entreprises doivent dès lors opérer des adaptations pour pouvoir récupérer les produits en fin de vie et les réintroduire dans un autre cycle commercial
- tous les partenaires de la chaîne de valeur doivent bénéficier de la mise en place de nouveaux marchés, qu'il s'agisse d'avantages économiques, sociétaux ou environnementaux
- pour couvrir tous les aspects de la circularité, de tels modèles nécessitent l'instauration de partenariats et de collaborations entre entreprises, d'autant plus si elles appartiennent à



des secteurs professionnels différents. La communication et le partage sont des valeurs essentielles permettant à chaque partenaire de bénéficier de la collaboration.

La transition du secteur de la construction vers un modèle circulaire sera gouvernée tant par des facteurs externes que par la volonté des acteurs d'évoluer et de se différencier. Il reste toutefois de **nombreux enjeux techniques, économiques, sociétaux, légaux et environnementaux** à régler.

Parmi les facteurs externes, les **orientations politiques** ont toute leur importance. Elles incluent tant les initiatives européennes que fédérales ou régionales en faveur du réemploi, du recyclage ou de tout autre aspect touchant à la construction durable. Ces mesures devraient encourager le développement économique de nouvelles chaînes de valeur telles qu'un cadre législatif ou fiscal spécifique.

Les **facteurs économiques** concernent principalement l'attractivité financière des nouveaux modèles d'affaires et la nécessité de garantir le retour sur investissement. Pour rendre le modèle d'économie circulaire opérationnel, il faudrait mettre en place une nouvelle chaîne de valeur intégrant des acteurs qui conçoivent pour le désassemblage, des entreprises qui désassemblent les bâtiments, qui gèrent des lieux de collecte et de stockage des matériaux, créent un marché pour leur réemploi, etc.

Les **facteurs sociaux** couvrent le fort potentiel de création d'emplois locaux (souvent peu qualifiés), mais également les mesures de stimulation socioéconomique des PME et des entreprises à finalité sociale, ou encore la croissance économique des zones rurales.

Quant aux **facteurs techniques et technologiques**, s'ils ne sont pas les plus limitatifs pour le développement de l'économie circulaire, certaines technologies sont encore en pleine évolution et nécessitent des mises au point.

Les **facteurs environnementaux** sont peut-être les plus importants pour la stimulation de l'économie circulaire. Le défi majeur reste toutefois l'absence de prise en compte des coûts environnementaux dans le prix de revient des matériaux et des produits, de sorte que l'optimisation économique de la conception du bâtiment s'en trouve affectée.

Enfin, le **cadre législatif** peut également faire obstacle au développement de l'économie circulaire : le droit de propriété intellectuelle, la responsabilité vis-à-vis du produit, la réglementation sur la garantie des produits (et notamment la réalisation d'essais et la normalisation), les autorisations en matière de traitement et de transport des déchets, les permis d'urbanisme pour les logements flexibles, les règles d'amortissement comptables ou la distribution des revenus de plateformes partagées au niveau national ou international sont autant de barrières à surmonter pour qui veut créer de nouvelles activités en économie circulaire.

Le présent document montre, au travers des différents enjeux évoqués, que la transition du modèle d'économie linéaire vers un modèle circulaire dans la construction requiert encore de la part du secteur une veille attentive et des développements techniques, technologiques, sociétaux et économiques.



Par la description et l'illustration des principes fondateurs de la construction circulaire, il révèle que le concept est déjà à l'œuvre dans notre secteur et qu'il génère maintes opportunités de création de modèles d'affaires et de modes constructifs qui favorisent la transition vers un environnement bâti durable.

Les nombreux exemples cités démontrent que des acteurs visionnaires – concepteurs, entrepreneurs, producteurs – ont déjà capitalisé sur les opportunités offertes par l'économie circulaire, s'attachant à surmonter les obstacles et l'inertie du changement pour se différencier sur le marché et ainsi prospérer dans cette nouvelle économie de la construction.



