
Travail de fin d'études / Projet de fin d'études : Comment l'architecture modulaire hors site répond aux exigences d'une architecture durable. Approche réflexive autour des normes DNSH 'Do no significant Harm'

Auteur : Ros-Guézet, Pierre

Promoteur(s) : Leclercq, Pierre

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en ingénierie architecturale et urbaine

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/24774>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative" (BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Université de Liège

Faculté des Sciences Appliquées

Comment l’architecture modulaire hors site répond aux exigences d’une architecture durable. Approche réflexive autour des normes DNSH ‘Do no significant Harm’.

Pierre ROS-GUEZET

Projet de fin d’études réalisé en vue de l’obtention du grade de Master « Ingénieur Civil Architecte »

Année académique 2024-2025

Composition du Jury : Pierre Leclercq, Sigrid Reiter, Emilie Gilliard, Bernard Charlier, Hugo Jamin

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur **Pierre Leclercq**, mon promoteur, pour son accompagnement bienveillant, ses conseils rigoureux et la qualité de son encadrement tout au long de ce travail. Sa disponibilité et son regard critique ont largement contribué à enrichir ma réflexion et produire ce TFE tel qu'il est aujourd'hui.

Je remercie également Monsieur **Bernard Charlier**, partenaire chez Degotte, pour sa précieuse collaboration, sa confiance, ses visites, ainsi que pour les documents et informations techniques qu'il m'a généreusement transmis, rendant possible l'analyse concrète du cas d'étude.

Mes sincères remerciements vont aussi à Monsieur **Hugo Jamin**, expert DNSH au sein du SPW, dont les conseils avisés et l'éclairage sur les exigences de la taxonomie européenne m'ont permis de mieux appréhender les enjeux réglementaires liés à la durabilité.

Enfin, je souhaite remercier chaleureusement l'ensemble des intervenants — enseignants, professionnels, contributeurs et personnes rencontrées dans le cadre de ce travail — pour leur disponibilité, leur implication et leur partage d'expertise, qui ont été d'un grand soutien dans l'élaboration de ce mémoire.

Introduction.....	4
Chapitre 1. Etat de l'art.....	5
1.1. Présentation architecture modulaire et hors site.....	5
1.1.1. Les origines historiques de la construction modulaire.....	5
1.1.2. Les recherches récentes sur l'architecture modulaire hors site.....	8
1.1.3. Limites identifiées.....	12
1.2. Relation entre les normes DNSH et l'architecture modulaire hors site	17
1.3. Méthodologie et cadre de recherche.....	18
Chapitre 2. Architecture durable et normes environnementales	19
2.1. Définition de la construction/architecture durable	19
2.2. Les normes DNSH : ces origines, ces objectifs et ces six critères	23
2.3. Focus sur le formulaire DNSH de la SPW	26
Chapitre 3. Architecture modulaire hors site	29
3.1. Définition et principes techniques de l'architecture modulaire hors site	29
3.2. Processus de fabrication	30
3.3. Assemblage.....	32
3.4. Transport.....	35
3.5. Avantages durables	37
3.6. Limites et enjeux	40
Chapitre 4. Cas d'étude d'une architecture modulaire hors site : L'offre de Degotte	41
4.1. Examen du cas d'étude : Degotte	41
4.2. Exemple de démontabilité/remontabilité : Le projet Um bock	51
Chapitre 5. Scénario fictif d'une architecture modulaire-hors site en faveur du DNSH	54
5.1. Objectif.....	54
5.2. Contraintes et libertés.....	54
5.3. Critères	54
5.4. Critique de ce scénario fictif	57
5.5. Le confort des usagers.....	62
5.6. Conclusion.....	64
Chapitre 6. Enjeux et perspectives.....	66
6.1. Les premières initiatives : BAMB.....	66
6.1.1. Design de Bâtiment Réversible.....	66
6.1.2. Passeport Matériaux.....	69
6.2. Les freins institutionnels, techniques et économiques	70
6.3. Evolution du cadre réglementaire belge.....	71

Chapitre 7. Conclusion.....	74
7.1. Bilan compatibilité : modulaire hors site et DNSH.....	74
7.2. Apport de la recherche.....	76
7.3. Ouvertures, perspectives et limites	77
Bibliographie.....	79
Liste des figures	85

Introduction

Contexte et enjeux de la durabilité dans la construction

Actuellement, le secteur de la construction correspond à 37%-39% des émissions de gaz à effet de serre (Building Materials and the Climate, 2025) et 33% de la consommation finale mondiale d'énergie selon l'agence internationale de l'énergie (Buildings - Energy System - IEA, 2025) et constitue un des plus grands producteurs de déchets.

La transition écologique et le développement durable reconnaissent l'impact du bâtiment sur la planète, que ce soit l'accélération du réchauffement climatique, l'épuisement des ressources naturelles ou l'aspect social par rapport aux exigences croissantes en termes de confort et qualité de vie des espaces urbains bâtis. La question de la durabilité dans le secteur de la construction est un sujet actuel qui concerne le monde entier.

L'enjeu est de repenser les pratiques constructives pour répondre aux problématiques présentes et futures sans endommager l'environnement. Cette philosophie s'applique à l'intégrité du cycle de vie du bâtiment, de la conception à la construction, l'usage et la maintenance, puis la rénovation et la déconstruction.

Ainsi, plusieurs initiatives ont été mises en place pour favoriser ce développement : des certifications environnementales telles que HGE (Haute qualité environnementale), LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) ou plus récemment le DNSH (Do no significant harm), le développement de la construction passive à énergie positive ou l'usage de matériaux biosourcés. Cependant, certains freins persistent, tels que le coût économique, l'incompréhension et le désaccord sur les enjeux, etc.

L'objectif de ce travail de fin d'études est d'analyser l'intérêt d'une forme d'architecture particulière — la construction modulaire hors site — dans une perspective de durabilité. Pour ce faire, l'étude s'appuie sur l'intégration de nouvelles stratégies orientées vers le développement durable, ici le principe du "Do No Significant Harm" (DNSH). Combiné à l'approche modulaire hors site développée par l'entreprise Degotte, ce cadre permet de traiter un sujet à la fois actuel et pertinent pour le secteur de la construction.

L'approche intègre une analyse documentaire, l'utilisation de données provenant de multiples rapports et d'interviews avec différents intervenants concernés en plus d'un examen comparatif des effets environnementaux. Les chapitres abordent tour à tour les questions de performance énergétique, de gestion des ressources, de diminution et d'exploitation des déchets, de confort des utilisateurs, ainsi que d'empreinte carbone. La recherche se termine par une récapitulation qui évalue dans quelle mesure l'approche mis en œuvre dans un cas d'étude respecte les critères DNSH, accompagnée de suggestions visant à améliorer cette conformité, en vue d'une expansion plus importante de la construction modulaire durable.

Chapitre 1. Etat de l'art

1.1. Présentation architecture modulaire et hors site

1.1.1. Les origines historiques de la construction modulaire

Il ne faut pas confondre préfabrication et module, dont le second traite de la répétition d'éléments, si possible standardisé. Malheureusement, les termes sont souvent confondus. Suivant la logique de préfabrication, les éléments de structure, fondation, portes, fenêtres, murs etc.... sont répétés dans la construction, intégrant un aspect de modularité. L'histoire de l'architecture préfabriqué est ainsi l'un des précurseurs de l'architecture modulaire

Le principe de préfabrication remonte aux débuts de la civilisation. Dès l'Antiquité, les Grecs et les Romains utilisaient des éléments architecturaux standardisés, comme des colonnes monolithiques ou segmentées, facilitant le transport et l'assemblage sur place (Hausladen et al., 2010). Bien que les temples antiques ne soient pas à proprement parler des bâtiments préfabriqués. L'intérêt de ces techniques résidait surtout dans leur capacité à accélérer les processus de construction, notamment pour des machines de guerre telles que les balistes, les béliers ou les tours de siège (Vitruve, 1991). Cependant, dans ce contexte militaire et impérial, la préfabrication appliquée au logement ne constituait pas encore une priorité.

Le premier exemple documenté anglo-américain de maison préfabriquée modulaire apparaît en 1624 à Cape Ann, dans le Massachusetts. Il s'agissait d'un bâtiment en bois, préassemblé en Angleterre, puis démonté, transporté par bateau et remonté sur place afin de loger une flotte de pêche. Cette structure, démontable et remontable, marque les débuts de la construction transportable, préfigurant les grands principes de la modularité moderne et ouvre la voie sur la diffusion de cette nouvelle "architecture" (Herbers, 2004).

Au tournant du XXe siècle, face à la croissance démographique rapide des États-Unis, la préfabrication prend un nouvel essor. Dès les années 1908–1910, l'entreprise E.F. Hodgson Compagnie, basée à Dover (Massachusetts), commence à produire des maisons portables en kit, livrées partout dans le pays (Figure 1). Ces constructions sont largement utilisées pendant la Première Guerre mondiale, notamment pour abriter des cantines, des hôpitaux militaires ou des logements temporaires. Elles représentent les premiers véritables prototypes de maisons modulaires hors site aux États-Unis (Wright, 1981). C'est à cette période qu'une distinction précise entre le préfabriqué et le modulaire est établi.

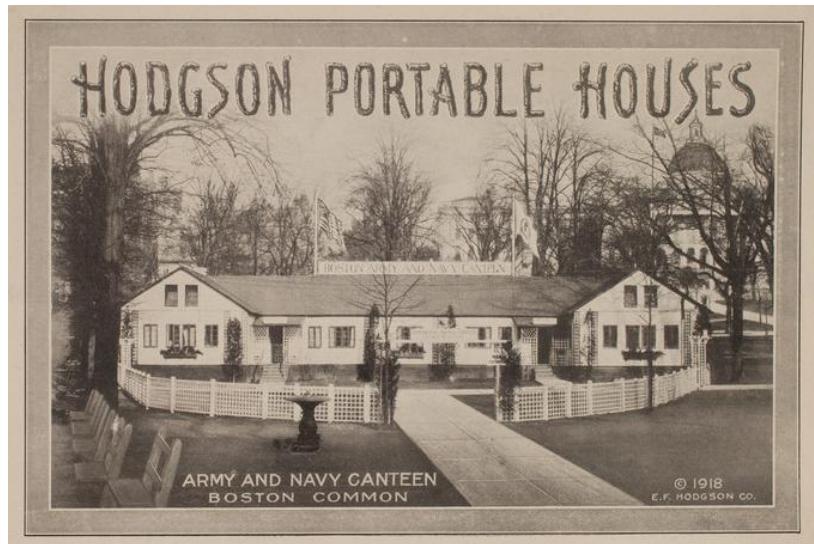


Figure 1: Page de catalogue pour les maisons modulaires Hodgson, 1918

Après la Première Guerre mondiale, la nécessité de reconstruire rapidement et à grande échelle favorise le développement de la construction modulaire dans plusieurs pays. En France, l'architecte Henry Baronnet-Frugès (1879–1974), en collaboration avec Le Corbusier, expérimente dès 1924 à Lèze-Cap-Ferret une série de logements économiques (Figure 2). Ceux-ci sont réalisés à partir d'éléments préfabriqués et de béton projeté, permettant une mise en œuvre rapide tout en conservant une ambition architecturale.



Figure 2: Photographie des logements “les cités de labeur”, Lèze, 1924

Les cités Bessonneau sont un exemple emblématique de logements préfabriqués et modulaires construits en France juste après la Première Guerre mondiale en 1918 (Figure 3). Elles tirent leur nom de l'industriel Jules Bessonneau, fabricant de structures en bois et de hangars démontables, très utilisés par l'armée française pendant la guerre. Les maisons sont majoritairement composées de modules en bois préassemblé, comme des murs en bois “à double paroi”. Pour beaucoup, il s'agit du premier exemple de construction modulaire industrialisé en France.



Figure 3: Photographie d'une des dernières maisons en bois de la cité ouvrière Bessonneau

La Seconde Guerre mondiale constitue un tournant décisif. Après la Libération en 1945, la France, comme de nombreux pays européens, doit faire face à une grave crise du logement. La préfabrication devient alors un outil stratégique pour reconstruire rapidement. Les techniques employées pour les infrastructures militaires sont adaptées au secteur résidentiel, notamment à travers la préfabrication lourde du béton, les panneaux muraux, ou les modules tridimensionnels (Sudjic, 2005).

À partir de cette période, la construction modulaire évolue : elle cesse d'être uniquement une réponse à l'urgence pour devenir un modèle d'architecture réfléchi. Les progrès technologiques, la standardisation des composants et l'industrialisation du secteur permettent une montée en qualité et une meilleure adaptation aux besoins des usagers. L'architecture modulaire hors site intègre progressivement les mêmes normes que la construction traditionnelle, tout en offrant davantage de flexibilité, de rapidité d'exécution et de contrôle en usine (Kieran et Timberlake. 2004)).

Aujourd'hui, l'architecture modulaire s'est imposée comme une alternative crédible, et parfois même supérieure, à la construction conventionnelle. Elle s'inscrit pleinement dans une logique de durabilité, en limitant les déchets, en optimisant les ressources et en réduisant les émissions de CO₂ liées aux chantiers. Elle permet également une grande liberté créative, tout en

modulaire n'est plus un sous-produit de l'urgence : il est désormais au cœur des stratégies de construction durable et performante pour le XXIe siècle (Gibb. 1999).

1.1.2. Les recherches récentes sur l'architecture modulaire hors site

La construction modulaire hors site occupe aujourd'hui une place de plus en plus importante dans les solutions de construction durable. Elle est souvent comparée à la construction traditionnelle, notamment à travers des études récentes. À ce titre, une enquête menée à l'occasion des 20 ans de l'ACIM (Acteurs de la Construction Industrialisée et Modulaire), en partenariat avec l'organisme indépendant Tribu Énergie, a été présentée le 6 juin 2024 en France. Elle a comparé une centaine de bâtiments modulaires et traditionnels, afin d'évaluer leur performance globale. Il en ressort que, si les coûts de construction initiale sont comparables, les bâtiments modulaires s'avèrent 21 % moins chers en prenant en compte les coûts de portage (durée de chantier, immobilisation financière) et d'entretien. L'étude souligne également une réduction de 77 % des nuisances liées au chantier, notamment en matière de bruit, poussières et flux logistiques, qui est un atout de taille dans les milieux urbains denses (Admin & Admin, 2024).

D'autres études récentes vont dans le même sens et confirment l'essor du modulaire dans le monde. L'étude de marché publiée par Businesscoot le 21 janvier 2025 indique une croissance spectaculaire du secteur : entre 2017 et 2023, les revenus mondiaux liés à la construction modulaire ont augmenté de 72 %. Selon cette source, cette dynamique s'explique par les avantages multiples de ce mode constructif : rapidité d'exécution, réduction de l'empreinte environnementale, standardisation des composants, et flexibilité d'usage. Le modulaire séduit autant les acteurs publics que les promoteurs privés, notamment dans les domaines du logement collectif, de l'enseignement, de la santé ou encore de l'hôtellerie (Businesscoot, 2024).

Au-delà de ses performances techniques et économiques, la construction modulaire s'impose également comme un langage architectural à part entière. De plus en plus d'architectes y voient un terrain d'expression créative, où la répétition des éléments, les jeux d'emboîtement et les structures préfabriquées deviennent les fondements d'une esthétique contemporaine. Un exemple emblématique de cette approche est le CBR Building à Bruxelles, conçu en 1970 par les architectes Constantin Brodzki et Marcel Lambrichs (Figure 4). Ce bâtiment administratif est constitué de 765 modules ovales préfabriqués en béton blanc moulé. Les vitrages, teintés en orange, sont insérés sans châssis visibles, créant une façade à la fois organique et répétitive. Ce projet, récemment rénové, est aujourd'hui reconnu comme une œuvre pionnière de l'architecture modulaire expressive.

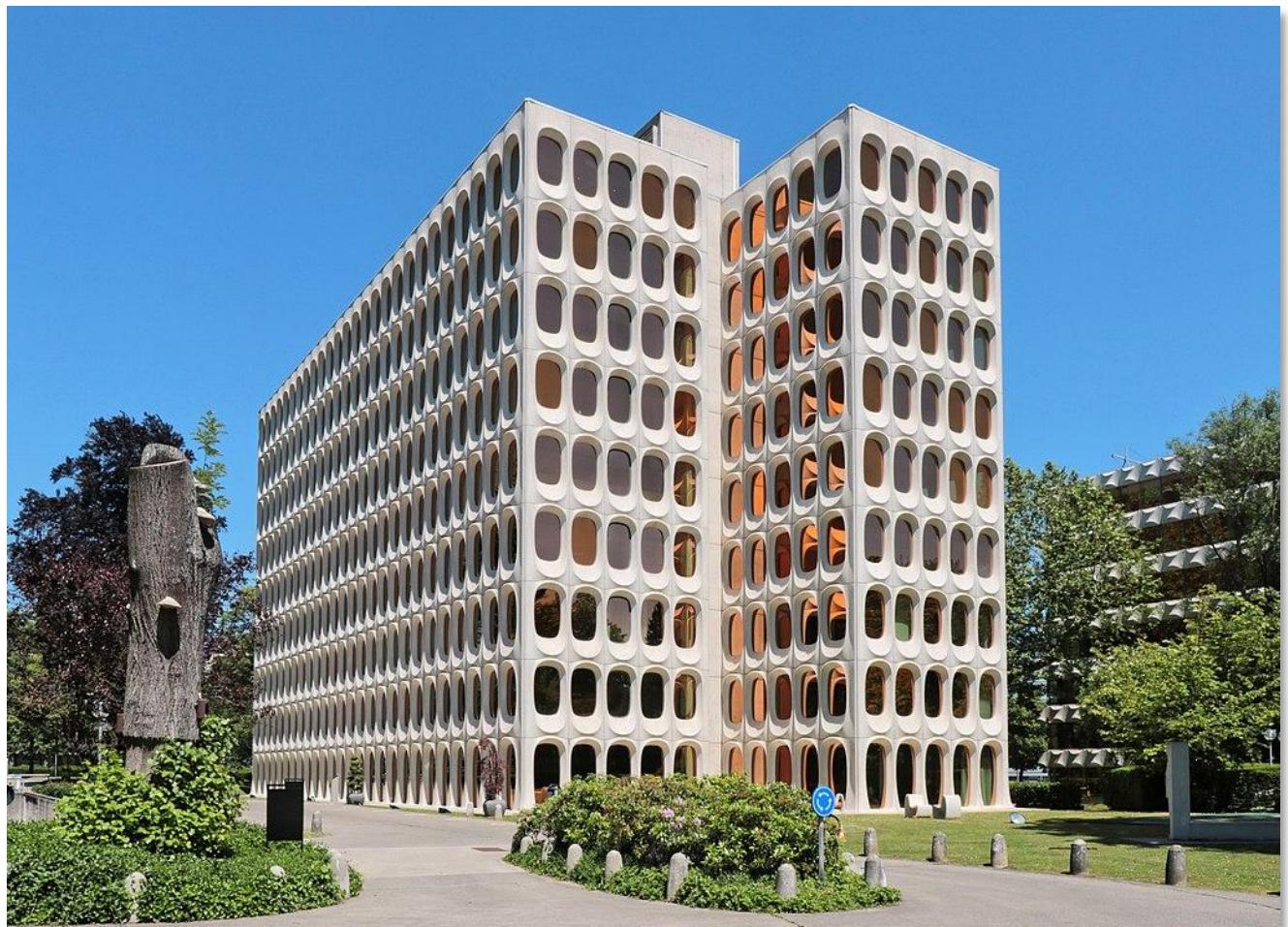


Figure 4: Photographie de l'immeuble CBR, région Bruxelles capitale

Un autre exemple remarquable, plus contemporain, est celui d'Urban Rigger, situé à Copenhague. Ce projet d'habitat étudiant utilise des conteneurs maritimes recyclés comme modules d'habitation (Figure 5). Conçus par Kim Loudrup en collaboration avec le cabinet d'architecture BIG (Bjarke Ingels Group), ces modules sont assemblés sur une plateforme flottante pour créer 12 logements abordables et bas-carbone. L'objectif est double : proposer des logements étudiants accessibles dans une ville dense et réduire l'impact environnemental en recourant à des matériaux réemployés et à des solutions de construction hors site. Ce projet illustre parfaitement le lien croissant entre modularité, économie circulaire et innovation architecturale.



Figure 5: Photographie d'un Prototype du Urban Rigger, Copenhague

En somme, la construction modulaire hors site s'affirme non seulement comme une réponse technique aux défis du secteur du bâtiment, mais aussi comme un levier pour réinventer la manière de concevoir, de produire et d'habiter les espaces contemporains.

La montée de la construction modulaire hors site se base de plus en plus sur les technologies digitales et l'automatisation. Ces avancées révolutionnent toute la chaîne, allant de la conception à l'assemblage, sans oublier la production et la logistique.

Une étude publiée dans le Balkan Journal of Interdisciplinary Research (septembre 2024) démontre que l'association du BIM (Building Information Modeling) avec l'automatisation améliore considérablement la précision de la conception, favorise une production plus efficace

et perfectionne l'assemblage sur site : ces éléments contribuent à diminuer les déchets et l'impact carbone (Lluka, 2024).

Par ailleurs, l'incorporation de RFID (Radio Frequency Identification) et d'autres détecteurs dans les modules offre un suivi en direct tout au long du processus, garantissant une meilleure traçabilité et un contrôle qualité amélioré.

D'après une analyse exhaustive de MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute), l'utilisation de la robotique et de l'intelligence artificielle dans les usines modulaires autorise la réalisation de tâches récurrentes avec une précision améliorée, tout en diminuant le gaspillage (Díaz, 2024).

Une enquête de Construction Business Review (septembre 2024) atteste que l'automatisation robotisée pour la coupe, l'assemblage ou le soudage optimise la qualité, booste la rapidité de production et renforce la sécurité. Le suivi encadré par les nouvelles technologies transforme radicalement la logistique modulaire. Ces technologies facilitent la gestion du transport, de la manipulation et de l'installation des modules, contribuant ainsi à minimiser les erreurs et les dépenses (Construction Business Review, 2024).

1.1.3. Limites identifiées

Malgré la mise en avant fréquente de la construction modulaire hors site comme une réponse potentiellement efficace aux défis contemporains du secteur (délais, coûts, durabilité), son déploiement à grande échelle, notamment pour les structures de grande taille, reste encore limité. Dans une étude de 2020 parue dans la revue Sciences Appliquées, Li, Shen et al. ont analysé les difficultés majeures qui empêchent l'application de cette méthode dans les projets verticaux sophistiqués.

Cette étude se base sur une méthode précise en quatre phases : un examen de la littérature académique, des entretiens en groupe avec des spécialistes, une enquête par le biais d'un questionnaire destinée aux professionnels du domaine, et pour conclure, l'étude de cas d'un Ibis hôtel, hôtel modulaire de dix-huit niveaux bâti à Perth, en Australie. Cette méthode intégrée a abouti à l'élaboration d'une cartographie exhaustive des restrictions propres au modulaire de haute dimension.



Figure 6: Photographie de l'hôtel modulaire Ibis, à Perth, Australie

Parmi les obstacles les plus notables identifiés, on relève en premier lieu le déficit de coordination entre les divers intervenants du projet, entravant l'intégration harmonieuse des modules dès la phase de conception. Cette lacune en communication est amplifiée par une division des responsabilités et un manque de connaissance des procédures industrielles dans le domaine du bâtiment. En plus, il y a des coûts de départ considérable liés principalement aux systèmes de levage, au transport spécialisé et à la préfabrication de modules complexes sans assurance de commande préalable.

L'analyse souligne aussi des éléments structurels, comme le manque de politiques publiques encourageantes, l'inadéquation des standards et régulations actuels pour les bâtiments modulaires à hauteur, ainsi qu'un déficit général de compétences spécifiques, tant en design architectural que dans l'exécution technique. L'étude de cas à Perth met également en évidence les défis associés à la logistique (stockage, transport, assemblage vertical) et à la complexité des interconnexions structurelles et fonctionnelles entre les modules.

En réponse à ces observations, les auteurs suggèrent l'élaboration de normes spécifiques, une coordination améliorée grâce à des outils numériques tels que le BIM et l'approche DfMA (Design for Manufacture and Assembly), ainsi qu'un investissement dans la formation professionnelle pour guider la transition du secteur vers des pratiques plus industrielles.

Pour conclure, cette recherche révèle que le potentiel du modulaire de grande hauteur ne pourra être entièrement exploité sans une refonte systémique qui soit à la fois technique, réglementaire et organisationnelle. Elle offre des possibilités tangibles pour l'incorporation des principes d'industrialisation dans l'architecture verticale moderne, tout en soulignant que la modularité requiert une démarche intégrée dès les phases initiales du projet.

Un second point est un aspect crucial de l'architecture modulaire : l'homogénéisation des modules. Le 461 Dean à Brooklyn, reconnu en 2016 comme la plus grande tour résidentielle modulaire au monde avec ses 32 niveaux, illustre parfaitement ce concept (Figure 7). Conçu par SHoP Architects et mis en œuvre par Forest City Ratner, ce projet visait à démontrer l'efficacité de la préfabrication pour faire face à la crise du logement urbain : réduction des délais de construction de 18 mois, économies d'environ 20 %, et création de logements abordables dans un secteur immobilier fortement sollicité.



Figure 7: Photographie du 461 Dean, la plus haute tour modulaire de Brooklyn, New York

Toutefois, au lieu de répondre à ces attentes, le projet a subi un retard de deux ans et d'importants dépassements budgétaires. Le problème réside dans la complexité excessive des modules employés. En opposition aux fondements de la construction modulaire — qui se base sur l'utilisation répétée de pièces standardisées — le projet a exigé la création de 960 modules uniques pour répondre à la forme triangulaire du terrain et aux contraintes architecturales. Ainsi, chaque module se transformait en un élément presque unique, remettant en question les économies d'efficacité escomptées. Cette décision a engendré une surcharge logistique, compliqué l'assemblage sur place et perturbé les procédures de production en atelier.

Comme l'a admis le chef de la division modulaire chez Forest City : “ Dans notre quête de démontrer les possibilités infinies du modulaire, nous avons sûrement trop accentué la complexité. “ (Roger Krulak, 2016). Ce décalage entre la vision architecturale et la logique industrielle a également donné lieu à des frictions entre les partenaires, à des contentieux juridiques avec l'entreprise Skanska, et à une prise de contrôle forcée de l'usine de modules par Forest City pour finaliser le projet.

