

Étude de cas

La construction modulaire volumétrique et l'économie circulaire : Le cas d'étude GoKit

Équipe solution #5 – Étudier
l'impact de la construction
modulaire



Date : Juin 2023

UQÀM | École de design

BON
ARCHITECTURE



Bureau de promotion
des produits du bois
du Québec (OWEB)



Le lab construction est un projet du Centre d'études et de recherches intersectorielles en économie circulaire de l'ÉTS (CERIEC).

La construction modulaire volumétrique et l'économie circulaire :

Le cas d'étude GoKit

Juin 2023

Équipe de recherche :

Carlo Carbone - architecte, professeur, chercheur principal, École de design, UQÀM

Raquel Fernandez - B.A. auxiliaire de recherche, École de design, UQAM

Bruno Verge - senior MOAQ, P. A. LEED BD + C concepteur Passive House certifié, Boon Architecture

Mario Maltais ING. - chargé de projet/Bâtiment -Structure CIMA+

Sébastien Trudel, ING. - ingénieure Bâtiment-Structure

Julien Jean-Charland ING.- PA LEED BD C associé/directeur national de l'expertise, Bâtiment-Mécanique CIMA+

Gabriel Faggion - M. Arch. /Technologue Arch. /Stagiaire en architecture, Boon Architecture

Cette recherche a été financée par le laboratoire d'accélération en économie circulaire du Centre d'études et de recherches intersectorielles en économie circulaire de l'École de technologie supérieure (ÉTS) – le laboratoire est soutenu par Desjardins et le gouvernement du Québec

Le lab est un projet du Centre d'études et de recherches intersectorielles en économie circulaire de l'ÉTS (CERIEC).



UQÀM | École de design

Gokit

BOON
ARCHITECTURE



Bureau de promotion
des produits du bois
du Québec (BPPB)

CIMA+

Partenaires financiers du lab construction:

Québec

Desjardins

Table des matières

0	Mise en contexte de la recherche	5
1	Revue de littérature	7
2	L'économie circulaire et GoKit	17
3	Défis et enjeux légaux et contractuelles	38
4	Conclusion	43
5	Annexes	49
6	Références	59

0 Mise en contexte de la recherche

Ce projet de recherche vise à étudier et préciser les potentiels d'application des principes de l'économie circulaire au projet GoKit, un système constructif modulaire volumétrique pour la réalisation d'édifices de logements collectifs. Ce système est développé dans le cadre d'un projet de recherche, de création et développement qui fédère des partenaires privés, académiques, et publics sous la direction du QWEB (Québec Wood Export Bureau) et du CNRC (Conseil National de recherche du Canada). L'objectif principal est de concevoir un système ouvert permettant à différents manufacturiers présents dans le domaine de déployer la même plateforme afin d'accroître leur productivité. La démarche de conception a été encadrée par des principes d'efficacité manufacturière notamment, le «DFMA» (Design for Manufacture and Assembly) pour les appliquer à la fabrication modulaire spécifiquement pour le logement collectif.

Les notions d'optimisation de la fabrication en usine et la facilité d'assemblage au chantier ont été centrales dans le développement du produit GoKit. Le «Design for Assembly» est un des principes fondateurs de la production de masse et un des piliers de l'efficacité potentielle de la construction hors site. Aujourd'hui, cette notion est complétée par les principes du «Design for Disassembly» (la conception pour faciliter le désassemblage) afin de voir les systèmes comme des banques de ressources, matières et composantes qui pourraient être démontées et redéployées dans d'autres contextes d'utilisation. C'est ce point de vue de la circularité

potentielle, par opposition au circuit linéaire, qui circonscrit la présente recherche selon la question suivante : quel est le potentiel du système de construction GoKit dans une perspective d'économie circulaire articulée au redéploiement du système ou de ses composantes dans d'autres contextes ou pour réduire le gaspillage lié aux nécessaires modifications du système dans le temps ?

Appliquer, la notion d'économie circulaire aux édifices n'est pas encore très répandue et implique des considérations qui renvoient aux fondements mêmes de l'architecture et de la construction. Un édifice est habituellement construit pour durer dans le temps. Un édifice de logement collectif est conçu avec un cycle de vie de 50 à 100 ans et les espaces qui sont habituellement appelés à subir des rénovations et modifications (cuisines et salles de bains) ont un cycle d'environ 20-25 ans. Cette durabilité intrinsèque aux immeubles implique qu'à la fin de vie utile des infrastructures, une deuxième vie est souvent contingente à de nouvelles contraintes sociales, normatives, fonctionnelles, et technologiques. Conséquemment, l'ensemble des systèmes sont rarement pertinents pour une nouvelle époque. Nonobstant ce constat et biais de départ lié aux édifices, nous avons étudié les principes d'économie circulaire dans le contexte de la construction modulaire volumétrique pour évaluer les possibilités de faciliter les rénovations, les modifications et même la réutilisation dans une perspective de concevoir des structures adaptables aux changements.

1 Revue de littérature

La littérature concernant l'économie circulaire appliquée aux édifices est relativement nouvelle et majoritairement théorique. La publication de l'American Institute of Architects : *Buildings That Last Design for Adaptability, Deconstruction and Reuse* (AIA 2020), le Travail de Liliane Wong (Wong 2016) sur la notion « d'Adaptive Reuse » et le livre récent *Reuse in Construction, A compendium of Circular Architecture* (Stricker 2020) offrent un regard actuel sur la théorisation des concepts de circularité appliqués aux édifices et propose des approches d'application par des cas concrets. La littérature est encore plus modeste en matière de lien entre l'économie circulaire et la construction modulaire volumétrique. La présente recherche appliquée pourra permettre à la fois de prévoir des principes de circularité pour le projet GoKit, mais également d'élargir le bassin d'articles critiques sur le thème de la circularité dans le secteur de la construction.

La publication de l'American Institute of Architects, *Buildings That Last Design for Adaptability, Deconstruction and Reuse* (AIA 2020) utilise trois concepts, adaptabilité, déconstruction et réutilisation pour définir les trois échelles d'interventions les plus associées à la transformation d'édifices pour mitiger le gaspillage trop souvent engendré par les rénovations. Riche en information et critères de conception, la publication fait référence à quelques items bibliographiques qui traitent de l'adaptabilité en architecture : à l'aide des cinq références, le document offre surtout une vision articulée à la flexibilité des aménagements et à la construction sèche pour améliorer la résilience des bâtiments.

En plus de cette recherche de la AIA qui définit un cadre très pratique à l'adaptabilité, la présente recherche avait l'ambition de cumuler une littérature qui aborde l'économie circulaire dans la construction spécifique à la construction modulaire volumétrique.

L'objectif n'était pas de faire une revue systématique de la littérature, mais de compiler et étudier les articles les plus récents, depuis les dix dernières années, pour guider notre recherche. Nous avons identifié une soixantaine d'articles au total. (Revue de littérature) Les mots clés utilisés au départ ciblaient « circular economy in modular volumetric construction ». La recherche d'articles s'est élargie aux termes suivants : « adaptability in modular volumetric construction », et « design for adaptability in modular volumetric construction », afin d'ouvrir sur des questions d'adaptabilité.

Les articles identifiés ont été classés en trois thèmes : soit, 21 articles sur l'adaptabilité, 21 articles portant sur les principes d'économie circulaire et 23 sur « design for adaptability ». En architecture, les notions d'adaptabilité et de circularité sont parfois utilisées d'une manière interchangeable. À partir de cette revue préliminaire, il a été possible de clarifier les similarités et différences entre ces concepts, mais ce n'était pas l'objectif de cette recherche. Le fichier Excel (Revue de littérature) compile les divers articles ainsi que les différents mots clés utilisés.

La revue nous a permis d'identifier trois articles sur lesquels nous avons structuré trois ateliers de cocréation avec les différents intervenants du projet. Ces ateliers sont décrits et résumés dans le présent rapport et devaient permettre de suggérer des pistes de modifications pour améliorer le système de construction du point de vue de la circularité.

Dans l'article *Adaptability and Modularity in Housing : Case Study of Raines Court and Next21* (Ismail, Rahim s.d 2021), Ismail et Rahim proposent une lecture du lien entre le thème d'adaptabilité et de la modularité. Quoique pas nouveau, ce lien reste fondamental aux principes d'adaptabilité, de Design for Assembly et Design for Disassembly. La modularité dans cet article n'est pas spécifiquement liée à la construction avec des volumes, mais plutôt sur la modularisation en tant que principe de coordination dimensionnelle et systémique des composantes et sous-assemblages d'un bâtiment.

L'article présente le potentiel d'inventivité et de transformation qu'a l'industrialisation pour le secteur de la construction. L'article décrit la construction modulaire comme approche qui facilite les adaptations dans le temps. Les auteurs réexaminent un archétype de la construction adaptable, le projet NEXT21 construit en 1994 (voir figure 1) qui déploie les principes du « Open Building » cherchant à développer des systèmes ouverts intégrés d'une capacité d'évolution. Le pilier théorique de l'approche est la séparation des systèmes communs (plus fixes) des systèmes individuels (plus flexibles).

Un bâtiment, prototype et exemplaire du mouvement « Open Building », les systèmes de Next 21 mettent en application la notion de stratification de couches d'information selon le type de modification possible dans le temps. Cette séparation en couches permet la convertibilité des installations sans affecter certains systèmes plus globaux. En respectant une série de règles matérielles, modulaires et de dimensionnement, chacun des locataires des logements peut modifier, aménager et rénover son logement à sa guise sans affecter les autres logements voisins adjacents, ou superposés. Un plancher technique, une sorte de « méga-gaine », distribue les systèmes mécaniques sans croiser les unités. Conçu dans une perspective de design for assembly et disassembly le bâtiment a été rénové en redéployant 90 % des matériaux pour servir des nouveaux aménagements. La conception du « layering » (Brand 1994) ou la séparation en couches d'information harmonisées, mais indépendantes élimine l'embrouillement habituellement associé à la rénovation des bâtiments. Cette séparation des systèmes est un principe fondamental qui a encadré le travail de cocréation.