7. Références bibliographiques

Publications

1. ABM-AMRO, *Circulair bouwen : het fundament onder een vernieuwde sector*.
2. Abood D., Cooper A., Horn E., Fillit, M., Reyes O. & Goode Ja, *Sustainable Energy for All : Opportunities for the Construction Industry*, 2012.
3. Anquetil F. et al., *Matière grise : Matériaux, réemploi, architecture*. Pavillon de l’Arsenal. 2014.
4. ARUP & BAM, *Circular Business Models for the built environment* (sans date), https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/ce100/CE100-CoPro-BE_Business-Models-Interactive.pdf
5. Azcarate-Aguerre J. F., *Façades as a Product-Service System : The potential of new business-to-client relations in the facade industry*, 2014, <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:0aca38e7-81ae-4ca7-9b1f-ffc0f2e33fc?collection=education>
6. Bachus K., Van Dyck L. & Van Eynde S., *Quickscan jobpotentieel van de circulaire economie*. Malines, étude réalisée par KULeuven pour le compte de l’OVAM, 120 p., 2016, <https://www.vlaanderen.be/nl/publicaties/detail/quickscan-jobpotentieel-van-de-circulaire-economie>
7. Baum A.M., McElhinney A., *The causes and effects of depreciation in office buildings : a ten year update*, 1996, <http://www.reading.ac.uk/LM/LM/fulltxt/0700.pdf>
8. BE Circular BE Brussels, *Contribution de Bruxelles Environnement pour une économie circulaire à Bruxelles*.
9. Berthier S., *WikiHouse, La troisième révolution industrielle à l’époque du réel*. Paris, Éditions Association Criticat, Criticat 18, pp. 65-87, automne 2016.
10. Bocken N.M.P., Short S.W., Rana P. & Evans S., *A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes*, *Journal of Cleaner Production*, 65, 42-56, 2014.
11. Brand S., *How buildings Learn. What Happens After They’re Built*. New York, VIKING, 1994.
12. Bruxelles Environnement, *Plan déchets – Plan de prévention et de gestion des déchets*. Bruxelles, 71 p., 2010. http://document.environnement.brussels/opac_css/electfile/Plandechets_2010_FR
13. Bruxelles Environnement, *Étude sur l’analyse du gisement, des flux et des pratiques de prévention et de gestion des déchets de construction et de démolition en Région de Bruxelles-Capitale*. Bruxelles, étude réalisée par le Ceraa asbl et Rotor asbl pour le compte de l’IBGE, version publique, 206 p., 2012, http://www.environnement.brussels/sites/default/files/user_files/stud_2012_gisementdcd.pdf
14. Bruxelles Environnement, *Programme Régional en Économie Circulaire 2016-2020 – Mobiliser les ressources et minimiser les richesses perdues : pour une économie régionale innovante*. Bruxelles, 69 p., 2016. http://document.environnement.brussels/opac_css/electfile/PROG_160308_PREC_DEF_FR
15. C.J. Campbell, The Association for the Study of Peak Oil and Gas, Newsletter n° 41, May 2004, <https://www.peakoil.net/Newsletter/NL41/newsletter41.pdf>
16. Chebli Z., *Demontagevermogen en Demontagebehoefte : De relevantie van demontage voor gebouwen binnen de circulaire economie*, Delft University of Technology, 2016, <http://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:076a71c4-d2ec-4a9d-bbc1-0cdf0dea05e2/datastream/Obj/download>.
17. Cheshire D., *Building Revolutions : Applying the circular economy to the built environment*, RIBA Publishing, 2016.
18. Chertow M. R., *Industrial symbiosis : literature and taxonomy*, *Annual review of energy and the environment*, 25(1), 313-337, 2000.
19. Clinton L., Whisnant R., *Model behavior – 20 Business Model Innovations for Sustainability*, SustainAbility, 2014, <http://sustainability.com/our-work/reports/model-behavior/>