Cette expérience met en lumière une vérité fondamentale : la véritable efficacité de la construction modulaire est atteinte uniquement lorsqu'elle s'appuie sur des modules standardisés, récurrents et rationalisés. La normalisation offre non seulement un contrôle des coûts et des échéances, mais elle favorise également la qualité, la gestion logistique, l'assemblage et l'entretien. En revanche, une modularité trop divisée, élaborée spécifiquement pour chaque projet, compromet le processus industriel dans son ensemble et peut entraîner plus de complications qu'une construction conventionnelle.

À la suite de cet échec partiel, l'industrie en tire des enseignements. Des sociétés telles que FullStack Modular, qui sont nées de cette expérience, s'efforcent à présent de concevoir des bibliothèques de modules standardisés et optimisés pour diverses applications (Figure 8). Cette méthode privilégie une véritable industrialisation du bâtiment, basée sur des principes comparables à ceux de la production automobile ou aéronautique.

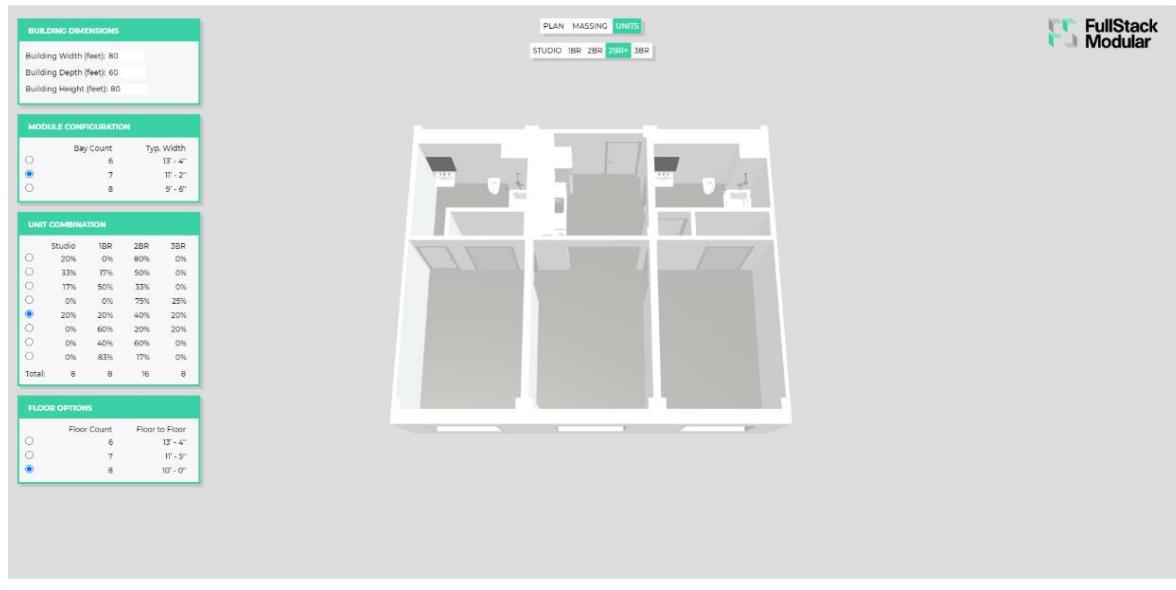


Figure 8: Capture d'écran du site : <https://www.fullstackmodular.com/process/> , démontrant la capacité de leur logiciel à associer leurs modules

Le cas du 461 Dean illustre que le succès d'un projet modulaire ne dépend pas uniquement de l'innovation technologique ou architecturale, mais surtout de la rigueur dans sa conception industrielle. La normalisation ne doit pas être considérée comme un obstacle à l'innovation, mais plutôt comme le fondement essentiel de l'efficacité, de la reproductibilité et de la viabilité financière du modèle modulaire, surtout en ce qui concerne les bâtiments de grande échelle.

1.2. Relation entre les normes DNSH et l'architecture modulaire hors site

Le concept de DNSH, qui signifie Do No Significant Harm (ne pas causer de tort significatif), a été introduit par l'Union européenne comme un élément central de ses politiques relatives à la transition écologique. Il s'appuie sur un principe essentiel : toute activité économique qualifiée de durable ne doit pas nuire à d'autres objectifs environnementaux. Le règlement (UE) 2020/852 du 18 juin 2020, également connu sous le nom de règlement sur la taxonomie verte, a formellement établi ce principe. Ce règlement définit un système commun de classification des activités économiques durables au sein de l'Union européenne.

Pour l'instant, il ne semble pas y avoir d'étude exhaustive qui se soit penchée de manière approfondie sur la compatibilité ou l'apport réel du modèle modulaire en ce qui concerne les exigences du DNSH. Les recherches existantes traitent de ces deux sujets de façon simultanée, mais les regroupent rarement, voire jamais, dans un contexte commun. Il existe donc un déficit documentaire et scientifique notable, d'autant plus que les décisions de construction doivent répondre aux critères réglementaires de la transition écologique.

Bien que la construction modulaire hors site soit présentée comme une solution innovante et durable – avec des réductions de coût jusqu'à 20 % (*McKinsey & Company*, 2019), de temps de construction jusqu'à 60 %, et des baisses considérables de déchets sur site (jusqu'à 50 %) (*Construction Durable*, 2023) ainsi que de carbone grise (jusqu'à 20 % de moins que le béton traditionnel) (*CORDIS*, 2017) – on observe une absence quasi totale de publications établissant un lien explicite avec le principe DNSH des politiques environnementales européennes.

Le DNSH, pourtant central dans la Taxonomie de l'UE et dans les réformes réglementaires environnementales (*Joint Research Centre*, 2023), reste peu mobilisé pour évaluer l'impact environnemental réel de la construction modulaire hors site, en dehors de quelques analyses générales. Cette lacune représente un véritable angle mort et potentiellement un champ de recherche innovant pour évaluer pleinement la durabilité de ces systèmes constructifs.

C'est cette absence manifeste de relation claire et documentée qui fait la pertinence de ce mémoire de fin d'études. En examinant les principes techniques et réglementaires du DNSH en relation avec les spécificités de la construction modulaire hors site, ce mémoire vise à révéler les points de convergence, les incompatibilités potentielles ainsi que les possibilités d'innovation. On cherchera notamment à examiner comment la préfabrication, la réversibilité, l'économie circulaire et la standardisation des modules peuvent satisfaire aux critères du DNSH, en termes de pollution, de biodiversité ou d'utilisation durable des ressources.

En répondant à cette lacune informationnelle, notre travail pourrait aider les intervenants du domaine, architectes, maîtres d'ouvrage, collectivités, bureaux d'études, dans leurs choix futurs en leur fournissant un cadre de référence explicite sur la jonction potentielle entre modularité et durabilité réglementaire.

1.3. Méthodologie et cadre de recherche

Afin de répondre à la problématique posé et compte tenu que le sujet n'a pas été abordé avant, et qu'ainsi aucune information n'est disponible pour étoffer ou comparer, une approche analytique en utilisant un cas d'étude général sera la méthode adoptée.

En effet, pour prouver la légitimité à l'architecture modulaire hors site à être une architecture durable, la meilleure façon de procéder est de constater les exigences environnementales récentes, qui sont le DNSH. Leur présence est relativement récente et le manque de connaissance générale sur le sujet permet d'avoir un avis critique sur la situation et éventuellement proposer des voies d'évolution ou de changements sur la pertinence du DNSH dans le secteur de la construction.

Des rendez-vous mensuels sont organisés afin d'échanger sur l'orientation du TFE et l'apport que celui-ci peut avoir pour l'entreprise. Le TFE donne l'opportunité à l'entreprise d'explorer un secteur en plein essor et mieux cibler les attentes concernant les nouvelles normes environnementales, favorisant de meilleures ventes. Plusieurs réunions concernent des demandes sur les informations pouvant être partagées pour appuyer les propos développés. D'autres pour des visites des locaux ainsi que des rencontres avec différents acteurs de l'entreprise du cas d'étude sont également prévues.

Pour obtenir des documents, un tableau excel regroupant chaque document attendu ainsi que leur priorité et leur moyen d'obtention est partagé avec le cas d'étude [annexe 1]. Après multiples discussions, certains documents ont pu être fournis et d'autres non, nécessitant des moyens trop considérables, soit c'est confidentiel ou alors ils ne l'ont tout simplement pas. Une explication est fourni au chapitre 7, partie 7.3.

Les documents fournis serviront au même titre que n'importe quelle source, permettant de justifier certains points nécessitant d'être approfondi en détail par des documents issus de professionnels du secteur du bâtiment. La démarche du TFE peut ainsi être reproduite quel que soit le cas d'étude d'architecture modulaire hors site choisi, les arguments et les conclusions seront similaires.

Par ailleurs, afin de mieux cerner les enjeux de la problématique, plusieurs entretiens sont organisés avec des professionnels du secteur de la construction, principalement issus du LUCID et de l'Université de Liège. L'objectif de ces interviews est de déterminer les thématiques prioritaires à aborder et d'évaluer la connaissance générale du DNSH et de l'architecture modulaire hors site parmi les professionnels du domaine.

Enfin, la recherche s'est appuyée sur un projet fictif de conception, visant à projeter l'application réelle du DNSH dans un programme de logement modulaire temporaire, réemployable et démontable. Cette démarche spéculative permet de tester la robustesse théorique du modèle modulaire face aux contraintes réglementaires réelles.

Chapitre 2. Architecture durable et normes environnementales

2.1. Définition de la construction/architecture durable

Il est complexe de définir ce qu'est l'architecture durable, certains expliquent qu'elle se positionne comme une extension des principes du développement durable, tels que spécifiés par le rapport Brundtland en 1987 : « un développement qui satisfait les besoins actuels sans mettre en péril la capacité des générations à venir à subvenir aux leurs » (Brundtland, 1987). Cette démarche, dans le domaine de la construction, a pour but de réduire l'impact environnemental des édifices tout en garantissant le confort, la santé et la rentabilité économiques du projet. D'après l'ADEME (2023), l'architecture durable peut être définie comme « une architecture qui préserve l'environnement, qui est économique en énergie et plaisante à vivre pour ses occupants, englobant toutes les dimensions du cycle de vie d'un bâtiment ». Cela implique une vision globale du bâtiment, qui couvre les phases de conception, construction, utilisation, rénovation et démolition.

Normativement, l'architecture écoresponsable est régie par divers standards environnementaux tels que HQE (Haute Qualité Environnementale), BREEAM (Royaume-Uni) ou LEED (États-Unis). Au niveau de l'Europe, le règlement (UE) 2020/852 relatif à la taxonomie verte exige, via le principe DNSH, que toute activité qualifiée de durable ne nuit pas de manière significative aux six critères environnementaux fixés par l'Union européenne (Commission européenne, 2020).

De plus, bon nombre d'architectes actuels soulignent l'importance culturelle et sociale de l'architecture durable. Par exemple, Norman Foster met en évidence que « la durabilité n'est pas une option, mais une condition indispensable de toute architecture contemporaine importante » (Foster, 2011). Cela témoigne d'un changement radical dans le rôle de l'architecte, qui doit allier progrès technologique, responsabilité sociétale et vision écologique. Pour conclure, l'architecture durable ne se cantonne pas à des méthodes ou des matériaux «verts» : elle représente une philosophie de conception qui prend en compte les enjeux écologiques, économiques et sociaux dans l'acte de construction. Dans un contexte de crise énergétique et climatique, elle constitue une réponse structurée, évolutive et quantifiable aux exigences de la transition écologique.

Avec une urbanisation accélérée, des crises immobilières et des transformations démographiques, l'architecture modulaire offre la souplesse nécessaire pour une réponse rapide à des exigences évolutives. Elle permet la construction de structures démontables, mobiles ou reconfigurables, ce qui facilite une gestion plus flexible du milieu urbain (Smith, 2010). Cette compétence est d'une grande valeur dans les cités où la pression foncière est forte ou qui nécessitent des solutions temporaires telles que des habitations d'urgence, des établissements scolaires modulaires ou des centres de santé provisoires.

Un des défis principaux en matière de durabilité sociale est l'accès équitable au logement. L'architecture modulaire permet la construction à grande échelle de logements sociaux ou abordables en minimisant les frais de production et les temps de livraison. Des initiatives telles

que les habitations modulaires pour les sans-abris à Londres ou Vancouver prouvent que ces configurations peuvent répondre à des crises sociales tout en préservant des normes de qualité et de dignité (Lawson et al., 2012). Cette méthode encourage aussi l'intégration sociale et appuie les politiques de réinsertion ou d'accueil des groupes marginalisés.

Sur le plan de l'urbanisme, la modularité hors site facilite une revitalisation rapide des friches urbaines, des terrains vacants ou des zones qui sont peu exploitées. Elle s'inscrit dans des initiatives de recyclage urbain et de densification modérée, en suggérant des approches temporaires ou semi-permanentes qui redynamisent les quartiers tout en prévenant des projets massifs et définitifs (Gibb & Pendlebury, 2006). Cette aptitude à « expérimenter » des applications et à évoluer au fil du temps stimule une ville réversible, adaptive et résiliente.

Habitat 67, conçu par l'architecte Moshe Safdie à l'occasion de l'Exposition universelle de Montréal en 1967, représente une des illustrations les plus symboliques de l'architecture modulaire conçue pour répondre aux enjeux urbains et sociaux liés au logement (Figure 9). Ce projet, imaginé comme une expérimentation radicale, prévoit dès les années 1960 des enjeux toujours pertinents : densification contrôlée, accès équitable à l'habitat confortable et intégration de la production industrialisée dans le milieu urbain.



Figure 9: Photographie de l'Habitat67 à Montréal, Canada

La méthode modulaire rend également plus aisée l'adoption citoyenne des espaces urbains. Certaines initiatives modulaires impliquent directement les résidents dans la création et l'utilisation des espaces grâce à des approches collaboratives telles que le design participatif ou les ateliers de co-conception. Cette approche consolide le tissu social, la gestion locale et la pérennité culturelle des actions urbaines (Anderson & Priestly, 2020).

Habitat 67 constitue effectivement un exemple significatif d'architecture modulaire, employant des modules préfabriqués qui sont montés sur site. Cependant, il ne se conforme pas entièrement au modèle actuel de construction modulaire hors site, qui est caractérisé par une approche standardisée, optimisée et axée sur la production à grande échelle. On peut donc qualifier le bâtiment de « modulaire », dans le sens où il est fabriqué en atelier puis assemblé sur place, mais il est plus expérimental que typiquement hors site en ce qui concerne sa méthode.

Le projet des appartements Juf Nienke, qui se trouve sur l'île de Centrumeiland à Amsterdam, illustre une interprétation moderne de l'architecture modulaire hors site en matière d'urbanisme et de cohésion sociale. Crée par RAU, SeARCH et DS Landscape Architects, le projet se base sur des modules préfabriqués en bois lamellé croisé (CLT), qui sont produits en usine et ensuite montés sur place. Cette approche accélère de façon significative le projet, diminue les désagréments dans un milieu urbain surpeuplé et restreint l'impact carbone de la construction (ArchDaily, 2022).



Figure 10 : Juf Nienke Apartments : modularité hors site au service de la ville et de la société

D'un point de vue urbanistique, l'édifice s'inscrit dans un quartier conçu pour résister aux modifications climatiques, doté d'infrastructures « rainproof » capables de gérer les pluies intenses et d'encourager la gestion durable des eaux. La structure semi-ouverte en arc, agrémentée de grandes fenêtres, établit une conversation entre l'espace privé et le territoire public. Le rez-de-chaussée, largement ouvert, héberge des zones polyvalentes (cafétéria,

ateliers, espaces communs) qui stimulent la vitalité du quartier et favorisent le développement économique local. Un jardin collectif surélevé, à la portée des résidents, joue le rôle de poumon vert partagé, favorisant la biodiversité et les échanges sociaux (ArchDaily, 2022).

D'un point de vue communautaire, Juf Nienke offre 61 logements locatifs à prix raisonnable et de qualité, conçus pour héberger une population variée. Les espaces communs favorisent les interactions, l'assistance mutuelle et la formation d'une communauté, brisant l'isolement généralement lié aux grands complexes résidentiels. L'édification modulaire en dehors du site facilite également la prévision de la déconstruction et de la réutilisation des modules, augmentant par conséquent la valeur sociale et économique du bâtiment sur le long terme (ArchDaily, 2022).

En alliant efficacité de construction, intégration dans le paysage urbain et bénéfice social positif, les appartements Juf Nienke illustrent la capacité de l'architecture modulaire hors site à servir d'instrument puissant pour des villes durables, inclusives et résilientes.

Cependant, dans le cadre de ce travail, le focus sera porté sur les aspects techniques et non les aspects sociétaux de l'architecture modulaire hors site, qui est aussi un sujet d'actualité mais trop exhaustif pour être abordé en détail, dans ce TFE.

2.2. Les normes DNSH : ces origines, ces objectifs et ces six critères

Bien que récemment structuré au sein des politiques européennes, le principe DNSH trouve ses racines dans une tradition plus ancienne de réflexion environnementale et de régulation durable. Ce n'est pas une idée entièrement inédite, mais plutôt une structuration juridique d'une série de principes éthiques, scientifiques et réglementaires qui se sont progressivement manifestés depuis les années 1970.

Le concept de DNSH trouve son origine dans l'émergence des inquiétudes écologiques dans les années 1970, une époque marquée par le rapport « Limits to Growth » du Club de Rome (1972) ainsi que les premières rencontres internationales sur l'environnement, notamment la Conférence de Stockholm (1972). Ces événements établissent le principe selon lequel l'expansion économique doit se réaliser sans nuire aux écosystèmes.

De nombreux principes du droit environnemental international ont ouvert la voie au DNSH :

- Lors du Sommet de Rio (1992), le concept de précaution a été établi, préconisant de prendre des mesures même face à une incertitude scientifique si un risque de préjudice sérieux à l'environnement est présumé.
- Le concept de prévention exige d'intervenir en amont pour empêcher la pollution au lieu de simplement rectifier ses effets.
- Le concept de non-régression, plus actuel, vise à éviter toute régression des normes environnementales en vigueur.
- Pour finir, le concept d'intégration impose que la sauvegarde de l'environnement soit incorporée dans chacune des politiques sectorielles (article 11 du Traité sur le fonctionnement de l'Union européenne).

Ces principes ont été progressivement transposés dans les législations européennes et nationales, créant un socle favorable à l'émergence du DNSH.

L'introduction explicite du DNSH par le règlement (UE) 2020/852, connu sous le nom de règlement sur la taxonomie, constitue une véritable étape charnière. Selon l'article 17, ce principe est défini comme l'obligation qu'une activité économique ne doit pas causer de dommage notable à l'un des six critères environnementaux établis par l'Union européenne.

Ce principe s'est imposé comme un élément clé dans plusieurs politiques de l'Union européenne, en particulier :

- le Mécanisme pour la relance et la résilience (MRR)
- les initiatives soutenues par les fonds de l'Union européenne (NextGenerationEU, Horizon Europe, etc.)
- l'évaluation de la durabilité des sociétés selon la CSRD (Directive sur le Reporting de Durabilité des Entreprises)

Au-delà des cadres européens, des organisations telles que l'OCDE, le PNUE ou la Banque mondiale ont encouragé des directives qui influencent de manière indirecte le DNSH. L'OCDE,

en particulier à travers ses travaux sur l'évaluation environnementale stratégique (1991-2006), défend l'examen des impacts négatifs significatifs comme étape préliminaire à la planification de projets.

D'après ce décret, on peut considérer une activité comme « durable » si elle favorise de façon importante l'un des six buts environnementaux définis par la taxonomie, sans nuire de façon notable aux cinq restants.

Les six critères comprennent (Règlement UE 2020/852, article 9) voir (Figure 11). :

- (1) la limitation du réchauffement climatique,**
- (2) l'ajustement au réchauffement climatique,**
- (3) le recours durable et la sauvegarde des ressources aquatiques et marines,**
- (4) le passage à une économie circulaire,**
- (5) l'évitement et la diminution de la pollution**
- (6) la défense de la biodiversité ainsi que des écosystèmes**

L'approche DNSH a été établie pour assurer la cohérence écologique des investissements. Depuis 2021, il est devenu essentiel pour les projets financés dans le cadre du plan européen de relance NextGenerationEU, notamment pour le Mécanisme pour la Relance et la Résilience (MRR), de se conformer à ce critère (Commission européenne, 2021). Par exemple, selon le plan de relance français, chaque projet soutenu par l'État est tenu de prouver, en se basant sur un cadre technique, qu'il adhère au principe DNSH. Cette condition a aussi été prise en compte dans d'autres fonds européens comme Horizon Europe, le FEDER ou le Fonds social pour le climat (France Relance).

EXPLICATION DES 6 OBJECTIFS



Figure 11:slide issu d'une présentation du Réseau interfédéral DNSH. Le principe du DNSH : application au secteur de la construction et de l'installation

En pratique, le DNSH impose aux initiateurs de projets de justifier l'absence d'impact environnemental défavorable notable en s'appuyant sur des études de cycle de vie, des évaluations d'impact environnemental ou des normes techniques sectorielles. La Commission européenne a émis des directives pour clarifier l'application du principe par domaine (Commission européenne, 2022).

En dépit de ses aspirations audacieuses, le DNSH est confronté à quelques critiques et contraintes. D'une part, beaucoup d'intervenants se plaignent de la complexité des normes techniques établies dans les actes délégués de la taxonomie, fréquemment considérées comme peu claires ou ardues à mettre en œuvre, en particulier pour les PME (Institut de l'économie pour le climat [I4CE], 2022). Par ailleurs, les procédures de contrôle sont complexes et les méthodes peuvent différer d'un État membre à l'autre, conduisant à des disparités dans le traitement. En définitive, le DNSH n'assure pas à lui seul la viabilité totale d'un projet : il prévient un dommage significatif, mais ne suffit pas à prouver un profit net sur le plan environnemental.

Toutefois, le DNSH représente un progrès significatif dans l'organisation de la finance verte en Europe. C'est un outil essentiel pour diriger les flux financiers vers des initiatives véritablement en phase avec les objectifs de carboneutralité et de résilience écologique, tout en combattant le greenwashing. Dans le futur, son périmètre devrait se développer, en relation avec la directive CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive), qui exige des grandes entreprises qu'elles divulguent des renseignements sur les conséquences environnementales de leurs opérations, y compris en rapport avec la taxonomie européenne.

2.3. Focus sur le formulaire DNSH de la SPW

Dans le cadre de ce travail, le cas d'étude a gracieusement partagé deux documents publics, mais seulement partagé à ceux qui répondent à l'appel d'offre. Il s'agit d'un marché public donc les documents ne sont pas confidentiels. Les documents sont présents en Annexe 2. Le formulaire a été rédigé par la SPW IAS (intérieur et action sociale) avec la participation du pouvoir subsidiant puis est envoyé au bénéficiaire de la subvention, après avoir répondu aux exigences, le renvoie au SPW IAS.

Ce projet est soumis aux normes environnementales du règlement européen DNSH, en accord avec les directives de la Facilité pour la Reprise et la Résilience. Les deux documents fournis, à savoir le Formulaire DNSH et le Tableau d'analyse des risques et de suivi, sont les fondements de la stratégie de conformité environnementale du projet.

Le Formulaire DNSH offre une étude approfondie de l'incidence potentielle du projet sur les six buts environnementaux établis par l'Union européenne : l'atténuation et l'adaptation au changement climatique, la sauvegarde des ressources aquatiques et maritimes, le passage à une économie circulaire, la lutte contre la pollution et la préservation de la biodiversité. Pour chaque objectif, le document repère les dangers, les stratégies d'atténuation établies et les mesures de suivi programmées. Il est évident que le projet vise des performances énergétiques hautement ambitieuses (valeurs PEB K=21 et Ew=31) en s'appuyant sur une isolation avancée, un système de ventilation à double flux, un chauffage par pompe à chaleur, l'emploi de matériaux biosourcés et recyclables, sans oublier l'éventuelle utilisation d'énergie solaire.

De plus, la prise en compte de l'adaptation au changement climatique se manifeste par des mesures préventives contre les surchauffes (inertie thermique élevée, protections solaires passives) et la régulation des eaux de pluie (citernes de collecte, drainage, surfaces perméables). Le projet se caractérise également par une vision circulaire : construction en usine avec des éléments modulables, des matériaux démontables, recyclables et certifiés durables, ainsi qu'une gestion planifiée et contrôlée des déchets.

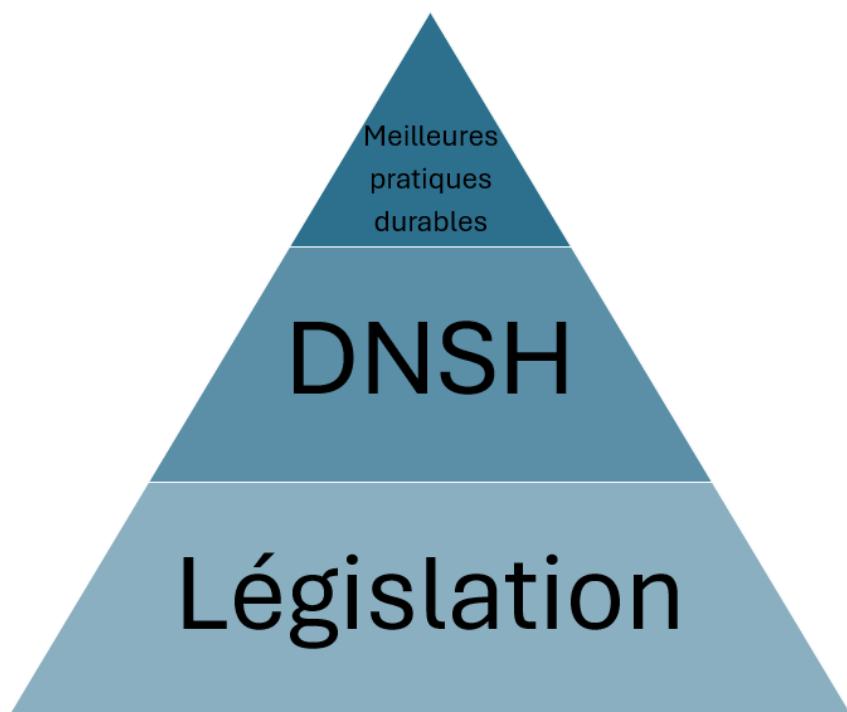
Un tableau d'analyse des risques et de suivi vient enrichir le formulaire en offrant une perspective opérationnelle sur les engagements pris. Il traduit les buts environnementaux en risques tangibles, explicite les actions techniques choisies pour chaque étape du projet (de la phase préparatoire à la phase post-construction) et indique les justificatifs à fournir (essais, attestations, photos, comptes-rendus). Ce tableau est un instrument de suivi pour garantir que chaque engagement DNSH est appliqué, vérifié, enregistré et maintenu à long terme. On accorde une importance majeure à la tenue d'un dossier DNSH exhaustif sur une durée de 10 ans, afin d'assurer la traçabilité et la transparence en cas d'audit.

