

Mémoire de fin d'études : "La nouvelle norme NBN ISO 20887 "développement durable dans les bâtiments et ouvrages de génie civil - conception pour la démontabilité et l'adaptabilité - principes, exigences et recommandations", est-elle un réel levier pour renforcer et intensifier les pratiques de conception circulaire en Belgique ?

Auteur : Glodkowski, Paul-Antoine

Promoteur(s) : Trachte, Sophie

Faculté : Faculté d'Architecture

Diplôme : Master en architecture, à finalité spécialisée en art de bâtir et urbanisme

Année académique : 2022-2023

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/18263>

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.



UNIVERSITE DE LIEGE – FACULTE D’ARCHITECTURE

La nouvelle norme NBN ISO 20887

*"développement durable dans les bâtiments et ouvrages de
génie civil – Conception pour la démontabilité et
l’adaptabilité – principes, exigences et recommandations"*

Est – elle un réel levier pour renforcer et intensifier les
pratiques de conception circulaire en Belgique ?

Travail de fin d’études présenté par Paul-Antoine GLODKOWSKI en vue de l’obtention du
grade de Master en Architecture

Sous la direction de : Sophie TRACHTE

Année académique 2022 -2023

Remerciements

Avant toute chose, je souhaite remercier madame Sophie Trachte, promotrice de ce TFE, tant pour ses précieuses recommandations, que pour son encadrement et son soutien. Mes remerciements vont également aux membres du jury, M. Laurent, M. Possoz et Mme Maerckx d'avoir accepté d'être lecteur, pour l'intérêt porté à ce sujet ainsi que le temps consacré à la lecture de ce travail.

Je tiens à remercier M. Breels project manager dans la construction durable chez le bureau d'ingénierie MATRIciel, Mme Maerckx anciennement manager advies dans le bureau d'étude Cenergie, M. Romné project manager pour l'économie circulaire et la transition climatique chez l'ICEDD asbl, pour avoir pris le temps de répondre à mes questions et d'avoir enrichi mes connaissances par leurs expériences. De même, je tiens à remercier l'ingénieur du groupe BESIX et l'organisation Mundo-Lab d'avoir répondu à mon questionnaire.

En dernier lieu, je remercie ma famille, mes proches, ainsi que mon entourage pour leurs encouragements et leur soutien tout au long de mes études.

Avant-propos

Avant d'entrer dans le vif du sujet, il me paraît important d'expliquer la genèse de mon intérêt pour la question de la conception circulaire dans la construction.

Lors du cours d'état d'avancement, je me suis intéressé aux causes de l'abandon des bâtiments dans les villes, qui a permis d'amorcer une réflexion personnelle sur la pratique de l'architecture et l'impact sur l'environnement.

Durant mes années académiques en architecture, j'ai eu l'occasion de suivre le cours de Mme Trachte et M. Laurent qui abordent le sujet de la gestion durable et circulaire de nos ressources, ainsi que les conceptions alternatives permettant de prolonger la durée de vie des bâtiments et de limiter leur impact environnemental. C'est grâce à ce cours que mon intérêt pour la conception circulaire est né. J'ai eu ensuite la chance d'être encadré par madame Trachte comme promotrice qui m'a proposé le sujet de mon TFE.

Ces recherches m'ont permis de me rendre compte des enjeux de la construction dans notre société, mais aussi de prendre connaissances de l'opportunité d'une conception circulaire et des nombreux acteurs, leviers et outils qui font avancer le secteur du bâtiment vers un avenir plus durable.

Ce travail de fin d'étude fut, pour moi, une ouverture d'esprit qui m'a apporté une toute nouvelle réflexion sur ma vision de l'avenir et qui m'a permis de découvrir de nouvelles approches, techniques et méthodes qui sont, selon moi, le futur de la construction de nos ouvrages.

Table des matières

Remerciements	1
Avant-propos	2
Introduction :.....	6
Méthodologie :	7
1. Cadre théorique	8
1.1. Les enjeux du secteur de la construction en Belgique	8
1.2. L'économie circulaire	13
1.2.1. Origine.....	13
1.2.2. Définition :	14
1.2.3. L'économie circulaire dans la construction.....	17
1.3. Des conceptions alternatives	19
1.3.1. Des conceptions pour le changement et l'adaptabilité :.....	20
1.3.2. Des conceptions pour la déconstruction et le désassemblage :	23
1.3.3. Des conceptions pour le recyclage et le réemploi :	26
1.4. Conclusion.....	31
2. Les principes de conception architecturale circulaire	32
2.1. Introduction	32
2.2. L'échelle du bâtiment :.....	35
2.2.1. L'implantation du site :	36
2.2.2. L'adaptabilité spatiale :	37
2.2.3. Stratification des éléments:	39
2.2.4. Synthèse	41
2.3. L'échelle du composant :	43
2.3.1. Le principe de réversibilité technique	43

2.3.2.	Le principe de simplicité	46
2.3.3.	Le principe de compatibilité.....	47
2.3.4.	Le principe de durabilité	48
2.3.5.	Synthèse :	49
2.4.	L'échelle du matériau :.....	51
2.4.1.	Choisir les matériaux en fonction de leur potentiel de réutilisation ou de valorisation.....	51
2.4.2.	Choisir les matériaux en fonction de leur impact environnemental.....	52
2.4.3.	Synthèse	52
2.5.	Document d'informations (Passeport matériaux)	53
2.6.	Conclusion :.....	55
3.	Analyse de la norme ISO NBN 20887	56
3.1.	Introduction	56
3.2.	Définition préalable d'une norme technique	56
3.3.	Descriptif de la norme ISO NBN 20887 :.....	57
3.3.1.	Introduction :.....	57
3.3.2.	Stratégies de conception :.....	58
3.3.3.	Les principes de conception pour la démontabilité et l'adaptabilité :.....	61
3.3.4.	Principes d'adaptabilité :.....	61
3.3.5.	Principes de démontage.....	66
3.3.6.	Documentation et informations	78
3.3.7.	Mise en œuvre de la Cp D/A.....	79
3.4.	Conclusion.....	81
4.	Pratiques de conception et construction circulaire à Bruxelles et en Wallonie.	86
4.1.	Introduction :	86
4.2.	Habitudes et pratiques de conception des architectes :	86
4.2.1.	Pratiques d'adaptabilité spatiale.....	87

4.2.2.	Pratiques de réversibilité technique.....	89
4.2.3.	Le choix des matériaux	92
4.2.4.	La gestion des données.....	93
4.2.5.	Les freins et les obstacles en Belgique.....	94
4.3.	Les outils et les leviers au niveau de la conception circulaire en Belgique :	96
4.3.1.	Introduction :.....	96
4.3.2.	Les leviers de la région Flandre	97
4.3.3.	Les leviers de la région Bruxelles - Capitale.....	99
4.3.4.	Les leviers de la région Wallonne	101
4.3.5.	Les autres leviers en Belgique.....	101
4.3.6.	Positionnement de la norme face aux leviers existants.	103
4.4.	Les exemples de bâtiments circulaires	106
4.4.1.	Le projet Hôpital Joseph Bracops.	106
4.4.2.	Le projet MUNDO LLN (Louvain-La-Neuve)	109
4.4.3.	Le projet ZIN.....	111
4.5.	Conclusion.....	113
5.	Discussion.....	117
6.	Conclusion générale	119
	Bibliographie.....	122
	Webographie.....	131
	Table des illustrations	132
	Tableau.....	133
	Annexes	Erreur ! Signet non défini.