20. Construction, *On a creusé pour vous ... le LEAN ou la systématisation de l'efficacité*. Bruxelles, Construction, octobre 2016, pp. 17-27.
21. Cooper R., Timmer V. et al., *Local governments and the sharing economy*, One Earth, LocalGovSharingEcon, 216 p., 2015, http://www.localgovsharingecon.com/uploads/2/1/3/3/21333498/localgovsharingecon_report_full_oct2015.pdf
22. Debacker W., Galle W., Vandenbroucke M., Wijnants L., Chung Lam W., Paduart A., Herthogs P., De Temmerman N., Trigaux D., De Troyer F. & De Weerd Y., *Veranderingsgericht bouwen : ontwikkeling van een evaluatie- en transitiekader*. Malines (BE), étude réalisée par VITO, VUB et KULeuven pour le compte de l'OVAM, 247 p., 2015, http://www.ovam.be/sites/default/files/atoms/files/TWOL%20Dynamisch%20Bouwen_%20EIN DRAPPORT_finale%20versie_OVAM1_LR.pdf
23. de Ridder H., *LEGOlisering van de bouw*, Maurits Groen, 2011.
24. Devlieger L., *L'architecture à l'envers*. Paris, Éditions Association Criticat, Criticat 18, pp. 91-101, automne 2016.
25. DIRECTIVE, EU Waste Framework, Directive 2008/98 EC of the European Parliament and of the Council of 2008, vol. 19, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32008L0098>
26. EU Commission, *A lead market initiative for Europe*, COM (2007), 860, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/fr/TXT/?uri=CELEX%3A52007DC0860>
27. EU Commission, *Roadmap to a Resource-efficient Europe*, COM (2011), 571, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A52011DC0571>
28. EU Commission, *Resource efficiency opportunities in the building sector*, COM (2014), 445, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2014:0445:FIN>
29. EU Commission, *Towards a Circular Economy : A Zero Waste Programme for Europe*, COM (2014), 398, <http://eur-lex.europa.eu/procedure/EN/1042145>
30. EU Commission, *Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy*, COM (2015), 614, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1453384154337&uri=CELEX:52015DC0614>
31. WWF, *Living Planet Report 2012, Biodiversity, biocapacity and better choices*, WWF International, Gland, Suisse. https://www.footprintnetwork.org/content/images/uploads/LPR_2012.pdf
32. Flamant G., Deroisy B., Delem L. et Decuyper R., *Construire passif et durable : le projet pilote Ecoffice*. Bruxelles, Les Dossiers du CSTC, 2013/04.13.
33. Gaglio G., Lauriol J. & Du Tertre C., *L'économie de la fonctionnalité : une voie nouvelle vers un développement durable ?* Octares Éditions, 2011.
34. Ghysot M., Devlieger L., Billiet L. et Warnier A., *Déconstruction et réemploi - Comment faire circuler les éléments de construction*. Lausanne, Rotor, Presses polytechniques et universitaires romandes (PPUR), 2018. <http://www.ppur.org/produit/872/9782889152391/Deconstruction%20et%20reemploi>
35. Guldager Jensen K. et al., *Building a Circular Future*, Danish Environmental Protection Agency, 2016.
36. Huygen J. M., *La poubelle et l'architecte. Vers le réemploi des matériaux*. Arles (France), Actes Sud, 2008.
37. Johnson M. R. & McCarthy I. P., *Product Recovery Decisions within the Context of Extended Producer Responsibility*, Journal of Engineering and Technology Management 34, 9-2, 2014.
38. Josephson P.-E. & Saukkoriipi L., *Waste in construction projects – call for a new approach*, The Centre for Management of the Built Environment (CMB), Chalmers University of Technology, ISBN 978-91-976181-7-5, 2007, http://www.cmb-chalmers.se/wp-content/uploads/2015/10/waste_construction.pdf
39. Josephson P.-E. & Saukkoriipi L., *Reducing resources waste in construction projects*, CIB W065/055 Commissions : Transformation through Construction, International Council for Research and Innovation in Building and Construction, CIB, sans date, <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB17601.pdf>