Même si le formulaire montre une détermination claire à suivre les principes de développement durable, il comporte des insuffisances qui entravent sa conformité totale avec les normes européennes dans ce domaine. Lors d'une discussion avec Monsieur Hugo Jamin, expert DNSH à la SPW, plusieurs points contradictoires à la philosophie du DNSH ont été soulevés :

Certaines thématiques sont abordées de façon partielle. Par exemple, des thèmes tels que la lutte contre la pollution ou la sauvegarde de la biodiversité sont rarement abordés, alors qu'ils représentent des buts environnementaux à part entière selon le règlement européen. En outre, l'appréciation des impacts indirects ou des effets à long terme - y compris ceux en rapport avec la fin de vie du bâtiment ou l'origine des matériaux - demeure très superficielle, voire inexistante. Le principe DNSH requiert une évaluation tout au long du cycle de vie du projet, depuis la phase de conception jusqu'à celle de démolition.

De plus, une incorporation de plus grand nombre de données quantifiables et authentifiables serait bénéfique pour le formulaire. Même si certaines performances sont citées (comme les valeurs PEB ou les coefficients d'isolation), d'autres indicateurs demeurent vagues, sans mention précise de niveaux atteints, de quantités économisées ou d'impact diminué. Cette absence de chiffrage restreint la clarté du document et complique la validation des promesses.

Pour ce qui est de la forme, le questionnaire manque de rigueur. Certaines sections sont abordées de manière trop superficielle, avec des explications très restreintes ou des formulations standardisées. Cela va à l'encontre des directives officielles, qui demandent des réponses précises, argumentées et adaptées à chaque objectif environnemental. De plus, certaines exigences vont au-delà de ce qu'exige le DNSH ou la Taxonomie tel que l'exigence de matériaux biosourcés. Même si cela va dans le sens d'une architecture durable, certains pouvoirs subsidiant en profitent pour demander des exigences personnelles au nom du DNSH. Le DNSH encourage les entreprises à concevoir de manière durable sans pour autant « imposer » comme une loi mais avec plus de poids que de meilleures pratiques durables (Figure 12).



En résumé, bien que le formulaire DNSH mette en avant de nombreuses intentions positives et plusieurs actions appropriées, il n'est pas entièrement satisfaisant en termes de structure, de précision et d'exhaustivité. Pour satisfaire pleinement les exigences européennes, une version plus détaillée, technique et argumentée serait indispensable.

Chapitre 3. Architecture modulaire hors site

3.1. Définition et principes techniques de l'architecture modulaire hors site

La construction modulaire hors site, également connue sous le nom de construction modulaire industrialisée, fait référence à une méthode de construction où les composants d'un édifice sont produits dans un milieu maîtrisé, généralement une usine, avant leur transport et leur assemblage sur le lieu définitif. Cette approche vise à rationaliser et industrialiser la construction, contrairement aux techniques traditionnelles sur site. À l'opposé d'une perception courante, la modularité ne brime pas l'inventivité architecturale ; elle offre plutôt une souplesse de conception tout en procurant des avantages notables en termes de temps, de dépenses, de qualité et de pérennité (Smith, 2010).

D'un point de vue technique, la construction modulaire s'appuie sur divers principes essentiels. La première approche est la décomposition de la conception architecturale en modules, qui implique de segmenter un bâtiment en unités standard fabriquées de manière indépendante. Selon Lawson, Ogden et Goodier (2014), ces modules peuvent être de nature tridimensionnelle (volumétrique), bidimensionnelle (panneaux 2D), ou hybride, fusionnant les deux méthodes. Chaque module est élaboré de façon indépendante et intègre généralement les composantes structurelles, les parois, les finitions, les installations techniques (plomberie, électricité, ventilation) ainsi que l'isolant thermique et phonique. La normalisation offre l'opportunité d'optimiser les processus de fabrication, de minimiser les erreurs et de simplifier le montage sur place.

Le travail hors site permet des conditions de travail plus sécurisées et plus performantes, en offrant une meilleure gestion de la qualité grâce à un contrôle effectué en usine. Cela contribue à minimiser les résidus de construction, les nuisances sonores et les retards sur le chantier, étant donné que la production en usine peut se dérouler simultanément avec les préparatifs du site. D'après Gibb & Pendlebury (2006), cette approche a le potentiel de diminuer le temps de construction global jusqu'à 50%, selon la complexité du projet.

Un autre principe fondamental est l'incorporation des systèmes techniques au sein des modules. Les équipements électriques, sanitaires, de chauffage ou de climatisation peuvent être prééquipés en usine, réduisant ainsi les opérations nécessaires sur le lieu d'installation ultérieurement. Cela requiert une synchronisation minutieuse entre les diverses disciplines du projet, ce qui est généralement rendu plus aisés par l'emploi d'outils numériques tels que le BIM (Modélisation de l'information du bâtiment). Le BIM offre une modélisation digitale intégrale du projet, prévoyant les interfaces, les liaisons techniques et les marges de montage (Kamar et al., 2011).

L'approche modulaire nécessite aussi une considération particulière des contraintes logistiques et structurelles. Les modules doivent être assez résistants pour supporter le transport et la manipulation. Leurs dimensions sont généralement contraintes par les restrictions relatives aux transports routiers, ce qui a un impact sur la conception architecturale et l'approche de montage. De plus, l'interaction entre les modules doit assurer la continuité de la structure, l'étanchéité à

l'air et à l'eau, et le respect des standards acoustiques et thermiques locaux (Lawson et al., 2014).

En définitive, la construction modulaire hors site correspond parfaitement aux objectifs de développement durable. Elle participe à la diminution globale de l'empreinte écologique du bâtiment en minimisant les déchets, en faisant baisser les émissions associées aux déplacements et à la gestion des sites de construction, et en maximisant l'exploitation des ressources. Elle contribue aussi à optimiser la qualité de la mise en œuvre, tout en proposant des solutions plus promptes pour satisfaire des exigences pressantes (habitations, établissements scolaires, hôpitaux, etc.).

3.2. Processus de fabrication

La fabrication suit un processus spécifique, incluant la conception modulaire intégrée (généralement aidée par le BIM), la production industrielle des composants, leur transport et logistique, jusqu'à leur assemblage rapide sur place.

Ce système de construction se base sur divers niveaux de modularité, organisant la structure du système constructif de façon hiérarchique. Au niveau initial, on retrouve des éléments de base tels que les fixations, les isolants ou les profilés en métal. Ces éléments fondamentaux sont indispensables à la réalisation, mais n'ont pas d'autonomie opérationnelle. Au niveau secondaire, on trouve les éléments intégrés, qui sont des composants dotés d'une fonction précise, tels qu'un mur préfabriqué, une façade vitrée déjà assemblée ou un plafond technique. Ce niveau facilite la combinaison de fonctions structurelles, thermiques et esthétiques au sein d'une seule entité constructible (Pan & Sidwell, 2011).

Le troisième niveau concerne les montages en trois dimensions, ou modules finis, tels que des salles, cuisines ou blocs de sanitaire. Ces modules sont habituellement indépendants, produits en usine avec leurs systèmes techniques incorporés, et sont aptes à être superposés ou montés sur le site de construction (Figure 13).

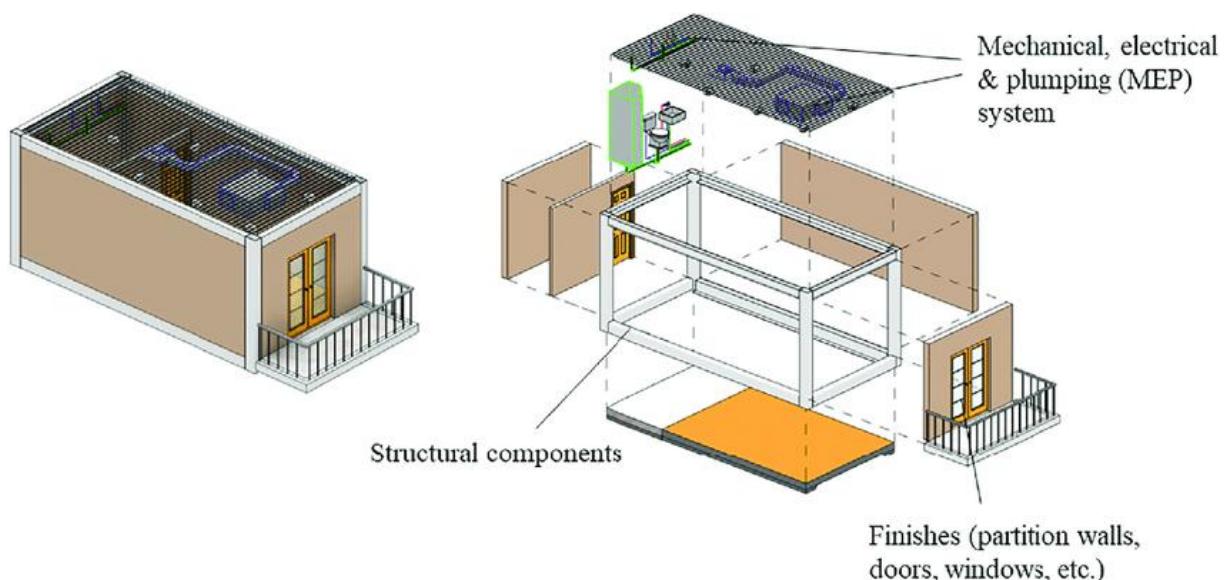


Figure 13: Schéma représentant comment différents composants définissent un module (Chen et al., 2022.)

Finalement, le niveau ultime est celui du système global, où tous les modules, une fois assemblés, constituent un édifice complet et cohérent qui respecte les normes et critères architecturaux. Cette stratification offre la possibilité de fusionner personnalisation et normalisation, élément essentiel de la modularité mise en œuvre dans la construction (Gbadamosi et al., 2021).

Un des principaux atouts de cette approche modulaire est sa possibilité d'incorporer des stratégies durables. Dans une usine, l'utilisation des matériaux est optimisée, la gestion des déchets est améliorée et les conditions de travail sont davantage sécurisées. De plus, les structures modulaires peuvent être fabriquées de manière à pouvoir être démontées, transportées ou réassemblées, favorisant ainsi une longévité accrue et une meilleure circularité des ressources (Courgeon et al., 2022). Cette souplesse est en accord avec les principes de l'économie circulaire, qui sont de plus en plus appréciés dans les politiques publiques du secteur de la construction.

3.3. Assemblage

Le bâtiment hors site basé sur une architecture modulaire est une technique de construction où la plus grande partie de l'édifice est réalisée en usine (Figure 14), sous forme de modules tridimensionnels préfabriqués, qui sont par la suite acheminés et montés sur le lieu de construction. Cette méthode se caractérise par son exactitude industrielle, sa vitesse de mise en œuvre et sa faculté à minimiser les perturbations sur le lieu même (NEC, 2018). La planification méthodique de la distribution des responsabilités entre l'usine et le chantier vise à optimiser la qualité, les délais et les coûts.



Figure 14: Vue intérieure d'un atelier industriel où sont fabriqués les modules (Intelligent Offsite (UK) – usine de modules modulaires)

La production modulaire commence par une étape de conception rigoureuse, souvent soutenue par des instruments de modélisation numérique, comme le BIM, facilitant la division du projet en modules adaptés aux exigences de transport et de montage (Construction hors site, 2025). Une fois les projets approuvés, l'organisation de la production en usine se fait à travers des lignes de fabrication spécialisées.

Les structures des modules, qu'elles soient en acier ou en bois, sont d'abord assemblées sur des stations spécifiques, assurant ainsi le respect de tolérances dimensionnelles strictes. La pose de panneaux de parement et l'intégration de matériaux isolants suivent, le tout se déroulant dans un environnement à l'abri des intempéries. En même temps, les installations techniques (comme l'électricité, la plomberie et la ventilation) sont déjà intégrées dans les modules, ce qui réduit les besoins d'intervention sur le lieu de construction (VBC, 2025). Selon le degré de finition désiré, l'intérieur des modules peut être fourni complètement aménagé, incluant les

sols, les plafonds, les menuiseries, les équipements sanitaires et même le mobilier permanent (Figure 15) (The Offsite Guide, 2025).

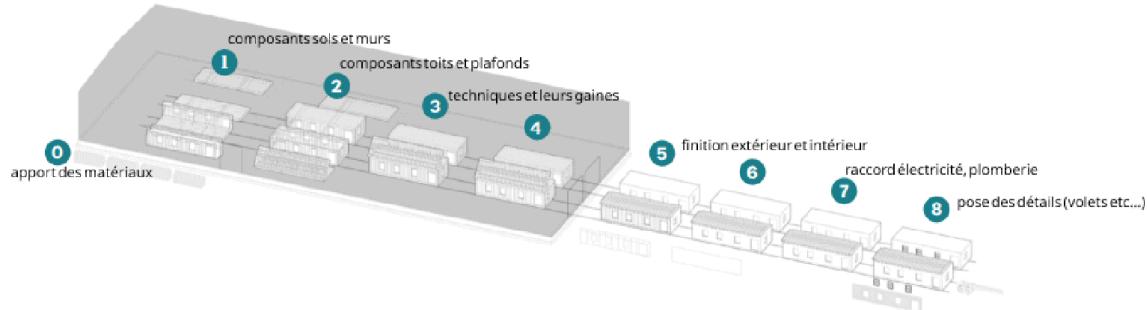


Figure 15: Schéma des différentes étapes d'assemblage d'une construction modulaire hors site (Modular Building Institute (MBI))

Un contrôle qualité est effectué à chaque étape de la chaîne, assurant la conformité des modules aux normes techniques et réglementaires. Cette production en environnement maîtrisé permet de réduire drastiquement les aléas liés aux conditions climatiques, d'améliorer la productivité, tout en limitant les pertes de matériaux et les déchets (Billing Engineer, 2025).

Après l'achèvement des modules, l'étape logistique s'avère cruciale. Chaque module est méticuleusement sécurisé pour le transport et acheminé sur des remorques appropriées, tout en respectant les limites dimensionnelles imposées par les voies routières (Billing Engineer, 2025). La livraison est coordonnée avec le progrès du chantier pour optimiser les flux et minimiser l'entreposage sur place (VBC, 2025).

Sur le site de construction, les fondations ont été mises en place à l'avance, généralement en parallèle avec la production des modules à l'usine. Cette prévision contribue à une diminution significative des délais totaux du projet (NEC, 2018). Les fondations, qu'elles soient de type semelles filantes, plots ou poutres porteuses, sont exécutées avec une grande précision pour faciliter l'installation des modules.

L'installation sur place débute par l'élévation des modules grâce à des grues mobiles (Figure 16). Chaque module est placé sur les points d'ancrage prévus, ajusté et fixé mécaniquement afin de garantir la stabilité et l'intégrité de l'ensemble (The Offsite Guide, 2025). On accorde une attention spéciale à l'étanchéité des raccords entre les modules, en utilisant des joints spécifiques et des bandes d'étanchéité fournies par le fabricant.



Figure 16: un module en cours d'assemblage sur un chantier (The Code Authority® (UL) – construction modulaire levée par grue)

Les finitions effectuées sur place sont restreintes et se focalisent essentiellement sur des modifications esthétiques ou fonctionnelles : retouches de peinture, installation de revêtements de sol particuliers, modifications de menuiseries ou d'éléments décoratifs (McAvoy Group, 2025). Une fois ces tâches terminées, une évaluation finale est réalisée en collaboration avec le maître d'œuvre afin de contrôler la qualité globale et résoudre les possibles réserves (NEC, 2018). Cette approche offre une diminution notable des temps d'exécution comparativement à la construction conventionnelle.

On procède ensuite à la connexion des réseaux techniques (électricité, plomberie, ventilation) aux divers modules ainsi qu'aux réseaux principaux du bâtiment (EDF, eau, évacuations, etc.). Ces interventions sont réduites au maximum, étant donné que la plupart des installations ont été prévues en usine (Billing Engineer, 2025). Des vérifications opérationnelles, telles que les tests d'étanchéité des réseaux ou la mise sous tension des circuits électriques, sont effectuées afin de confirmer la conformité des installations (VBC, 2025).

3.4. Transport

La livraison des modules de grande taille nécessite une logistique avancée, conçue pour gérer des unités généralement de grande dimension et pesantes. Les modules sont généralement acheminés de l'usine au site de construction à l'aide de camions spécialisés (semi-remorques extensibles, remorques à plusieurs essieux, remorques hydrauliques autonomes conçus pour répartir la charge et assurer une stabilité pendant le transport. (*Modular Construction Transport: Pre-Fabricated Buildings Made Easy*, 2025)

Avant l'expédition, les modules sont généralement soigneusement empaquetés ou couverts pour les protéger des éléments (film thermique, housses, bâches techniques), dans le but de maintenir la qualité des finitions et des installations internes.

La planification logistique est cruciale : l'obtention de permis pour des convois exceptionnels, la présence d'escortes (voitures de tête) et le choix d'un itinéraire optimisé (éviter les zones urbaines étroites, les ponts bas, les virages serrés) sont des phases indispensables. Ci-dessous, un exemple de planification du projet, démontrant comment l'espace est utilisé pour acheminer et stocker plusieurs modules (Figure 17).

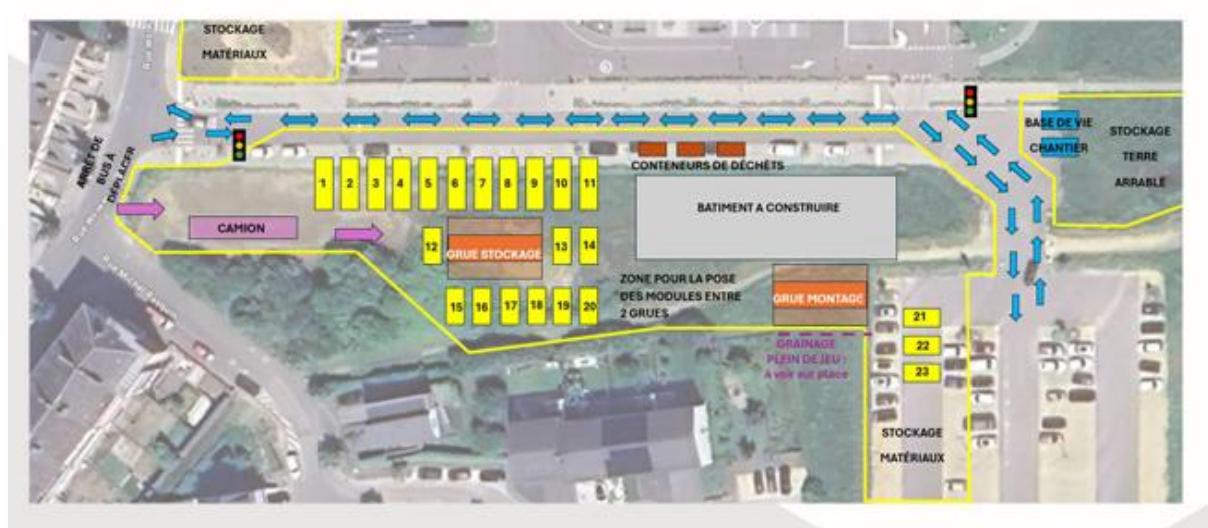


Figure 17: Plan de planification du chantier "ecole de Um bock" de Degotte

Le déplacement des modules préfabriqués représente une phase essentielle dans le processus de construction modulaire hors site. En Belgique, avec une attention particulière à la Wallonie, ce mode de transport est régi par des règles rigoureuses concernant les dimensions, le poids et les conditions de circulation. Ces contraintes ont un impact direct sur la conception des modules pour garantir leur mobilité sans avoir besoin constant d'autorisations spécifiques.

Une largeur de 2,55 mètres (ou 2,60 mètres s'il s'agit d'un véhicule frigorifique), et la hauteur totale ne doit pas être supérieure à 4,00 mètres (ITF, 2022). La longueur maximale dépend du genre de convoi : un tracteur avec semi-remorque peut mesurer jusqu'à 16,50 mètres, alors qu'un ensemble articulé peut s'étendre jusqu'à 18,75 mètres (Euro-Trafic, 2025). Concernant le poids maximal autorisé, il peut monter jusqu'à 44 tonnes pour les convois équipés de cinq

essieux ou plus, à condition de se conformer à certaines configurations techniques (SPW Mobilité et Infrastructures, 2023).

Ces standards justifient que la plupart des modules produits en usine soient conçus pour ne pas dépasser ces limites. En général, un module standard mesure entre 2,40 et 2,55 mètres de largeur, de 3,80 à 4,00 mètres de hauteur (équipements de toiture inclus), et possède une longueur allant de 12 à 16 mètres. La masse globale d'un module complet fluctue entre 15 et 30 tonnes, en fonction des matériaux employés, du degré de finition et de l'incorporation des systèmes techniques (Liew, Chua & Dai, 2019).

Si ces limites sont franchies, une autorisation pour un transport exceptionnel est nécessaire. En Wallonie, c'est le SPW Mobilité et Infrastructures qui supervise ce processus, réclamant la présentation d'un dossier complet comprenant les trajets projetés, les horaires de passage, ainsi que les dispositions de sécurité prévues (SPW Mobilité et Infrastructures, 2023). Cette approche pourrait se révéler onéreuse et restrictive, ce qui explique une inclination pour les modules « compatibles avec le transport » dans les projets en cours.

En définitive, la logistique de transport fait souvent appel à des semi-remorques renforcés ou surbaissés, qui permettent d'assurer la stabilité de la charge tout en respectant les dimensions maximales autorisées. L'option de faire appel à des transporteurs spécialisés est essentielle pour garantir la sécurité des déplacements et le respect des échéances de livraison. Les trajets sont aussi organisés en tenant compte des restrictions liées à la hauteur des ponts, à la largeur des routes et aux conditions d'accès aux chantiers en milieu urbain.

3.5. Avantages durables

Le secteur de la construction témoigne d'un intérêt grandissant pour l'architecture modulaire hors site, grâce à ses multiples avantages écologiques et économiques. En industrialisant la construction des édifices, elle satisfait à des critères de durabilité et d'efficacité qui sont désormais primordiaux dans un cadre de transition écologique. Cependant, cette approche n'est pas exempte de contraintes et soulève des questions techniques, réglementaires et culturelles qui conditionnent son déploiement à grande échelle.

L'architecture modulaire délocalisée favorise à la fois une diminution importante de l'empreinte carbone et un contrôle des déchets. Des initiatives exemplaires tel que la cité U «Wood Up» à Paris Rive Gauche (Figure 18) illustre une diminution de 50% des émissions de CO₂ en recourant à des matériaux renouvelables ou recyclés et par la valorisation des déchets. (Archimodulaire, 2025) La préfabrication en atelier permet une découpe optimale et diminue le gaspillage, tout en promouvant l'emploi de matériaux biosourcés tels que le bois, l'acier recyclé et le béton recyclé

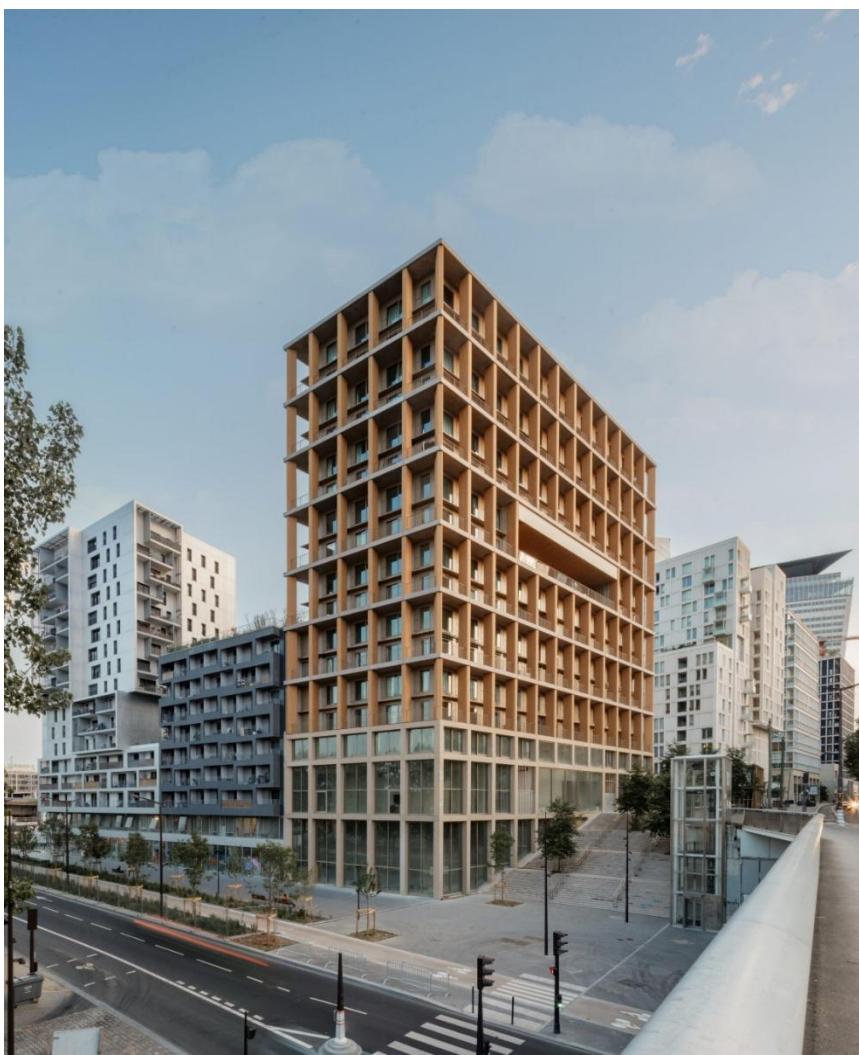


Figure 18: Photographie de la cité U « Wood UP » à Paris rive gauche, composé de modules uniquement en bois

Le projet Synapses, situé à Courbevoie dans le quartier de La Défense, représente le premier édifice entièrement modulaire en bois en France (Figure 19). Il a été élaboré dans le contexte

de l'appel à projets « Empreintes », qui a pour objectif de favoriser des initiatives urbaines novatrices et respectueuses de l'environnement. L'idée centrale était de concevoir un édifice modulable, écologique et parfaitement intégré à son cadre urbain, tout en répondant à la demande grandissante de logement flexible et collectif (GA Smart Building, 2025).