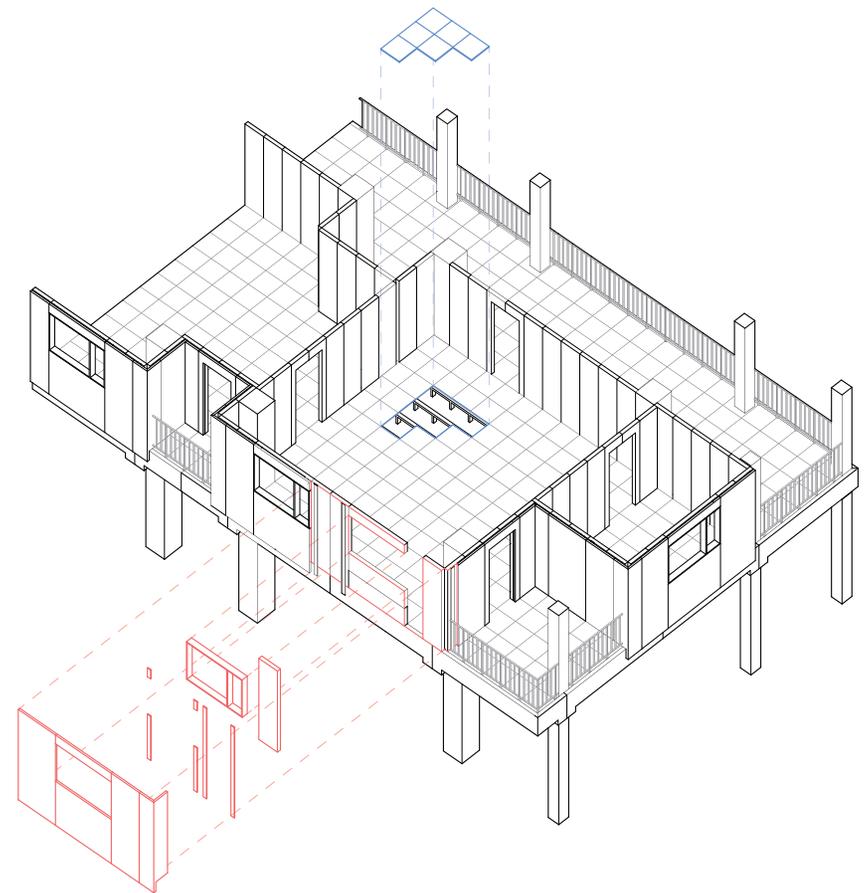


Figure 1 Next 21 un prototype des principes du Open Building, Adaptability and Modularity in Housing: Case Study of Raines Court and Next21 (Ismail, Rahim s.d 2021)

Next 21

Architecte : Yositika Utida, Shu-Koh-Sha Architectural and Urban Design Studio

Planification du système : Kazuo Yatsumi and Mitsuo Takada

Stratégie principale d'adaptabilité : Système de coordination modulaire de l'infrastructure et du remplissage individualisé

Mandataire : Compagnie de gaz Osaka, Japon

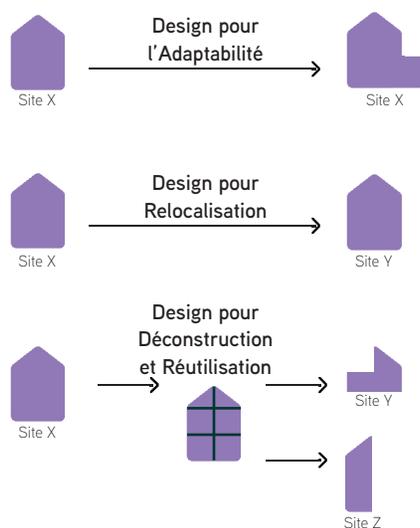


Figure 2 Adapté de *Modular building in a circular economy : Exploratory Research* (Potemans 2017)

L'article *Modular Building in a Circular Economy : Exploratory research*, est une recherche doctorale d'Astrid Potemans (Potemans 2017) de l'Université de Delft aux Pays-Bas qui décrit la grande consommation et le gaspillage des ressources du secteur de la construction. L'auteur argumente pour l'évolution vers des stratégies plus efficaces par le biais d'un parc immobilier circulaire. Elle postule que la construction modulaire volumétrique offre une voie pour générer un parc immobilier circulaire, en étudiant des critères de conception pour augmenter l'utilité future des systèmes et des constituantes. Ce sont les principes sous-jacents de la construction modulaire, la multiconfiguration et le design for assembly et disassembly qui permettent l'ajustement, la relocalisation du bâtiment ainsi que la déconstruction et la réutilisation des composants. Les notions

de « Design for Relocation » (le design pour la relocalisation des modules) et le « Design for Deconstruction and Reuse » (le design pour le démontage et la réutilisation) sont deux sujets porteurs et qui ont été analysés plus précisément pour le projet GoKit. Le Design for Adaptability est un troisième principe particulièrement pertinent pour GoKit dans une perspective qu'un édifice modulaire volumétrique puisse être transformé plusieurs fois durant sa durée de vie. Les trois concepts (voir figure 2) ont servi de structure pour les ateliers de co-création et d'analyse pour le système GoKit.

Publié en 2021, *Digitally enabled modular construction for promoting modular reuse: a UK view* (Lacovidou, Purnell, Tsavdaridis et Poologanathan, 2021), présente le défi de la séparation entre design, fabrication et construction des projets ; le manque de collaboration dans les projets. Même avec le support et l'investissement majeurs du gouvernement britannique pour la construction modulaire, la relation design et construction reste parfois conflictuelle. L'article argumente que la construction modulaire présente une opportunité d'intégrer les pratiques de construction en amont et en aval, de design, de fabrication et de construction afin de parvenir à la durabilité par des processus d'efficacité et d'efficience liés à la modularité systémique. Le postulat de l'article est que la combinaison de construction modulaire avec la numérisation intelligente en amont des systèmes pourrait accroître la durabilité et éliminer le gaspillage à toutes les étapes de la réalisation d'édifice. Selon Lacovidou, Purnell, Tsavdaridis et Poologanathan, une plateforme de construction modulaire intelligente numérique peut rendre opérationnels la collecte et le stockage des informations relatives au cycle de

vie des composants. En plus d'aider le secteur à se doter des capacités nécessaires pour éliminer les inefficacités, la plateforme soutiendrait la maintenance, la récupération et la réutilisation des composants modulaires. Cet article est particulièrement pertinent pour notre recherche puisqu'il puise dans les initiatives au Royaume-Uni pour mieux saisir les enjeux et potentiels des plateformes de conception des constructions modulaire à intégrer une adaptabilité systémique. En plus des articles mentionnés, nous avons ouvert la recherche et les discussions sur l'adaptabilité puisqu'en matière d'édifices, les notions d'adaptabilité et économie circulaire sont liées. Il existe une abondance de littérature sur la notion d'adaptabilité en architecture. Les travaux de Habraken, Till, Brand, Kendall, Teichser et Leupen restent les plus fondamentaux. Dans notre revue, c'est l'article *Adaptability and Modularity in Housing : Case Study of Raines Court and Next21* (Ismail, Rahim s.d 2021) qui est le plus près des principes qui combine à la fois

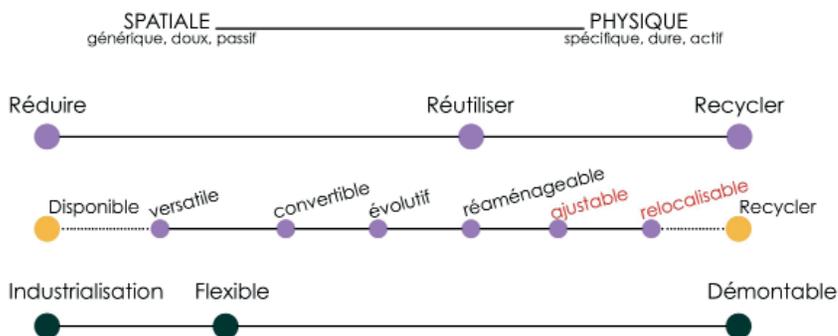


Figure 3 Adapté de *Digitally Enabled Modular Construction for Promoting Modular Components Reuse: A UK View* (Lacovidou, Purnell, Tsavdaridis et Poolaganathan, 2021)

l'adaptabilité et l'économie circulaire dans une perspective de notre projet GoKit. Le cadre d'analyse proposé dans l'article a été adapté pour cadrer la suite de la recherche. Pour structurer la suite de la recherche, en plus des trois articles résumés ci-haut, nous nous sommes appuyés sur les critères d'adaptabilité dans les édifices proposés suivant la recherche *Buildings That Last Design for Adaptability, Deconstruction and Reuse*. (AIA 2020) Sans être exhaustive, cette liste de critères nous a permis de constater des points intrinsèquement adressés par la construction modulaire volumétrique et des défis à traiter.

Principes de conception (relocaliser, réutiliser, adapter) :

- Portées libres (déjà appliqué dans GoKit)
- Hauteurs des planchers et des plafonds réguliers généraux (déjà appliqué dans GoKit)
- Planchers plats (minimiser les changements de niveau) (déjà appliqué dans GoKit)
- Cloisons non porteuses (charpente squelettique) (déjà appliqué dans GoKit)
- Modularité et trames constantes (déjà appliqué dans GoKit)
- Systèmes simples et répétitifs (déjà appliqué dans GoKit)
- Les finis conçus comme des éléments temporaires (défi)
- Séparation des sous-systèmes (layering) (défi)
- Jonctions exposées (défi)
- Fixations mécaniques (défi)
- Documents de construction et de déconstruction clairs (plateforme numérique - déjà appliquée dans GoKit)

2 L'économie circulaire et GoKit



Figure 4 Prototype de GoKit utilisé comme objet d'analyse (BOON architecture)

Le système GoKit est une stratégie de construction volumétrique, c'est-à-dire de construire des édifices de logements par la juxtaposition et l'empilement fixe de volumes produits en usine. Le système de construction du volume de base, où l'unité de base est un assemblage de composantes en acier (utilisés pour former un squelette, les arrêtes du prisme) et bois (utilisés pour le remplissage et former les surfaces, planchers, plafonds et murales). La dimension modulaire de 12' x 40' constitue le tracé régulateur de base pour composer des agrégations (d'autres dimensions sont également disponibles, mais les composantes et méthodes d'attaches sont les mêmes). Le volume ou module de base peut être aménagé selon les multiples arrangements puisque les arrêtes forment une charpente qui rend l'intérieur libre d'obstacles porteurs. L'enveloppe, l'isolant et l'étanchéité de l'ensemble sont réalisés aux chantiers là où il est plus facile d'assurer la qualité totale de l'étanchéisation.