40. Langdon D., *Designing out Waste : A design team guide for buildings – Less waste, sharper design*, Prepared for WRAP, 60 p., sans date, <http://www.modular.org/marketing/documents/DesigningoutWaste.pdf>
41. Lee B., Preston F., Kooroshy J., Bailey R. and Lahn G., *Resources Futures, A Chatham House Report*, December 2012, https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/public/Research/Energy,%20Environment%20and%20Development/1212r_resourcesfutures.pdf
42. Le Moigne R., *L'économie circulaire : Comment la mettre en œuvre dans l'entreprise grâce à la reverse supply chain ?* Dunod, 2014.
43. Lemoine T., *BIM : collaborer est le mot d'ordre*. Bruxelles, CSTC-Contact 42, 2014, <http://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact42&art=643>
44. Loppies W., *Bouwen aan de Circulaire Economie : 'Een betere wereld begint bij het stellen van een betere vraag'*, Delft University of Technology, 2015, <http://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:ef74b3d7-2efa-47ad-bc96-f6ff2624d3ae?collection=education>
45. MacArthur E., *Towards the circular economy*, 2013, <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications>
46. MacArthur E., *Towards the circular economy, Economic and business rationale for an accelerated transition*, 2013, <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>
47. MacArthur, McKinsey, SUN, *Growth within : a circular economy vision for a competitive Europe*, 2015, https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/EllenMacArthurFoundation_Growth-Within_July15.pdf
48. McDonough W. & Braungart M., *Cradle to cradle : Remaking the way we make things*, MacMillan, 2010.
49. Mining U., *Urban mining : Concepts, terminology, challenges*, Waste Management, 45, 1-3, 2015.
50. Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), *Policy brief – Improving recycling markets*, janvier 2007.
51. Osterwalder A. et Pigneur Y., *Business Model Generation: A Handbook for Visionaries, Game Changers, and Challengers*. Hoboken (NJ), John Wiley & Sons, 2010.
52. OVAM, *Dynamisch of veranderingsgericht bouwen*, Afval en Materialen, 2016.
53. Paduart A., De Temmerman N., Trigaux D., De Troyer F., Debacker W. & Danschutter S., *Casestudy ontwerp van gebouwen in functie van aanpasbaarheid : Mahatma Gandhiwijk Mechelen*, étude réalisée par la VUB, la KULeuven, le VITO et le CSTC pour le compte de l'OVAM, 102 p., 2013, http://www.ovam.be/sites/default/files/FILE1375792665548ovor130806GANDHI_Eindrapport_OPLEVERING.pdf
54. Plastics Today, *Track plastics packaging with tracer-loaded masterbatch*, 06/03/11.
55. Price Waterhouse Cooper, *The sharing economy*, In Consumer Intelligence Series, avril 2015. <http://www.pwc.com/us/en/industry/entertainment-media/publications/consumer-intelligence-series/sharing-economy.html>
56. Réylum, GTM Bâtiment, Nantet et Arès Associations, *DEMOCLES – Les clés de la démolition durable*, Rapport d'étude, 126 p., 2016, <http://www.presse.ademe.fr/2016/09/etude-democles-recyclage-des-dechets-du-second-oeuvre-du-batiment.html>; <http://www.reylum.com/democles/democles.html>
57. Romnée A. et Vrijders J., *L'économie circulaire : bien plus que du recyclage !* Bruxelles, Les Dossiers du CSTC, 2017/02.02.
58. Russel P. & Moffatt S., *Assessing the Adaptability of Buildings*, Energy-Related Environmental Impact of Buildings, 31, 2001.



59. SPF Finance, SPF Santé Publique, *Vers une Belgique pionnière de l'économie circulaire*, 2014.
60. Stone D., *Cook County Demolition Debris Diversion Ordinance*, Chicago Metropolitan Agency for Planning, Energy & Natural Resources Committee, Offices of the CMAP, 4 mars 2015.
61. Temmerman L., *Le choix des techniques constructives et des matériaux dans une réflexion environnementale*, Formation Bâtiment Durable : Gestion de chantier plus durable, Bruxelles Environnement, 2015,
http://www.environnement.brussels/sites/default/files/user_files/pres_20150303_chan_1_4tech_fr.pdf
62. Tsolis N., *Enhancing circularity in the building industry*, 2017,
<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:a60a3b58-dfc4-4e64-92b9-27a368136dcf?collection=education>
63. van Renswoude K., ten Wolde A. & Joustra D.-J., *Circular Business Models – Part 1 : An introduction to IMSA's circular business model scan*. Amsterdam, IMSA, 18 p., avril 2015.
https://groenomstilling.erhvervsstyrelsen.dk/sites/default/files/media/imsa_circular_business_models_-_april_2015_-_part_1.pdf
64. World Economic Forum, *Shaping the Future of Construction – A Breakthrough*, Mindset and Technology, 64 p., 2016,
http://www3.weforum.org/docs/WEF_Shaping_the_Future_of_Construction_full_report_.pdf
65. Woskow D., *Unlocking the sharing economy : An independent review*, 43 p., 2014,
https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/378291/bis-14-1227-unlocking-the-sharing-economy-an-independent-review.pdf
66. Zakar S., *Wastage Rate Report*, Prepared for Construction Resources and Waste Platform, Approved by BRE, 40 p., 2008,
<http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/Wastageratesreport.pdf>