Introduction :

Le secteur de la construction belge est actuellement basé sur un modèle économique linéaire. Cependant, ce système ne prend pas en compte le caractère épuisable de la matière première, ce qui provoque une mauvaise optimisation dans la valorisation des matériaux en fin de vie. Ces derniers deviennent des déchets résiduels mis à la décharge ou à l'incinération. Un tel concept est actuellement insoutenable pour la croissance économique et pour les générations futures (Romné & Vrijders, 2018, p. 6).

L'économie circulaire représente une opportunité pour le secteur de la construction. Ce modèle cherche à conserver en usage les ressources aussi longtemps que possible. Il maximise la valeur des produits pendant leur utilisation, favorise la récupération des matières pour qu'elles soient valorisées en fin de cycle de vie. Il représente donc une alternative pour repenser nos manières de construire.

Grâce à l'émergence de l'économie circulaire dans la construction, le concepteur dispose d'une nouvelle référence pour innover. Elle vient s'ajouter à des approches telles que la conception pour l'adaptabilité et la conception pour la déconstruction.

En 2020, est sortie la norme NBN ISO 20887 « *Développement durable dans les bâtiments et ouvrages de génie civil — Conception pour la démontabilité et l'adaptabilité — Principes, exigences et recommandations* » qui s'appuie sur la norme existant au Canada. Elle permet de fournir un cadre de travail pour les principes de Conception de Démontabilité et d'Adaptabilité (Cp D/A) ainsi que les enjeux-clés (ISO & NBN, 2021). Il est ainsi pertinent d'étudier si elle est un réel levier pour renforcer et intensifier les pratiques de conception circulaire en Belgique.

Nous voulons comprendre si la norme traite de principes en corrélation avec les approches des constructions circulaires, si ces stratégies sont efficaces en termes de pratiques architecturales et si elles sont dans la continuité des leviers instaurés en Belgique.

Méthodologie :

Nous verrons, dans un premier temps, les actuels enjeux présents dans la construction des ouvrages afin de mieux comprendre quels sont les facteurs qui ont un impact sur l'environnement. Nous analyserons également le modèle d'économie circulaire, pour comprendre l'influence qu'il peut avoir sur le secteur de la construction, et finalement définir les approches de conceptions alternatives telles que l'adaptabilité et la déconstruction.

Puis, dans un second chapitre, nous développerons, sur la base de documentations, les principes de la conception circulaire et les notions-clés qui seront divisées selon trois échelles d'analyse : celle du bâtiment, celle du composant et celle du matériau. Cette section nous donnera un catalogue de critères pour les comparer aux principes de la norme NBN ISO 20887 .

Ensuite, nous analyserons, dans le troisième chapitre, la norme NBN ISO 20887 « *Développement durable dans les bâtiments et ouvrages de génie civil — Conception pour la démontabilité et l'adaptabilité — Principes, exigences et recommandations* » afin de les mettre en parallèle avec les principes de conception circulaire.

Enfin, nous étudierons le niveau de pratiques circulaires dans le secteur de la construction belge afin de déterminer leur degré d'utilisation et de relever les potentiels freins. Nous développerons aussi les éventuels leviers présents en Belgique, dans le but de cerner le contexte actuel.

L'objectif est de déterminer si la norme apporte une contribution au secteur de la construction belge pour évoluer vers une économie circulaire.

1. Cadre théorique

1.1. Les enjeux du secteur de la construction en Belgique

Notre société actuelle est issue d'un modèle économique qui a permis « d'accélérer » le progrès et qui a aidé les populations à accéder à une prospérité matérielle (Morris, 2016). Cependant, il n'a pas pris et ne prend pas en compte le caractère épuisable des matières premières (Sobotka et al., 2019, p. 7). Or, l'exploitation n'a cessé d'augmenter, dépassant le taux de régénération des ressources naturelles et montrant ainsi des limites (Meadows et al., 2017, p. 10). Ces dernières sont à l'origine de bouleversements sociaux et environnementaux, que les climatologues Will Steffen et Paul J Crutzen, ainsi que l'historien John R McNeil, ont nommé la « *grande accélération*¹ » (2007).

D'après le projet BBSM (Bâti Bruxellois Source de nouveaux Matériaux), l'utilisation annuelle en ressource matérielle est estimée à seize tonnes par habitant pour l'Europe. L'une des conséquences est que nous produisons six tonnes de déchets par habitant (Gobbo & Trachte, 2016). En outre, un résumé des perspectives des ressources mondiales de 2019 par PRI (Panel International Ressources) montre qu'entre 1970 et 2017, l'extraction annuelle de matières a triplé, passant de 27 à 92 milliards de tonnes (Oberle et al., 2019). Selon Buildwise (anciennement CSTC), la consommation de ressources devrait se poursuivre compte tenu de la hausse démographique, ainsi que de la croissance de la classe moyenne et de son pouvoir d'achat (Romné & Vrijders, 2018).

L'un des secteurs économiques qui a le plus d'impact sur l'environnement, en ce qui concerne les ressources et les déchets, est celui de la construction. D'après la Commission européenne le secteur de la construction et de l'exploitation des bâtiments représente environ la moitié de l'extraction de tous les matériaux et génère 38 % des déchets (Sobotka et al., 2019). Il jouera donc un rôle primordial en devenant un acteur moins consommateur de ressources et moins producteur de déchets.

De plus, de nouvelles exigences s'imposent à l'environnement bâti, comme : les innovations technologiques, la hausse démographique, l'évolution des problèmes écologiques, le changement des économies et des modes de vie. Selon E. Durmisevic et J. Brouwer, cela

¹ La grande accélération est un terme pour désigner l'impact que l'humanité a sur la biosphère de la terre car elle s'est dégradée ces dernières années (1945 à aujourd'hui)

influence considérablement la façon dont nous devons concevoir et construire à l'avenir. (Chini & Schultmann, 2002).

On peut alors se demander quelles sont les pratiques de construction actuelle qui provoquent ce gaspillage de ressources.

L'une des premières raisons est notre économie qui suit un modèle linéaire que l'on peut simplifier par :

« Extraire — Fabriquer — Consommer — Jeter ».

C'est-à-dire : l'extraction des ressources naturelles, la transformation de la matière, l'utilisation du produit et, finalement, la requalification des composants en déchet lorsque celui-ci n'a plus d'utilité pour notre société (Fénard, 2021). Ce paradigme économique dégrade notre écosystème, appauvrit nos ressources naturelles et peut provoquer, dans le futur, un risque volatile des prix. (Romné & Vrijders, 2018)

On retrouve cette pensée dans nos ouvrages, car aujourd'hui, nos constructions sont conçues pour être finies. Selon les normes de conception structurelle telles que les Eurocodes², la durée de vie attendue d'un bâtiment est de 50 ans pour une construction classique et de 100 ans pour les constructions monumentales. Mais bien que nous sachions construire de manière robuste et pérenne, on observe des démolitions prématurées pour les bâtiments n'ayant pas encore atteint leur fin de vie prévue (Galle et al., 2019a). Leur nature statique entraîne souvent une inadéquation avec la demande dynamique des consommateurs (Chebli, 2016).

Pour les auteurs Donald Iselin et Adrew Lemer les bâtiments sont sujets à des changements qui les rendent obsolètes. Ils proposent de classer des facteurs de changement selon quatre dimensions. (Iselin & Lemer, 1993, p. 20-21).

Le facteur fonctionnel influe sur l'usage des édifices, de ses éléments ou de ses commodités. Il est altéré par l'usure (naturelle ou due à l'exploitation du bâtiment) et par les besoins des utilisateurs qui évoluent dans le temps. (Manque de flexibilité spatiale, organisation, etc.)