Figure 19 : Rendu 3D du projet "Synapses"

Ce projet est le résultat d'une coopération entre différents acteurs : GA Smart Building et Pitch Immo agissant en qualité de maîtres d'ouvrage, l'Atelier(s) Alfonso Femia pour les travaux d'architecture et d'urbanisme, Ossabois pour la production des modules en bois, CDC Habitat comme investisseur, ainsi que TERRELL Group, CET Ingénierie et ELIOTH by Egis pour les prestations de bureaux d'études. Merci Raymond a garanti l'aménagement végétal. Cette collaboration a abouti à la création d'un édifice qui est à la fois pratique, beau et durable (GA Smart Building, 2025).

D'un point de vue architectural, l'édifice est constitué de deux tours jointes par une base commune, proposant une superficie globale de 8 000 m². Des espaces commerciaux et des services de proximité sont incorporés dans le socle, alors que les tours sont réservées à des habitations en coliving. Cette configuration encourage la diversité fonctionnelle et sociale, et répond à l'augmentation de la demande pour des espaces de vie flexibles et agréables (GA Smart Building, sans date).

Synapses se démarque par ses résultats en matière d'environnement. L'ensemble de la structure est conçu en bois labellisé FSC, ce qui assure un impact carbone réduit et l'option de recyclage des matériaux. Près de 30 % des matériaux sont issus du recyclage. Le bâtiment est conforme aux normes RE2020, possédant une enveloppe thermique efficace et des systèmes de ventilation

améliorés. Finalement, 3 250 m² de zones vertes ont été intégrés, contribuant à la biodiversité et au bien-être des résidents (GA Smart Building, 2025).

L'élément de construction hors site a constitué un avantage prédominant du projet. Ossabois a préfabriqué les modules en usine, qui ont ensuite été montés sur place en seulement 17 mois. Cette approche a considérablement diminué les temps de construction, les désagréments sur le lieu de travail et les résidus produits, réduisant ces derniers de 30 à 40 % grâce à l'utilisation de la préfabrication (GA Smart Building, sans date).

Synapses, par son impact urbain et social, participe à la régénération de l'axe reliant La Défense au cœur de Courbevoie. Le projet encourage la diversité sociale et fonctionnelle en réunissant des espaces résidentiels, professionnels et de services en un seul endroit, tout en offrant une habitation adaptable et pérenne aux résidents (GA Smart Building, 2025).

La construction modulaire incorpore aussi des méthodes circulaires : certains modules sont pensés pour être démontés, remis à neuf ou réutilisés, prolongeant de ce fait leur longévité et réduisant la consommation de ressources inédites (Campus Hors Site, 2025). Ce modèle adhère au principe DNSH, en épargnant les dégâts environnementaux majeurs, en protégeant les sols et en restreignant l'artificialisation des terrains.

La préfabrication favorise dès la conception des performances énergétiques supérieures : l'étanchéité à l'air, une isolation thermique optimisée, l'incorporation de systèmes domotiques intelligents (BMS), voire d'énergies renouvelables (solaire, ventilation de haute efficacité), contribuent à optimiser le bilan énergétique global des modules (Construction21, 2023). Ces modules sont facilement conformes aux certifications HQE, BREEAM ou LEED, en adéquation avec les buts de construction durable (Immodurable, 2024).

Finalement, l'harmonisation des processus, en particulier par le biais de systèmes mixtes bois-acier (Figure 20), associe la capacité d'accumulation de carbone du bois à la recyclabilité de l'acier (pouvant atteindre 99 %) pour réduire les émissions et améliorer l'utilisation des ressources (Infogreen, 2024)

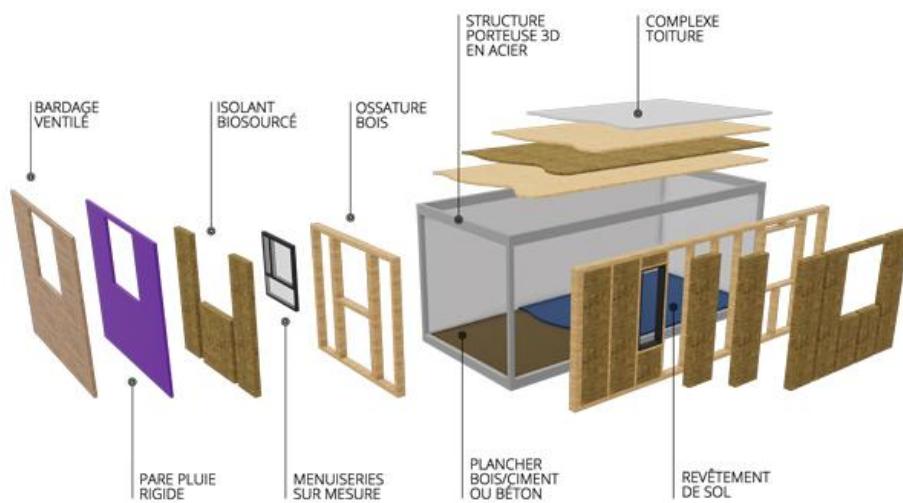


Figure 20: exemple d'architecture modulaire hors site acier-bois, (site Avelis)

3.6. Limites et enjeux

En dépit de ses avantages, l'approche modulaire fait toujours face à des défis logistiques et techniques. Les modules doivent se conformer à des dimensions routières généralement restreintes (environ 3,5 m de largeur), ce qui limite certaines conceptions architecturales et complique leur transport vers le lieu de construction (Construction hors site, 2025).

Les interfaces entre les modules, qu'il s'agisse d'aspects structurels, acoustiques ou thermiques, risquent de montrer des vulnérabilités si la coordination BIM ou la préfabrication ne sont pas à la hauteur, ce qui pourrait engendrer des problèmes sur le long terme.

L'élément économique demeure fluctuant : les dépenses sont maîtrisées dans les projets récurrents ou modulaires, cependant pour des constructions singulières ou intensément sur-mesure, les frais d'ingénierie et de personnalisation peuvent annuler les avantages de la fabrication en série (Construction21, 2023).

Les enjeux réglementaires jouent un rôle crucial : les normes de construction belges, françaises ou européennes ont généralement été conçues pour l'architecture traditionnelle, ce qui peut provoquer des retards bureaucratiques dans les projets modulaires, ou exiger des modifications normatives (Construction hors site, 2025).

La croissance de l'industrie modulaire est toujours contrainte par la capacité de production : peu d'unités de fabrication peuvent produire massivement en incorporant des matériaux biosourcés et des éléments réutilisables. Il est primordial de consolider les collaborations entre le secteur public et le secteur privé, ainsi que d'apporter un soutien institutionnel pour organiser efficacement la filière.

L'architecture modulaire hors site constitue un outil efficace pour une construction respectueuse de l'environnement, grâce à l'incorporation de matériaux biosourcés, la gestion circulaire des modules, une performance énergétique maximale et une meilleure gestion des ressources. Cependant, il est nécessaire de gérer ses contraintes logistiques, économiques et culturelles à travers des innovations dans les domaines réglementaires, industriel et architectural. Ces stratégies, qui appliquent implicitement les principes DNSH, favorisent une construction qui n'est pas significativement nuisible, ouvrant ainsi la voie à une chaîne de production modulaire vertueuse et résiliente.

Chapitre 4. Cas d'étude d'une architecture modulaire hors site : L'approche de la société Degotte

4.1. Examen du cas d'étude

Présentation de la société Degotte

Degotte S.A. est une compagnie belge localisée à Herstal, spécialisée dans la construction modulaire hors site. Originellement dédiée à la production de caravanes résidentielles, elle a opéré un changement de cap stratégique en 2015 pour se focaliser sur la fabrication, la location et l'installation de bâtiments modulaires architecturés (Degotte, août 2025). L'entreprise se démarque par une approche intégrée qui gère en interne toutes les phases d'un projet : conception, production au sein de son propre atelier, transport, montage sur site et maintenance. Cette domination totale de la chaîne lui confère la capacité de proposer des solutions personnalisées, de qualité et rapides. Chaque année, Degotte fabrique entre 350 et 450 modules dont environ 40% sont destinés à la location (Le Soir, 2022).

Degotte travaille surtout avec des clients du secteur public (environ 70 %), comme les municipalités, les écoles ou les hôpitaux, mais également avec des clients privés (30 %) dans des domaines tels que la logistique ou l'industrie. Il exerce ses fonctions en Belgique, au Luxembourg et dans le nord de la France (L'Avenir, 2024).

Degotte privilégie la réutilisation et la reconfiguration de ses modules dans un cadre d'économie circulaire, en matière d'innovation et de durabilité. Ses solutions sont aussi élaborées pour minimiser les déchets de construction et l'impact écologique, conformément aux nouvelles normes réglementaires européennes.

En somme, Degotte se distingue comme un intervenant industriel novateur, alliant expertise technique, modularité structurée et engagement écologique, dans une industrie en constante évolution. Leur conception de modules servira de base pour la comparaison avec les exigences du DNSH.

Grâce à Monsieur Charlier, Coordinateur AQ, EC et RSE chez Degotte, plusieurs documents partagés permettent de comprendre leur position vis-à-vis des exigences DNSH et comment ils essayent, ou non, d'y répondre. Tous les documents sont à disposition dans les annexes 3 et 4, que ce soit le PEB, le PPSS et l'APP. Chacun des six critères du DNSH sera examiné.

Atténuation du changement climatique

Cette condition exige que le bâtiment obtienne un haut degré de performance en matière d'énergie. Le projet décrit dans le rapport PEB y répond intégralement. En effet, il obtient un niveau K de 18, nettement en dessous du seuil exigé en Wallonie ($K \leq 45$), et un niveau E de 29, ce qui correspond à une performance quasi nulle en énergie (NZEB), très performante. Cela signifie une consommation d'énergie très minime lors de l'utilisation.

De plus, le bâtiment présente une consommation caractéristique en énergie primaire (EP) particulièrement faible, à savoir 179 537 MJ/an, tandis que la consommation de référence est fixée à 619 435 MJ/an. Cette performance est encore optimisée par l'implémentation de

panneaux solaires, produisant une économie d'énergie de -62 658 MJ/an. La génération locale d'énergie renouvelable est directement liée aux critères de la taxonomie européenne, qui privilégie l'indépendance énergétique et la diminution des émissions associées à l'utilisation du bâtiment.

L'exigence de lutte contre le changement climatique impose la diminution des émissions de gaz à effet de serre durant l'ensemble du cycle de vie du bâtiment. L'évaluation comprend toutes les couches constructives (structure, enveloppes, aménagements, etc.) (Figure 21), mais aussi les aspects souvent sous-estimés tels que la logistique de transport, la consommation dans l'atelier de production et les mouvements des sous-traitants.

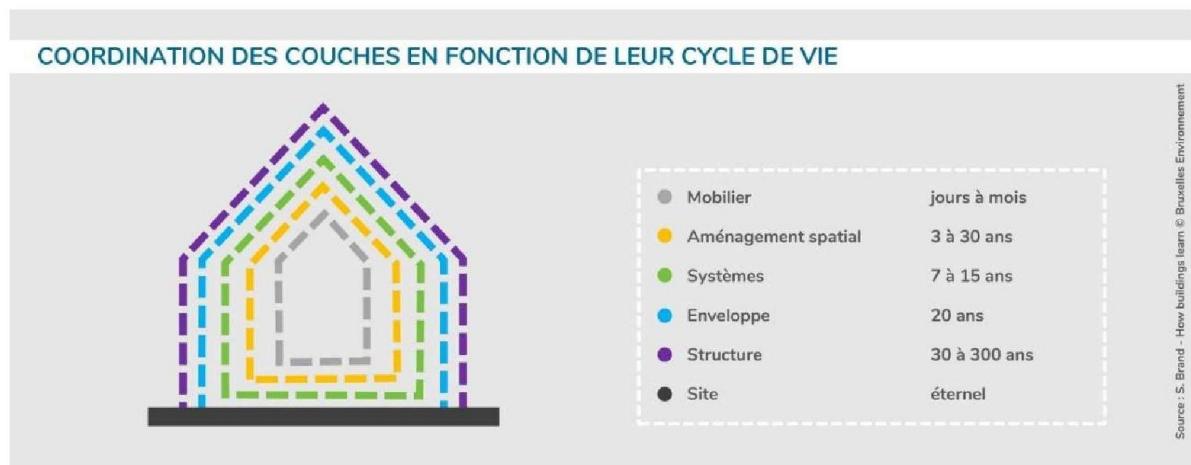


Figure 21: représentation par strates constructives Stewart Brand 1994

La strate structurelle représente la part la plus importante des émissions, suivie par les enveloppes extérieure et intérieure, soulignant l'impact significatif des matériaux porteurs, des isolants, des bardages et des systèmes de cloisonnement. Les aménagements spatiaux (revêtements, éléments intégrés) et la logistique (transport des modules, flux de chantier) constituent également des postes non négligeables, illustrant des spécificités propres à la construction modulaire (Figure 22 et Figure 23).



Figure 22: proportion de CO2 émis pour le transport

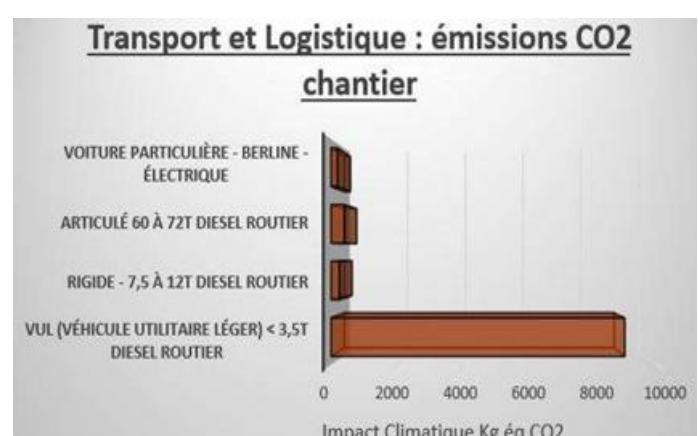


Figure 23: émissions CO2 chantier uniquement, l'utilitaire est une énorme majorité (Degotte)

Cette méthode systématique offre une évaluation globale de l'empreinte carbone. Pour citer l'AAP de Degotte : « Ce sont à 93% les transports « chantier » (site de production vers chantier et sous-traitants) qui sont responsables des émissions alors que les approvisionnements sur le site de production ne pèsent que 7% ! Si l'on détaille le poste « chantier » c'est à 91% les utilitaires légers qui sont responsables des émissions » (Degotte, 2018)

L'analyse Degotte offre des données très précises : les émissions totales atteignent 77 748 kg éq. CO₂ pour un édifice de 133,67 m². Ce nombre correspond approximativement à 641,6 kg éq. CO₂ par m² SHON (Surface Hors Œuvre Nette), une mesure en accord avec les références diffusées par l'ADEME

De plus, la recherche révèle que les couches structurelles et d'enveloppe sont les principales sources d'émissions, ce qui facilite l'orientation des efforts de réduction (Figure 24). L'examen en cours sur l'optimisation des matériaux, en particulier les isolants, contribue entièrement à l'objectif d'atténuation. L'entreprise envisage également de constituer des bases de données environnementales internes pour améliorer ses prises de décisions. Tous ces facteurs répondent aux critères du DNSH concernant la diminution des émissions.

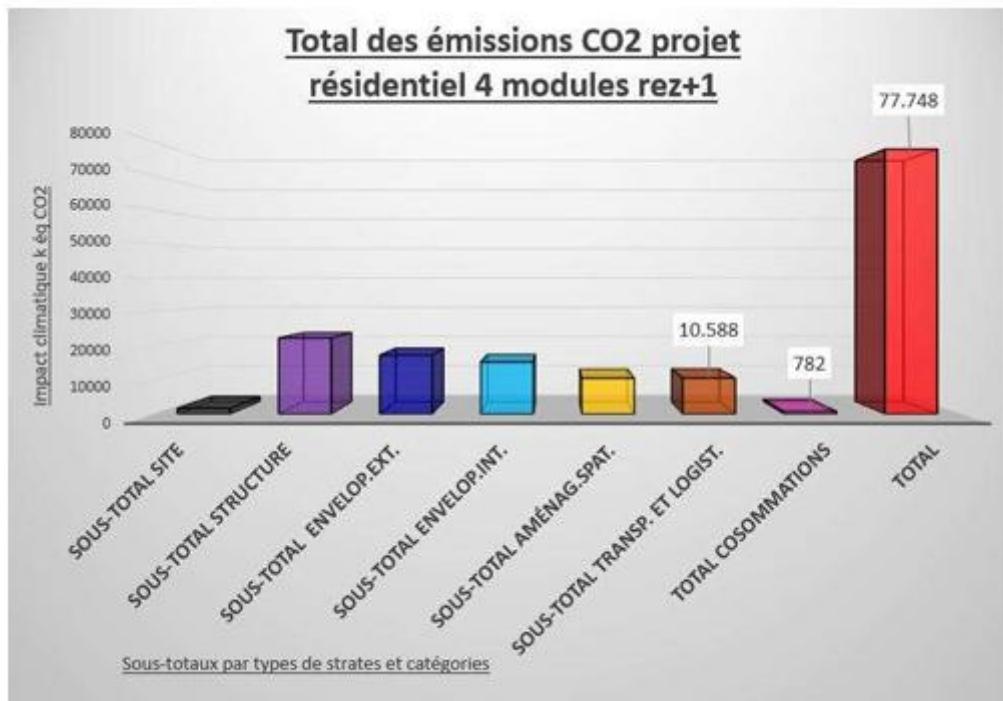


Figure 24 : Total et sous-totaux des émissions pour un projet 4 modules rez+1 Degotte

Toutes ces informations démontrent que le projet se conforme intégralement aux critères du DNSH concernant la lutte contre le changement climatique en réduisant son empreinte de carbone et sa consommation d'énergie.

Adaptation au changement climatique

Ce paramètre est conçu pour assurer la robustesse du bâtiment face aux événements climatiques futurs (hautes températures, précipitations, inondations, etc.). Le rapport PEB ne traite pas directement des scénarios climatiques à venir, cependant, il présente plusieurs indices indiquant que la construction est pensée pour prévenir les surchauffes.

Les vitrages, par exemple, possèdent un facteur solaire g de 0,54 qui limite les gains solaires excessifs. En outre, une évaluation du risque de surchauffe a été effectuée (en accord avec les normes PEB en Wallonie), démontrant ainsi une considération des conditions météorologiques extrêmes dans le processus de conception.

Finalement, l'orientation du bâtiment ainsi que la taille de ses ouvertures suggèrent un design bioclimatique bien contrôlé qui privilégie la ventilation naturelle et minimise la nécessité d'une climatisation.

Utilisation durable et protection des ressources en eau

Ce critère, qui se concentre sur l'utilisation efficace de l'eau et la protection contre la pollution aquatique, n'est pas mentionné dans le rapport PEB. Il n'est fait mention ni de la récupération des eaux pluviales, ni de la mise en place de dispositifs d'économie d'eau (robinetterie à débit réduit, systèmes double chasse, etc.). Aussi, il n'y a aucune indication concernant la gestion des eaux usées ou le traitement sur place.

Il serait donc approprié de se référer aux documents techniques ou aux plans du permis d'urbanisme afin de compléter cette évaluation. À ce stade, le rapport ne donne pas la possibilité de valider la conformité du projet par rapport à ce critère DNSH.

Une justification est que le critère de l'eau n'est que superflu comparé aux autres, ne suggérant seulement à ce que la plomberie ne dépasse pas un certain débit d'eau. Ainsi, dans la même logique que précédemment, il ne sera pas traité.

Transition vers une économie circulaire

Les documents démontrent une véritable intention d'incorporer les principes de circularité. L'approche stratifiée facilite l'identification précise des éléments qui peuvent être démontés, réutilisés ou recyclés. La société a analysé l'impact de différents matériaux (PIR (polyuréthane), laine de verre, isolants biosourcés) et prévoit d'établir un tableau comparatif d'évaluation pour prioriser les options à fort potentiel écologique. L'analyse indique que certaines strates, telles que les revêtements de sol ou les peintures, ont un effet inégal et qu'elles peuvent être prioritairement visées pour des remplacements.

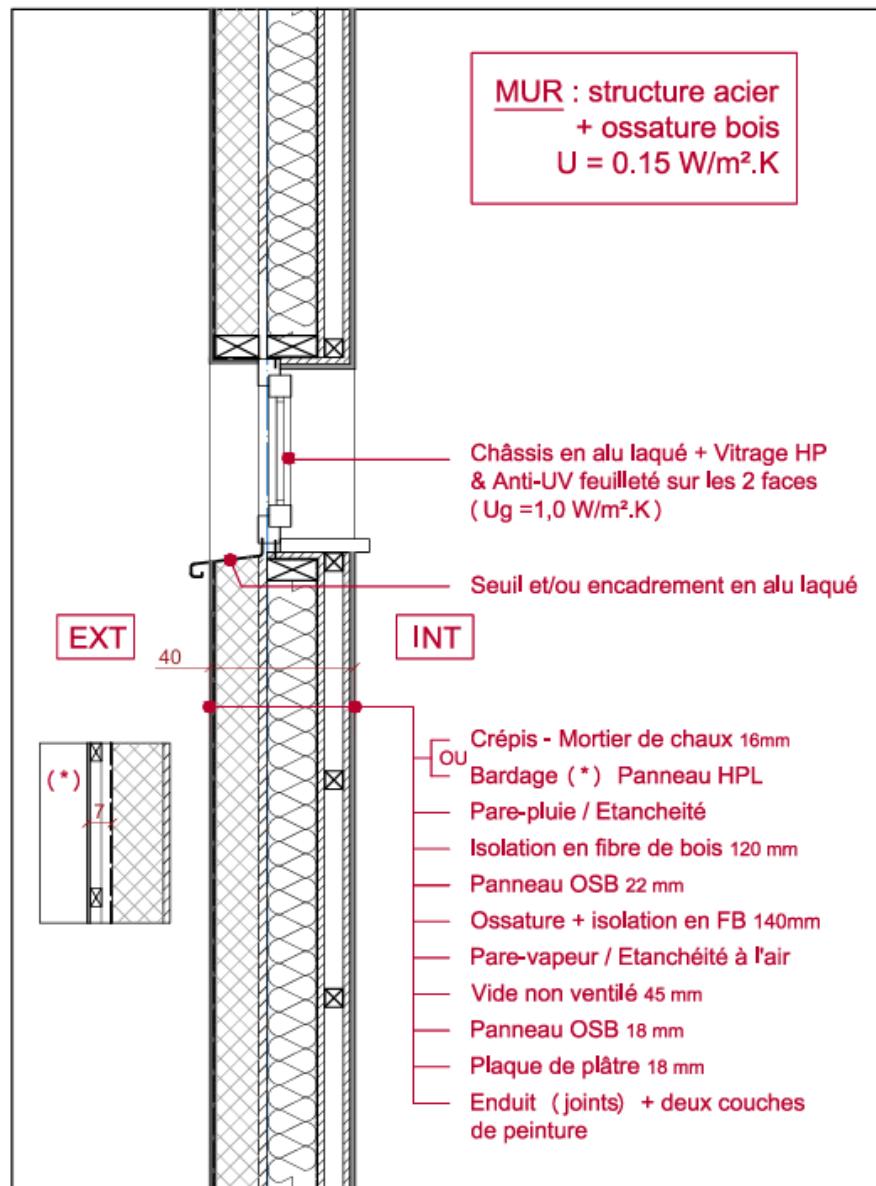
Le rapport AAP (Appel à projet) souligne surtout que la production délocalisée encourage une réutilisation sur place — par les mêmes intervenants et sans nécessité de logistique complexe — ce qui diminue considérablement les barrières habituelles à l'économie circulaire (transport, classement, reconditionnement, suivi des produits). L'aspect modulaire de cette architecture constitue un avantage significatif pour satisfaire le critère DNSH associé à la gestion durable des ressources et à l'économie circulaire.

Le rapport PEB met en évidence divers aspects qui favorisent la circularité des ressources, notamment lors de la sélection des matériaux d'isolation et des finitions. Les murs externes sont isolés à l'aide de fibre de bois (ISONAT Plus 55 Flex H), un matériau biosourcé contenant 90 % de fibres de bois recyclées ce qui s'aligne avec une démarche de sauvegarde des ressources non renouvelables et de valorisation des déchets. L'application de l'isolant se fait en strates successives, ce qui rend son remplacement plus aisé lors d'une rénovation ultérieure. Degotte arrive à utiliser jusqu'à 63.35 % de biosourcé pour la composition des parois (Figure 25)

Crèche de MOIGNELEE			
At (sans châssis)	Se1	Se2	Total/poste
S-Sol	395,27	20,71	415,98
T-Toit plat	392,07	20,71	412,78
M1-Façade avec enduit	38,44	0	38,44
M2-Façade avec bardage	260,72	7,06	267,78
Total At sans châssis = 100%			1134,98
Total Biosourcé			719,00
% biosourcé			63,35%
T-Toit plat	U = 0,15 W/m2.K isolation 2 couches « toiture mixte »		
- Isolation ép.14 cm, continue, au-dessus du support. Fibres de bois en panneaux rigides. $\lambda = 0.040$ – $R = 3,5 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$			
- Isolation ép. 14 cm, entre gîtes, en dessous du support. Fibres de bois en matelas flexibles. $\lambda = 0.036$ – $R = 2,7 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$			
M1-Façade avec enduit	U = 0,15 W/m2.K isolation 2 couches		
- Isolation ép.12 cm, continue, à l'extérieur de l'ossature bois. Fibres de bois en panneaux rigides. $\lambda = 0.040$ – $R = 3,00 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$			
- Isolation ép. 14 cm, entre montants, dans l'épaisseur de l'ossature bois. Fibres de bois en matelas flexibles. $\lambda = 0.036$ – $R = 3,05 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$			
M2-Façade avec bardage	U = 0,15 W/m2.K isolation 2 couches		
- Isolation ép.12 cm, continue, à l'extérieur de l'ossature bois. Fibres de bois en panneaux rigides. $\lambda = 0.041$ – $R = 2,92 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$			
- Isolation ép. 14 cm, entre montants, dans l'épaisseur de l'ossature bois. Fibres de bois en matelas flexibles. $\lambda = 0.036$ – $R = 3,05 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$			

Figure 25:Rapport PEB Degotte pour le projet de la crèche, montrant la proportion de biosourcé

Des panneaux OSB et des plâtres-carton viennent compléter le complexe mural (Figure 26), deux matériaux généralement compatibles avec une approche de démontabilité et de recyclabilité. Le rapport présente la paroi comme un système multicouche, ce qui soutient particulièrement l'approche « Design for Disassembly » - un concept central de l'économie circulaire.