Web

67. AGORIA online, *Vers une économie circulaire : le potentiel inexploité du remanufacturing*, Agoria Corporate News, 05/10/2016, <https://www.agoria.be/fr/Vers-une-economie-circulaire-le-potentiel-inexploite-du-remanufacturing>, consulté le 07/10/2016.
68. Albarede A., *Alléger la ville : des stratégies de lieux partagés*, Internetactu.net, 2013,
<http://www.internetactu.net/2013/10/11/alleger-la-ville-des-strategies-de-lieux-partages/>, consulté le 09/11/2016.
69. Arup, http://www.arup.com/news/2015_05_may/11_may_3d_makeover_for_hyper-efficient_metalwork
70. Botsman R., *Defining The Sharing Economy : What is collaborative consumption – and what isn't ?* FastCoExist, 2015, <https://www.fastcoexist.com/3046119/defining-the-sharing-economy-what-is-collaborative-consumption-and-what-isnt/5>, consulté le 03/11/2016.
71. Circular Economy practitioner guide, *Strategies and examples*, <http://ceguide.org/Strategies-and-examples>, consulté le 22/01/2018.
72. Circular Flanders, *BMIX – The business model innovation grid*, <http://www.vlaanderen-circulair.be/bmix/#at09>, consulté le 22/01/2018.
73. Circulator, *The circular business models mixer*, <http://www.circulator.eu/> Consulté le 22/01/2018.
74. Démoclès, <http://www.recylum.com/democles/accueil.html>
75. De Wijk van Morgen, *Modulair gebouwd, toch gesloopt*, Clustervorming, 2016,
http://www.dewijkvanmorgen.be/eigen-keuze/1/de-wijk-van-morgen?utm_source=mailing&utm_medium=email&utm_campaign=BA+04%2F10%2F2016#message=967, consulté le 05/10/2016.
76. De Wijk van Morgen, *Onderzoek naar businessmodellen voor circulaire gevel*, Clustervorming, 2016,
http://www.dewijkvanmorgen.be/eigen-keuze/1/de-wijk-van-morgen?utm_source=mailing&utm_medium=email&utm_campaign=BA+04%2F10%2F2016#message=964, consulté le 05/10/2016.