Le facteur technologique est lié à l'efficacité des techniques par rapport aux nouvelles technologies. On peut l'observer lorsqu'un produit ne répond plus à son utilité principale

² Les Eurocodes sont des codes européens de conception et de calcul des ouvrages, se substituant aux codes nationaux et permettant aux entreprises de travaux ou bureaux d'études, d'accéder aux marchés des autres pays membres. (« Eurocodes », s. d.)

comme un toit qui fuit. Ce facteur est lié aux domaines de la sécurité, du sanitaire, du confort, de l'efficacité énergétique, etc.

Le facteur économique dépend de la différence de coût entre des choix de rénovation qui maintiennent l'existant, et des choix de démolitions pour reconstruire du neuf. Ce peut être également dû à des dépenses de frais de gestion ou d'entretien. Et aussi des dépenses influencées par la valeur immobilière, par l'emplacement du bâtiment ou encore par le développement du marché.

Le facteur social, est influencé par : des valeurs sociales, des valeurs environnementales, des valeurs esthétiques, des programmes politiques, des législations ou des modes de vie, etc.

C'est à cause de l'évolution rapide des exigences que la fonction d'un bâtiment a un cycle plus court, ce qui remet en question notre méthode de conception durable.

« [...] *the unit of design analysis regarding sustainable building should not be the building, but the use of this building over time, including environmental and economic impacts that the building design offers* » (Durmisevic, 2006a, p. 53).

« [...] *L'unité d'analyse de la conception concernant la construction durable ne devrait pas être le bâtiment, mais l'utilisation de ce bâtiment dans le temps, qui inclut les impacts environnementaux et économiques que la conception du bâtiment offre* » (Durmisevic, 2006a, p. 53).

Dans le guide « concevoir la transition vers l'économie circulaire », on apprend que la longévité d'un bâtiment et sa qualité de résistance à l'usure, dépend de plusieurs conditions. D'abord, de l'environnement dans lequel il est situé et de son contexte socio-culturel, mais aussi des matériaux utilisés (Galle et al., 2019a). De plus, dans l'ouvrage « Design for deconstruction and materials reuse » (Guy & Shell, 2006), les auteurs décrivent un conseil lié à l'expérience des praticiens. Selon ces derniers, un enchevêtrement des systèmes (électriques, gaines, etc.) dans les murs, sols et plafond ainsi que l'utilisation de connecteurs inaccessibles, ne permettent pas de séparer les composants dans les ouvrages. Or, pour Brand, la considération principale pour l'adaptation des bâtiments est le cisaillement spatial et temporel entre les systèmes et les matériaux du bâtiment (Brand, 1995).

Il décrit dans son livre « how buildings learn : What happens after they're built » (Brand, 1995) la séparation des couches en fonction de leur durée de vie. Par exemple, la structure, d'une

durée de vie de 30 à 300 ans, devrait être indépendante de la « Peau » qui a une espérance de vie de 20 ans ou des services (électricité, plomberies, etc.) dont la période d'existence n'est que de 7 à 15 ans. La plupart des bâtiments sont construits de manière à ne pas permettre le démontage simple. Ils sont coulés sur place, intégrés et liés de manière à empêcher la déconstruction facile des composants. (Crowther, 2005a).

Il faut donc que le secteur de la construction anticipe, dès la conception, une flexibilité spatiale et technique, afin de prolonger la durée de vie de nos édifices et de leurs composants. Car les conceptions rigides peuvent être des déclencheurs d'obsolescence et, par addition, provoquer le gaspillage des ressources et la production de déchets.

En outre, un rapport du FEDER BBSM analyse ce qu'est un déchet de construction. Selon le texte les déchets de construction sont : : « *tout déchet produit par une des phases du cycle de vie d'un matériau de construction, d'un élément de construction ou d'un équipement, et ce, depuis sa fabrication.* » (Bos & Trachte, 2021, p. 20) On peut trouver plusieurs déclinaisons comme le montre le schéma ci-dessous :



Figure 1: les différentes déclinaisons du déchet de construction tirées d'architecture et climat (source : Bos & Trachte, 2021)

On retrouve des déchets de construction lors de la *production* qui, selon le type de transformation, varient de 2 à 10 % des matières premières utilisés. Elles sont généralement réinjectées dans le cycle de fabrication car elles sont peu « *souillées* » et peuvent être assimilées dans le processus.

Les chutes de mise en œuvre représentent environ 10 % des matières utilisées selon le type de chantier (rénovation, nouvelle construction ...). Elles peuvent être identifiées pour un triage sélectif et sont généralement peu ou pas souillées. Il faut cependant prendre aussi en compte les déchets d'emballage (palette, plastique, etc.) qui sont générés en quantité importante.

Quant aux *déchets de démolition*, ils représentent « *une grande variété typologique sur base de caractéristiques diverses : quantité de déchets produits ; nature des déchets ; dimension des déchets ; état de dégradation du déchet; pollution du déchet ...Etc.* » (Bos & Trachte, 2021, p. 21). Toujours selon le texte de BBSM FEDER les déchets de construction sont souvent mal quantifiés et peuvent être 2 fois supérieurs à l'estimation de l'entrepreneur.

On remarque donc que la plupart des déchets sont issus de démolition or selon Buildwise 54% des déchets de démolition sont mis en décharge et la plupart ne peut être réemployés car ils contiennent des éléments toxiques. (Romné & Vrijders, 2018). Le reste est en majorité recyclé pour servir de fondation de routes ou de bâtiments. Pour la doctorante E. GOBBO, ces déchets inertes concassés sont un bon exemple du downcycling³. Ils montrent que le recyclage actuel pose problème, avec une diminution de qualité initiale de la matière ainsi qu'une consommation d'énergie et de ressources additionnelles lors des traitements (Gobbo, 2015).

Grâce à l'analyse de ces pratiques, nous pouvons affirmer que les bâtiments doivent être conçus en prévoyant toutes les étapes de leur cycle de vie, dont les futurs changements (Chebli, 2016). Les systèmes constructifs qui composent les ouvrages, peuvent influencer, en fonction de leur durée de vie, l'obsolescence des édifices. Quant aux matériaux, il faut mettre en place une meilleure gestion des déchets pour que leur valorisation soit optimale.

Dans le guide « *environmental improvment through product development* » (2009), McAloone et Bey nous expliquent que quel que soit la nature, l'ampleur ou le moment de l'apparition de l'impact d'un produit, environ 80 % sont fixés dans la première phase du développement. C'est donc dès la conception qu'il faut chercher à prévoir le cycle des bâtiments, des composants et des matériaux. Cependant, très peu de concepteurs ou de constructeurs envisagent un scénario de fin de vie. La plupart conçoit pour le montage, mais ne prend pas en compte le démontage ou la réutilisation des matériaux (Durmisevic & Yeang, 2009).

« *If a building doesn't support change and reuse, you have only an illusion of sustainability.* »
(Croxtton cité par Chebli, 2016, page. 21)

³ Recyclage d'une matière en tenant compte d'exigences de performance, de qualité et de valeur inférieure à celle d'origine [A. Romné, J. Vrijders ; 2018]

« Si un bâtiment ne permet pas le changement et la réutilisation, vous n'avez qu'une illusion de durabilité ». ⁴

1.2. L'économie circulaire

1.2.1. Origine

Les premiers modèles d'économie circulaire apparaissent en 1972, dans une expertise appelée « *rapport Meadows* » (Meadows et al., 2017) commandée par le club de Rome. Il met en évidence les dangers de la croissance économique et démographique du milieu du XXe siècle pour l'environnement et l'humanité. Plusieurs organisations, à la suite de ce constat, cherchent à prouver la nécessité d'une transition vers des modèles de production et de consommation ralentissant l'exploitation des ressources, et dont les répercussions environnementales sont minimales.