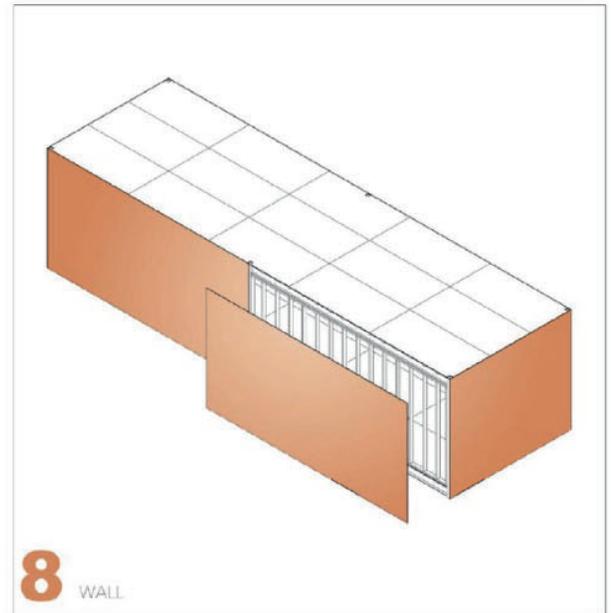
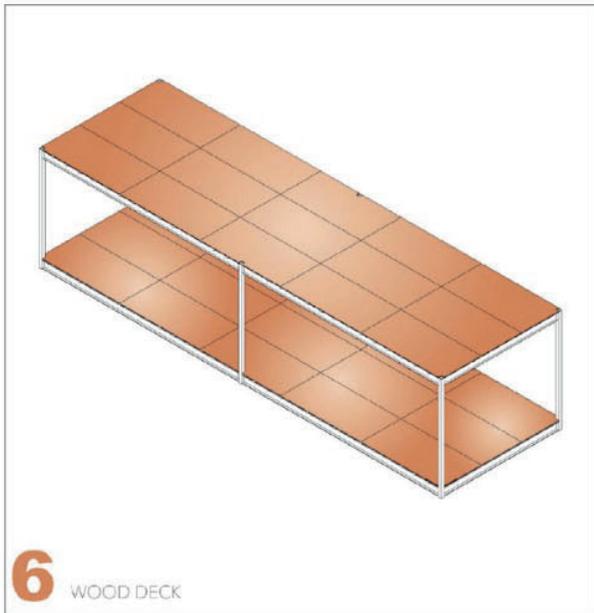


Figure 5 Prototype de GoKit utilisé comme objet d'analyse (BOON architecture)

À partir de la revue de littérature, nous avons identifié trois sujets porteurs qui ont servi de cadre structurant pour trois ateliers de cocréation avec les différents intervenants du projet. Ces ateliers de 90-120 minutes ont permis d'extraire les potentiels et les enjeux qui pourraient s'inscrire dans la suite du développement de GoKit. Des détails, des principes, ou des manières de faire qui bonifieraient la conception.

Les trois axes de la recherche visent :

- 1. La relocalisation des modules volumétriques avec l'identification de dispositifs nécessaires pour faciliter le démantèlement, le déplacement et la recomposition dans d'autres contextes.**
- 2. Le recyclage des composantes - nous visons à déterminer les critères d'assemblages qui permettraient de récupérer les différents matériaux et composantes pour soit reconstruire/restaurer les modules ou simplement avoir une banque de ressources/matériaux/composantes à la fin de vie des modules.**
- 3. Le réaménagement potentiel des modules dans le temps. Puisque ce thème concerne tous les systèmes du bâtiment, nous nous sommes concentrés sur les relations entre les différents systèmes et une série de recommandations sur leur assemblage afin de faciliter le réaménagement.**

2.1 Trois Axes d'adaptabilité de GoKit (trois ateliers de travail)

Axe 1 : Conception pour la relocalisation des modules (module et enveloppe)

Définition : Intégration des critères et méthodes de démontage dans la conception d'un produit, objet ou édifice pour faciliter son déplacement et son assemblage subséquent dans d'autres contextes avec un minimum de perte ou de gaspillage.

Date de l'atelier : 18/01/2023

Participants :

Carlo Carbone – UQAM

Bruno Verge – BOON architecture

Mario Maltais - CIMA+

Raquel Fernandez – UQAM

Julien Jean-Charland - CIMA+

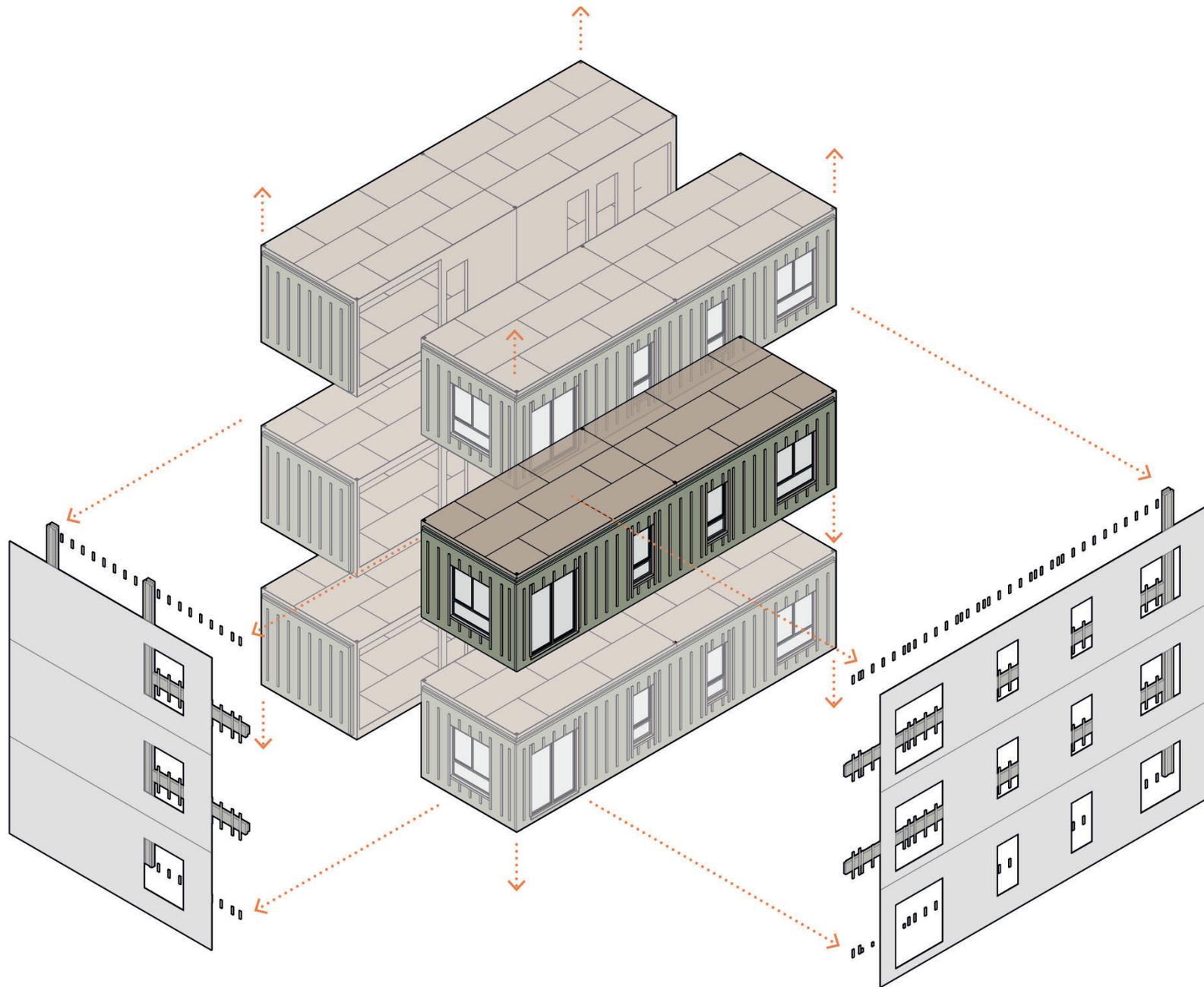


Figure 6 Déconstruction au niveau du Module (source: BOON architecture)

Résumé des points saillants (voir annexe pour résumé complet):

- Le prototype présentement en étude et en fabrication par l'équipe du projet est proposé comme sujet d'étude.
- Identification de l'ensemble des composantes du GoKit et de leurs méthodes de fixation.
- Simulation de la déconstruction d'un projet GoKit et des dispositions nécessaires pour la relocalisation des modules.
- Pour faciliter la déconstruction, les jonctions doivent se faire en priorité vissée et non clouée ou collée. (enjeu pour le contreventement présentement cloué)
- **Le démantèlement de l'enveloppe, de l'isolation, se fait relativement facilement (murs et toits), il est possible de l'extérieur d'arriver à un module tel qu'il serait lors de sa fabrication.**
- La juxtaposition des modules avec la continuité de l'étanchéité et du contreventement implique la conception d'un détail de chevauchement qui permettrait le désassemblage des volumes.
- Le gypse comme parement intérieur est un choix problématique, puisqu'il rend le démontage des volumes plus difficile. Ce matériau entraîne une destruction et du gaspillage.
- Proposition de définir des types de revêtements et types d'attaches spécifiques pour GoKit qui pourraient faciliter le démantèlement.
- Les modules doivent s'enlever par étage entier pour la relocalisation.

- Les considérations contextuelles, de normes et de règlements, doivent être les mêmes pour les différents sites et époques de relocalisation.
- Le démantèlement des modules doit se faire avec une grue, ce qui implique une gestion de chantier complexe. L'évolution du contexte d'implantation à proximité du projet peut empêcher l'installation optimale de la grue. De plus pour un démantèlement facile, toutes les largeurs des modules doivent être égales, ce qui implique une grande standardisation dans la conception des projets.
- La relocalisation des modules dans d'autres contextes implique un nouveau cadre de calcul structural (charges de neige, vents, sismiques, etc.), et une approbation d'ingénieur en structure spécifique à ce nouveau contexte.
- Prévoir un connecteur spécifique (mâle) à la fondation et pour le levage.
- Les systèmes mécaniques sont traités d'une manière conventionnelle. Il serait possible de prévoir des connexions/valves pour la plomberie et la ventilation. Par contre, pour l'électricité c'est plus difficile, dû à des contraintes réglementaires.
- **La position des connecteurs, cachée dans les parois, empêche le démantèlement non destructif de certaines parties des modules.**

Recommandations:

- › Bien définir la notion de durée de vie pour chaque édifice, 5, 10, 15, 25, 50 ans ce qui a une portée importante sur la capacité de relocaliser les modules.
- › Produire un document illustré qui encadre la relocalisation des modules volumétriques selon les enjeux d'inspection normative (contextuel), démontage, de levage, de transport et d'entreposage.
- › Concevoir des accès aux connecteurs sans destruction des finis intérieurs.
- › Concevoir des détails d'enveloppes qui minimisent les interventions sur les modules.
- › Modulariser les systèmes mécaniques.
- › **Définir les critères d'inspection et de suivi durant la vie de l'immeuble pour assurer un maintien de qualité des systèmes et composantes.**

Axe 2 : Conception pour réutilisation (module et enveloppe)

Définition : La réutilisation est ici définie comme la réutilisation d'un produit, une composante ou un matériau extrait d'un projet à sa fin de vie pour être réemployé dans un usage similaire ou dans un autre contexte.