TECHNIQUE - Détail D2 - Mur / Plancher 1/20e

Figure 26: Détail technique d'un composant "Mur" de l'architecture modulaire hors site Degotte

L'absence de matériaux composites ou d'adhésifs irréversibles accentue davantage la faculté de démolition sélective de l'édifice, une condition sine qua non pour se conformer au critère « économie circulaire » du DNSH.

Cependant, concernant l'utilisation des panneaux de bois, Degotte n'obtient pas l'exigence de ne pas dépasser 10% du poids total en déchets, étant seulement à 18% (Figure 27).

Réduction matière première : panneau bois aggloméré							
	montage traditionnel (2 modules) m ² PHASE 1+2	AAP déchet-ressource (2 modules) m ² PHASE 1+2	Consommation annuelle 2022 en m ² montage traditionnel	Consommation projetée si montage AAP m ²	Gain annuel 2022 /m ²	Coût si méla	Coût si stratifié
Consommation panneau	127,11	95,38	7762,25	5824,60	1937,65	27.611,46 €	56.792,41 €
Réduction matière première > calepinage : panneau bois aggloméré							
	montage traditionnel (2 modules) m ² PHASE 1	AAP déchet-ressource (2 modules) m ² PHASE 1	Pourcentage bénéfice	Consommation annuelle 2022 en m ² montage traditionnel	Gain potentiel annuel 2022 /m ²	Coût si méla	Coût si stratifié
Consommation panneau	99,57	90,84	8,77%	7762,25	680,77	9.701,04 €	19.953,50 €
Déchets évités/réemploi : panneaux bois aggloméré							
	Déchets Montage tradi. (2 modules) PHASE 2 /m ²	Déchets AAP (2 modules) PHASE 2 /m ²	Gain projet /m ²	Gain projet pourcentage %	Volume totale déchets bois A + B 2022 /kg	Volume totale déchets bois B 2022 /kg	Gain projeté volume déchets bois B annuel /kg
Consommation panneau	28	5	23	18%	66250	19875	3595,83

Figure 27 : extrait de l'APP, proportions de déchets des panneaux de bois

Malheureusement, pas assez de données ont été fourni pour savoir si un projet dans sa globalité ne dépasse pas les 10% de déchets. Après plusieurs discussions avec Monsieur Charlier, cela reste une grande difficulté à atteindre même s'ils y travaillent.

La gestion des déchets chez Degotte

À Degotte, la gestion des déchets est envisagée comme un outil stratégique pour minimiser l'impact environnemental, en respectant le principe DNSH (Do No Significant Harm), qui stipule qu'aucune activité ne doit nuire de manière significative à l'environnement. Cette nécessité se manifeste par une démarche qui cherche à minimiser la génération de déchets, encourager leur réutilisation et maximiser leur valorisation.

La société substitue même le mot « déchets » par « ressources » ou « matières premières secondaires », témoignant de son intention de traiter chaque flux comme une matière à valoriser plutôt qu'à supprimer. Cette approche repose sur une hiérarchie de gestion inspirée de l'échelle de Lansink et augmentée par la règle des 10 R (Refuser, Réfléchir, Réduire, Réutiliser, Réparer, Reconditionner, Refabrication, Redéfinir, Recycler, Récupérer), qui priviliege la prévention et la circularité comme étapes préliminaires à toute action.

Après un diagnostic des flux traités et non traités, Degotte est passée de 5 à 12 flux collectés, avec obligation de tri, via un contrat unique et flexible avec le collecteur. Les quatre flux principaux monitorés sont :

- **PC** : Papier-carton
- **CL2** : Classe II « tout-venant »
- **PMC** : Plastiques, métaux et cartons à boisson
- **GBE** : Bois, métaux et déchets de Classe II

Les actions mises en place répondent directement au DNSH, notamment sur le volet prévention et réduction des déchets :

- **Éco-conception** : intégration de la déconstructibilité sélective, amélioration du calepinage, réduction des pertes et des chutes, diminution des commandes de sécurité.
- **Innovation produit** : pose verticale des panneaux sandwich permettant près de 30 % d'économie de matière ; optimisation des structures acier avec des gains cumulés de plus de 50 % de matière grâce au passage à des profils plus légers et mieux formés.
- **Maîtrise des flux sortants** : développement de la logistique inverse et limitation des déchets composites difficiles à valoriser.

Ces démarches impliquent une attention particulière sur l'impact en amont, notamment par le biais du bilan carbone scope 3. Ce dernier contribuera à la collecte de données massives précises et à établir un lien direct entre l'utilisation des ressources, la production de déchets et leur gestion avec les critères du DNSH.

Pour conclure, Degotte met l'accent sur l'importance cruciale de la stabilisation de son standard constructif (en développant des gammes de produits) pour un reporting solide. Cela permettra de prouver que l'expansion de l'entreprise s'accompagne d'une réduction relative des déchets et d'une amélioration continue des matières premières, en accord avec le principe du DNSH.

Prévention et contrôle de la pollution

Le rapport PEB présente des chiffres très encourageants concernant les émissions de gaz à effet de serre. L'édifice génère 6 834 kg de CO₂ chaque année, parmi lesquels 4 486 kg sont neutralisés grâce à la production d'énergie photovoltaïque. Cela permet de minimiser l'empreinte carbone du bâtiment et témoigne d'une volonté d'incorporer des énergies renouvelables dans son utilisation quotidienne.

De plus, aucun système basé sur des combustibles fossiles n'est indiqué. Il est probable que le système de chauffage et de ventilation fonctionne sur la base d'une technologie entièrement électrique ou à pompe à chaleur, ce qui supprime les rejets liés à la combustion locale.

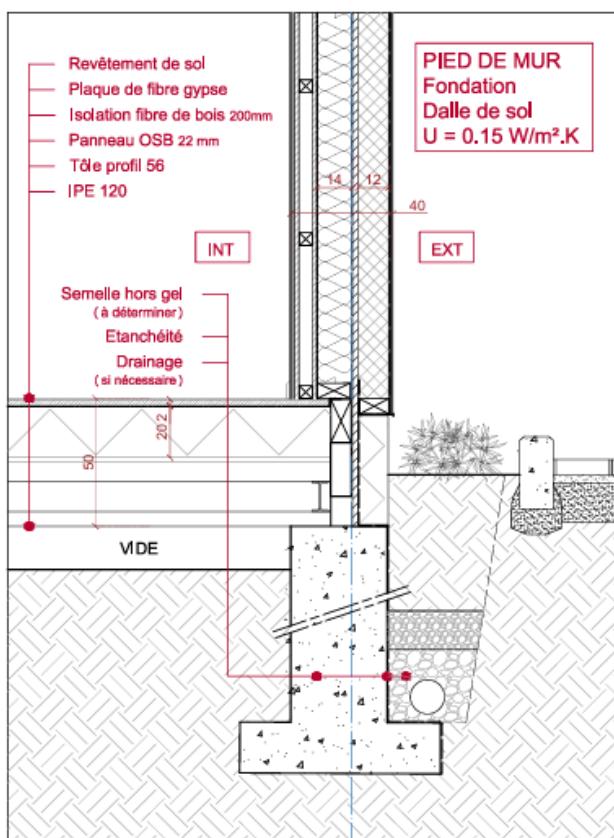
Toutefois, le rapport n'expose pas la composition chimique des substances, ni leur effet sur la qualité de l'air à l'intérieur. Aucune évaluation des composés organiques volatils (COV), de l'amiante, du plomb ou d'autres substances jugées préoccupantes n'est mentionnée. Ces renseignements doivent être trouvés dans les fiches techniques des produits ou dans un passeport de matériaux.

Protection et restauration de la biodiversité et des écosystèmes

Ce critère DNSH fait référence à l'influence du projet sur le milieu naturel. Il est impératif de veiller à ce que la construction ne se trouve pas dans une région sensible (Natura 2000, réserve naturelle, etc.) et qu'elle n'entraîne pas de déclin net de la biodiversité.

Le rapport PEB ne traite aucun élément relatif à la biodiversité. Il n'y a aucune indication relative à la nature du site, aux mesures compensatoires, à l'intégration paysagère ou à la perméabilité des sols qui soit fournie.

Le rapport AAP fournit une étude pertinente de la strate « site », mettant en évidence que l'utilisation de plots de fondation plutôt qu'une dalle entraîne une diminution significative de l'artificialisation des sols (Figure 28). Cette approche, caractéristique du modulaire, conserve la perméabilité du sol et minimise la dégradation des milieux naturels.



TECHNIQUE - Détail
D3 - Pied de mur 1/20e

Figure 28 : Détail technique des fondations de l'architecture modulaire hors site Degotte

Le document situe aussi cette question dans le cadre régional wallon, soulignant que la diminution de l'artificialisation est une priorité politique. Il mentionne également des chiffres préoccupants concernant la perte de biodiversité liée à l'urbanisation, cité du rapport d'activité 3 [annexe 3]. « Selon un rapport du WWF, l'artificialisation des espaces terrestres et marins

serait la première cause de la disparition de la biodiversité mondiale (50%) bien plus que la pollution (7%) ou le réchauffement climatique (6%) »

L'option de déconstruction des modules et de retour à l'état initial des terrains répond directement à la demande de réversibilité, un aspect rarement traité dans les projets traditionnels. Cela place la construction modulaire hors site comme une option bénéfique pour la protection des écosystèmes (Figure 29).

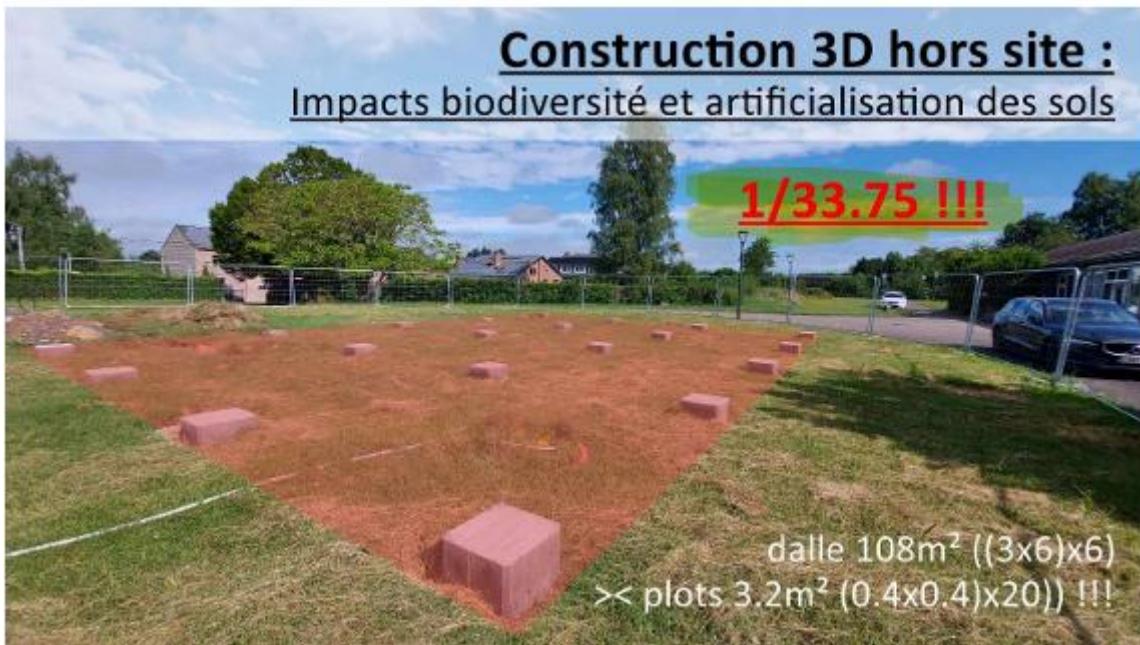


Figure 29 : extrait de l'APP : impact de l'architecture modulaire hors site sur le sol selon Degotte

4.2. Exemple de démontabilité/remontabilité : Le projet Um bock

Même si le formulaire DNSH, ou la taxonomie en générale, ont des critères précis pour chacun des six points du DNSH, la philosophie d'une construction durable veut que les critères soient aussi observés d'un point de vue Macro. Ainsi, grâce au PPSS (Plan Particulier de Sécurité et de Santé) fourni par Degotte, la preuve de la démontabilité et remontage d'un projet dans sa globalité est bien réelle.

Le projet « Um Bock » à Differdange (Luxembourg) démontre idéalement le potentiel durable de l'architecture modulaire hors site. C'est une construction qui se compose de 90 unités préfabriquées en bois, constituant une école temporaire. Initialement pensé pour être démonté et réutilisé, ce bâtiment modulaire est prévu pour être transféré à un autre emplacement, à Woiwer, dans le cadre d'un projet de réutilisation (Figure 30). Ce projet illustre l'importance de la réversibilité architecturale, un aspect essentiel de l'architecture circulaire et durable.

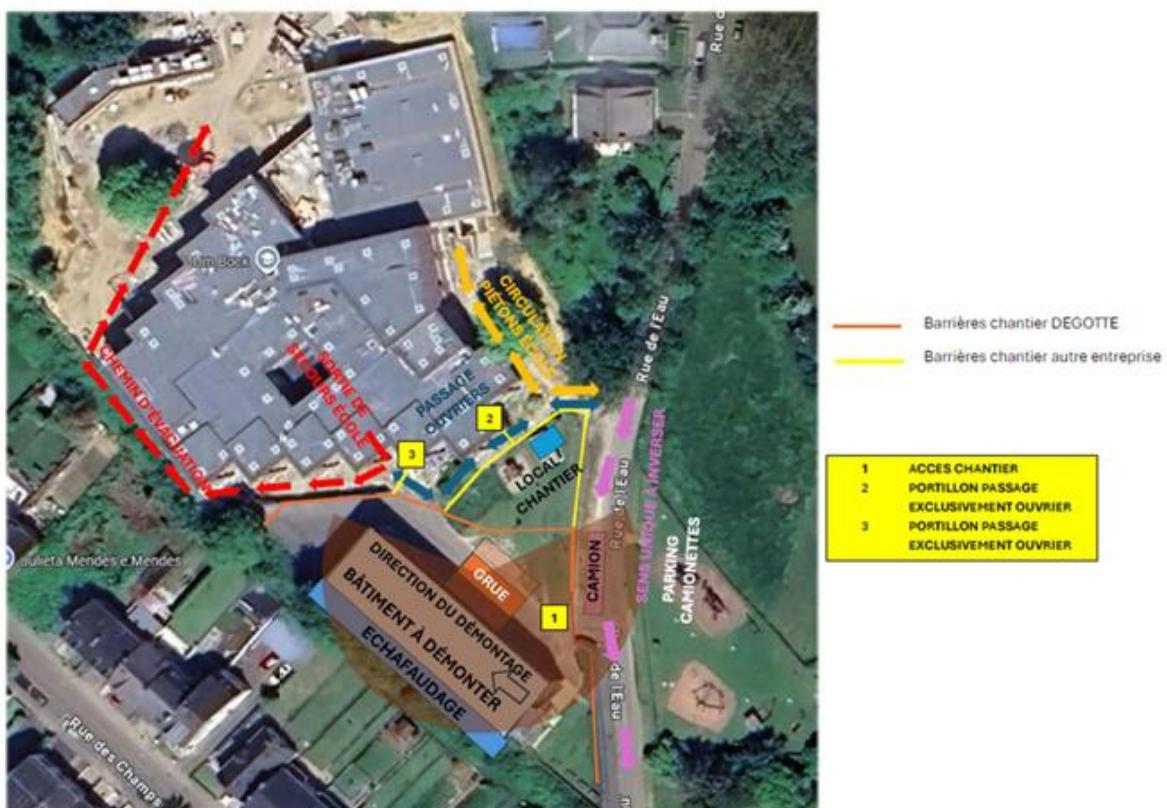


Figure 30: Site de démontage de l'école Um Bock

Le bâtiment se compose de modules 3D, réalisés en dehors du lieu d'assemblage, qui englobent les structures porteuses en bois, les revêtements intérieurs (panneaux de gypse, panneaux OSB), ainsi que des composantes techniques déjà montées (système électrique, plomberie, ventilation). Chaque module agit comme une unité indépendante, apte à être isolée du tout, déplacée et réassemblée dans une autre disposition en fonction des exigences.

Le processus de démolition commence par la préparation soigneuse du bâtiment sur son lieu d'origine. Cela signifie l'enlèvement des cloisons de finition internes entre les modules, la

séparation des dispositifs techniques, et le démontage des faux plafonds pour dégager les voies requises pour le câblage et les installations structurelles. Les membranes d'étanchéité, qui garantissent la liaison entre les modules sur le toit, sont minutieusement enlevées pour être substituées après leur réinstallation. Cette étape d'élaboration assure la conservation de la structure des modules et minimise les dangers de dégradations lors du transport.

Après l'accomplissement de ces tâches, chaque module est soulevé individuellement à l'aide d'une grue. Chaque module est minutieusement extrait sous la surveillance de signaleurs et ensuite entreposé provisoirement dans une zone sécurisée avant d'être transféré (Figure 31). L'acheminement se fait par le biais de camions-remorques appropriés, ce qui requiert une organisation logistique scrupuleuse pour réduire au minimum les effets sur le trafic local.

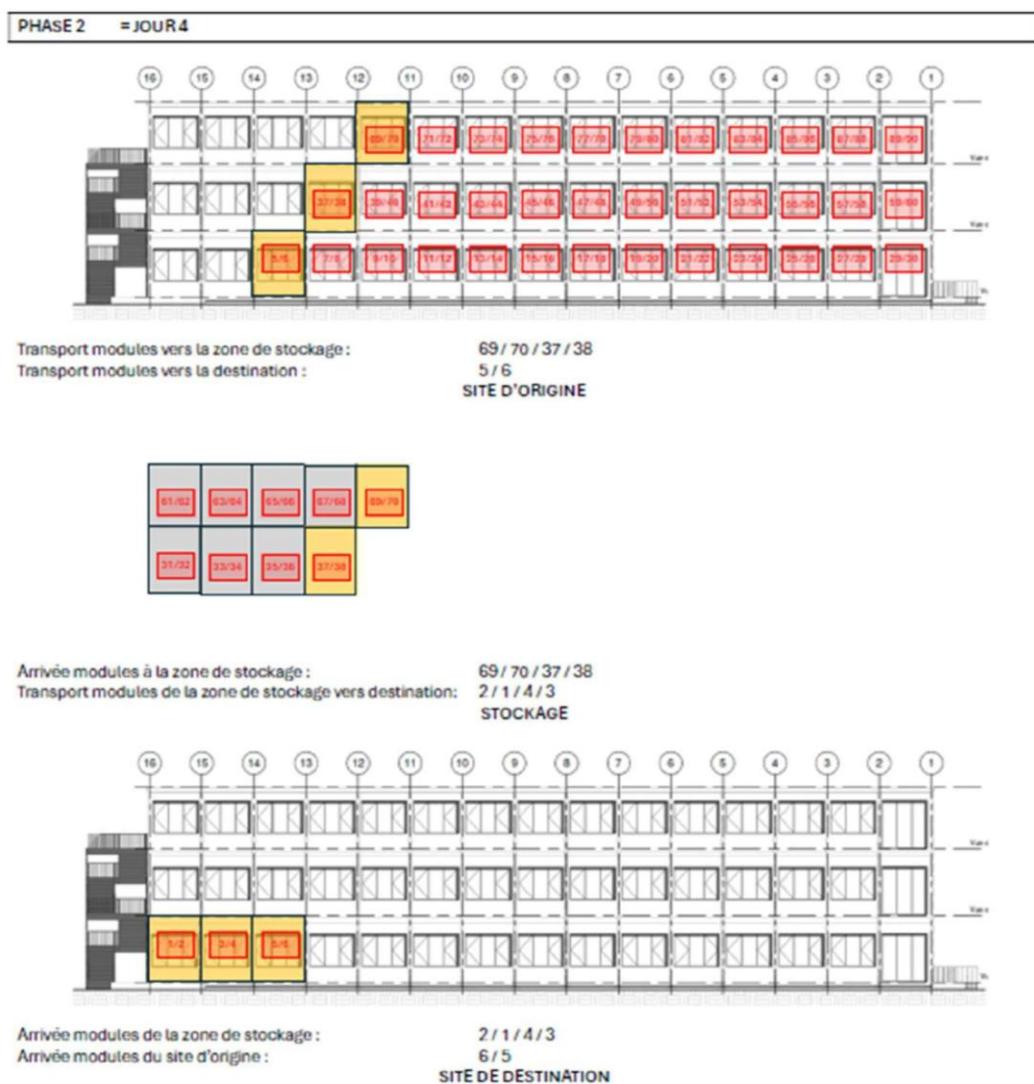


Figure 31: Extrait du PPSS, instructions de l'ordre de démontage, stockage et remontage des modules

À Woiwer, sur le lieu d'arrivée, les fondations et les connexions techniques (drainage, électricité, différentes réseaux) sont mises en place à l'avance pour recevoir les modules.

L'assemblage se fait module par module, suivant une séquence spécifique qui assure la stabilité de l'ensemble. Une fois les modules positionnés sur les points d'ancrage prévus, des fixations mécaniques et des contreventements supplémentaires sont ajoutés pour renforcer les jonctions structurelles, en particulier au rez-de-chaussée. Les membranes d'étanchéité du toit sont ensuite remises en place et soudées par air chaud afin de garantir l'intégrité de l'enveloppe.

Pour garantir l'esthétique et la fonctionnalité des espaces, les éléments d'assemblage internes, comme les cloisons ou les faux plafonds, sont installés sur place. Les systèmes techniques internes sont reconnectés et des tests opérationnels (électricité, plomberie, ventilation) sont réalisés avant la réouverture de l'immeuble. À ce stade, des modifications de l'agencement intérieur peuvent être effectuées en fonction des exigences particulières du nouveau lieu.

Cette méthode de désassemblage et de réassemblage met en évidence les bénéfices écologiques et économiques de l'architecture modulaire hors site. En autorisant la réutilisation intégrale de la structure, cela prévient la démolition et l'accumulation de déchets, tout en allongeant la longévité des modules. Ce genre d'initiative s'aligne totalement sur une approche d'économie circulaire et respecte les critères de durabilité requis par les lois en vigueur, y compris les normes DNSH de la taxonomie européenne. Cela démontre comment l'assemblage modulaire peut apporter une solution agile et responsable aux demandes changeantes des communautés.

Conclusion sur l'approche de Degotte :

Les différents rapports mettent en évidence des indicateurs techniques robustes pour prouver que le projet respecte les critères DNSH, notamment sur les aspects suivants : efficacité énergétique (atténuation du changement climatique), adaptation au changement climatique, circularité des matériaux, préservation du sol et diminution des émissions. Cependant, les critères concernant l'eau et la pollution sont moins abordés, n'étant pas les exigences les plus accentuées par la taxonomie et ne posant peu voire pas de contrainte.

Ce projet illustre que la construction modulaire hors site, lorsqu'elle fait appel à des matériaux appropriés et à un processus de préfabrication maîtrisé, peut être conforme aux normes réglementaires européennes relatives à la durabilité environnementale.

Chapitre 5. Scénario fictif d'une architecture modulaire-hors site en faveur du DNSH

Dans le cadre de ce TFE, je propose de m'affranchir de toute limite économique ou volonté du bénéfice qui motive le concepteur d'une architecture quelconque et ainsi proposer un projet de conception d'une architecture modulaire hors site majoritairement en faveur du respect des exigences DNSH

5.1. Objectif

Imaginer un scénario fictif d'architecture modulaire hors site en respectant autant que possible les critères DNSH. Examiner la pertinence et la réalisabilité d'un tel projet, puis réévaluer l'importance de chaque critère DNSH en relation avec l'architecture modulaire hors site.

5.2. Contraintes et libertés

Dans un contexte où les contraintes économiques et technologiques ne constituent pas un frein, le projet doit viser une conformité maximale avec les exigences DNSH, en anticipant les normes environnementales à l'horizon 2030. L'objectif est de concevoir une structure optimisée pour un transport efficace, imposant une contrainte forte sur les dimensions des modules afin de respecter les gabarits logistiques actuels. Les aspects esthétiques et de confort, bien que cruciaux, seront abordés ultérieurement, ce qui permet de concentrer dans un premier temps la réflexion sur la durabilité, la réversibilité et l'impact carbone neutre du système constructif, sans compromis liés aux considérations de design ou d'aménagement intérieur.

5.3. Critères

Pour chaque critère, Le but est de pousser la philosophie du DNSH au maximum, quitte à proposer des solutions difficilement envisageables, sur le plan économique du moins. J'ai bien conscience que certaines solutions ont probablement de meilleures alternatives ou alors sont compliquées à mettre en place sur une architecture modulaire hors site. Cependant, l'objectif de cet exercice est justement d'imaginer comment une conception durable s'accentuera autour d'une architecture modulaire hors site. Chacun des 6 critères du DNSH seront traités indépendamment l'un de l'autre et les solutions proposées sont généralement les technologies les plus récentes, novatrices, si possible avec source à l'appui en annexe.

1) Atténuation du changement climatique

Objectif : Emissions de gaz à effet de serre réduit au minimum, être le plus autonome en énergie.