D'autres théories, apparues dans les années suivantes, ont exercé une influence sur l'apparition du concept d'économie circulaire. (Fénard, 2021).

On peut notamment citer la théorie d'économie régénérative développée par le paysagiste américain John T.Lyle (Lyle, 1996). Elle a pour objectif de développer un système pérenne pour les besoins de la société en conservant l'intégrité de notre écosystème naturel. Elle se base sur des processus visant à renouveler ou à restaurer l'énergie et la matière nécessaires à la production.

On retrouve dans le texte « Jobs for tomorrow : The potentiel for Substituting Manpower Energy » (Stahel & Reday-Mulvey, 1981) les principes d'une économie fonctionnant en circuit fermé et leur impact sur l'extraction des ressources naturelles et la production de déchets.

Plus tard, Walter Stahel co-écrit avec Orio Giarini le concept d'économie de la fonctionnalité dans son rapport « The limits to Certainty. Facing Risks in the New Service Economy » (Giarini & Stahel, 1991). En partant du constat que l'extractivisme n'est aucunement tenable sur le long terme, ils suggèrent que la solution serait de faire en sorte que les processus de croissance économique ne soient pas basés sur la consommation de matières, mais plutôt sur l'utilisation et la fonction des biens et services. Ce principe permet de réduire l'extraction intensive des ressources tout en favorisant la valeur d'usage. Il permet aussi d'abolir l'intérêt de

⁴ Traduction libre

l'obsolescence programmée mise en place par les industriels soucieux de maximiser leurs profits.

En 1998, dans son ouvrage «vers une écologie industrielle » (Erkman, 1997) Suren Erkman développe le concept d'écologie industrielle. La stratégie, selon S. Erkman vise à appliquer une « restructuration écologique » ou une « écorestructuration » du système industriel (Gobbo, 2015, p. 33). Elle se divise en quatre axes principaux :

- La **valorisation des déchets** comme ressources
- Le **bouclage des cycles** de matières et la minimisation des émissions dissipatives
- La **dématérialisation** des produits et activités économiques
- La **décarbonisation** de l'énergie

Le terme d'économie circulaire fait son apparition la première fois dans l'ouvrage « Economic of Natural Ressources and the Environnement » (Pearce & Turner, 1989). Mais c'est dans les années 2000 que le concept se démocratise, notamment avec le succès de l'ouvrage « cradle to cradle » (McDonough & Braungart, 2011) de William McDonough et Michael Braungart.

1.2.2. Définition :

L'économie circulaire apparaît donc dans un contexte de remise en question. Ce nouveau paradigme est en opposition avec le modèle linéaire en proposant de changer radicalement d'approche, celle d'envisager les ressources dans une boucle fermée. Les « déchets » deviennent quant à eux des ressources qui peuvent être revalorisées dans un cycle permettant de pérenniser le système. Il puise son inspiration de fonctionnement dans notre écosystème : celui d'un cycle naturel.

Selon la fondation d'Ellen MacArthur⁵, l'économie circulaire se caractérise « *par une économie restauratrice et régénératrice par nature, qui vise à maintenir systématiquement les produits, les composants et les matériaux à leur niveau d'utilité et de valeur optimale, en faisant la distinction entre les cycles techniques et les cycles biologiques.* » (Ellen McArthur Foundation, 2013). La fondation envisage l'économie circulaire comme un cycle de développement positif continu qui préserve et développe le capital naturel, optimise le rendement des ressources et minimise les risques systémiques, par la gestion des stocks et des

⁵ La fondation Ellen MacArthur est une association caritative britannique créée en 2009 qui vise à repenser et construire un avenir positif à travers le cadre de l'économie circulaire. source Wikipédia : https://fr.wikipedia.org/wiki/Fondation_Ellen_MacArthur.

flux de ressources. Son objectif est de décorrélérer le développement économique mondial et la consommation des ressources limitées.

Dans un rapport sorti en 2013, ils décrivent trois principes pour rendre notre système de consommation et de production plus durable (Ellen McArthur Foundation, 2013) :

Le premier principe est de préserver et de restaurer le patrimoine naturel en contrôlant les stocks limités et en équilibrant les flux renouvelables. Il faut en conséquence dématérialiser les produits qui peuvent l'être pour réduire la consommation de matières premières. Et lorsqu'il y a besoin de ressources, sectionner de façon que le produit n'impacte pas négativement l'écosystème.

Le second principe est d'optimiser le rendement des ressources dans les produits, les composants, etc, avec un haut niveau de fonctionnalité dans un cycle technique ou biologique. Autrement dit, concevoir en amont en vue de réutiliser, de réusiner, de rénover, de recycler, etc, afin de maintenir les ressources de composants dans le circuit. Les circuits peuvent être plus courts, comme la maintenance plutôt que le recyclage, ce qui permet de conserver de l'énergie et des ressources. Ce principe cherche à maximiser le nombre de cycles consécutifs ou de garantir une durée de vie plus longue dans chaque boucle.

Le troisième principe est de déceler les effets négatifs qui dégradent notre système circulaire afin de les limiter. On parle ici de dommages causés qui provoquent des fuites dans le circuit, mais aussi des facteurs tels que la pollution de l'air, de l'eau, de l'occupation des sols etc.

GRAPHIQUE 1 : SCHEMA DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

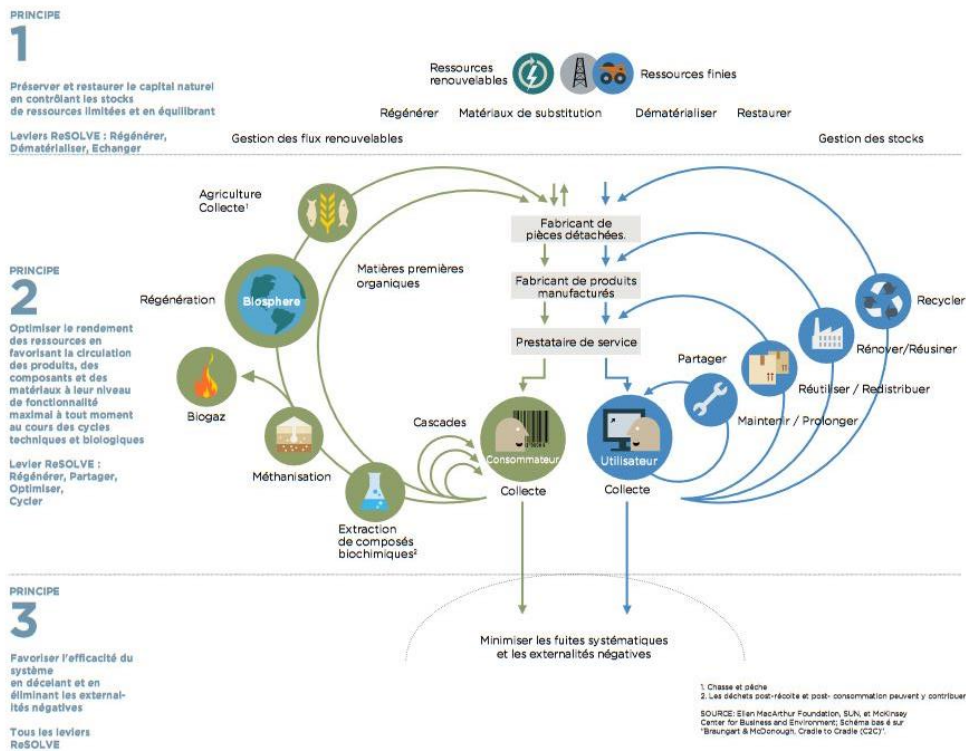


Figure 2 : schéma de l'économie circulaire selon la fondation McArthur (source Towards a circular economy, 2015)

Pour la Commission européenne, l'économie circulaire est une économie dans laquelle « les produits et matières conservent leur valeur le plus longtemps possible ; les déchets et l'utilisation des ressources sont réduits au minimum et, lorsqu'un produit arrive en fin de vie, les ressources qui le composent sont maintenues dans le cycle économique afin d'être utilisées encore et encore pour recréer de la valeur. » (Paquet « économie circulaire », 2015).