Date de l'atelier : 01/02/2023

Participants :

Carlo Carbone – UQAM

Bruno Verge – BOON architecture

Mario Maltais - CIMA+

Raquel Fernandez – UQAM

Gabriel Faggion - BOON architecture

TYPE DE FIXATION

- Collée
- Plâtrée
- Collée et Vissée
- Vissée
- Clouée
- Serrée
- Déposée
- Boulonnée

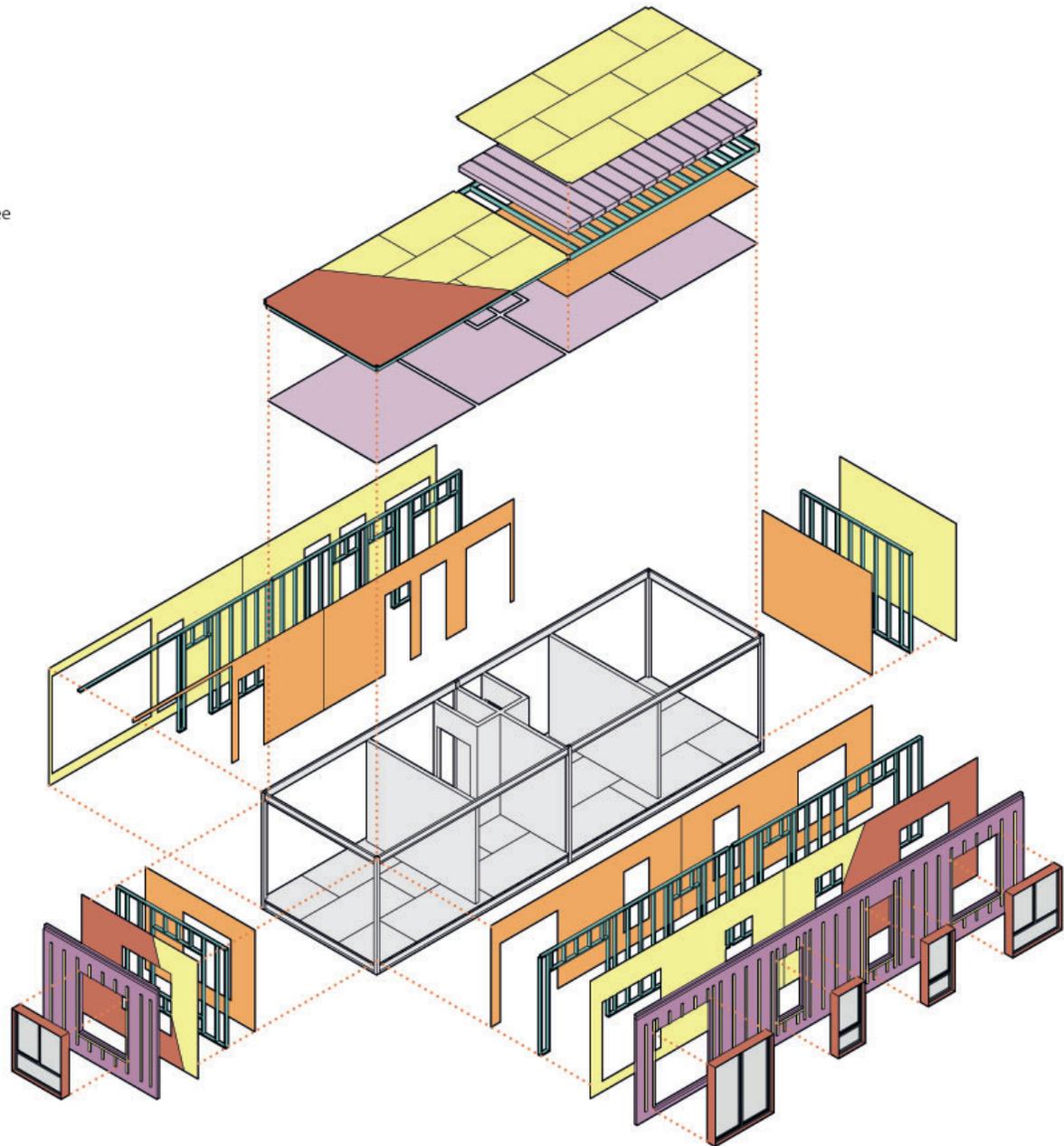


Figure 7 Déconstruction au niveau des composantes (source: BOON architecture)

Résumé des points saillants (voir annexe pour résumé complet):

- Cet atelier est structuré par les constats de l'atelier 1 qui ont fait valoir la possibilité de démanteler l'enveloppe et d'aboutir à un module de base. Ce deuxième atelier tente de décrire les différents enjeux et potentiels du démantèlement complet des modules.
- La modularisation est employée comme stratégie de conception principale. Il est possible de démanteler l'ensemble des systèmes de l'enveloppe externe, relativement facilement pour revenir aux composantes de départ.
- **Le démantèlement des finis intérieurs, murs, planchers et plafonds implique une déconstruction conventionnelle avec la difficulté de récupérer les différentes composantes. (il serait toutefois possible de recycler au lieu de réutiliser)**
- Les contraintes d'acoustiques et de coupe-feu impliquent une continuité des finis qui se fait d'une manière semblable à la construction conventionnelle.
- Les soudures utilisées pour former la structure de base des modules impliquent de couper les composantes. Il est théoriquement possible de retrouver certaines des composantes de base, mais qui requièrent une transformation pour être réutilisées.
- Il est possible de démonter tous les systèmes de mobilier intégré (cuisines, salles de bain) qui sont déjà conçus avec une approche modulaire.

- Les contraintes réglementaires seraient à considérer pour la réutilisation des systèmes mécaniques, de plomberie et d'électricité même s'il est possible de déconstruire ces systèmes. Il serait possible d'imaginer la modularisation de la mécanique pour faciliter la déconstruction.
- Les produits d'étanchéité, membranes, colles et scellant rendent le démantèlement de certaines composantes impossible.
- Certains détails, exemple le clouage des 2x4 aux Fer C principaux de la structure, conçus pour faciliter la construction ou même la fabrication en usine empêche le désassemblage simple à la fin de vie des dispositifs.
- La séquence de déconstruction devra tenir compte de la solidarité structurelle de la construction volumétrique.
- **Dans la construction des modules, le contreventement vissé au lieu de cloué faciliterait la déconstruction.**

Recommandations :

- › Bien définir la notion de durée de vie pour chaque édifice, 5, 10, 15, 25, 50 ans qui aura un impact important sur la capacité de réutilisation des composantes.
- › Document illustré qui encadre le désassemblage complet des édifices.
- › Concevoir des détails de finition, de jonction, de contreventement qui minimisent les interventions de démolition et qui proposent plutôt une construction sèche. (assemblage mécanique dans une majorité des cas)
- › Explorer davantage la modularisation des systèmes mécaniques.

Axe 3: Conception pour adaptabilité (intérieur du module)

Définition : La conception pour l'adaptabilité est principalement une stratégie utilisée pour éviter l'obsolescence des bâtiments et les impacts environnementaux associés à la consommation de ressources et au gaspillage de matériaux. L'adaptabilité renvoie à la facilité d'aménagement des rénovations simples aux changements d'usage plus complexes. Pour GoKit cette adaptabilité est abordée par la flexibilité des réaménagements intérieurs, les modifications possibles dans le temps (remplacement de systèmes), et la convertibilité vers d'autres usages.

Date de l'atelier : 15/02/2023

Participants :