77. Économie Circulaire.org., 2016, <http://www.economiecirculaire.org/>, consulté le 12/10/2016.
78. Ellen Mc Arthur Foundation, *A vision for the built environment*, Educational Resources : Circular Economy general resources map, <https://kumu.io/ellenmacarthurfoundation/educational-resources#circular-economy-general-resources-map/a-vision-for-the-built-environment>, consulté le 23/09/2016.
79. Ellen Mc Arthur Foundation, *The circular design guide*, <https://www.circulardesignguide.com/>, consulté le 22/01/2018.
80. EU Commission, 2018 Circular Economy Package, http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm
81. Implementation Centre for Circular Economy (ICCE), 2016, <http://becircular.eu/>, consulté le 23/09/2016.
82. Institut de l'Économie circulaire, 2016, <http://www.institut-economie-circulaire.fr/>, consulté le 23/09/2016.
83. MINEA., *Mining the European anthroposphere*, 2016, <http://www.minea-network.eu/event.php?id=1>, consulté le 12/12/2016.
84. Onghena S., *Casa poubelle*, 2016, <http://www.casapoubelle.be/default.asp?l=fr&group=home> , consulté le 07/10/2016.
85. Portakabin, <http://www.portakabin.be/>
86. Projet de recherche BBSM, *Le Bâti bruxellois : source de nouveaux matériaux*, <https://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=projects&proj=96>
87. Service public fédéral Santé publique, Sécurité de la Chaîne alimentaire et Environnement, *Base de données pour déclarations environnementales de produits (EPD)*, 2016, <http://www.health.belgium.be/fr/base-de-donnees-pour-declarations-environnementales-de-produits-epd>, consulté le 11/01/2018.
88. Skilpod, <http://skilpod.com/>
89. Symbiose, <http://www.smartsymbiose.be/>
90. The Guardian, *Three ways we will build the cities of the future from waste*, 2016, <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2015/jun/19/three-ways-we-will-build-the-cities-of-the-future-from-waste>, consulté le 12/12/2016
91. TSI, <http://www.tsi.com/plastics-analyzer/>
92. Turntoo, *Onze visie*, 2018, <http://turntoo.com/>, consulté le 11/01/2018.
93. Willem P., *Modularité et flexibilité du bâtiment, Quand et comment les intégrer dans le bâtiment ?* Formation bâtiment durable : Chantiers en économie circulaire, automne 2017, Bruxelles Environnement, <https://environnement.brussels/sites/default/files/pres-171128-circ-2-2-modul-fr.pdf>
94. World Economic Forum, *Can the circular economy transform the world's number one consumer of raw materials ?*, 2016, <https://www.weforum.org/agenda/2016/05/can-the-circular-economy-transform-the-world-s-number-one-consumer-of-raw-materials/>, consulté le 18/01/2018.
95. Youtube, *Smart-Price Houses - „Grundbau und Siedler"*, Jörg Leiser, Affordable Housing BeL, 2013, <https://www.youtube.com/watch?v=R-W-3nvftVA>, consulté le 15/11/2016.
96. ZenRobotics, fournisseur de technologies du tri robotisé des déchets, www.zenrobotics.com

Exemples présentés dans le document

97. Alliander HQ, <http://www.rau.eu/portfolio/liander/>
98. Architectenweb, http://www.architectenweb.nl/aweb/redactie/redactie_detail.asp?iNID=39654
99. Architectuur Maken, <http://architectuurmaken.nl/english/>, Stonecycling, <http://www.stonecycling.com/projects-2/2016/8/25/building-from-waste-house-in-rotterdam> et The Guardian, https://www.theguardian.com/sustainable-business/2016/may/21/rotterdam-couple-house-made-from-waste-stonecycling-bricks-netherlands?CMP=tw_t_gu
100. Armstrong, <https://www.armstrongceilings.com/commercial/fr-be/performance/sustainable-building-design.html>