Cette dernière adopte en 2015 le « *Circular Economy Package* » pour aider les entreprises à se tourner vers une transition circulaire. Les mesures du plan d'actions relatif au secteur de la construction sont (Romné & Vrijders, 2018) :

Établir des lignes directrices en matière d'analyse avant la démolition

Encourager la mise en place de protocoles de recyclage pour les déchets de construction et de démolition.

Développer des indicateurs fondamentaux pour l'évaluation de la performance environnementale des bâtiments tous ont long du cycle de vie et des mesures en faveur de leur utilisation.

Buildwise souligne, qu'en Belgique, les régions ont élaboré des programmes de développement dans l'objectif de changer notre vision économique linéaire. On retrouve en Flandre le **Vlaams Materialenprogramma**⁶ et **Visie 2050**⁷, En Wallonie le **Plan Marshall**⁸ et **Circular Wallonia**⁹ et en Région Bruxelles-Capitale le **Programme Régional en économie circulaire (PREC)**¹⁰ (Romné & Vrijders, 2018).

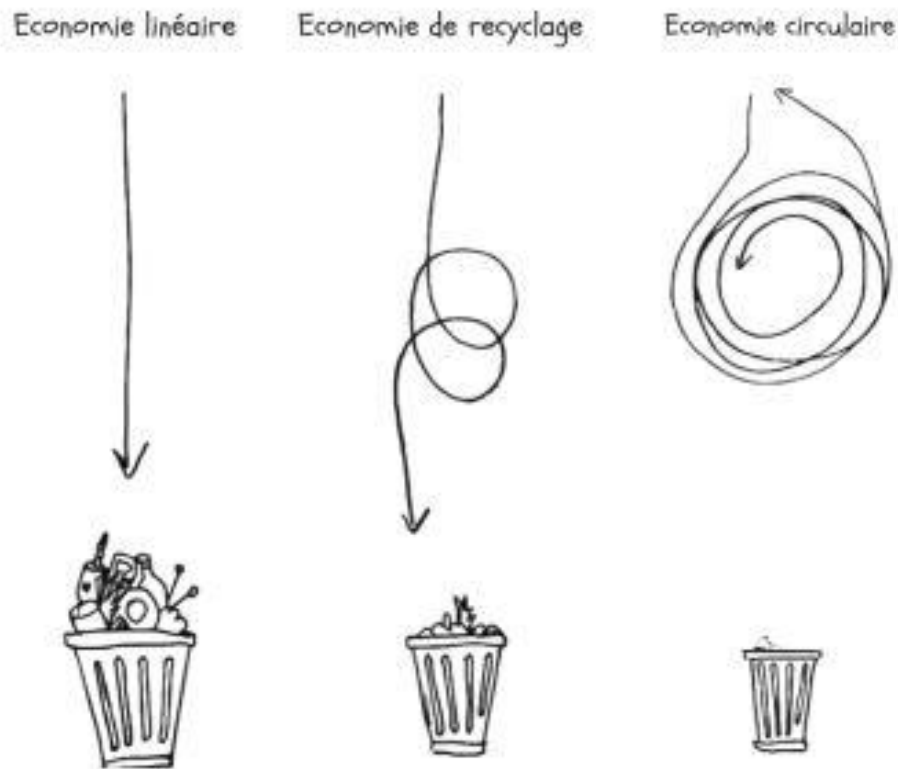


Figure 3 : schéma des modèles économiques (Source : Vlaanderen Circulair)

1.2.3. L'économie circulaire dans la construction

Pour le guide de « concevoir la transition vers l'économie circulaire » (Galle et al., 2019b), si les bâtiments veulent s'inscrire dans une conception durable, ils doivent être construits avec des composants réemployés, remanufacturés, recyclés ou régénérés de façon efficace et de manière à maintenir leur utilisation en circuit fermé. Or, selon Buildwise,

⁶ Source site OVAM : <https://www.vlaanderen.be/publicaties/stand-van-zaken-vlaams-materialenprogramma-clusters-en-randvoorwaarden>.

⁷ Source site Vlanderen : <https://www.vlaanderen.be/publicaties/visie-2050-een-langetermijnstrategie-voor-vlaanderen>.

⁸ Source site Wallonie économie SPW : <https://economie.wallonie.be/content/plan-marshall-40>.

⁹ Source site Circular Wallonia : <https://economiecirculaire.wallonie.be/fr/economie-circulaire-pouvoirs-publics>.

¹⁰ Source site Bruxelles Environnement : https://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/PROG_160308_PREC_DEF_FR.

« l'économie circulaire traite autant la question de l'usage des matières, des composants et des produits en fin de vie que de la manière dont ces éléments sont conçus, fabriqués et mis en œuvre pour favoriser leur (ré) utilisation et pour préserver leur capital naturel à toutes les étapes de leur vie » (Romné & Vrijders, 2018, p. 12). Dans ce type de modèle tant que le produit garde la matière qui le compose, il limite le besoin d'énergie et de ressource. Autrement dit, plus on utilise des solutions de maintenance ou de maintien des produits, moins on dépense d'énergie et de matières nouvelles pour la valorisation des déchets (voir figure 5.) (Romné & Vrijders, 2018).

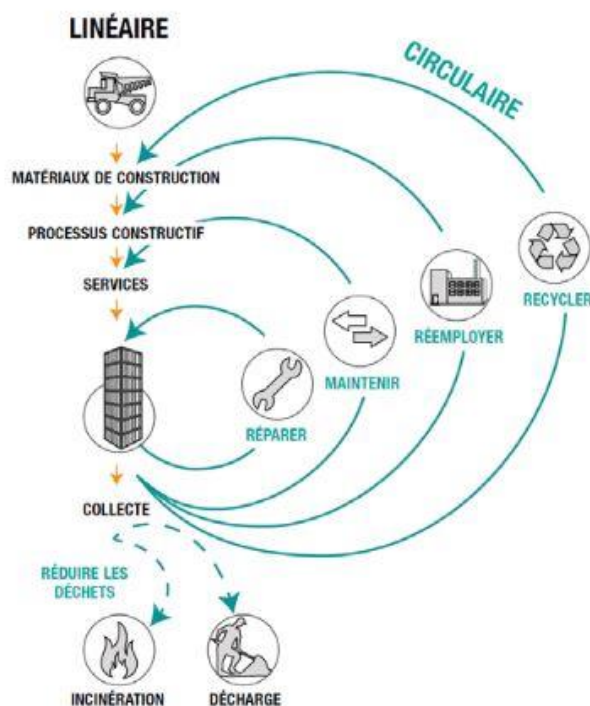


Figure 4 : Schéma des principes de l'économie circulaire dans la chaîne de valeur de la construction (source : (Romné & Vrijders, 2018))

Toujours selon Buildwise, engager le secteur de la construction dans une économie circulaire offre de nombreux avantages comme une minimisation de la pression sur l'environnement et une meilleure sécurité d'approvisionnement des matières. De plus, le modèle peut fournir des solutions innovantes et des emplois non-délocalisables. Afin d'aider le secteur de la construction, le centre scientifique et technique regroupe les principes du modèle circulaire en trois sections (Romné & Vrijders, 2018, p. 12) :

Concevoir et construire des ouvrages qui permettent de récupérer les matériaux en fin de vie.