Carlo Carbone – UQAM

Bruno Verge – BOON architecture

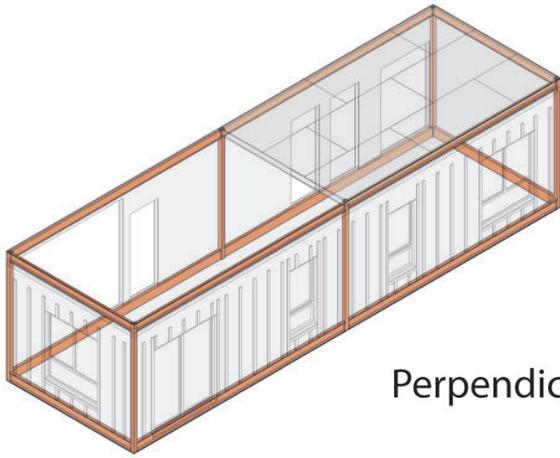
Mario Maltais - CIMA+

Raquel Fernandez – UQAM

Gabriel Faggion - BOON architecture

Julien Jean-Charles - CIMA+

Sébastien Trudel - CIMA+



Perpendicular access to the corridor

Parallel access to the corridor

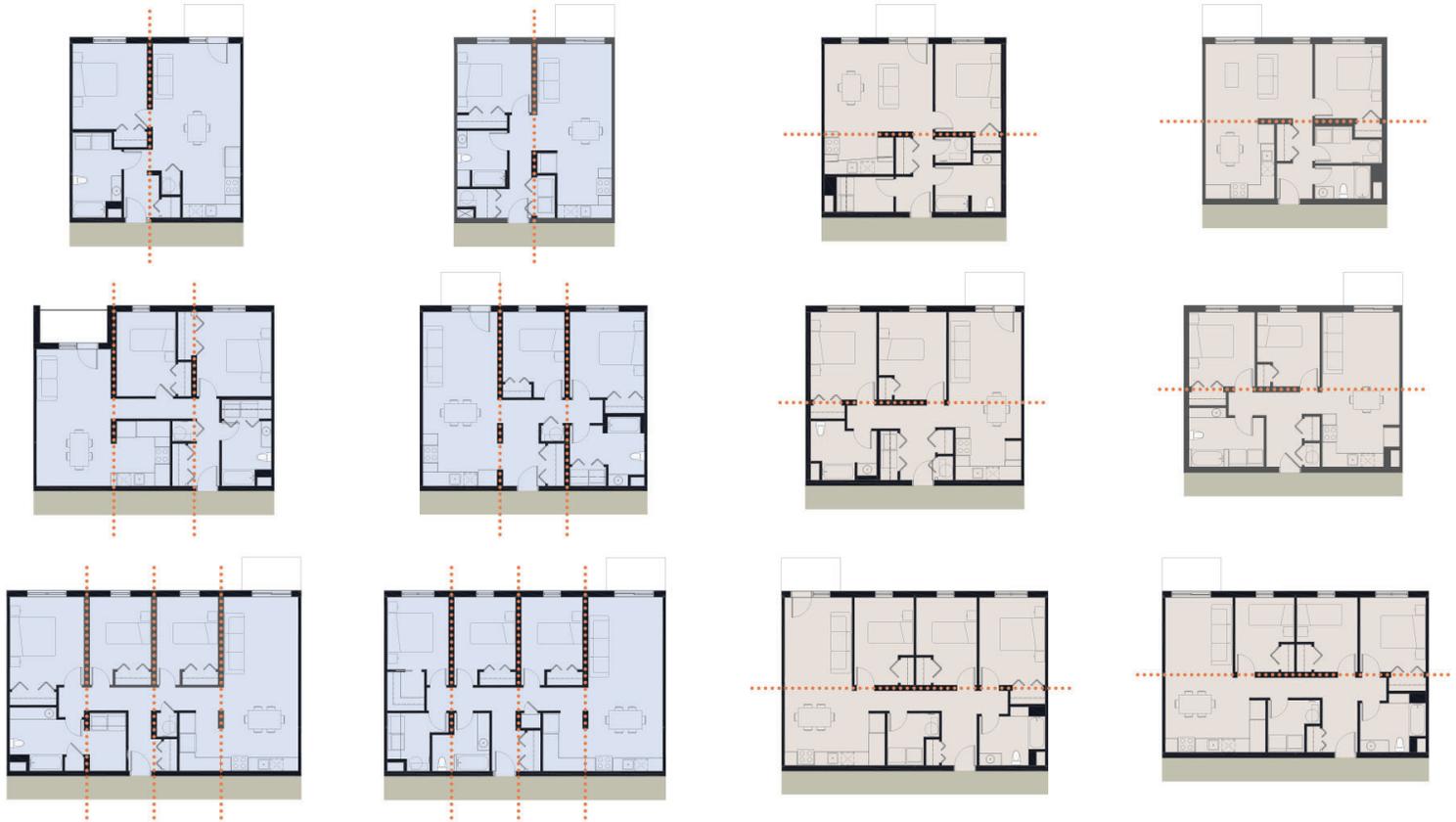


Figure 8 Adaptabilité du système (source: BOON architecture)

Résumé des points saillants (voir annexe pour résumé complet) :

- Les différents principes de conception utilisés sont analysés en rapport avec la liste des critères de *Buildings That Last Design for Adaptability, Deconstruction and Reuse*. (AIA 2020)
- **Le contreventement continu entre les volumes et dans les systèmes planchers/plafonds empêche les modifications des modules dans le temps sans affecter la structure. C'est le point majeur qui limite l'adaptabilité.**
- L'adaptabilité des aménagements intérieurs encadrés par le périmètre et les arêtes des modules est claire et facile à envisager, mais les transformations ne sont ni plus ni moins faciles qu'en rénovation habituelle. La convertibilité des logements est fortement limitée par les murs de contreventements des façades.
- **Les modules sont flexibles, mais ne sont pas adaptables, il y a une nuance importante entre flexibilité et adaptabilité. Les principes du Open Building – la séparation des systèmes communs (supports) et les systèmes individuels (infill) ne sont pas appliqués.**
- Même si la fabrication est faite en usine, les systèmes de finis, de fixation, d'assemblage sont ceux de la construction conventionnelle, très peu d'effort de conception est mis sur le désassemblage des différents systèmes pour faciliter les réaménagements. Ce défi est fortement lié au coût d'investissement majeur qui serait requis pour un retour mitigé quand on considère la durée de vie longue des immeubles de logements.

- Une approche squelettique avec des systèmes répétitifs indépendants est prônée pour l'élaboration des modules GoKit. Ce principe facilite les changements et le remplacement de composants dans le temps.
- Il serait possible de modulariser la mécanique pour faciliter les réaménagements, mais ce n'est pas une stratégie envisagée présentement.

Recommandations:

- › **Concevoir une séparation systémique plus claire entre la structure, l'aménagement intérieur et la mécanique. Exemple: éliminer la fonction contreventement des parois des modules pour faciliter l'intervention sur chaque paroi horizontalement et verticalement.**
- › Modulariser tous les systèmes mécaniques et de finition intérieure.
- › Appliquer les principes du Open Building.

3 Défi et enjeux légaux et contractuelles

Dans le cas de GoKit, les simulations design for relocation et design for reuse ont fait la démonstration du redéploiement théorique des systèmes constructifs d'un immeuble. En pratique, le propriétaire d'un édifice modulaire volumétrique qui veut proposer la réutilisation des éléments/composantes/sous-assemblages à leur fin de vie utile devient le vendeur ou donateur de composantes ou volumes. Le contrat d'achat et de réutilisation des éléments doit tenir compte des enjeux de :

- › Les contrats utilisés présentement dans l'industrie ne prévoient pas les clauses nécessaires à la conception, l'achat, ou même la réutilisation de composantes ; ces clauses doivent être définies pour les différentes échelles de réutilisation.
- › Des clauses liées aux garanties et la responsabilité civile liée à la réutilisation des composantes.
- › Un descriptif précis de séquence de désassemblage ; de transport ; de manutention ; d'entreposage et de protection doit être convenu entre les manufacturiers et les entrepreneurs généraux qui assurent le redéploiement des parties d'édifices.
- › Une manière d'encadrer l'inspection des produits avant démontage et après démontage.
- › La distribution des rôles et responsabilités des concepteurs, manufacturiers, entrepreneurs spécialisés, généraux.
- › Démontage des composantes et modules de la manière la plus claire et précise possible

- › Des clauses liées à la vérification normative des éléments récupérés pour un usage dans un contexte similaire ou différent
- › Des clauses liées au bris durant le démontage des modules volumétriques.
- › Les clauses liées à la gestion de chantier accrue pour assurer des conditions idéales pour le démontage des composantes.

Cette liste non exhaustive et non hiérarchique offre un point de vue sur les contraintes contractuelles d'une approche circulaire. Comme la planification d'un projet modulaire volumétrique implique une collaboration plus grande entre les différents intervenants, la conception d'un processus circulaire demande que la durée de vie d'un immeuble soit gérée d'une manière plus holistique. Les contrats présents dans l'industrie ne reflètent pas adéquatement cette volonté de circularité et sont à construire pour chaque cas. Le travail des auteurs Stricker, Brandi et AIA, ainsi que notre série de recommandations à la suite de l'étude des différentes échelles de réutilisation potentielle pour GoKit constitue un point de départ pour encadrer ces enjeux. La figure 9 tiré de *Reuse in Construction, A compendium of Circular Architecture* (Stricker 2020) démontre une série d'étapes, enjeux, intervenants, et dispositions à considérer pour l'ensemble du processus de réalisation des projets.

Construction organization: Services and processes

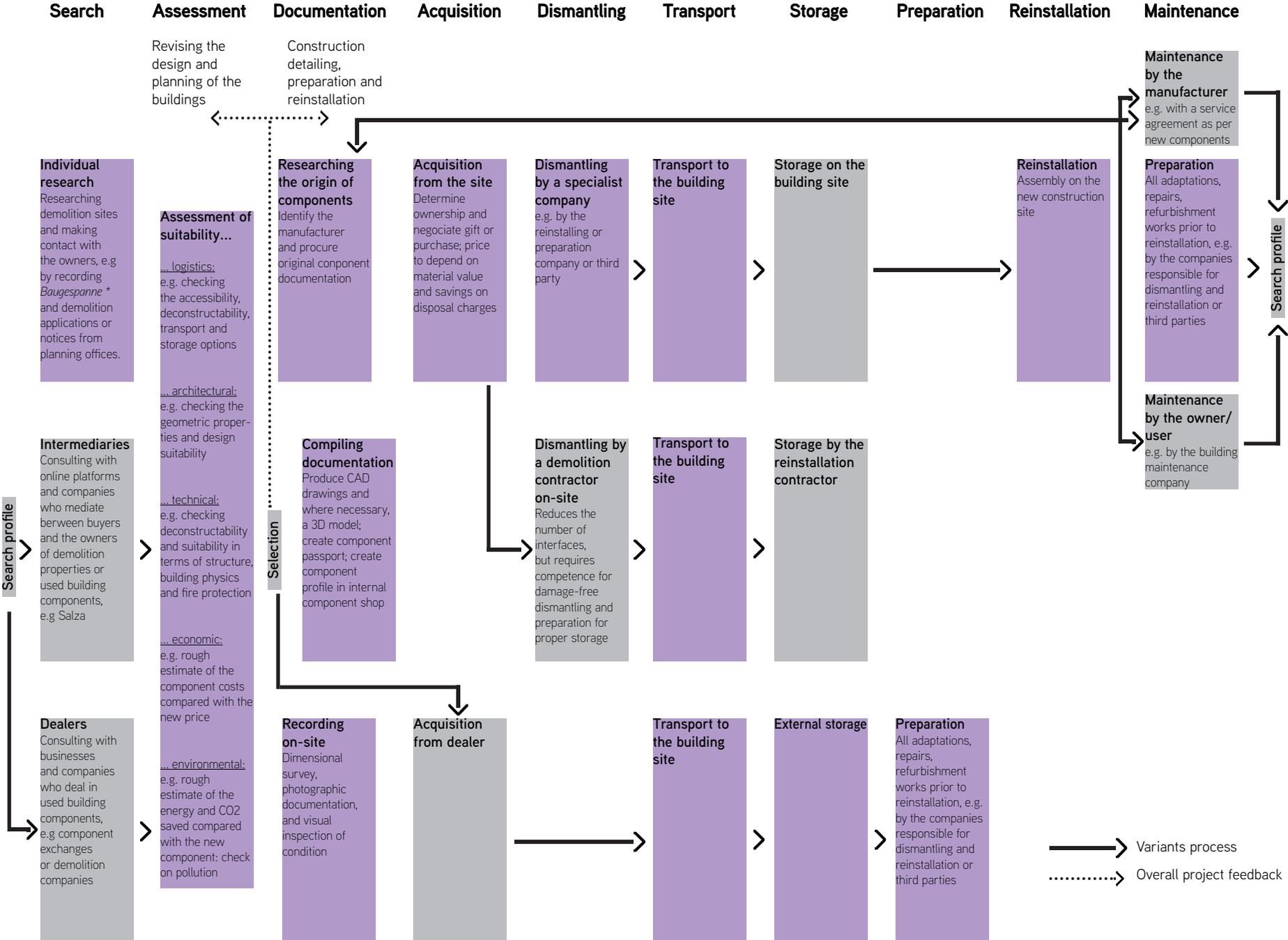


Figure 9 Adapté de Reuse in Construction: A Compendium of Circular Architecture (Stricker 2020)