Chaque module est entièrement énergétiquement autonome et conçu pour avoir une empreinte carbone nulle durant toute sa durée de vie. L'édifice contient une association de panneaux solaires organiques flexibles, de petites éoliennes silencieuses sur le toit, ainsi que des sols piézoélectriques incorporés aux planchers. L'énergie est emmagasinée dans des accumulateurs utilisant un électrolyte naturel (comme le sel fondu ou redox), entièrement recyclables. La chaleur et la climatisation ne sont fournies que par des systèmes passifs (panneaux à changement de phase, puits canadien, ventilation naturelle). Le module ne contient aucun système à base de combustibles fossiles, ni de climatisation active.

2) Adaptation au changement climatique

Objectif : Limiter les risques et dangers, viser un habitat adaptable à tous les environnements et toutes les situations.

Chaque module est élaboré en tant qu'unité autonome robuste, destinée à faire face aux extrêmes météorologiques futurs. Dans les régions sujettes aux inondations, des pieux hydrauliques extensibles permettent au bâtiment d'ajuster la hauteur en fonction du niveau de l'eau lors des inondations. Une plateforme à flottaison régulée garantit la stabilité même lors d'une inondation soudaine, intégrée au sol, elle permet que la maison reste « stable » même si les pieux de fondation lâchent prise. En réponse aux rafales de vent, l'architecture est conçue avec une aérodynamique dynamique, dotée de volets anti-tempête rétractables et d'un mécanisme de verrouillage structurel. Lors des vagues de chaleur intense, les toits sont conçus pour être végétalisés et naturellement rafraîchis, alors que les façades se déploient et se replient automatiquement en fonction de l'ensoleillement, imitant le comportement d'une peau vivante. L'habitat possède une autosuffisance et anticipe les perturbations climatiques, sans nécessité d'intervention humaine.

3) Utilisation durable et protection des ressources hydrologiques et marines

Objectif : être le moins dépendant du réseau d'eau

Le dispositif opère en circuit hydrique fermé. Les eaux de pluie sont collectées, purifiées et filtrées avant d'être réintroduites dans les systèmes domestiques. Le recyclage local des eaux usées est effectué pour l'usage dans les toilettes et l'irrigation. Des toilettes équipées de bioréacteurs à microalgues transforment les déchets humains en compost liquide destiné aux plantes comestibles sur le toit (C'est une hypothèse, aucun projet n'existe encore). Un système de collecte d'eau atmosphérique installé sur le toit capture l'humidité présente dans l'air et la condense, garantissant une disponibilité minimale d'eau même dans les conditions arides. Chaque goutte d'eau est appréciée, quantifiée et réutilisée, supprimant tout déversement superflu dans l'environnement.

4) Transition vers une économie circulaire

Objectif : limiter au maximum les déchets, concevoir une architecture recyclable/démontable.

Ici, l'architecture modulaire est totalement démontable, traçable et réversible. Tous les éléments sont fabriqués en usine à partir de matières premières biosourcées, recyclées ou recyclables (bois CLT provenant de forêts reboisées, composites végétaux, verre recyclé, métal biosourcé à faible impact carbone). Il n'y a pas de collage permanent utilisé : les montages sont soit mécaniques, soit magnétiques, et chaque élément est équipé d'une puce RFID (Radio Frequency Identification) qui enregistre son origine, ses conditions d'utilisation et sa date de fin de vie prévue. Un jumeau numérique du bâtiment anticipe et perfectionne les réparations, l'entretien et la réutilisation élément par élément. Sur l'ensemble du site, il n'y a aucun déchet produit : tout est récupéré, réutilisé ou biodégradé. Chaque module est identifié et retracé, que ce soient les matériaux qui composent les composants et les équipements installées.

5) Prévention et contrôle de la pollution

Objectif : limiter la pollution de l'air et du sol.

Tous les matériaux employés sont non nocifs, biosourcés ou neutres, y compris les colles, les peintures et les isolants. Les murs sont recouverts d'un revêtement photo catalytique dérivé des algues, capable de capturer les particules fines. Des mousses végétales détoxifiantes, incorporées dans des murs respirants, assurent la régulation de l'air intérieur. Aucune pollution n'est émise au sol : les fondations sont démontables, non en béton, et ne requièrent ni excavation profonde, ni étanchéité permanente. Chaque fluide est contenu dans des circuits totalement étanches, surveillés par des capteurs. L'architecture agit comme un purificateur écologique actif, nettoyant plus qu'elle ne pollue.

6) Protection et rétablissement de la biodiversité et des écosystèmes

Objectif : Ne pas faire de dégâts à l'écosystème, la faune et la flore

Les modules ne sont jamais directement placés au sol, mais sur des plots réglables, ce qui permet de restaurer complètement la flore naturelle sous et autour du bâtiment. Des plantes favorables aux abeilles sont utilisées pour végétaliser les toits, qui comportent également des abris destinés à des espèces auxiliaires. Les façades sont dynamiquement végétalisées et peuvent être ajustées en fonction de l'écosystème local. L'architecture ne se contente pas d'occuper l'espace : elle interagit avec le vivant, le protège, le nourrit et le répare. Le sol doit pouvoir être réutilisé comme s'il était vierge de toute construction, ainsi accueillir de nouvelles fonctions.

5.4. Critique du scénario fictif

Bien que chaque proposition pour chacun des 6 critères du DNSH vis-à-vis de ce scénario fictif soit logique et pertinent, la mise en application de certains s'avère plus complexe. Par exemple, l'atteinte d'une indépendance totale en termes d'eau et d'électricité reste ardue, essentiellement à cause de l'irrégularité des énergies renouvelables : manque de vent pour les turbines éoliennes, faible exposition au soleil pour les panneaux solaires, ou fluctuations climatiques régionales. De surcroît, l'emploi de sols piézoélectriques dans le domaine résidentiel se révèle peu productif : la rareté des déplacements au sein d'un domicile ne permet pas de produire un volume d'énergie notable.

Parmi tous les critères, celui qui concerne la transition vers une économie circulaire semble être à la fois le plus facile d'accès et le plus structurant en termes de conception. C'est également celui qui, lorsqu'il est correctement mis en œuvre, permet de revisiter les matériaux, les systèmes d'attache et les cycles de vie. Cependant, l'objectif d'une production de déchets entièrement nul reste extrêmement audacieux. Même avec une optimisation modulaire, il est nécessaire de garder des marges de manœuvre lors de l'assemblage, ce qui entraîne des pertes inévitables ou des tolérances matérielles.

Pour faciliter la compréhension de ce que représenterait un projet incluant tous ces critères, j'ai élaboré un schéma rassemblant les principales installations techniques et environnementales (Figure 32).

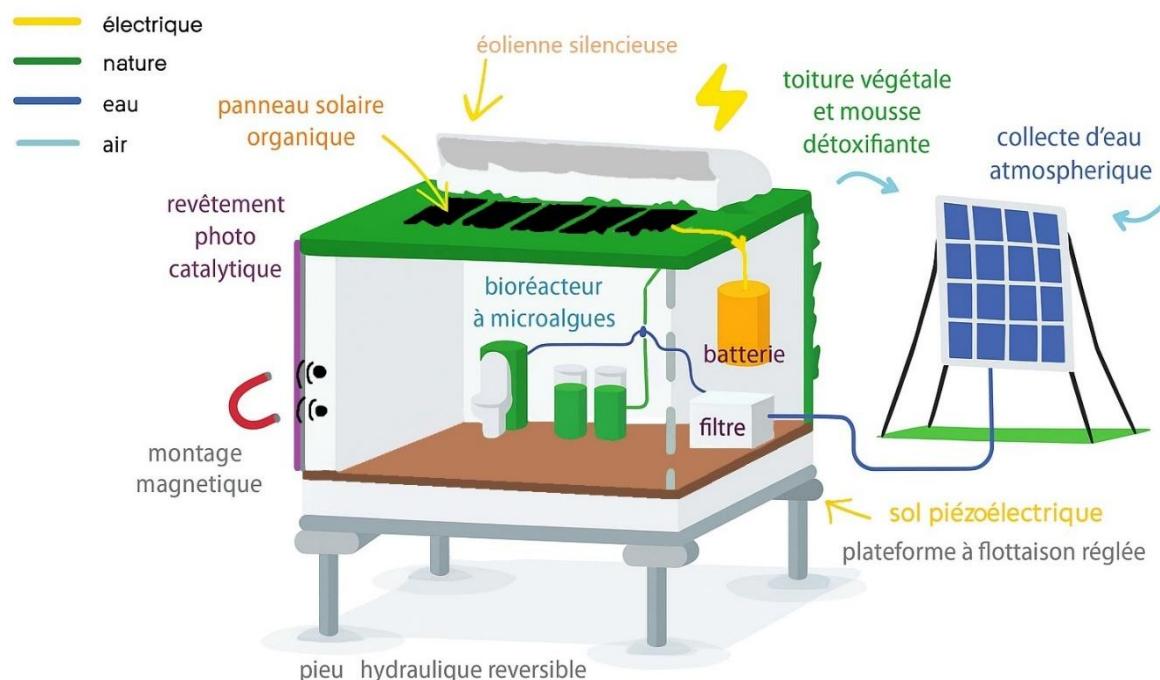


Figure 32: Schéma d'un projet d'architecture modulaire en faveur du DNSH

Ce dessin démontre certaines incompatibilités d'utilisation ou de cohabitation. Par exemple, l'installation conjointe de panneaux solaires et d'une toiture verte peut poser des problèmes : ces deux installations se concurrencent pour l'espace disponible et peuvent diminuer leur

performance respective (ombre, maintenance, poids, accessibilité). Par ailleurs, le concept de créer des façades démontables ou mobiles pour optimiser la ventilation naturelle se heurte à l'installation de revêtements muraux fixes tels que des mousses végétales purificatrices ou un revêtement photo catalytique, qui requièrent stabilité.

Il est donc préférable d'opter pour l'intégration de solutions agro-photovoltaïques. Ce concept consiste à associer la production d'énergie solaire à des installations agricoles ou végétalisées, en superposant les usages. Sur une toiture ou une façade, des panneaux solaires semi-transparents ou surélevés pourraient ainsi coexister avec des cultures en bac ou des plantations à faible hauteur, permettant d'exploiter l'ombre partielle générée par les panneaux pour certaines espèces végétales. Toutefois, cette approche introduit de nouvelles contraintes techniques : il est nécessaire de garantir un accès facile à la maintenance des installations photovoltaïques tout en préservant la qualité des plantations. De plus, le poids cumulé des substrats agricoles, des systèmes d'irrigation et des structures porteuses de panneaux demande une attention particulière en matière de dimensionnement structurel et de compatibilité avec les modules démontables du bâtiment.

L'application de l'agro-photovoltaïque est majoritairement utilisé en agriculture sur plusieurs hectares (Figure 33) et la transposition à un système d'habitation modulaire à plus petite échelle nécessite une réflexion conséquente.



Figure 33: exemple d'application de l'agro-photovoltaïque (entreprise Grengy solar)

Des technologies incorporées dans cette forme d'architecture excèdent largement les ressources techniques et financières disponibles actuellement pour de nombreux projets. Des systèmes tels que les bioréacteurs à microalgues ou les sols piézoélectriques, actuellement en phase d'amélioration et de perfectionnement, sont caractérisés par un prix élevé et une complexité significative lors de leur installation. Souvent, leur opération nécessite une maintenance

spécialisée, ce qui entrave grandement la résilience et l'indépendance du bâtiment sur le long terme. Au contraire, une architecture véritablement durable devrait aspirer à une maintenance facile et accessible, sans recourir excessivement à des compétences spécialisées.

De plus, l'association d'une plateforme de flottaison contrôlée et d'un ancrage fixe au sol, par exemple grâce à des pieux hydrauliques, pose une question de cohérence technique. Ces deux systèmes sont mal compatibles : un édifice flottant ne peut pas être fixement amarré en même temps. Cela peut créer des tensions structurelles possibles, surtout si l'on intègre des assemblages magnétiques dans l'équation. Bien que prometteurs en matière de modularité, ces derniers ne garantissent pas actuellement la stabilité structurelle d'un bâtiment. Une avancée sur le sujet a déjà été discuté par les Pays-Bas avec le Projet M.A.R.S décrit ci-dessous (Figure 34). *Imaginé par Factor Architecten et Dura Vermeer qui ont remporté le Prix « Eau, Habitation et Aménagement du Territoire » pour ce projet (Factor Architecten B.V., 2021)*



Floating homes seen from access road, July 2005.



Amphibious house afloat, January 2011.



Amphibious house with garden and parking place, July 2005.



Amphibious house afloat, January 2011.

Figure 34: Photographies d'une architecture préfabriquée utilisant le système M.A.R.S (Factor Architecten et Dura Vermeer, Pays bas)

Le système de reconversion amphibie modulaire (M.A.R.S.) est une réponse novatrice élaborée aux Pays-Bas pour faire face à l'augmentation des risques d'inondation, spécifiquement dans les régions submergées non protégées par des digues. Ce dispositif est basé sur des logements édifiés sur une plateforme flottante en béton lourd, coiffé d'une structure légère en bois, ce qui permet à tout l'édifice de s'élever spontanément lors d'une inondation. Des pieux en acier coulissants assurent la stabilité horizontale, orientant les habitations verticalement tout en autorisant leur élévation jusqu'à 5,5 mètres (Figure 35). C'est ce qui a été prouvé lors de l'inondation remarquable de 2011 à Maasbommel (Climate-ADAPT, 2015).



Figure 35: Photographies des pieux coulissants (Factor Architecten, Pays bas)

Ce dispositif intègre aussi des liens techniques adaptables qui assurent la permanence des réseaux (eau, électricité, drainage) même en situation de flottaison (Urbangreenbluegrids, 2025). Le M.A.R.S. est attrayant pour son aptitude à convertir des maisons conventionnelles en unités amphibies sans le besoin de recourir à des ancrages fixes au sol, souvent incompatibles avec les mouvements verticaux provoqués par les inondations (Adaptation Case Studies, 2015). Ce projet illustre parfaitement l'application de la stratégie modulaire et réversible en architecture résidentielle, suivant les directives d'adaptation aux conséquences du changement climatique.

Finalement, le scénario fictif ne reflète pas pleinement le potentiel esthétique que pourrait offrir un tel projet. Dans son état actuel, il peut susciter un certain inconfort, voire un rejet, en donnant l'impression de vivre à l'intérieur d'un organisme vivant ou d'un système technique surchargé. Cependant, avec une étude architecturale approfondie, il est tout à fait envisageable que des concepteurs parviennent à intégrer harmonieusement ces technologies durables dans une forme à la fois fonctionnelle et esthétiquement aboutie.

Interaction entre les différents critères

Il est important de ne pas oublier que les six critères du DNSH sont étroitement liées et que les interactions entre eux ne peuvent pas être incompatibles, plusieurs de ces points noirs ont été relevé dans la partie 5.4 : critique du scénario fictif

Je propose une grille d'analyse croisée de la conception que propose pour les 6 critères DNSH, afin de mieux comprendre les interactions entre chaque critère mais aussi la compatibilité avec la conception générale d'une l'architecture modulaire hors site ainsi que les principaux conflits pour une conception réalisable.

Critère DNSH	Compatibilité avec l'architecture modulaire hors site	Difficulté à mettre en place. (1=facile 5=difficile)	Principaux risques de conflits par rapport à mes idées
Atténuation du changement climatique	Compatible, faible inertie carbone du modulaire.	2	Technologies trop complexes, difficiles à entretenir
Adaptation au changement climatique	Discutable, en conflit avec la volonté de standardiser les modules	4	Difficile de couvrir tous les risques (pieux ou flottaison)
Utilisation durable des ressources en eau	Moyenne, la compacité est un avantage mais l'autonomie compliqué	3	Impossible d'être totalement autonome et maintenance nécessaire
Économie circulaire	Extrêmement compatible, démontabilité et préfabrication.	1	Production d'aucun déchet difficilement atteignable
Pollution (air, sol, eau)	Moyenne, dépend des matériaux utilisés.	3	Coût des matériaux trop élevé et nécessité de béton pour les fondations
Préservation de la biodiversité	Compatible, bâtiments avec faible emprise au sol.	2	Aucune emprise au sol compliquée même si faible

Sans surprise, l'économie circulaire, l'atténuation du changement climatique et la préservation de la biodiversité sont les atouts majeurs de l'architecture modulaire hors site et peu contraignant dans le respect des exigences du DNSH.

Dans le contexte de la lutte contre le changement climatique, l'architecture modulaire hors site offre un avantage considérable par rapport à la construction conventionnelle en raison de sa faible empreinte carbone. La préfabrication en usine permet d'optimiser l'usage des matériaux et de minimiser les déchets, à l'opposé des constructions traditionnelles où les pertes sont plus conséquentes. Cependant, certaines solutions à faible émission de carbone peuvent être plus complexes technologiquement et donc plus difficiles à maintenir dans le cadre modulaire, comparativement à la construction traditionnelle qui offre une plus grande souplesse en matière d'entretien.

En matière d'adaptation au changement climatique, l'architecture traditionnelle permet une plus grande flexibilité en se basant sur les caractéristiques locales (géotechniques, hydrologiques), puisque chaque édifice est élaboré de manière singulière. Par contre, l'uniformisation des modules hors site rend l'intégration de solutions personnalisées (comme la flottabilité, les pieux, la protection contre les aléas) plus complexe, ce qui va à l'encontre du principe d'industrialisation inhérent au modulaire.

En ce qui concerne l'usage durable des ressources hydriques, la compacité des constructions modulaires est un avantage théorique pour réduire les besoins. Cependant, l'indépendance totale demeure ardu à réaliser. L'approche conventionnelle facilite l'incorporation de systèmes sophistiqués de gestion de l'eau (récupération, phytoépuration). Puisque, cela engendre un coût supplémentaire significatif et une occupation du sol souvent plus large.

En revanche, l'architecture modulaire surpasse largement la construction traditionnelle en matière d'économie circulaire. L'utilisation de la déconstructibilité et de la préfabrication favorise une réutilisation totale des modules, en vue d'un réemploi, ce qui s'avère beaucoup plus complexe et onéreux à réaliser dans les constructions conventionnelles, où le démontage n'est généralement pas prévu dès la phase de conception.

En matière de pollution (air, sol, eau), la modularité ne constitue pas un avantage systématique. L'impact environnemental dépend fortement du choix des matériaux (bois, béton, composites). Les bâtiments traditionnels peuvent intégrer des matériaux bio-sourcés en grande quantité, mais la gestion des déchets et des pollutions liées au chantier est souvent moins maîtrisée que dans les usines de préfabrication.

Enfin, pour la préservation de la biodiversité, les bâtiments modulaires ont une emprise au sol plus faible, ce qui facilite leur implantation sans artificialiser massivement les sols. Ils permettent des interventions réversibles et limitées spatialement, contrairement à la construction traditionnelle, qui nécessite souvent des terrassements lourds et irréversibles, même dans le cas de projets légers.

5.5. Le confort des usagers

L'approche de ce scénario fictif mise sur le respect strict des critères DNSH. L'introduction de technologies durables de pointe modifie radicalement la façon dont les utilisateurs perçoivent et interagissent avec leur environnement domestique. L'initiative exposée examine de nombreuses options techniques à haute valeur écologique, dont les conséquences sur le confort d'utilisation journalière nécessitent une évaluation minutieuse.

Dans ce contexte, l'accompagnement des utilisateurs se transforme en un défi crucial afin de garantir l'adoption et l'usage correct des équipements durables intégrés au bâtiment. L'intégration de technologies de pointe — telles que le contrôle actif de la ventilation naturelle, les façades adaptatives, ou les systèmes de récupération et réutilisation des eaux usées — requiert une assistance pour aider les utilisateurs à bien comprendre leur fonctionnement. À l'inverse, des équipements passifs ou entièrement automatisés nécessitent parfois des actions quotidiennes (réglage de panneaux, contrôle d'ouvertures, suivi d'indicateurs de performance) afin de garantir leur rendement environnemental optimal.

Il est donc primordial de mettre en place un système de formation ou d'accompagnement sur mesure, à travers des outils éducatifs ou des sessions pratiques, afin que les utilisateurs

participent activement à l'amélioration de la performance du bâtiment plutôt que d'être de simples observateurs. Cette méthode d'accompagnement augmente également l'acceptabilité sociale de certaines avancées technologiques dont les avantages peuvent ne pas être apparents ou immédiats sans une compréhension appropriée, comme le projet ENERPOS.

Inauguré en 2008 sur le site universitaire du Tampon (île de La Réunion), l'édifice ENERPOS (École d'ingénieurs de l'Université de La Réunion et de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Montpellier) représente l'une des premières illustrations de bâtiment à énergie positive (Net Zero Energy Building, NZEB) dans un climat tropical humide (Lauret et al., 2013). Le projet, élaboré par les architectes Philippe Madec et Olivier Lemoine, s'appuie sur une stratégie bioclimatique incluant la ventilation naturelle, l'éclairage naturel et une protection solaire améliorée pour minimiser autant que possible le besoin en climatisation (Garde et al., 2014).



Figure 36 : Photographie du projet Enerpos, vue des protections solaires (île de La Réunion)

La validation sociale de cette méthode dépend en grande partie de l'assistance fournie aux utilisateurs. Étant prévu pour recevoir des étudiants, enseignants et membres du personnel administratif, des mesures de sensibilisation ont été instaurées dès l'inauguration : des panneaux informatifs, une formation sur l'utilisation du bâtiment, et un suivi des comportements. Une analyse après occupation a révélé que beaucoup d'utilisateurs se sentaient à l'aise sans climatisation, même pendant la période estivale, ce qui valide l'efficacité de l'approche bioclimatique (Garde et al., 2014).

Le projet ENERPOS démontre comment, dans le secteur de l'éco-construction, la sensibilisation et l'adhésion des résidents sont essentielles à la réussite des innovations technologiques, en particulier lorsque leurs avantages (diminution de l'énergie consommée, amélioration du confort thermique passif) ne sont pas directement perceptibles.

Il faut aussi considérer l'atmosphère intérieure. L'emploi de systèmes passifs (ventilation naturelle algorithmique¹, matériaux à changement de phase, enveloppe bioclimatique) aide à établir un environnement thermique stable sans faire appel à des appareils consommateurs d'énergie. Conceptuellement, cela favorise le confort des résidents, mais cela nécessite aussi un certain type d'ajustement comportemental : supporter des fluctuations thermiques plus étendues, maîtriser l'utilisation des volets, ou adapter ses tâches en fonction de l'exposition au soleil.

La lumière naturelle et la pureté de l'air sont aussi grandement appréciées, grâce à des façades dynamiques, des murs perméables à l'air et des mousses végétales dépolluantes. Ces appareils peuvent contribuer à la santé et au bien-être physiologique, cependant ils requièrent un entretien régulier et une considération esthétique particulière (matériaux naturels, revêtements végétaux). Par ailleurs, quelques utilisateurs pourraient éprouver un malaise face à des composants architecturaux changeants ou considérés comme « organiques », particulièrement si le logement semble « vivant » où réagir de façon indépendante. La présence d'insectes ou de rongeurs vivant autour des plantes qui composent le toit et les façades peuvent en effrayer plus d'un.

L'utilisation autonome en énergie et en eau implique également certaines restrictions. L'eau, étant une ressource de grande valeur, est soumise à un contrôle rigoureux et à une réutilisation. Cela requiert des résidents une rigueur dans son utilisation (durée de la douche, qualité du tri des eaux grises, etc.). De même, une indépendance énergétique basée sur des ressources intermittentes nuit au confort de l'habitation, empêchant l'utilisation de certains équipement dépendant de ces faibles productions (faible luminosité, absence de vent).

En dépit de ces défis, cette perspective architecturale offre également de nouvelles options pour la liberté d'utilisation, la mobilité résidentielle et la connexion avec le vivant. En incorporant des technologies dynamiques, adaptatives et réversibles, elle reconSIDÈRE le rôle de l'utilisateur. Il n'est plus simplement un occupant, mais un participant à la gestion écologique de son habitat.

5.6. Conclusion du scénario fictif

Ce scénario fictif démontre qu'élaborer une architecture réellement basée sur les principes du développement durable, de la résilience et de la préservation de l'environnement représente un défi complexe. Pousser le principe du DNSH à son paroxysme semble presque inaccessible actuellement, étant donné que les contraintes cumulées sont sévères sur les plans technique, réglementaire, éthique (confort) et opérationnel. Cependant, l'inclusion sélective de certains aspects pour se conformer aux standards de la taxonomie verte européenne tout en respectant le confort des usagers est nettement plus faisable.

Plusieurs des six critères du DNSH trouvent une mise en œuvre naturelle dans l'architecture modulaire hors site. Notamment, les aspects liés à la transition vers une économie circulaire, à la préservation de la biodiversité et à la lutte contre le changement climatique peuvent être traités efficacement par cette démarche constructive. Il est même possible de correspondre à la philosophie du DNSH en appliquant uniquement une petite partie - environ 10 % - des idées les plus avancées mentionnées dans le scénario fictif. Le traçage des différents matériaux,

¹ La **ventilation naturelle algorithmique** désigne un système automatisé qui pilote l'ouverture et la fermeture des ouvrants d'un bâtiment en fonction de données issues de capteurs (température, qualité de l'air, vent, etc.), afin d'optimiser le confort, la qualité de l'air et la performance énergétique.

l'utilisation d'une maquette numérique comme support d'entretien ou l'emploi de matériaux biosourcées sont des exemples.

Il est à noter que certains indicateurs du DNSH témoignent déjà d'une pensée pragmatique initiée par les autorités de régulation. Par exemple, il n'est pas nécessaire de créer un réseau d'eau totalement indépendant ou autonome, mais simplement de respecter des critères précis de consommation pour les appareils sanitaires et domestiques. Ce genre de pragmatisme reflète un désir de favoriser une progression graduelle du domaine, plutôt que d'imposer des principes irréalisables. Cependant, aucun critère de confort n'est présent dans le DNSH.

En effet, selon la taxonomie européenne, le principe DNSH examine l'effet environnemental des activités par rapport à six critères, sans prendre en compte le confort des utilisateurs (thermique, acoustique, visuel ou qualité de l'air). Cette lacune soulève une question : un bâtiment peut être conforme aux normes écologiques tout en fournissant un environnement de vie inconfortable, ce qui pourrait provoquer des actions compensatoires (comme l'usage intensifié du chauffage ou de la climatisation) et diminuer les bénéfices environnementaux escomptés, un phénomène désigné sous le terme d'écart de performance (de Wilde, 2014). Le manque de considération pour le confort pourrait également compromettre l'acceptabilité sociale des initiatives, d'autant plus que le bien-être des résidents est un facteur reconnu de la durabilité (Organisation mondiale de la santé, 2018).