101. Art & Build Architect, Van Volxem, <http://www.artbuild.eu/projects/environment/van-volxem-development-mixed-use-project>
102. Arteam Architects, <http://a-plus.be/projects/duurzaam-kantoor-stationsstraat/#.W0hVaNIzaUk>
103. Atelier d'architecture Alain Richard, Bâtiment scolaire à Braine l'Alleud, http://www.aar.be/projet.asp?projet_id=45
104. Atelier d'architecture Alain Richard, Maison des Associations à Esneux, http://www.aar.be/projet.asp?projet_id=20
105. Atelier d'architecture Alain Richard, Pépinière d'entreprises, http://www.aar.be/projet.asp?projet_id=23
106. BedZed, http://www.bioregional.com/wp-content/uploads/2014/11/BedZED_toolkit_part_1.pdf
107. BeL, http://www.bel.cx/cx_Projekte/072_cx_IBA/072_GuS_BeL.pdf
108. Bioregional, <http://www.bioregional.com/bedzed/> et http://www.bioregional.com/wp-content/uploads/2014/11/BedZED_toolkit_part_1.pdf
109. Bouwwereld, *Stadhuis Brummen wint duurzaamheidsaward*, 2013, <https://www.bouwwereld.nl/nieuws/stadhuis-brummen-wint-duurzaamheidsaward/>, consulté le 12/07/2018.
110. Bureau d'engineering et d'architecture industrielle, Tour à plomb, <http://beai.be/portfolio/tour-plombs/>
111. Cable Stud, <http://www.gyproc.nl/gipsplaten/benodigdheden/profielen/cable-stud-systeem>
112. Chap-Yt, <http://chapyt.be/index.php/fr/home-3/>
113. Ciment de haut fourneau, <https://www.lafarge.fr/fabrication-du-ciment>
114. ClickBrick®, Daas Baksteen, <http://www.daasbaksteen.nl/>
115. Corium, <https://wienerberger.co.uk/about-us/what-is-corium>
116. Creative Commons, <https://creativecommons.org/>
117. CSTC, <http://www.bimportal.be/fr/>
118. CSTC, Recyhouse, <https://www.cstc.be/homepage/download.cfm?lang=fr&dtype=publ&doc=Recyhouse%20FR.pdf>
119. Derbigum, <https://derbigum.be/fr/recyclage/>
120. Desso, <http://www.desso.fr/c2c-corporate-responsibility/bilan-cradle-to-cradle/>
121. Ditto, https://www.facebook.com/permalink.php?story_fbid=611753072336673&id=379719548873361
122. Dusseldorp, https://dusseldorp.nu/media/CO2_Prestatieladder/Ketenanalyse_Sloop.pdf
123. Économie sociale et chantier, <http://www.levanto.be/>
124. EEN TIL EEN, The Biological House, <http://eentileen.dk/forside>
125. F87 (Efficiency House Plus), <http://www.wernersobek.de/en/projects/material/glass/f87/>
126. Harvestmap Glasgow, <https://urbanrestart.wordpress.com/2014/12/07/harvest-map-glasgow-commons/comment-page-1/>
127. Harvestmap Rotterdam, <http://www.oogstkaart.nl/>
128. Harvestmap Utrecht, <http://www.365dagenkunst.nl/2012/4855/>
129. JustPark, <https://www.justpark.com/about/> et http://www.turas-cities.org/uploads/biblio/document/file/294/WP6_MS36_Product_Service_System_List_of_inspiring_examples.pdf (rechercher Parkatmyhouse)
130. Knauf – phosphogypse, <http://www.omicron-media.be/fr/nouvelles/paint-stuc-covering-news/item/911-knauf-une-production-locale-et-durable>
131. LuxReview, Nus, <http://luxreview.com/article/2013/12/nus-pioneers-pay-as-you-go-light-scheme>
132. LuxReview, Schiphol, <http://luxreview.com/article/2015/04/pay-as-you-go-lighting-arrives-at-amsterdam-s-schiphol-airport>
133. Magasin comme PSS, <http://www.mipvlaanderen.be/file.aspx?mode=download&id=1824>
134. Magasin Moor & Moor, <https://www.facebook.com/moormoorfood/>
135. McDonough + Partners, ICEhouse, <http://www.mcdonoughpartners.com/projects/icehouse/>



136. McDonough + Partners, Technical Nutrient Pavilion, <http://mcdonoughpartners.com/projects/technical-nutrient-pavilion/>
137. Métisse, <http://www.isolantmetisse.com/>
138. Netherlands Circular Hotspot, <https://www.netherlandscircularchotspot.nl/home.html>
139. Newlife Paints, <http://www.newlifepaints.com/>
140. NOORD4US, <http://buiksloterham.nl/project/1302/noord4us>
141. One Stop Shop, www.one-stop-shop.org
142. One Stop Shop, <http://www.one-stop-shop.org/sites/default/files/Guidelines-How-to-develop-a-business-model.pdf>
143. OpenStructures, <http://www.openstructures.net/>
144. OVAM, http://www.ovam.be/sites/default/files/atoms/files/TWOL%20Dynamisch%20Bouwen_%20EIN%20DRAPPORT_finale%20versie_OVAM1_LR.pdf
145. Pay per Lux, <http://www.lighting.philips.be/fr/systemes/circular-lighting.html>
146. PEIKKO, <http://www.peikko.com/products/product/tenloc-panel-connector/>
147. PlatoWood, <http://www.platowood.nl/>
148. Préfabrication, http://www.environnement.brussels/sites/default/files/user_files/pres_20150303_chan_1_4tech_fr.pdf
149. RAU, <http://www.rau.eu/portfolio/gemeentehuis-brummen/>
150. Reborn Paints (Paint it Back), <http://www.rebornpaints.co.uk/>
151. SEED Architects, <http://seedarchitects.nl/nl/projects/icon-martini-ziekenhuis/>
152. Seps Matériaux, <http://seps.be/seps-fr/album-seps-click-brick.php>
153. SILOX, www.silox.com
154. Smart Price House, http://www.bel.cx/cx_Projektseiten/projects.html
155. StoneCycling, <http://www.stonecycling.com/>
156. Superuse Studios, Villa Welpeloo, <http://superuse-studios.com/index.php/2009/10/villa-welpeloo/>
157. Sy-Bo, <http://www.sy-bo.be/pijlars>
158. Tarkett, <http://www.tarkett.com/en/content/planet>
159. Tivoli Green City, <http://www.bamcontractors.be/fr/projects/laken-tivoli/>
160. Tivoli Green City, <http://www.tivoligreencity.be/>
161. TU Delft, Façades comme PSS, <https://www.tudelft.nl/bk/studeren/studentenwerk/building-technology/juan-f-azcarate-aguerre/>
162. WikiHouse, <https://www.wikihouse.cc/> et <https://www.youtube.com/watch?v=Mlt6kaNjoel>