4 Conclusion

Le concept de la circularité vise à atteindre des principes plus écologiques de planification et de production de systèmes ou de produits. C'est une théorie basée sur le *Cradle to Cradle* développée par William McDonough et Michael Braungart. La différence entre le domaine de la fabrication d'objets ou produits et l'applicabilité des mêmes concepts en architecture est peu théorisée. La durée de vie longue des immeubles, parfois plus de 50-70 ans, est un premier point de divergence. Les matériaux, composantes, méthodes d'attaches et systèmes sont conçus dans un contexte (social et temporel) radicalement différent de celui qui agira à leur fin de vie. Ces divergences culturelles, normatives, réglementaires, rendent complexe la notion de circularité complète de l'œuvre. La qualité pérenne des assemblages pour rendre les enveloppes étanches, à l'eau, à l'air et à la vapeur d'eau par l'utilisation de colles, scellant, membranes, fait en sorte que le désassemblage et le remplacement des certaines composantes sont plus complexes que dans la manufacture discrète de produits. Cette durée de vie longue doit être considérée pour minimiser le gaspillage lié à la rénovation et l'adaptation.

Une des limites constatées durant la recherche est la cohabitation de deux archétypes de construction dans la production des bâtiments. La construction sèche (sans intervention de liant liquide) facile à déconstruire et la construction humide (intervention de liant à l'état liquide), difficile à déconstruire. L'intégration de plâtres, panneaux de gypse, peinture, crépis, coupe-feu pour aboutir à des intérieurs

lisse sans attaches apparentes à l'intérieur limite la rénovation sans démolition et l'adaptabilité des systèmes. Un autre facteur de difficulté est la distribution des systèmes électriques, de plomberie dont la continuité et la réduction des jonctions sont régies par des aspects normatifs. Ces particularités ont des impacts sur le très long terme et sur le potentiel de modification sans démolition destructive. Cette recherche mène au constat d'une nécessaire théorisation des différences entre édifices et produits pour mieux saisir les opportunités et les enjeux de l'économie circulaire appliquée à l'architecture.

En particulier pour la construction modulaire volumétrique, l'objet précis de ce rapport, les trois ateliers Design for Relocation, Design for Re-use, et Design for Adaptability ont permis de confirmer certains principes inhérents à la modularité, facilité d'assemblage, interopérabilité de certains systèmes, séparation systémique, à la base d'une malléabilité qui peuvent réduire les impacts des modifications, transformations dans le temps. Concernant le réaménagement intérieur et récupération des composantes à leur fin de vie, le système GoKit demanderait les mêmes travaux destructeurs que pour la construction conventionnelle. Le contreventement par les surfaces des modules dont la continuité structurale est fondamentale réduit l'adaptabilité future des modules. Nonobstant ces difficultés, nous avons constaté une possibilité de relocalisation relativement facile des modules complets et c'est le principal avantage de la modularisation en rapport avec la circularité.

Pour atteindre une plus grande circularité, une transformation de culture plus fondamentale serait requise. Concevoir des composantes murales, de mobilier intégré, de finition qui serait récupérée au courant de rénovations et de réhabilitation est plutôt difficile considérant la nature « sans fixations visibles et apparentes » qui caractérisent et sont souvent souhaitables dans nos immeubles.

La construction modulaire volumétrique et la composition de l'ensemble des éléments et de leur modélisation numérique en amont permettent de faciliter le travail d'inventaire et de classement primordial à leur récupération ou de réutilisation à la fin de vie des édifices. En plus de la nécessaire numérisation précise de l'ensemble des systèmes et composantes, les trois ateliers ont mené aux constats principaux suivants :

La conception pour la relocalisation

La conception pour la relocalisation intègre des principes de composition ou de décomposition par lesquels les boîtes de base de GoKit, comme fabriqué, peuvent être déployées dans plusieurs contextes et avoir plusieurs cycles de vie dans la mesure que les cadres réglementaires de différents contextes le permettent.

La démolition des finis nécessaire au déclenchement du connecteur pour permettre la déconstruction est relativement minime par rapport à la démolition complète qui serait nécessaire pour un bâtiment conventionnel.

La conception pour la réutilisation

La conception pour la réutilisation a fait valoir l'enveloppe du système GoKit en tant que série de couches démontables relativement facilement ce qui offre des possibilités dans le temps pour mitiger les difficultés inhérentes à des remplacements d'enveloppe, d'isolant, ou de revêtement. Contrairement à l'enveloppe extérieure - les revêtements intermédiaires recouvrant le module qui agissent comme contreventement ainsi que les revêtements intérieurs de finition, traités d'une manière semblable à toute construction conventionnelle, empêchent leur démontage et ces matériaux feraient plutôt l'objet d'une démolition. Il serait toutefois possible de les intégrer dans un processus de valorisation des matières, mais avec une transformation importante.

La conception pour l'adaptabilité

La conception qui facilite l'adaptation dans le temps relative à la construction modulaire volumétrique est trop souvent associée à une vision assez simpliste de portées libres. Cet atelier a permis de noter les difficultés inhérentes aux changements d'usage dans le temps surtout quant à la distribution mécanique, électrique, qui impose les changements réglementaires et d'organisation les plus importants dans l'espace et dans le temps. Certains systèmes intégrés, cuisines et salles de bain, sont déjà traités comme des composantes modulaires et peuvent facilement être démontés pour être remplacés sans affecter les structures totales. Ces principes peuvent être amplifiés

vers des finis et même une modularisation des systèmes qui retournent aux principes de « Supports and Infill » prônés par Habraken dans son manifeste *Supports – An Alternative to Mass Housing*. (Habraken,1962)

La construction modulaire volumétrique et le projet GoKit incarnent certains principes de base liés à la circularité qui diminueraient les pertes et le gaspillage occasionnés par les modifications dans le temps. Toutefois, les ancrages non accessibles pour la relocalisation, l'utilisation de revêtements intermédiaires comme contreventement, et les finitions murales restent les entraves les plus importantes à la mise en place d'une démarche Design for Disassembly. Ces éléments devraient faire l'objet d'une conception plus précise et de choix matériels plus justes pour atteindre les ambitions d'appliquer le *Cradle to Cradle* aux édifices GoKit.

5 Annexes (notes des ateliers)

ATELIER 1 : Design for relocation

La proposition du prototype GoKit comme sujet d'étude est acceptée, même si ce n'est pas un produit fini.

1. Composantes et méthodes de fixation :

Étapes de déconstruction (non considéré pour le moment non considéré pour relocalisation)

- a. Revêtements mis en place avec fixation mécanique. (vis et clous)
- b. Lattes (fixation mécanique)
- c. Couper membrane (collé)
- d. Isolation module (jonctions à enlever) fixé sur les lattes installées .
- e. Jonction de gypse (pas idéal pour la déconstruction)
- f. Jonctions mécaniques (plomberie, ventilation, électricité installation conventionnelle)
 - Drainage facile joint mécanique à défaire.
 - Approvisionnement traditionnel.
 - Ventilation relativement simple dont aucun dispositif n'est mis en place pour faciliter le désassemblage, jonction conventionnelle.
 - Complexe pour l'électricité, le fil électrique continu de la source à la charge. Il faudra prévoir la longueur nécessaire de fil électrique et le conserver à l'intérieur du module. Le démantèlement sera long et ardu.
- g. Jonctions et finis intérieurs (gypse, murs, plafonds suspendus)
 - Entraînent une certaine destruction, le module revient à son état initial à la sortie de l'usine.
- h. Toiture « sandwich », fabriquée en usine
 - Membrane TPO
 - Panneau de support
 - Isolation
 - Pare-vapeur/Pare-air
 - › Nous allons devoir couper la membrane TPO de la toiture puisqu'elle est collée sur OSB.

- › Il faudra enlever la bande grise pour la relocalisation. (Coupé membrane, enlever panneau et isolant)
 - › Un trait de scie au centre pourra faciliter le réassemblage dans un nouveau lieu.
 - i. Connecteur pour désassemblage
 - Le collet de serrage est accédé par une ouverture dans le plancher (18 x 8) à côté de chaque colonne. Il faudra le refermer par la suite.
 - Les plaques de connexions latérales sur la tête des colonnes sont unies sur la partie morte des connecteurs.
 - › Il faudra enlever les étages complets pour pouvoir enlever ces plaques latérales et pouvoir accéder à tous les modules des étages.
 - › Si nous coupons les plaques, il faudra en faire une nouvelle pour la relocalisation. [Risque feu]
 - › Les connecteurs rentrent dans la plaque.
 - j. Pour le levage (relocalisation), tous les connecteurs sont déjà fournis et installés sur les modules.
 - Impossible à inspecter par ce qu'a l'intérieur de HSS.
 - La documentation doit être conservée par le client.
 - Le connecteur devient un produit propriétaire pour tous les modules sauf ceux du dernier étage.
 - k. Transport
 - Aucun enjeu.
 - l. Sur nouveau site comme si nous sortons de l'usine et nous commençons à construire le projet.
 - Il n'y a pas de contraintes pour nouveau site à part les contraintes de construction usuelles.
2. Simulation de la déconstruction GoKit :
- Propositions :
- a. Le système pourrait être amélioré pour convenir à différentes conditions, aux changements futurs.
 - b. Revêtement - Enveloppe

- Revêtement extérieur sans éléments de jonctions, donc nous pouvons enlever une partie ou l'entièreté du revêtement.
 - Définir types de revêtement et types d'attaches pour GoKit qui pourrait faciliter le démantèlement.
 - Il y a des discussions à avoir sur dimensions du parement pour contrôler la quantité de joints.
3. Dispositions : Une analyse des contraintes [réglementaires et structurelles] des lieux d'accueil est nécessaire avant la relocalisation du produit.