Il paraît donc judicieux de voir les critères du DNSH non pas comme une contrainte politique démesurée ou du greenwashing, mais plutôt comme un fondement solide et structurant pour initier une réelle évolution de l'architecture vers des modèles plus durables. Ainsi, le DNSH peut être considéré comme une base d'engagement, un premier pas tangible vers une architecture écoresponsable, en adéquation avec les enjeux environnementaux actuels même si le confort de l'usager ne doit pas être ignoré.

Chapitre 6. Enjeux et perspectives

6.1. Les premières initiatives : BAMB

Initiative structurante lancée en 2015 dans le cadre du programme Horizon 2020 de l'Union Européenne, le projet BAMB - Building As Material Banks vise à révolutionner les processus de conception, construction, utilisation et déconstruction des bâtiments. Le but central de BAMB est de transformer l'industrie de la construction en adoptant un modèle d'économie circulaire. Ce modèle envisage les bâtiments non pas comme des produits achevés, mais plutôt comme des sources de matériaux qui peuvent être réutilisés et valorisés grâce à l'application de stratégies telles que la modularité, la démontabilité et la réversibilité.

6.1.1. Design de Bâtiment Réversible

Le Design de Bâtiment Réversible (RBD) est une démarche méthodologique élaborée dans le contexte du projet européen BAMB, avec pour objectif de convertir les édifices en réelles banques de matériaux recyclables. Cette idée se base sur l'élaboration de structures entièrement démontables, reconfigurables et adaptables, aussi bien en ce qui concerne les composants architecturaux (façades, planchers, cloisons) que les montages techniques, sans provoquer de destruction ou de dégradation des matériaux (Durmisevic, 2016). Le RBD met en place une classification précise des systèmes constructifs en sous-ensembles autonomes, facilitant leur extraction et leur substitution à diverses échelles (élément, sous-système, module).

Ci-dessous, l'exemple du projet « GTB Lab Module » conçu par Elma Durmisevic dans le cadre du projet européen BAMB, est un prototype de bâtiment modulaire entièrement démontable et reconfigurable, pensé pour maximiser la circularité dans le secteur de la construction (Figure 37).

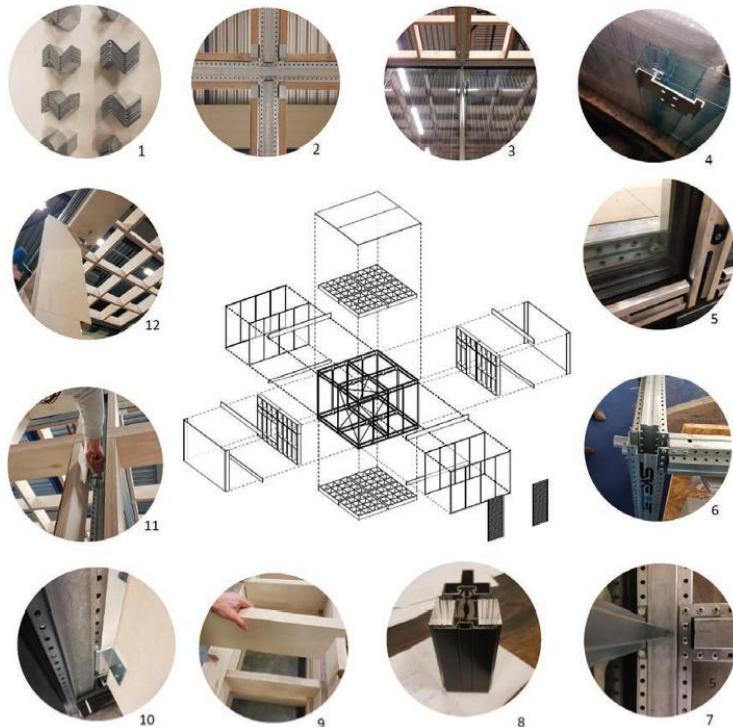


Figure 37: schéma des différents assemblages constituant le module “GTB lab Module”

Ce module expérimental démontre comment une architecture peut être conçue dès l'origine pour faciliter la déconstruction, la réutilisation des composants et l'adaptation à de nouveaux usages. Composé de 353 éléments assemblés selon une logique de “reversible building design”, le GTB Lab Module repose sur des connexions mécaniques démontables (sans colle ni soudure permanente) et sur une structuration en sous-systèmes indépendants (structure, enveloppe, équipements intérieurs) (Figure 38). Ce projet illustre la vision d'Elma Durmisevic selon laquelle l'architecture doit passer d'un modèle linéaire de consommation de ressources à une approche circulaire, où les bâtiments deviennent de véritables banques de matériaux (Durmisevic, 2016).



Figure 38: Rendu 3D du GTB LAB module (exemple d'assemblage), présentation BAMB

Sous la direction d'Elma Durmisevic, seize partenaires européens (architectes, ingénieurs, industriels, universités) ont collaboré pour concevoir des outils, des techniques et des projets pilotes attestant de la viabilité d'une architecture circulaire modulaire hors site. Deux axes principaux ont été privilégiés : le Design de Bâtiment Réversible (RBD) et le Passeport Matériaux (MP).

Cette méthode s'appuie sur les concepts de « design for disassembly (DfD)² », en mettant l'accent sur la possibilité de défaire les connexions : assemblages mécaniques, attaches détachables et interfaces « plug-and-play » adaptées à la préfabrication en usine (BAMB, 2019) (Figure 39). Le RBD a pour objectif non seulement d'améliorer les procédures de démontage et de remontage, mais aussi d'accroître la longévité des matériaux en favorisant leur réutilisation dans de nouveaux processus de construction. Cette approche est associée à des instruments d'évaluation dédiés, comme le Protocole de Conception de Bâtiment Réversible (RBDP) et la Méthode d'Évaluation Réversible (RAM), qui permettent d'évaluer le potentiel de transformation, de démontage et de réutilisation d'un bâtiment dès la phase initiale de conception (Debacker et al., 2019).

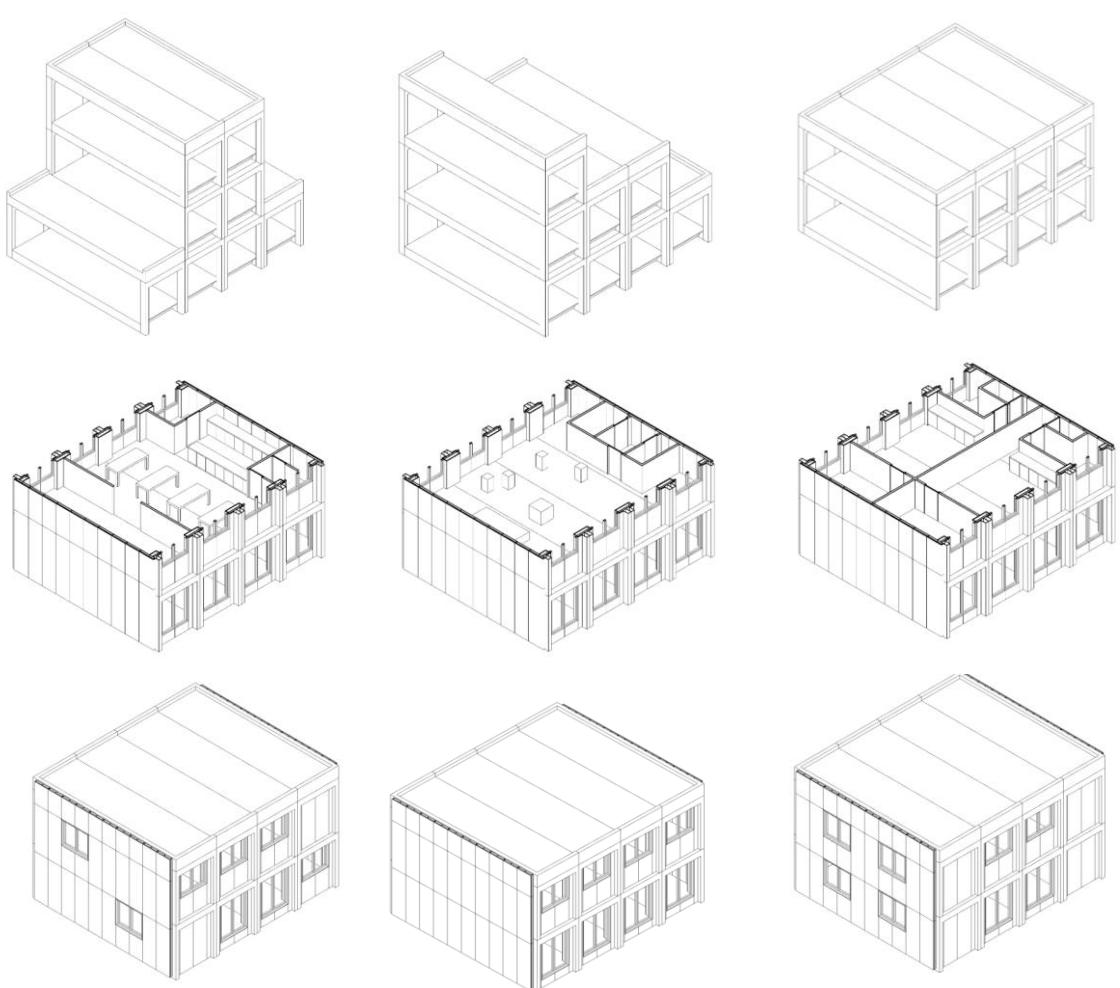


Figure 39: exemple de différentes combinaisons selon le principe DfD (site BAMB)

BAMB a prouvé la viabilité technique et financière d'une architecture modulaire circulaire en intégrant le RBD dans des projets pilotes tels que le GTB Lab Module ou le Circular Retrofit

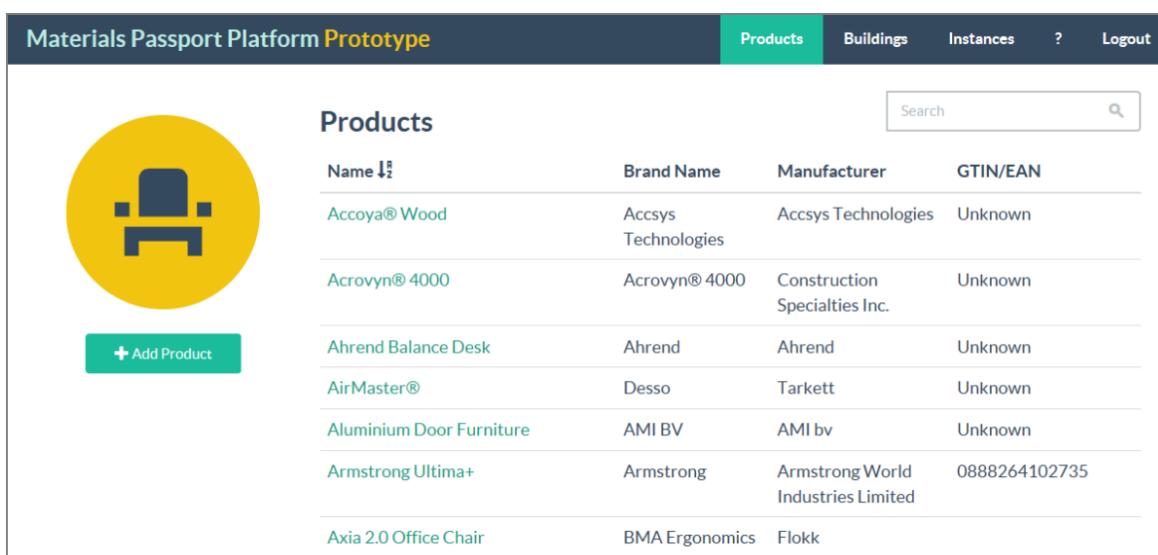
² Le Design for Disassembly (DfD) est une approche de conception qui vise à permettre le démontage facile, non destructif et sélectif des bâtiments et de leurs composants en fin de cycle de vie ou lors de transformations futures. L'objectif est de maximiser la réutilisation, la réparation et le recyclage des matériaux, en réduisant les déchets et l'impact environnemental.

Lab. Dans ce contexte, les cycles de vie des bâtiments ne sont plus confinés à un parcours linéaire (Durmisevic & BAMB Consortium, 2019).

6.1.2. Passeport Matériaux

Le passeport matériaux, comme stipulé dans le projet européen BAMB, est une ressource organisée qui compile les informations sur les matériaux employés dans la construction des bâtiments, dans l'intention d'optimiser leur réemploi, leur recyclage et leur valorisation à chaque phase du cycle de vie du bâtiment. Lancé entre 2015 et 2019 dans le contexte du programme Horizon 2020, le projet BAMB a rassemblé quinze partenaires européens dans l'objectif de favoriser une démarche circulaire en matière de construction. Un des éléments clés de ce projet est la création du passeport matériaux, envisagé comme un outil utile pour faciliter la transition du secteur vers des méthodes plus durables.

Un passeport matériaux renferme des renseignements précis concernant la composition, les caractéristiques, l'origine, l'usage, l'entretien et la possibilité de réutilisation ou de recyclage d'un élément ou d'une pièce de construction. Ce passeport, au-delà d'être une simple déclaration environnementale, se concentre sur la valeur future des matériaux, en particulier pour leur désassemblage ou leur transformation. Il permet donc de considérer les bâtiments comme des « dépôts de matériaux », où chaque composant est traçable et possède une valeur d'utilisation prolongée (Figure 40).



Products			
Name	Brand Name	Manufacturer	GTIN/EAN
Accoya® Wood	Accsys Technologies	Accsys Technologies	Unknown
Acrovyn® 4000	Acrovyn® 4000	Construction Specialties Inc.	Unknown
Ahrend Balance Desk	Ahrend	Ahrend	Unknown
AirMaster®	Desso	Tarkett	Unknown
Aluminium Door Furniture	AMI BV	AMI bv	Unknown
Armstrong Ultima+	Armstrong	Armstrong World Industries Limited	0888264102735
Axia 2.0 Office Chair	BMA Ergonomics	Flokk	

Figure 40 : prototype d'un passeport matériaux, retraçant les différents produits et leur composition (BAMB)

L'organisation du passeport suit une hiérarchie basée sur différents degrés d'information, depuis le matériau brut (tels que le bois ou l'acier), jusqu'au produit fini (comme un châssis de fenêtre), en passant par le système technique (par exemple, une façade ventilée), sans oublier l'échelle du bâtiment complet, voire celle du territoire urbain dans un cadre d'urban mining. Chaque niveau contient des données spécifiques qui s'emboîtent les unes dans les autres, offrant une cartographie dynamique et en constante évolution des ressources présentes dans la construction.

On distingue six principales catégories de données recensées : l'identification (nom, fabricant, localisation), les caractéristiques physiques et techniques, le registre d'utilisation et d'entretien, les conditions de maintenance, les scénarios de fin de vie (réutilisation, recyclage, valorisation) et finalement les indicateurs de durabilité (impacts environnementaux, sanitaires, etc.). Ces informations peuvent être incorporées dans des modèles numériques (BIM) et croisées avec d'autres bases de données afin d'améliorer le processus décisionnel concernant la conception, la gestion et la démolition des édifices.

Un des avantages significatifs du passeport matériaux est sa possibilité de promouvoir une véritable approche d'économie circulaire. En offrant aux maîtres d'ouvrage, architectes, entrepreneurs et gestionnaires une clarté sur la composition et la possibilité de réutilisation des matériaux, il aide à minimiser le gaspillage, prolonger la longévité des produits et diminuer l'extraction de ressources non exploitées. Toutefois, son utilisation est encore restreinte à cause de l'absence de normalisation, des défis liés à la collecte et l'organisation des données, ainsi que du manque d'un cadre légal harmonisé pour assurer sa durabilité et son interopérabilité.

Pour conclure, le passeport matériaux élaboré par le projet BAMB est un instrument essentiel pour favoriser la transition vers l'architecture circulaire. Il intègre des données techniques, de traçabilité et de réutilisation dans une approche numérique et systémique, pour une meilleure gestion des ressources dans le secteur de la construction.

6.2. Les freins institutionnels, techniques et économiques

Bien que l'architecture modulaire hors site soit en accord avec les buts de l'économie circulaire et le principe DNSH du règlement européen sur la taxonomie verte, elle rencontre divers obstacles qui entravent sa mise en œuvre à une grande échelle. D'un point de vue institutionnel, le manque d'une régulation uniforme à l'échelle européenne représente une entrave significative. La doctrine DNSH exige de prouver qu'un projet ne cause pas de dommage notable à six critères environnementaux, tels que la lutte contre le changement climatique, l'économie circulaire et la lutte contre la pollution. Cependant, en ce qui concerne l'industrie de la construction, les directives demeurent vagues et souvent non ajustées aux particularités de la construction modulaire, surtout en ce qui touche à la traçabilité des matériaux et à la démonstration du potentiel de réutilisation. Selon une recherche menée par Greenomy (2023), plus de 70 % des initiatives analysées ne respectent pas les critères DNSH à cause d'une absence de documentation ou de référentiels précis, particulièrement dans le domaine du traitement des déchets et la circularité réelle des composants (Greenomy, 2023).

D'un point de vue technique, malgré les bénéfices de la préfabrication modulaire en termes de diminution des déchets, d'efficacité temporelle et de qualité maîtrisée, elle rencontre diverses contraintes opérationnelles. Le déplacement de modules de grande taille peut entraîner des coûts additionnels et des rejets supplémentaires, alors que les critères de solidité structurelle peuvent mener à une surconsommation de matériaux, nuisant ainsi à l'empreinte écologique globale (Zhou et al., 2023). Par ailleurs, l'harmonisation des éléments et la compatibilité avec les outils numériques tels que le BIM ne sont pas encore entièrement mises en œuvre à l'échelle de l'industrie, entravant ainsi les complémentarités potentielles entre la conception, la production et la phase finale. La gestion des assemblages démontables, qui devrait être au cœur d'une approche DNSH, n'est pas non plus suffisamment maîtrisée en raison d'un déficit de compétences spécifiques chez les concepteurs et les entreprises du secteur de la construction (Charef & Lu, 2025).

Finalement, les obstacles économiques ont un impact considérable sur la soutenabilité du modèle circulaire hors site. Bien qu'il soit possible d'économiser entre 20 et 50 % sur les délais et entre 10 et 20 % sur les dépenses totales dans certains scénarios, les coûts d'investissement initiaux sont généralement supérieurs à ceux de la construction classique. Cela est dû aux coûts associés à l'établissement d'installations, à la conception personnalisée, au transport et à la logistique. De plus, on remarque une prise en compte insuffisante de la valeur du cycle de vie dans les critères d'attribution des contrats publics (Farah et al., 2024). Par ailleurs, les ambiguïtés réglementaires associées au DNSH complexifient l'attrait de financements verts pour ces projets, même si leur conformité à la taxonomie européenne devrait en principe favoriser leur accès aux capitaux durables.

Par conséquent, bien que l'architecture modulaire hors site ait un potentiel considérable pour faire face aux défis du développement durable, elle reste entravée par une série de barrières systémiques qui nécessitent une action coordonnée entre les législateurs, les acteurs industriels et les maîtres d'ouvrage pour être levées. Cela implique de normaliser les processus, de préciser les critères DNSH pertinents pour la préfabrication, et de revoir les modèles économiques afin d'incorporer pleinement la valeur circulaire des bâtiments modulaires.

6.3. Evolution du cadre réglementaire belge

Depuis l'introduction du Règlement Taxonomie de l'UE (UE 2020/852), la Belgique a progressivement incorporé le principe DNSH dans ses dispositifs de financement et ses politiques publiques, spécifiquement dans le contexte du Plan de relance et de résilience (RRP). Toute initiative candidate pour un financement européen se doit de prouver qu'elle ne nuit pas de manière significative à l'un des six buts environnementaux établis par la taxonomie, par le biais d'une évaluation méticuleuse et consignée (Service Public Fédéral de Santé, 2023). Même pour des initiatives liées à l'innovation ou à l'architecture modulaire, cette évaluation est indispensable, entraînant ainsi une charge administrative considérable.

Ces principes sont mis en œuvre par les trois régions belges, en fonction de leurs stratégies spécifiques. Par exemple, la Wallonie utilise des instruments d'analyse tels que TOTEM et le référentiel GRO pour juger de la durabilité des projets de construction en fonction de critères environnementaux, sociaux et sanitaires (Développement Durable Wallonie, 2024). Bruxelles, de son côté, intensifie les demandes en termes d'économie circulaire grâce à sa stratégie régionale, surtout dans les cahiers des charges publics. Ainsi, le principe DNSH joue le rôle de filtre transversal qui commence à être intégré dans les processus de planification et d'investissement publics (Futurebuild Belgium, 2025).

Le modèle belge se base largement sur les normes européennes pour évaluer l'impact environnemental des constructions. Il se base notamment sur les techniques d'Analyse du Cycle de Vie (ACV), de Déclaration Environnementale de Produits (EPD) et de calcul de l'empreinte carbone. TOTEM, la plateforme belge élaborée conjointement par les trois régions, est un instrument essentiel qui aide les concepteurs à mesurer l'impact environnemental total d'un bâtiment en phase de conception (Buildwise, 2025). Il offre également la possibilité de comparer les options de construction et les matériaux en fonction des critères de durabilité inclus dans le DNSH.

Par ailleurs, l'élaboration de bases de données nationales comme B-EPD (Environmental Product Declaration) facilite l'incorporation de données validées dans les projets du secteur

public et privé. Ces instruments sont indispensables pour démontrer que les travaux de construction ne compromettent pas les critères DNSH, notamment ceux concernant la gestion durable des ressources et la diminution des émissions de GES. Toutefois, comme l'ont souligné les études récentes de PwC Belgium (2023), il existe encore une faible comparabilité de ces méthodologies entre les différents opérateurs, entravant ainsi la transparence et la traçabilité des rapports d'impact.

Malgré les bénéfices clairs de l'architecture modulaire hors site concernant la réutilisation des composants, la minimisation des déchets et l'accélération des délais de construction, elle se confronte à une insuffisance normative au sein des normes belges actuelles. En Belgique, les règles techniques en matière de construction se basent essentiellement sur trois grands volets : les Documents Techniques Unifiés (DTU), les Eurocodes et la réglementation PEB (Performance Énergétique des Bâtiments). Ces référentiels ont été élaborés pour des constructions réalisées sur place, avec une mise en œuvre progressive sur le site, et non pour des composants préfabriqués assemblés rapidement.

D'un point de vue structurel, les Eurocodes établissent des directives de calcul pour les ouvrages statiques, mais qui ne sont pas particulièrement ajustées aux contraintes spécifiques auxquelles font face les modules lors de leurs opérations de levage, transport et assemblage. Les modules doivent être capables de supporter des charges dynamiques temporaires (comme celles provenant de grues ou de camions) qui ne sont pas spécifiquement prises en compte dans les techniques standard de dimensionnement.

D'un point de vue logistique, la réglementation ne traite pas des restrictions associées à la livraison de modules complets (gabarits routiers, points de levage, fixation temporaire) et de leur relation avec les fondations ou réseaux en place.

En matière environnementale, les normes belges ne mettent pas encore en avant des éléments pourtant cruciaux dans la modularité, tels que la conception déconstructible, la réutilisation des pièces ou le suivi des matériaux — facteurs qui sont pourtant indispensables pour une démarche d'économie circulaire et de respect du DNSH.

Par ailleurs, le respect des normes de sécurité représente un enjeu particulier dans le contexte modulaire. Les normes réglementaires concernant la protection contre les incendies, l'acoustique et la solidité structurelle sont élaborées pour des édifices monolithiques. Dans un système modulaire, il est essentiel d'assurer une performance constante entre les modules :

Dans le cas d'un incendie, la résistance au feu doit être garantie non seulement au niveau des parois individuelles, mais également aux jonctions, qui représentent souvent des points de vulnérabilité.

Dans le domaine de l'acoustique, les connexions entre différents modules peuvent se transformer en ponts phoniques si elles ne sont pas correctement gérées, ce qui rend difficile la conformité avec les indices de réduction sonore réglementaires.

En structure, le cumul des contraintes associées au transport et à l'assemblage des modules impose parfois des renforcements non prévus initialement, ce qui accroît les frais et la complexité du projet.

Faute de normes techniques précises, les responsables de projets et les concepteurs sont fréquemment contraints d'argumenter la conformité individuellement, ce qui retarde l'émission

des permis, complique la souscription aux assurances et rend plus ardu de prouver l'adéquation avec la taxonomie européenne (CAP Construction, 2024 ; EIPA, 2023).

Cela signifie que ces documents n'intègrent pas encore les spécificités structurelles, logistiques ou environnementales liées au modulaire. Malgré ces limites, la Belgique tente de structurer une gouvernance plus cohérente autour de la durabilité dans la construction. Les opérateurs publics collaborent avec des structures privées comme Group SECO pour former les entreprises à l'application du DNSH. Ces prestataires proposent des audits ESG³ (Environnement, Social et Gouvernance), des screenings de taxonomie et des rapports de conformité (Group SECO, 2024). Le but est d'outiller les acteurs pour qu'ils puissent démontrer leur contribution positive ou leur absence d'impact négatif. De plus, des manifestations telles que Futurebuild Belgium ou les assises de la construction durable constituent des plateformes d'échanges sur des exemples pratiques de l'application du DNSH dans le bâtiment neuf ou rénové. Ces plateformes offrent l'opportunité d'échanger des expériences sur la modularité, les matériaux biosourcés ou la traçabilité numérique, qui sont indispensables pour passer à une architecture modulaire certifiée conforme à la taxonomie (Futurebuild Belgium, 2025).

La Belgique a correctement incorporé le principe DNSH dans ses politiques publiques et son schéma d'investissement, conformément aux normes européennes. Toutefois, l'implémentation pratique de ces concepts dans l'industrie de la construction – et plus encore dans le secteur modulaire hors site – est entravée par des réglementations inappropriées, une absence d'uniformité dans la traçabilité, et des moyens de vérification encore améliorables. Pour soutenir efficacement ce changement, il est essentiel de mettre en place une régulation plus précise, alignée sur les pratiques de construction récentes, ainsi que d'intensifier les initiatives de formation, d'information et de certification à destination des opérateurs. Cette absence de régulation spécifique entrave l'innovation, complique l'obtention des permis de construire et limite la capacité à démontrer la conformité avec des critères de durabilité, tels que le principe DNSH.