Editeur responsable : Jan Venstermans
CSTC, Rue du Lombard 42
1000 Bruxelles

Recherche • Développe • Informe

Principalement financé par les redevances de quelque 85.000 entreprises belges représentant la quasi-majorité des métiers de la construction, le CSTC incarne depuis plus de 55 ans le centre de référence en matière scientifique et technique, contribuant directement à l'amélioration de la qualité et de la productivité.

Recherche et innovation

L'introduction de techniques innovantes est vitale pour la survie d'une industrie. Orientées par les professionnels de la construction, entrepreneurs ou experts siégeant au sein des Comités techniques, les activités de recherche sont menées en parfaite symbiose avec les besoins quotidiens du secteur.

Avec l'aide de diverses instances officielles, le CSTC soutient l'innovation au sein des entreprises, en les conseillant dans des domaines en adéquation avec les enjeux actuels.

Développement, normalisation, certification et agréation

A la demande des acteurs publics ou privés, le CSTC réalise divers développements sous contrat. Collaborant activement aux travaux des instituts de normalisation, tant sur le plan national (NBN) qu'europpéen (CEN) ou international (ISO), ainsi qu'à ceux d'instances telles que l'Union belge pour l'agrément technique dans la construction (UBAtc), le Centre est idéalement placé pour identifier les besoins futurs des divers corps de métier et les y préparer au mieux.

Diffusion du savoir et soutien aux entreprises

Pour mettre le fruit de ses travaux au service de toutes les entreprises du secteur, le CSTC utilise largement l'outil électronique. Son site Internet adapté à la diversité des besoins des professionnels contient les ouvrages publiés par le Centre ainsi que plus de 1.000 normes relatives au secteur.

La formation et l'assistance technique personnalisée contribuent au devoir d'information. Aux côtés de quelque 650 sessions de cours et conférences thématiques impliquant les ingénieurs du CSTC, plus de 18.000 avis sont émis chaque année par la division Avis techniques.

SIÈGE SOCIAL

Rue du Lombard 42, B-1000 Bruxelles
Tél. 02/502 66 90
Fax 02/502 81 80
E-mail : info@bbri.be
Site Internet : www.cstc.be

BUREAUX

Lozenberg 7, B-1932 Sint-Stevens-Woluwe
Tél. 02/716 42 11
Fax 02/725 32 12

- Avis techniques – Publications
- Gestion – Qualité – Techniques de l'information
- Développement – Valorisation
- Agréments techniques – Normalisation

STATION EXPÉRIMENTALE

Avenue Pierre Holoffe 21, B-1342 Limelette
Tél. 02/655 77 11
Fax 02/653 07 29

- Recherche et innovation
- Formation
- Bibliothèque

CENTRE DE DÉMONSTRATION ET D'INFORMATION

Marktplein 7 bus 1, B-3550 Heusden-Zolder
Tél. 011/79 95 11
Fax 02/725 32 12

- Centre de compétence TIC pour les professionnels de la construction (ViBo)
- Centre d'information et de documentation numérique pour le secteur de la construction et du béton (Betonica)

BRUSSELS MEETING CENTRE

Boulevard Poincaré 79, B-1060 Bruxelles
Tél. 02/529 81 29

BRUSSELS GREENBIZZ

Rue Dieudonné Lefèvre 17, B-1020 Bruxelles
Tél. 02/233 81 10