Recommandations :

La toiture en membrane élastomère doit être soudée. Pour pouvoir être enlevé plus facilement, le détail de toiture est à refaire pour les jonctions entre les différents modules/détails d'enveloppes à refaire également. (trappe d'accès pour les connecteurs?)

ATELIER 2 : Design for reuse (module et enveloppe)

Stratégie de design utilisé pour aider à la réutilisation :

- La modularisation est la stratégie principale utilisée puisque le module est préfabriqué.
 - La dissociation systématique des fonctions par exemple, la fonction de barrière coupe-feu et acoustique du plafond fini. Le travail est systémique en couche, il y a une dissociation des systèmes et des fonctions.
 - Les panneaux sont fixés avec des vis.
 - Il y a eu une stratégie de coordination dimensionnelle, par exemple des panneaux de mêmes grandeurs pour faciliter l'aménagement.
 - Mobilier, cuisine et salle de bain modulaire, mais théorique parce que leurs durées de vie sont relativement courtes.
 - Assemblage mécanique du connecteur conçu pour le démontage.
 - Construction conventionnelle pour le revêtement.
1. Étapes de déconstruction (extérieur)
 - a. Revêtement
 - Il n'y a pas d'enjeux pour le désassemblage et il peut être réutilisé. La durée de vie des revêtements extérieurs est relativement longue. (brique 100 ans, parement d'aluminium 75 ans, acier 45 ans, latte de bois 50 ans)
 - b. Lattes
 - C'est possible théoriquement, mais on ne paie pas le cout réel économique pour réutiliser le matériau. (Frais de main-d'œuvre très élevés)
 - c. Couper Membrane (collé)
 - d. Isolation module
 - Elle est fixée temporairement avec des vis et des rondelles par la suite les lattes de bois retiennent l'isolation en place.
 - Enveloppe isolante extérieure, est primordiale pour garder la structure sans corrosion .

- Les vis à l'extérieur du pare-vapeur ne sont pas récupérables.
 - L'isolation de l'extérieur est une stratégie d'isolement facilement récupérable, car la laine de roche ne se dégrade pas.
- e. Jonctions gypse
 - Il est complexe de réutiliser le gypse, mais il peut être recyclé. (récupérer la partie gypse)
 - Il est facile de récupérer le colombage.
2. Étapes de reconstruction (intérieur)
 - a. Revêtements surface
 - Murs en gypse.
 - Plafonds en gypse.
 - Les revêtements de plancher ne sont pas déterminés dans GoKit (choix du client). Toutefois, nous pourrions offrir un assortiment facile à enlever, préférablement non collé.
 - b. Jonctions mécaniques
 - Construction conventionnelle.
 - c. Drainage
 - Construction conventionnelle .
 - d. Alimentation
 - Construction conventionnelle.
 - e. Électricité
 - C'est complexe pour l'électricité, car le fil électrique continu de la source à la charge. Il faudra prévoir la longueur nécessaire de fil électrique et le conserver à l'intérieur du module. Le démantèlement sera long et ardu.
 - f. Ventilation
 - Construction conventionnelle.
 - g. Jonctions de finis intérieurs.
 - Construction conventionnelle .

3. Toiture
 - a. Une membrane TPO est utilisée pour le prototype, car elle se récupère facilement. Elle est fixée mécaniquement et soudée subséquemment pour finaliser les joints. (20% garder, 80% jeter)
 - b. Géotextile. (à voir)
 - c. Panneaux de support en fibre de bois, ils sont récupérables, si vissés.
 - d. Isolation
 - Elle est fixée temporairement avec des vis et des rondelles par la suite, les lattes de bois retiennent l'isolation en place.
 - e. Pare-air/pare-vapeur est collé sur OSB extérieur.
 - Il faudra le fixer mécaniquement et non le collé pour pouvoir le réutiliser.
 - f. Un détail de jonction est à concevoir, pour faciliter le démontage et assurer l'étanchéité entre les modules.
4. Plafonds sans toitures, gypse, coupe-feu sur 2X10 fixé directement.
 - a. Le gypse cause un problème de déconstruction.
5. Connecteur prévu pour désassemblage
 - a. Il y a accès au collet par une ouverture sur le côté de chaque colonne.
 - b. Il faut prévoir d'enlever les modules d'un étage complet.
6. Levage
 - a. Par un œillet à l'intérieur de l'HSS.
7. Le solinage est difficilement récupérable puisqu'il y a des contraintes de dimensions et il est soudé ou collé en place.
8. Les fenêtres et les portes sont facilement récupérables.
9. Ancrage à la fondation.

10. Le béton ne peut pas être récupérable, cependant il peut être recyclé.
11. L'isolation entre modules peut être facilement récupérée.
12. Les HSS/2 x 4
 - a. Ils sont fixés avec des clous en acier, donc compliqué pour le démantèlement. Cependant, cela n'affecte pas leurs capacités structurantes.
 - b. La structure en acier devrait être boulonnée, mais difficile à faire.

Conception des projets pour leur déconstruction et non pour sa pérennité. Presque un non-sens puisque nous voulons que le bâtiment soit le plus durable possible.

Recommandation :

Détail de désassemblage de la toiture à inclure dans le prototype pour faciliter le désassemblage.

ATELIER 3 : Design for Adaptability

1. Flexibilité
 - a. Possible pour le réaménagement intérieur à cause de la clarté du système constructif et du système structural.
 - b. Les façades (si ce n'est pas des contreventements) peuvent être modifiées aussi.
 - c. Il y a une flexibilité liée au système mécanique.
 - d. La flexibilité est plus horizontale, mais pas verticale.
2. Changement dans le temps (rénovations faciles)
 - a. Les rénovations ne sont pas plus faciles ou difficiles que dans les constructions traditionnelles.
3. Convertibilité (changement d'usage)
 - a. Les contreventements limitent beaucoup le changement d'usage.
 - b. Les modules sont flexibles, mais ne sont pas adaptables. Il y a une nuance entre flexibilité et adaptabilité.

Principes de conception (relocation, reuse, adaptability) issue de la revue de littérature.

- > Portées libres
 - a. La structure est d'acier donc les murs ne sont pas porteurs. Mais il y a des contreventements utilisés dans certains murs.
 - b. Cadre rigide soudé design for disassembly n'est pas réalisable.
 - c. Possibilité de faire une structure d'acier boulonné, pour ainsi avoir la possibilité d'effectuer un changement intérieur de murs sans problème structural.
- > Hauteurs planchers/plafonds
 - a. Hauteur de 9 pieds plancher/plafond.

- b. Les retombées sont en fonction de la configuration du module. Elles ne sont pas standardisées, il y a une variation par module dépendant des besoins de distribution de la ventilation (mécanique, électricité).
 - c. Les retombées ne sont pas nécessaires dans tous les modules donc moins de gaspillage.
- > Plancher plat
 - a. Pour minimiser les changements de niveau et faciliter le réaménagement intérieur.
 - > Cloison non porteuse
 - a. Les cloisons sont toujours non-porteuses à l'intérieur du module, mais les cloisons extérieures participent au contreventement.
 - b. Les cloisons peuvent être démolies, mais pas facilement. Les murs de gypse ne restent pas prévus pour le démontage, ils demeurent un problème pour le démantèlement.
 - > Modularité/trame constante
 - a. La trame est constante, selon le site et l'aménagement des modules.
 - > Systèmes simples/répétitifs
 - a. Les éléments de configuration du système mécanique sont répétés.
 - b. Les types de systèmes restent toujours les mêmes, mais la distribution peut varier.
 - c. L'élément primordial est la configuration initiale versus la configuration future. Toute mécanique pourrait être réutilisée si la configuration est identique.
 - > Finis comme élément temporaire
 - a. Construction conventionnelle, les finis non usuels ne sont pas pensés.
 - b. Changement de culture constructive dans les finis recommandés.

- > Séparation des sous-systèmes
 - a. Il n'y a pas d'enjeux, mais c'est à considérer dès le départ, la coordination se fait en amont.
 - b. La distribution des systèmes se fait dans le plafond.
 - c. Les logements sont indépendants, mais il y a une relation verticale (drainage, électricité) entre les logements. Chaque module est autonome, mais il peut avoir des systèmes interconnectés.
- > Fixations mécaniques
 - a. C'est une construction conventionnelle, nous pourrions créer une modulation de la mécanique comme le système lui-même.
- > Documents de construction et déconstruction
 - a. Aucun document de déconstruction disponible.

6 Références

Alistair Gibb, Simon Austin, Andrew Dainty, Nigel Davison, Christine Pasquire. 2007. "Towards Adaptable Buildings: pre-configuration two case studies." ManuBuild 1st International Conference The transformation of the Industry: Open Building Manufacturing. Rotterdam: academia.edu.

Arvanti, Eleni. 2020. Ensuring adaptability in modular construction. Thèse, Aalborg University.

Asiah Abdul Rahim, Zuhairi Abdul Hamid, Ismawi Hj. Zen, Zulkefle Ismail, Kamarul Anuar Mohd Kamar. 2012. "Adaptable Housing of Precast Panel System in Malaysia." ASEAN Conference on Environment-Behaviour Studies. Bangkok: Procedia - Social and Behavioral Sciences. 369 – 382.

Bon-GangHwang, MingShan, Kit-YingLooic. 2019. "Prefabricated Prefinished Volumetric Construction: Key Constraints and Mitigation Strategies." IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Chulalongkorn: Chulalongkorn University. 24-25.

Cecília G. da Rocha, Carlos T. Formoso, and Patrícia Tzortzopoulos. 2015. "Adopting Product Modularity in House Building to Support Mass Customisation." Sustainability.

Chen, Lingkun, Chencheng Zhai, Lu Wang, Xiaolun Hu, and Xiaoming Huang. 2022. "Modular Structure Construction Progress Scenario: A Case Study of an Emergency Hospital to Address the COVID-19 Pandemic." Sustainability.