³ ESG (*Environmental, Social, Governance*) désigne un cadre d'évaluation des performances extra-financières d'une entreprise ou d'un projet, portant sur ses impacts environnementaux, sociaux et de gouvernance. Les audits ESG permettent de vérifier la conformité aux standards de durabilité, de détecter les risques et de produire des rapports de transparence à destination des parties prenantes, en lien avec le principe DNSH.

Chapitre 7. Conclusion

7.1. Bilan compatibilité : modulaire hors site et DNSH

L'examen des six critères du DNSH révèle une forte adéquation structurelle entre l'architecture modulaire hors site et les objectifs de durabilité établis par l'Union européenne. La construction modulaire, grâce à sa préfabrication en usine et sa capacité de démontage, apporte des solutions pratiques aux attentes de circularité, de diminution de l'empreinte carbone et de contrôle de la pollution. En effet, la préfabrication facilite l'optimisation de l'utilisation des ressources, minimise les déchets sur site et assure une mise en œuvre de meilleure qualité, qui sont tous des aspects cruciaux pour adhérer aux principes DNSH (Construction21, 2023 ; Immodurable, 2024).

Des contraintes demeurent, surtout en ce qui concerne l'adaptation au changement climatique. La normalisation des modules peut parfois contrarier les besoins d'adaptation locale (nature du sol, risques naturels, etc.). Ainsi, bien que la compacité des modules puisse faciliter une utilisation plus efficiente des ressources hydriques, elle restreint l'implémentation de systèmes sophistiqués de gestion de l'eau (épuration biologique, recyclage des eaux usées). En effet, l'architecture modulaire hors site répond parfaitement aux critères de l'économie circulaire, de la biodiversité et de la réduction du changement climatique, tout en étant en adéquation avec les normes réglementaires actuelles (Construction hors site, 2025 ; Futurebuild Belgium, 2025).

Tableau de synthèse de la compatibilité

Afin de clarifier les résultats obtenus dans cette recherche, le tableau suivant propose une lecture croisée entre les six critères DNSH et la capacité de l'architecture modulaire hors site à y répondre. Il met en évidence les forces, les limites et les pistes d'amélioration possibles.

Critère DNSH	Points fort du modulaire	Limites identifiées	Solutions proposées
Atténuation du changement climatique	Réduction des déchets, ACV favorable, logistique optimisée	Transport routier des modules, usage de matériaux conventionnels	Modules biosourcés, logistique douce, ACV projetée
Adaptation au changement climatique	Rapidité de déploiement, flexibilité des usages	Faible adaptation aux risques locaux (sols, inondation, surchauffe)	Intégration contextuelle, conception bioclimatique*
Ressources et circularité	Démontabilité, réemploi des modules, production en atelier maîtrisée	Normes absentes pour la traçabilité, manque de standards sur matériaux	Passeports matériaux, bases de données EPD, indicateurs TOTEM
Pollution	Réduction de la pollution sur site, maîtrise en usine	Peu d'analyses sur la pollution des composants (COV, plastiques, etc.)	Analyse matériaux entrants, labels faibles émissions
Eau	Consommation réduite en phase de chantier, compacité utile	Peu d'autonomie hydraulique, rejet non valorisé	Systèmes de récupération, réutilisation eaux grises*
Biodiversité	Moins d'emprise au sol, intervention courte sur site	Modules souvent posés sur dalle ou pieux, pas de compensation écologique	Intégration végétalisée, fondations légères

* Certains critères de la taxonomie ne permettent pas à l'architecture modulaire hors site d'exprimer des solutions différentes de la construction traditionnelle, ces critères sont généralement peu explicites ou détaillés et ne posent pas une réelle contrainte dans la conception (Par exemple : le critère « eau » nécessite seulement un respect de débit d'eau de la plomberie).

7.2. Apport de la recherche

Cette thèse pallie un déficit documentaire significatif en analysant spécifiquement la concordance entre le modèle de construction hors site modulaire et le cadre DNSH, récemment instauré dans les normes européennes. Actuellement, il existe peu d'études qui abordent simultanément et de façon détaillée ces deux sujets. L'étude menée dans le cadre de ce travail de fin d'études offre une ressource précieuse pour les décideurs, architectes, ingénieurs ou développeurs qui aspirent à concilier l'industrialisation du bâtiment avec des objectifs écologiques.

La démarche méthodologique, basée sur l'analyse d'un cas d'étude développé par la société belge Degotte, a facilité la mise en parallèle des buts du DNSH avec les restrictions pratiques de la construction modulaire délocalisée. Cette société, en activité depuis 2015 dans le domaine de la préfabrication architecturale, met en lumière à la fois les possibilités de circularité (réemploi des modules, démontabilité) et les défis de l'intégration des normes DNSH dans l'application pratique. Cette étude de terrain, combinée à un examen détaillé des critères DNSH, propose donc un cadre d'évaluation opérationnel pouvant être appliqué à d'autres projets ou entreprises.

Une critique méthodologique reste toutefois nécessaire : bien que l'approche par étude de cas soit pertinente, elle ne permet pas de généraliser les résultats à l'ensemble du secteur. Une approche comparative entre plusieurs opérateurs aurait permis d'enrichir la portée des conclusions.

7.3. Ouvertures, perspectives et limites

Le temps imparti ne m'a pas permis d'approfondir certains aspects, tels que les dimensions sociétales ou urbanistiques de l'architecture modulaire, bien qu'ils méritent une attention particulière.

Par ailleurs, certains documents, notamment au sein de l'entreprise Degotte, n'ont pas pu être partagés, ou n'étaient tout simplement pas disponibles. Des plans de détail constructif ne pouvait pas être partagé car confidentiel et une étude globale sur la production de déchets sur l'entièreté d'un projet était trop couteuse. Malgré ces limites, le travail réalisé et les thématiques abordées témoignent d'une véritable volonté de positionner l'architecture modulaire hors site comme un vecteur d'une architecture durable et novatrice, tel qu'expliqué dans le chapitre 4.

Cette recherche ouvre la porte à de multiples axes de réflexion et d'innovation. Premièrement, elle insiste sur la nécessité d'élargir le référentiel DNSH, en ajoutant des critères liés au confort des utilisateurs, qui sont pour l'instant manquants comme vu au chapitre 5, Partie 5.5 avec la conception d'un scénario fictif, mais qui sont cruciaux pour toute conception architecturale cohérente et durable. Une étude plus approfondie de la relation entre la performance environnementale et la qualité d'utilisation pourrait représenter une direction de recherche future.

Par la suite, les contraintes détectées en matière d'adaptation au changement climatique ou de souveraineté en eau incitent à examiner plus en détail la problématique des interfaces entre normalisation industrielle et résilience locale. L'élaboration de modules adaptatifs, qui s'ajustent aux conditions climatiques ou géographiques spécifiques, serait une solution novatrice et encourageante à ce problème structurel.

Pour conclure, cette étude met en évidence le rôle crucial des systèmes de formation, d'audit et de certification pour soutenir la mutation du secteur tel expliqué au chapitre 6, partie 6.3. L'action de la Belgique, grâce à des partenariats entre les entités publiques et les acteurs du secteur privé, démontre qu'il est réalisable d'organiser un secteur modulaire en accord avec les buts de la taxonomie verte européenne. Cependant, cela exige un cadre légal plus précis, des normes spécifiques à la préfabrication et un investissement important dans le suivi numérique des matériaux, à l'image de projets tels que BAMB.

Bibliographie

Adaptation Case Studies. (2015). *Amphibious housing Maasbommel (Netherlands)*. Récupéré en août 2025 de <https://www.adaptecca.es/en/casos-practicos/amphibious-housing-maasbommel-netherlands>

Admin, & Admin. (2024, 21 août). *La construction modulaire face à la construction traditionnelle : L'étude présentée pour les 20 ans de l'ACIM ! Euro Modules*. Récupéré en août 2025 de <https://euro-modules.fr/construction-modulaire-face-a-la-construction-traditionnelle/>

Anderson, J., & Priestly, M. (2020). Citizen participation in modular urban projects: A framework for social inclusion. *Journal of Urban Design*, 25(4), 485–502.
<https://doi.org/10.5220/0006704202060213>

ArchDaily. (2022, 22 février). *First prefabricated wooden housing modules designed by RAU and SeARCH are installed in Amsterdam*. Récupéré en août 2025 de <https://www.archdaily.com/973742/first-prefabricated-wooden-housing-modules-designed-by-rau-and-search-are-installed-in-amsterdam>

Arashiro, L. T., Montero, N., Ferrer, I., Acién, F. G., Gómez, C., & Garfí, M. (2017). Life cycle assessment of high-rate algal ponds for wastewater treatment and resource recovery. *Science of the Total Environment*, 622–623, 1118–1130.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.051>

Billing Engineer. (2025). *Quality assurance and logistics in modular construction*. Récupéré en août 2025 de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666165924000899>

Bioréacteur à microalgues. (2025, août). *Wikipédia*. Récupéré en août 2025 de <https://fr.wikipedia.org/wiki/Photobior%C3%A9acteur>

Buildings As Material Banks. (2019). *Materials passports: Tool to support decision-making in circular construction*. Récupéré en août 2025 de <https://www.bam2020.eu/topics/materials-passports/>

Businesscoot. (2024, 26 novembre). *Le marché de la construction modulaire – France*. Récupéré en août 2025 de <https://www.businesscoot.com/fr/etude/le-marche-de-la-construction-modulaire-france>

Charef, R., & Lu, W. (2025). Adopting circular economy in construction: A review. *Frontiers in Built Environment*. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.151921>

Climate-ADAPT. (2015). *Amphibious housing in Maasbommel, the Netherlands*. European Environment Agency. Récupéré en août 2025 de <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/case-studies/amphibious-housing-in-maasbommel-the-netherlands>

Cohen, J.-L. (2006). *Le Corbusier : La planète comme chantier*. Paris : Textuel.

Collecte d'eau atmosphérique. (2025, août). *Wikipédia*. Récupéré en août 2025 de https://fr.wikipedia.org/wiki/G%C3%A9n%C3%A9rateur_d%27eau_atmosph%C3%A9rique

Construction Business Review. (2024, 30 septembre). *Modular construction technology is shaping the future of the industry*. *Construction Business Review Magazine*. Récupéré en août 2025 de <https://www.constructionbusinessreview.com/news/modular-construction-technology-is-shaping-the-future-of-the-industry-nwid-1760.html>

Construction Durable. (2023). *Guide construction hors site*. Récupéré en août 2025 de <https://www.constructiondurable.net/guide-construction-hors-site/>

Contributeurs aux projets Wikimedia. (2022, 26 octobre). *Lotissement de Lège*. *Wikipédia*. Récupéré en août 2025 de https://fr.wikipedia.org/wiki/Lotissement_de_L%C3%A8ge

Contributeurs aux projets Wikimedia. (2024, 17 août). *Établissements Bessonneau*. *Wikipédia*. Récupéré en août 2025 de https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89tablissements_Bessonneau

Contributeurs aux projets Wikimedia. (2024, 22 septembre). *Immeuble CBR*. *Wikipédia*. Récupéré en août 2025 de https://fr.wikipedia.org/wiki/Immeuble_CBR

Contributeurs aux projets Wikimedia. (2025, 9 mai). *Préfabrication*. *Wikipédia*. Récupéré en août 2025 de <https://fr.wikipedia.org/wiki/Pr%C3%A9fabrication>

CORDIS. (2017). *Optimised industrialisation of modular steel structures*. Récupéré en août 2025 de <https://cordis.europa.eu/project/id/315274/reporting/fr>

Couëron. (2025, août). *La Cité Bessonneau : un pan d'histoire*. *Nantes.maville.com*. Récupéré en août 2025 de https://nantes.maville.com/actu/actudet_-coueron.-la-cite-bessonneau-un-pan-d-histoire-_8-4793492_actu.Htm

Debacker, W., Manshoven, S., & Delem, L. (2019). *Reversible building design protocol & assessment method (RAM)*. Brussels : VITO & BAMB Project.

Degotte. (2025, août). *À propos*. Récupéré de <https://degotte.com/a-propos/>

Dey, S., Samanta, P., Ghosh, A. R., Banerjee, S., & Sen, K. (2024). State-of-the-art microalgae-based bioreactor wastewater treatment for the elimination of emerging contaminants: A mechanistic review. *Cleaner Water*, 2, 100027. <https://doi.org/10.1016/j.clwat.2024.100027>

Díaz, J. C. G. (2024, 4 novembre). *The integration of smart technologies in modular construction*. *Dormakaba Blog*. Récupéré en août 2025 de <https://blog.dormakaba.com/bits-and-blocks-the-integration-of-smart-technologies-in-modular-construction/>

Durmisevic, E., & BAMB Consortium. (2019). *Reversible building design framework*. BAMB Horizon 2020.

EDF. (2025). *Normes et raccordements techniques en construction*.

Elhalwagy, A. M., Ghoneem, M. Y. M., & Elhadidi, M. (2017). Feasibility study for using piezoelectric energy harvesting floor in buildings' interior spaces. *Energy Procedia*, 115, 114–126. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.012>

European Union. (2020). *Regulation (EU) 2020/852 of the European Parliament and of the Council on the establishment of a framework to facilitate sustainable investment. Official Journal of the European Union*. Récupéré en août 2025 de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32020R0852>

Factor Architecten B.V. (2021, 4 mai). *Drijvende woningen Maasbommel - Factor Architecten*. Récupéré en août 2025 de <https://www.factorarchitecten.nl/project/drijvende-woningen-maasbommel/>

Farah, E., Cooper, S., Margitova, R., Neumann, C., & Oliver Wyman. (2024). *A review of the DNSH assessment in the EU taxonomy: Progress, gaps and pathways forward*. AFME.

Fournisseurs de structures de montage au sol de panneaux solaires personnalisés, usine - Service personnalisé - GRENGY. (2025, août). Récupéré de <https://fr.grengysolar.com/ground-mounting-system/solar-panels-ground-mounting-structure.html>

FullStack Modular. (2025, août). Récupéré de <https://www.fullstackmodular.com/>

GA Smart Building. (2025). *Synapses, le premier bâtiment 100 % modulaire en bois de France, pour Paris La Défense à Courbevoie*. Récupéré de <https://www.ga.fr/en/our-projects/housing/synapses-frances-first-modular-wood-building-paris-la-defense-courbevoie/>

Garde, F., Lauret, P., & David, M. (2014). Post-occupancy evaluation of a Net Zero Energy Building in a tropical climate: The case study of ENERPOS. *Energy and Buildings*, 82, 189–199. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.020>

Gibb, A. G. F. (1999). *Off-site fabrication: Prefabrication, pre-assembly and modularisation*. Whittles Publishing.

Gibb, A., & Pendlebury, M. (2006). Flexible urbanism: The role of off-site construction in regenerating urban areas. *Building Research & Information*, 34(6), 552–563. <https://doi.org/10.1080/17452007.2005.9684590>

Greenomy. (2023). *EU taxonomy in construction and real estate: 9 key facts*. Récupéré en août 2025 de <https://www.greenomy.io/fr/blog/eu-taxonomy-in-construction-and-real-estate-9-facts>

GTB Lab, & Durmisevic, E. (2019). *GTB Lab circular building module – Project factsheet*. Building As Material Banks (BAMB). Récupéré en août 2025 de <https://knowledgeplatform.gtb-lab.com/project/gtb-lab-module/>

Hausladen, G., Liedl, P., Saldanha, M., & Deilmann, C. (2010). *Modular architecture manual*. Birkhäuser.

Hearn, J. (2018, 18 juillet). *A short history of prefabrication*. Prefab Museum. Récupéré en août 2025 de <https://www.prefabmuseum.uk/content/history/short-history-prefabrication?>

Herbers, J. (2004). *Prefabricated houses: The history of an architectural concept*. Rizzoli.

Home | Volumetric Building Companies. (2025, août). Récupéré de <https://www.vbc.co/en-gb/>

Joint Research Centre. (2023). *Do no significant harm principle: Current approaches and potential improvements*. Publications Office of the European Union. Récupéré en août 2025 de <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC135691>

Kamar, K. A. M., Alshawi, M., & Hamid, Z. (2011). Industrialized building system (IBS): Revisiting issues of definition and classification. *International Journal of Emerging Sciences*, 1(2), 120–132.

Keim. (2025, août). *Revêtement photocatalytique*. Récupéré de <https://www.keim.com/fr-fr/photocatalyse/>

Kieran, S., & Timberlake, J. (2004). *Refabricating architecture: How manufacturing methodologies are poised to transform building construction*. McGraw-Hill.

Lauret, P., Garde, F., Boyer, H., & Bastide, A. (2013). ENERPOS: A Net Zero Energy Building in Reunion Island. *Journal of Green Building*, 8(3), 68–86. <https://doi.org/10.3992/jgb.8.3.68>

Lawson, R. M., Ogden, R. G., & Goodier, C. I. (2012). *Design in modular construction*. CRC Press.

Lawson, R. M., Ogden, R. G., & Goodier, C. I. (2014). *Design in modular construction*. CRC Press.

L’Avenir. (2024, 15 novembre). *L’entreprise Degotte va débarquer à Bastogne : une cinquantaine d’emplois créés*. Récupéré en août 2025 de <https://www.lavenir.net>

Le Soir. (2022, 31 août). *L’entreprise Degotte investit 15 millions d’euros dans la construction modulaire*. Récupéré en août 2025 de <https://www.lesoir.be/464211/article/2022-08-31/lentreprise-degotte-investit-15-millions-deuros-dans-la-construction-modulaire>

Lluka, D. (2024). Modular structure and BIM-enabled automation in design and construction. *Balkan Journal of Interdisciplinary Research*, 10(2), 1–12.

Maison flottante – Plateforme à flottaison régulée. (2025, août). Récupéré de <http://www.maison-flottante.fr/construction.html>

Matériaux à changement de phase. (2025, août). *Wikipédia*. Récupéré de [https://fr.wikipedia.org/wiki/Mat%C3%A9riaux_%C3%A0_changement_de_phase_\(thermique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mat%C3%A9riaux_%C3%A0_changement_de_phase_(thermique))

McAvoy Group. (2025). *Innovations in offsite modular housing*.

McKinsey & Company. (2019). *Modular construction: From projects to products*. Récupéré en août 2025 de <https://www.mckinsey.com>

Mon Kit Solaire. (2025, août). *Panneaux solaires organiques*. Récupéré de <https://www.monkitsolaire.fr/blog/panneau-solaireorganique-n402>

Mousses végétales détoxifiantes. (2025, août). *Climatico*. Récupéré de <https://www.climatico.fr/quand-la-mousse-vegetaleverdit-les-murs-des-villes/>

NEC. (2025). *Standards and regulations in modular construction*. [URL à préciser]

Pieux hydrauliques extensibles. (2025, août). *Technopieux*. Récupéré de <https://www.technopieux.com/fr-CA/projets/batimentsmodulaires/>

Puce RFID. (2025, août). *Wikipédia*. Récupéré de <https://fr.wikipedia.org/wiki/Radio-identification>

Smith, R. E. (2010). *Prefab architecture: A guide to modular design and construction*. John Wiley & Sons.

Smithsonian Institution. (2025, août). *E.F. Hodgson Company collection*. National Museum of American History Archives. Récupéré de <https://americanhistory.si.edu>

Sols piézoélectriques. (2025, août). *Wikipédia*. Récupéré de <https://fr.wikipedia.org/wiki/Pi%C3%A9zo%C3%A9lectricit%C3%A9>

Stinson, L. (2016, 23 novembre). The world's tallest modular building may teach cities to build cheaper housing. *WIRED*. Récupéré en août 2025 de <https://www.wired.com/2016/11/cities-can-learn-worlds-tallest-modular-building>

Sudjic, D. (2005). *The edifice complex: How the rich and powerful shape the world*. Penguin Books.

Sun, Y., Wang, J., Wu, J., Shi, W., Ji, D., Wang, X., & Zhao, X. (2020). Constraints hindering the development of high-rise modular buildings. *Applied Sciences*, 10(20), 7159.

Surfaces Reporter. (2025, août). *Adaptable daylight systems and dynamic facades*. Récupéré de <https://www.surfacesreporter.com/articles/123164/adaptable-daylight-systems-and-benefits-architecture-projects-with-dynamic-facades-sr-exclusive?>

The Offsite Guide. (2025). *Best practices in modular housing projects*.

Urbangreenbluegrids. (2025, août). *Amphibious homes, Maasbommel, The Netherlands*. Récupéré de <https://urbangreenbluegrids.com/projects/amphibious-homes-maasbommel-the-netherlands>

Vitruve. (1991). *De architectura* (P. Gros, Trad.). Les Belles Lettres. (Ouvrage original publié ~1er siècle av. J.-C.)

WeDemain. (2025). *Éoliennes silencieuses*. Récupéré de <https://www.wedemain.fr/sauver-la-planete/actions-ecologiques/des-eoliennes-discretes-et-silencieuses-a-poser-sur-les-toits-1132575>

Wikipedia contributors. (2025, 13 juin). *Prefabricated building*. Wikipedia. Récupéré en août 2025 de https://en.wikipedia.org/wiki/Prefabricated_building?

World Health Organization. (2018). *Housing and health guidelines*. WHO. Récupéré en août 2025 de <https://www.who.int/publications/i/item/9789241550376>

Wright, G. (1981). *Building the dream: A social history of housing in America*. MIT Press.

Zhou, Z., Olanrewaju, A. L., & Li, H. (2023). Identifying and assessing modular construction implementation barriers in developing nations. *Sustainability*, 15(15), 11730. <https://doi.org/10.3390/su151511730>

Liste des figures

Figure 1: Page de catalogue pour les maisons modulaires Hodgson, 1918	6
Figure 2: Photographie des logements “les cités de labeur”, Lège, 1924.....	6
Figure 3: Photographie d'une des dernières maisons en bois de la cité ouvrière Bessonneau ..	7
Figure 4: Photographie de l'immeuble CBR, région Bruxelles capitale	9
Figure 5: Photographie d'un Prototype du Urban Rigger, Copenhague	10
Figure 6: Photographie de l'hôtel modulaire Ibis, à Perth, Australie.....	12
Figure 7: Photographie du 461 Dean, la plus haute tour modulaire de Brooklyn, New York .	14
Figure 8: Capture d'écran du site : https://www.fullstackmodular.com/process/ , démontrant la capacité de leur logiciel à associer leurs modules	16
Figure 9: Photographie de l'Habitat67 à Montréal, Canada	20
Figure 10 : Juf Nienke Apartments : modularité hors site au service de la ville et de la société	21
Figure 11:slide issu d'une présentation du Réseau interfédéral DNSH. Le principe du DNSH : application au secteur de la construction et de l'installation	25
Figure 12: Représentation de la position législative du DNSH selon la SPW.....	27
Figure 13: Schéma représentant comment différents composants définissent un module (Chen et al., 2022.)	30
Figure 14:Vue intérieure d'un atelier industriel où sont fabriqués les modules (Intelligent Offsite (UK) – usine de modules modulaires)	32
Figure 15: Schéma des différentes étapes d'assemblage d'une construction modulaire hors site (Modular Building Institute (MBI)).....	33
Figure 16: un module en cours d'assemblage sur un chantier (The Code Authority® (UL) – construction modulaire levée par grue).....	34
Figure 17: Plan de planification du chantier ”école de Um bock” de Degotte	35
Figure 18: Photographie de la cité U « Wood UP » à Paris rive gauche, composé de modules uniquement en bois	37
Figure 19 : Rendu 3D du projet "Synapses"	38
Figure 20: exemple d'architecture modulaire hors site acier-bois, (site Avelis)	39
Figure 21: représentation par strates constructives Stewart Brand 1994	42
Figure 22: proportion de CO2 émis pour le transport.....	42
Figure 23: émissions CO2 chantier uniquement, l'utilitaire est une énorme majorité (Degotte)	42
Figure 24 : Total et sous-totaux des émissions pour un projet 4 modules r+1 Degotte	43
Figure 25:Rapport PEB Degotte pour le projet de la crèche, montrant la proportion de biosourcé	45
Figure 26: Détail technique d'un composant "Mur" de l'architecture modulaire hors site Degotte	46
Figure 27 : extrait de l'APP, proportions de déchets des panneaux de bois	47
Figure 28 : Détail technique des fondations de l'architecture modulaire hors site Degotte.....	49
Figure 29 : extrait de l'AAP : impact de l'architecture modulaire hors site sur le sol selon Degotte.....	50
Figure 30: Site de démontage de l'école Um Bock	51
Figure 31: Extrait du PPSS, instructions de l'ordre de démontage, stockage et remontage des modules	52
Figure 32: Schéma d'un projet d'architecture modulaire en faveur du DNSH	57

Figure 33:exemple d'application de l'agro-photovoltaïque (entreprise Grengy solar)	58
Figure 34:Photographies d'une architecture préfabriquée utilisant le système M.A.R.S (Factor Architecten et Dura Vermeer, Pays bas)	59
Figure 35: Photographies des pieux coulissants (Factor Architecten, Pays bas)	60
Figure 36 : Photographie du projet Enerpos, vue des protections solaires (île de La Réunion)	63
Figure 37: schéma des différents assemblages constituant le module “GTB lab Module”	66
Figure 38: Rendu 3D du GTB LAB module (exemple d'assemblage), présentation BAMB ..	67
Figure 39: exemple de différentes combinaisons selon le principe DfD (site BAMB)	68
Figure 40 : prototype d'un passeport matériaux, retracant les différents produits et leur composition (BAMB)	69

Annexe

Table des matières

Annexe	1
Annexe 1 : Tableau Excel Documents attendus par Degotte	2
Annexe 2 : Formulaire DNSH et tableau d'analyse	5
Formulaire DNSH.....	5
Tableau d'analyse du formulaire DNSH	24
Annexe 3 : PPSS Degotte (Plan Particulier de Sécurité et de Santé)	29
Annexe 4 : Appel à Projet (AAP) d'un projet Degotte	86
Décret calepinage.....	86
Comparatif commande projet	87
Rapport d'activité projet degotte.....	88