Développer des solutions techniques pour extraire et valoriser les ressources matérielles disponibles dans les bâtiments existants (urban mining).

Imaginer de nouveaux modèles d'affaires encourageant la création de valeur pendant tout le cycle des bâtiments et des matériaux.

D'après le guide « *concevoir la transition vers l'économie circulaire* » (Galle et al., 2019b), les architectes peuvent adopter une approche circulaire de différentes manières. D'une part en optimisant la capacité des ouvrages à s'adapter aux demandes et besoins des utilisateurs. D'autre part, en améliorant la gestion des flux de matériaux liés aux bâtiments pour atténuer leur impact environnemental. Ces deux stratégies permettraient d'éviter l'épuisement des ressources naturelles et la production de déchets. Dès lors, les auteurs proposent trois approches de conception (Galle et al., 2019b, p. 12-13):

Concevoir pour la longévité est une approche qui cherche à améliorer ou rénover l'existant afin d'éviter de bâtir du neuf. L'objectif est de maintenir la valeur d'un bâtiment au fil du temps grâce à des qualités architecturales telles qu'une implantation stratégique, une polyvalence des espaces, etc.

Concevoir pour le désassemblage et la déconstruction permet la récupération sans dommage des matériaux et des composants pour maintenir leur valeur, faciliter leur traitement et minimiser leur transformation en déchets.

Concevoir pour le réemploi est une stratégie de choix de matériaux ou de composants afin de réduire la consommation de matières premières. Ces choix peuvent être l'utilisation de matériaux valorisés et/ou l'utilisation de matériaux pour une future valorisation.

Afin d'acquérir des clés de compréhension sur les notions d'adaptabilité, de démontabilité et de réemploi, la prochaine partie détaillera l'approche des conceptions dans la construction.

1.3. Des conceptions alternatives

Durant la dernière décennie, plusieurs architectes et chercheurs ont développé des conceptions architecturales et des techniques dans l'objectif de limiter l'impact du secteur de la construction sur la consommation de ressources et la production de déchets. On peut parler du « *design for change* », du « *design for deconstruction* » ou encore « *design for deconstruction and material reuse* ».

Selon Durmisevic, les trois dimensions de transformation dans les bâtiments sont liées à leur « design » qui affecte la conception à tous les niveaux d'un ouvrage. (Durmisevic, 2006), on retrouve :

La **transformation spatiale** assure la continuité de l'exploitation de l'espace par l'adaptabilité spatiale.

La **transformation structurelle** garantit l'optimisation des bâtiments et de leurs composants grâce au démontage et à la réparation ou le remplacement des éléments constituants.

La **transformation des éléments et des matériaux** permet l'utilisation des ressources par le recyclage et le réemploi.

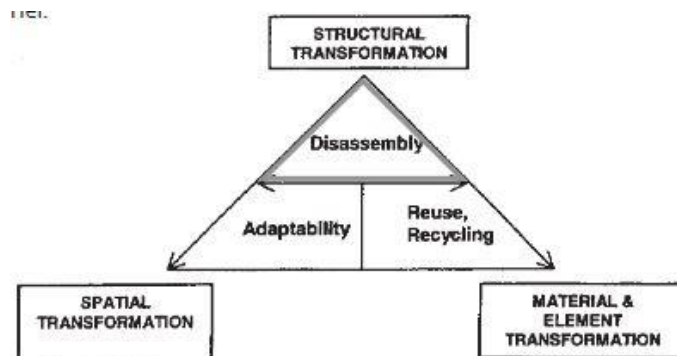


Figure 5 : schéma des trois dimensions de la transformation d'un bâtiment selon E. Durmisevic. (source: Durmisevic, 2006, p. 93)

« In the future, a quality of a building will be measured by its ability to transform on all levels of technical composition. » (Durmisevic, 2006a, p. 275)

« Demain, la qualité d'un bâtiment se mesurera à sa capacité à se transformer à tous les niveaux de compositions techniques. »¹¹

1.3.1. Des conceptions pour le changement et l'adaptabilité :

C'est au XXe siècle que la réflexion sur l'adaptabilité dans la construction prend son essor. Dans un contexte d'après-guerre, certains architectes effectuent des recherches sur les concepts alternatifs qui amèneront à la flexibilité fonctionnelle et structurelle.

Nous pouvons prendre l'exemple de la maison Dom-ino de Le Corbusier. Ce dernier y développe une logique constructive basée sur la standardisation et la préfabrication, ce qui a

¹¹ Traduction libre

permis d'accélérer la construction tout en abaissant le niveau exigé sur le chantier. On retrouve aussi les principes directeurs de l'architecture moderne, tels que une ossature poteaux-dalles, le plan libre et la façade libre¹² (De Collignon et al., 2017).

Nous pouvons aussi évoquer l'architecte néerlandais, John Habraken, qui est l'un des initiateurs des préceptes de « *l'Open Building* » (construction ouverte). Cette approche prend en compte la nécessité éventuelle de modifier ou d'adapter le bâtiment tout au long de sa vie, en fonction des évolutions sociales et technologiques.

Ces deux pionniers ont permis d'amener les premiers principes de l'adaptabilité architecturale. Ces principes se sont par la suite développés, au fil de temps, pour répondre à de nouveaux enjeux sociétaux.

On retrouve notamment, le *design for change* qui est décrit par le rapport WP5 du projet BBSM comme « *une conception de construction qui reconnaît les exigences et les aspirations en constante évolution pour l'environnement bâti. L'objectif de design for change est de créer des bâtiments qui accompagnent plus efficacement le changement* ». (Galle et al., 2019a)

Le design for change se rapproche fortement du concept d'adaptabilité dans les bâtiments. Dans le texte « *what is the meaning of adaptability in the building industry* » (Schmidt et al., 2010, p. 5) les auteurs cartographient les stratégies d'adaptabilité par rapport à la littérature et y décrivent six satellites qui gravitent autour du terme. On retrouve :

- (1) **La flexibilité** par la modification des espaces intérieurs pour divers usages.
- (2) **Le Réajustable** par la modification, le remplacement ou la suppression de composants.
- (3) **L'évolutif** par l'augmentation ou la diminution de la taille du bâtiment.
- (4) **La mobilité** par la modification des configurations ou de l'emplacement.
- (5) **Le réutilisable** par la réutilisation du bâtiment ou des composants dans leur forme d'origine.
- (6) **La disponibilité** par l'accessibilité à un ensemble de composants.

¹² Les premières esquisses viennent de Charles-Edouard Jeanneret qui veut élaborer un procédé de reconstruction économique rapide en béton. Mais les termes « plan libre » et « façade libre » passeront à la postérité avec Le Corbusier (De Collignon et al., 2017)

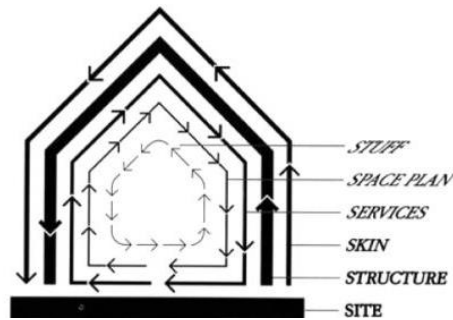


Figure 8 : schéma de différentes couches de cisaillement selon Brand .S (source : Brand, 1995)

Dans l'étude de cas de Mahatma Gandhiwijk à Malines (Paduart et al., 2013), les auteurs ont établi une méthodologie d'évaluation des bâtiments « dynamique » en examinant les outils de conception et de durabilité dans le contexte de construction flamande. Après l'analyse de ces critères, les auteurs concluent qu'en accordant plus d'attention à une composition « *dynamique* » des éléments de construction, il est possible d'anticiper : l'entretien du bâtiment, les futurs ajustements techniques, la reconfiguration des unités spatiales, le démantèlement et la fin de vie des composants.