Chi Sun-Pooh, Lara Jaillon. 2010. " Design issues of using prefabrication in Hong Kong building construction." Construction Management and Economics.

Chua, YS., JYR. Liew, and SD Pang. 2018. "Robustness of Prefabricated Prefinished Volumetric Construction (PPVC) High-rise Building." Proceedings of the 12th International Conference on Advances in Steel-Concrete Composite Structures. Valencia: Researchgate.

City of Seattle, King County, Washington, and Resource Venture Inc. n.d. Design for Disassembly in the Built . Seattle: City of Seattle, King County, Washington, and Resource Venture Inc.

City of Seattle, King County, Washington, and Resource Venture Inc. 2010. Design for Reuse Primer. Seattle: City of Seattle, King County, Washington, and Resource Venture Inc.

Delaney McFarland, Brandon Ross, M. Z. Naser, Rijk Blok & Patrick Teuffel. 2021. "Quantitative evaluation of the relationship between physical parameters and building demolition or adaptation outcomes." Architecture, Structures and Construction .

Des Doran, Mihalīs Giannakis. 2011. "An examination of a modular supply chain: a construction sector perspective." Supply Chain Management.

Edelman, Harry, Jaakko Vihola, Mikko Laak, and Petri Annila. 2016. "Resiliency Of Prefabricated Daycares And Schools: Finnish Perspective To Relocatable Education Facilities." International Journal of Strategic Property Management.

Eleni Iacovidou, Phil Purnell, Konstantinos, Daniel Tsavdaridis Konstantinos, Poologanathan Keerthan. 2021. "Digitally Enabled Modular Construction for Promoting Modular Components Reuse: A UK View." Journal of building engineering.

Elenila covidou, PhilPurnell, Ming K.Limb. 2018. "The use of smart technologies in enabling construction components reuse: A viable method or a problem creating solution?" Journal of Environmental Management.

Erwin Hofman, Hans Voordijk, Johannes Halman. 2009. "Matching supply networks to a modular product architecture in the house-building industry." Building Research & Information .

Fahad Saud Allahaim, Anas Alfaris, David Leifer. 2010. "Towards Changeability The Adaptable Buildings Design (ABD) Framework." Conference: fifth international Conference of Arab Society for Computer Aided Architectural. Fes, Maroc: researchgate.

Fernanda Cruz, RiosWai, K.Chong, DavidGrau. 2015. "Design for Disassembly and Deconstruction - Challenges and Opportunities." Procedia Engineering.

Francesco Pomponi, Alice Moncaster. 2016. "Circular economy for the built environment: A research framework." Journal of Cleaner Production.

Freitas, Maria do Carmo Duarte, and Gabriel Luiz Fritz Benachio. 2020. "Circular economy in the construction industry: a systematic literature review." Journal of Cleaner Production.

Graham, Peter. 2005. "Design For Adaptability — An Introduction To The Principles And Basic Strategies." Environment Design Guide.

Habraken, N.J. 1962. Supports: An Alternative to Mass Housing. New York: Routledge.

Haigh, Laxmi. 2021. "The Key Elements Of The Circular Economy." Circle Economy. Accessed 04 30, 2021. <https://www.circle-economy.com/resources/the-key-elements-of-the-circular-economy-framework>.

Harry Edelman, ViholaJaakko, LaakPetri. 2016. "Resiliency of prefabricated daycares and schools: Finnish perspective to relocatable education facilities." *International Journal of Strategic Property Management* .

Helena Johnson, John Henrik Meiling. 2010. "Defects in offsite construction: timber module prefabrication." *Construction Management and Economics*.

Hwang, Bon-Gang, Ming Shan, and Kit-Ying Looi. 2018. "Knowledge-based decision support system for prefabricated prefinished volumetric construction." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.

Ill, Robert Schmidt. 2014. *Designing for adaptability in architecture*. Thèse, Loughborough: Loughborough University.

Ismail, Zulkefle, and Asiah Abdul Rahim. n.d. *Adaptability And Modularity In Housing: A Case Study Of Raines Court And Next21*. Thèse, Kuala Lumpur: International Islamic University Malaysia.

Jaillon, Lara, and C. S. Poon. 2020. "Life cycle design and prefabrication in buildings: A review and case studies in Hong Kong." *Automation in Construction*.

Katherine Tebbatt Adams, Mohamed Osmani, Tony Thorpe and Jane Thornback. 2017. "Circular economy in construction: current awareness, challenges and enablers." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management*.

Kim, Doyoon. 2008. "Preliminary Life Cycle Analysis of Modular and Conventional Housing in Benton Harbor, MI." Center for sustainable systems, University of Michigan.

Latendresse, Sophie. 2019. *L'économie Circulaire Dans Le Domaine De La Construction Résidentielle Multilogements Au Québec : Analyse Du Secteur Et Proposition D'un Guide Des Pratiques Innovantes* . Thèse, Sherbrooke: Université De Sherbrooke .

Leonora Charlotte, Malabi Eberhardt, Harpa Birgisdotti, Morten Birkved. 2018. "Life cycle assessment of a Danish office building designed for disassembly." *Building Research and Information*.

Melton, Paula. n.d. "Buildings that last: Design for adaptability, deconstruction and reuse." American institute of architects.

Messa Sokoudjo, Virginie Raissa. 2012. *Barrières à l'utilisation de la préfabrication modulaire volumétrique de bois au Québec : étude de cas du passage d'un système préfabriqué unifamilial au multifamilial*. Thèse, Montréal: École de technologie supérieure.

Monique Eissens-van der Laan, Manda Broekhuis, Marjolein van Offenbeek, Kees Ahaus. 2016. "Service decomposition: a conceptual analysis of modularizing services." *International Journal of Operations & Production Management*.

Murat Kucukvar, Adeb A. Kutty, Nuri C. Onat, Nasser Al Jurf, Noora Al-Abdulmalek, Ayman Naser, Yulia Ermolaeva. 2022. "How Can Collaborative Circular Economy Practices in Modular Construction Help Fédération Internationale de Football Association World Cup Qatar 2022 to Achieve Its Quest for Sustainable Development and Ecological Systems?" *Frontiers in Sustainability*.

Nahmens, Isabelina, and Laura H. Ikuma. 2012. "Effects of Lean Construction on Sustainability of Modular Homebuilding." *Journal of Architectural Engineering*.

Peltokorpi, Antti, Hylton Olivieri, Engenharia Racional, Denis Arioaldo, and Olli Seppaen. 2017. "Categorizing modularization strategies to achieve various objectives of building investments." *Construction Management and Economics*.

Potemans, Astrid. 2017. *Modular Building in a Circular Economy: An exploratory research*. Thèse, Delft: Delft University of Technology.

Public Architecture, King County, Washington. n.d. *Environment: A Guide to Closed-Loop Design and Building*. . King County: Public Architecture, King County, Washington.

Quale, John, Matthew Eckelman, Kyle Williams, and Greg Sloditskie. 2012. "Construction Matters: Comparing Environmental Impacts of Building Modular and Conventional Homes in the United States." *Journal of Industrial Ecology*.

R.J.Geldermans. 2016. "Design for Change and Circularity – Accommodating Circular Material & Product Flows in Construction." *Energy Procedia*

Rabia Charef, Weisheng Lu, and Daniel Hall. 2022. "The transition to the circular economy of the construction industry: Insights into sustainable approaches to improve the understanding." *Journal of Cleaner Production*.

Rand Askar, Luís Bragança, Helena Gervásio. 2022. "Design for Adaptability (DfA)—Frameworks and Assessment Models for Enhanced Circularity in Buildings." *applied system innovation*.

Riikka Kyrö, Tuuli Jylhä, Antti Peltokorp. 2019. "Embodying circularity through usable relocatable modular buildings." *Facilities*.

Robert Schmidt, Kasper Sanchez Vibaek, Simon A Austin. 2014. "Evaluating the adaptability of an industrialized building using dependency structure matrices." *Construction Management and Economics*.

Roberto Minunn, Timothy O'Grady, Gregory M. Morrison, Richard L. Gruner, Michael Colling. 2018. "Strategies for Applying the Circular Economy to Prefabricated Buildings." *Buildings*.

Sachdev, Palak. 2018. "Modular Construction and India ." *International Journal of Research in Engineering, Science and Management*.

Schmidt III, Robert, Toru Eguchi, and Simon & Gibb, Alistair Austin. 2010. *What Is The Meaning Of Adaptability In The Building Industry?* Loughborough: Loughborough University.

Chartwell school. n.d. *Design for deconstruction*. Seaside, California: United States Environmental Protection Agency.

Stricker, Brand. 2020. Reuse in Construction, A compendium of Circular Architecture. Zurich: Park Books.

Sven Mackenbach, Johanna Zeller, R Osebold. 2020. "A Roadmap towards Circularity - Modular Construction as a Tool for Circular Economy in the Built Environment." IOP Conference Series Earth and Environmental Science. Aachen

Thomsen, A., & van der Flier, K. 2011. "Understanding obsolescence: a conceptual model for buildings." Building Research and information.

Toru Eguchi, Robert Schmidt, Andrew DaintyShow, Alistair G.f. Gibb. 2011. The Cultivation of Adaptability in Japan. Loughborough: Open House International .

U.S Environmental Protection Agency. n.d. "Design for Deconstruction."

W.Y.Tam, Vivian, C.M.Tam, S.X.Zeng, and William C.Y.Ngb. 2007. "Towards adoption of prefabrication in construction." Building and Environment.

Wong, Liliane. 2016. Adaptive Reuse: Extending the Lives of Buildings. Basel: Birkhäuser Verlag AG.

Wuni, Ibrahim Yahaya, and Geoffrey Qiping Shen. 2019. "Critical success factors for modular integrated construction projects: a review." Building Research & Information .

Wuni, Ibrahim Yahaya, and Geoffrey Qiping Shen. 2022. "Developing critical success factors for integrating circular economy into modular construction projects in Hong Kong." Sustainable Production and Consumption.

Y S Li, B G Hwang, M Shan, K Y Looi. 2019. "Developing a Knowledge-based Decision Support System for Prefabricated Prefinished Volumetric Construction." IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Singapore: IOP Science.

Yasaman Shahtaheri, Christopher Rausch, Jeffrey West, Carl Haas, Mohammad Nahangi. 2017. "Managing risk in modular construction using dimensional and geometric tolerance strategies." Automation in Construction.



Québec 