1.3.2. Des conceptions pour la déconstruction et le désassemblage :

La conception pour la déconstruction ou le démontage, est une stratégie qui vise à créer des éléments de constructions qui savent être désassemblés et dont les composants peuvent être facilement séparés sans dégâts. (Galle et al., 2019a).

Dans son article, J. Kanters, dresse une liste de principes généraux pour la conception qui ont été mentionnés par des directives professionnelles ou des rapports scientifiques. Ces principes sont divisés en quatre thèmes¹³ : (Kanters, 2018)

Conception globale du bâtiment : la conception d'un ouvrage peut permettre de faciliter la déconstruction, mais aussi la réutilisation alternative des espaces.

Matériaux et connexions : le choix des matériaux, des composants et des connexions peut s'avérer important pour le démontage d'un édifice et le réemploi de ses composants.

¹³ Les principes sont plus développés dans un Tableau disponible en annexe. Tableau 3

Phase de construction et de déconstruction : le parc immobilier est prévu pour tenir pendant une période considérable, mais ne prend pas en compte la fin de vie de ses bâtiments.

Communication, compétence et connaissances dans le processus de conception : la communication entre les acteurs est une priorité pour la conception pour le démontage.

Dans son article, il affirme que le design for deconstruction peut entraîner des avantages environnementaux, sociaux et financiers. De plus, ce type de design a des effets significatifs sur la façon dont les bâtiments sont conçus et construits.

Durmisevic et Yeang, quant à eux, décrivent le concept de déconstruction d'après trois dimensions pour les bâtiments : (Durmisevic & Yeang, 2009)

La dimension spatiale : la transformation spatiale assure la continuité dans l'exploitation de l'espace par l'adaptabilité.

La dimension structurelle : La transformation structurelle assure la continuité dans l'exploitation du bâti et de ses éléments, grâce au remplacement, au réemploi, et à la récupération des composants.

La dimension matérielle : la transformation des éléments et de matériaux de construction permet une continuité dans l'emploi des composants par le recyclage des matières.

Selon eux, la clé de chaque dimension est le démontage. Mais pour y parvenir, les architectes ou les concepteurs doivent changer fondamentalement leur perception du bâtiment. Les auteurs préconisent dès lors : de concevoir des bâtiments non pas comme des ouvrages statiques, mais en tant que structures dynamiques et ouvertes qui peuvent facilement s'adapter à l'évolution des besoins ; d'étendre la capacité de transformation des bâtiments et des systèmes constructifs en prenant en compte leur cycle de vie ; de traiter les matériaux de construction semblable à des actifs précieux à long terme ; et de les maintenir comme tels tout au long de leur cycle de vie en utilisant des options de reconfiguration, de réutilisation et de remise à neuf ; de considérer les déchets et la démolition comme une erreur de conception ; de découpler les relations fixes des matériaux dans le bâtiment via la conception de systèmes reconfigurables ; et enfin d'impliquer l'industrie de la construction tout au long du cycle de vie de l'ouvrage et de ses systèmes constructifs. Toujours selon E. Durmisevic et K. Yeang, ces prérequis doivent être

pris en compte en amont pour une plus grande diversité de conceptions de nos bâtiments, de même que cela favoriserait le recyclage et le réemploi.

On retrouve cette idée dans le document « *design and detailing for deconstruction* » (Morgan & Stevenson, 2005, p. 6). Les auteurs privilégient des solutions en « *amont* » qui traitent les causes des déchets de construction et évitent les réponses « *en bout de chaîne* » qui ne soignent que les symptômes. Pour atteindre cet objectif, ils décrivent une série de principes clés pour la déconstruction :

Concevoir des bâtiments adaptables à différents modes d'occupation en plan, en coupe et en termes structurels.

Veiller à ce que les bâtiments soient conçus en couches en fonction de leur durée de vie prévue.

S'assurer que tous les composants soient facilement accessibles et puissent être retirés pour leur réparation ou leur remplacement.

Adopter un régime de fixation simple qui permette à tous les composants d'être retirés et remplacés en toute sécurité. Les connecteurs doivent alors être conçus de façon à être à la fois indépendants et interchangeables.

Utiliser uniquement des composants durables qui puissent être réutilisés. Limiter le nombre de matériaux dans les composants et l'utilisation d'adhésif, de résine et de revêtement qui compromettent le potentiel de réutilisation et de recyclage.

Porter attention à l'usure différentielle des surfaces et favoriser l'entretien ou le remplacement de ces zones séparément des autres.

Planifier soigneusement les systèmes techniques afin qu'ils puissent être facilement identifiables, accessibles et entretenus sans perturber les autres parties du bâtiment.

Quant à l'architecte Brad GUY et l'ingénieur Scott SHELL, ils font remarquer que le style international de l'architecture développé dans le milieu du XXème siècle avait des attributs compatibles avec le design for deconstruction (Guy & Shell, 2006). On peut citer les constructions modulaires, les plans d'étage ouverts, les systèmes structurels et mécaniques exposés ou encore l'utilisation de matériaux comme le béton, la pierre, l'acier ou le verre qui ont un potentiel de recyclage. Selon les auteurs, les leçons tirées de la conception pour le démontage peuvent être utilisées pour concevoir l'avenir.

C'est d'ailleurs pour P. Crowther, l'une des stratégies pour faire face à l'énorme perte de matériaux et d'énergie qui caractérise actuellement l'industrie de la construction. Selon lui, l'un des plus grands obstacles à la réutilisation des composants et des matériaux est la difficulté de démontage. (Crowther, 2000, p. 6-8). À partir de ce constat, il ordonne la conception pour la déconstruction en quatre directives¹⁴ :

Les directives pour le recyclage des matériaux.

Les directives pour le retraitement des composants.

Les directives pour la réutilisation des composants.

Les directives pour l'adaptabilité ou la relocalisation des bâtiments.

La distinction faite entre le *réemploi* et le *recyclage* par P. Crowther, permet de mettre en évidence une hiérarchie écologique préférable, tant le premier nécessite moins d'énergie, de traitement, et d'apport de matières par rapport au second.

1.3.3. Des conceptions pour le recyclage et le réemploi :

Pour P. Crowther, notre manière de construire les bâtiments est actuellement irresponsable, car nous ne prenons pas en compte ce qui se passe après leur durée de vie utile (Crowther, 2000). Selon lui, les déchets peuvent être évités ou réduits en augmentant les taux de réemploi et de recyclage des matériaux et des composants de construction. On retrouve d'ailleurs, dans le secteur de l'industrialisation, des exemples de conception qui favorise la réutilisation de la matière. Nous pouvons par exemple citer *l'écologie industrielle* ou le principe de *cradle to cradle*.

« *L'écologie industrielle* » de Reid Lifset et Thomas Graedel (Graedel & Lifset, 2016) est une association d'industriels qui se concentre sur l'analyse de flux de matières et d'énergie pour les boucler en sein d'un système délimité. C'est Erkman qui, dans son ouvrage « *vers une écologie industrielle* » (Erkman, 2004), définit une stratégie qui vise à appliquer une « *restructuration écologique* » du système industriel. Cette stratégie comporte quatre axes principaux :

Valoriser les déchets comme ressources : minimiser les pertes durant la totalité du cycle de vie des produits par une efficacité accru et une prévention optimale.

¹⁴ Directives plus détaillées dans le tableau disponible en annexe. Annexe 2

Un bouclage des cycles de matières : en rendant les flux de matière et ressources cycliques.

La dématérialisation de produits et de l'activité économique : c'est-à-dire produire des biens et des services avec moins de matières et d'énergie.

Et la décarbonisation de l'énergie : prendre en compte les énergies renouvelables, les écobilan des ressources pour réduire les impacts environnementaux.

La philosophie de conception de « *cradle to cradle* » (berceau au berceau) est élaborée par William McDonough et Michael Braungart. (McDonough & Braungart, 2011).

Le terme se développe par opposition à l'expression « *cradle to grave* » (du berceau au tombeau) symbole de l'approche linéaire. Se basant sur la célèbre expression de Lavoisier « *rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme* »¹⁵, le concept est de créer des produits, soit biodégradables en tant que « *nutriment biologique* », soit indéfiniment recyclables « *nutriment technique* » et donc réintroduits dans le processus de fabrication comme matières.

Les nutriments biologiques doivent avoir pour condition des substances non-toxiques pour la santé et l'environnement. Quant au recyclage des nutriments techniques, il doit présenter une valeur équivalente ou supérieure à la qualité initiale. Ce type de recyclage est nommé upcycling (à l'opposé du downcycling¹⁶).

Si la philosophie Cradle to cradle met en évidence la programmation en amont des produits pour les valoriser en fin de vie, l'écologie industrielle prônent la réutilisation des « déchets ». Néanmoins, ces deux modèles cherchent à changer l'approche de l'homme au sujet des ressources et des déchets. En reconsidérant les matières premières comme limitées, on préserve le cycle régénérateur naturel de l'écosystème et on valorise les déchets pour qu'ils deviennent une ressource secondaire réutilisable dans le circuit de la production.

Concrètement, certains matériaux ne sont pas facilement réutilisables, mais peuvent être recyclés de manière rentable. Sur base de cette perspective Brad GUY et Scott SHELL, abordent la conception pour la déconstruction comme une « *conception hiérarchique* » (Guy & Shell, 2006, p. 5) comprenant :

¹⁵ De Lavoisier, A. L. REACTIONS CHIMIQUES. REACTIONS, 1, 26.

¹⁶ Recyclage d'une matière en tenant compte d'exigences de performance, de qualité et de valeur inférieures à celles d'origine [A. Romné, J. Vrijders ; 2018]

- (1) Conception pour la réutilisation
- (2) Conception pour la remise à neuf
- (3) Conception pour le recyclage

Cette hiérarchie s'inspire de la stratégie dites des « R » qui constitue une base pour la démarche zéro déchet. Selon R. Remkes, ces stratégies permettent de donner corps à l'économie circulaire en fournissant les informations sur les différents niveaux de valorisation de la matière et de leurs objectifs sous-jacents. (Remkes, 2019, p. 4). Il en regroupe 9 (Refuser ; repenser ; réduire ; réutiliser ; réparer ; remettre à neuf ; reconstruire ; recycler ; récupérer.) qui sont détaillés dans la le tableau ci-dessous.

Circular economy		Strategies	
	Smarter product use and manufacture	R0 Refuse	Make product redundant by abandoning its function or by offering the same function with a radically different product
		R1 Rethink	Make product use more intensive (e.g. by sharing product)
		R2 Reduce	Increase efficiency in product manufacture or use by consuming fewer natural resources and materials
	Extend lifespan of product and its parts	R3 Reuse	Reuse by another consumer of discarded product which is still in good condition and fulfils its original function
		R4 Repair	Repair and maintenance of defective product so it can be used with its original function
		R5 Refurbish	Restore an old product and bring it up to date
		R6 Remanufacture	Use parts of discarded product in a new product with the same function
	Useful application of materials	R7 Repurpose	Use discarded product or its parts in a new product with a different function
		R8 Recycle	Process materials to obtain the same (high grade) or lower (low grade) quality
R9 Recover		Incineration of material with energy recovery	
Linear economy			

Figure 9: Tableau reprenant la stratégies des 9 R (source : Remkes, 2019, p. 5).

Une autre référence est l'échelle de Lansink, aussi appelée hiérarchie des déchets, qui distingue cinq formes différentes du traitement des déchets (prévenir, réemployer, recycler, valoriser et éliminer les déchets). L'article 4 de la directive de 2008 du Parlement européen et du conseil relatif aux déchets stipule que cette « hiérarchie des déchets s'applique en priorité dans la législation et la politique de prévention et de gestion des déchets. » (Galle et al., 2019a, p. 26)

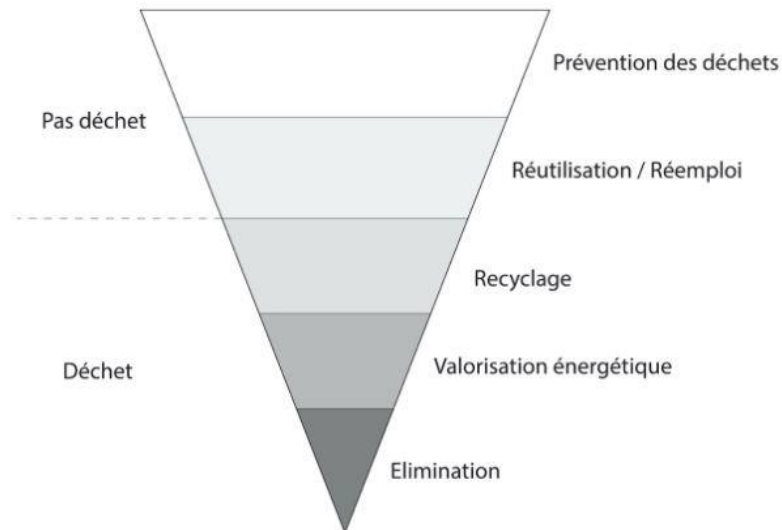


Figure 10 : hiérarchie des traitements de déchets (source : Fénard, 2021)

La prévention : il s'agit d'éviter de produire des déchets par des actions d'écoconception. On distingue la prévention quantitative (limiter les quantités de déchets produits) et la prévention qualitative (diminuer la dangerosité des déchets par des produits plus écologiques). Le réemploi direct fait partie de la prévention.

La réutilisation et le réemploi : les produits, les composants ou les matériaux dont un professionnel ou un particulier veut se séparer, peuvent être réutilisés pour un usage similaire ou différent. La préparation du réemploi peut se faire par un tri, une remise en état ou une réparation.

Le recyclage : consiste à récupérer les matières « brutes » des anciens produits et à les utiliser dans la fabrication de « nouveaux » produits. Cette démarche demande plus d'énergie que le réemploi.

La valorisation énergétique : cette méthode utilise le pouvoir calorifique des déchets pour alimenter le réseau électrique. Différents procédés, adaptés selon les déchets, permettent de valoriser l'énergie des matériaux comme l'incinération, la méthanisation ou encore la gazéification.

L'élimination : c'est le mode de traitement le plus dommageable au niveau environnemental et le moins souhaitable. Il s'apparente, soit à l'incinération sans valorisation énergétique, soit au stockage ou l'enfouissement. Cette approche est utilisée pour les déchets qui ne peuvent pas être traités selon les méthodes contemporaines comme les débris contenant de l'amiante, les sols contaminés, etc.

Concevoir pour le réemploi est donc un concept connexe à la conception pour la déconstruction. Sanchez et Haas, dans leur étude bibliographique sur la planification de projets pour l'économie circulaire (Sanchez & Haas, 2018), mettent en avant l'importance de maximiser les ressources et les matériaux recyclés ou réemployés en suivant le principe de boucles fermées.

En outre, le principe de boucle fermée des ressources peut permettre au métabolisme urbain d'être caractérisé par les échanges de flux d'énergie et matières utiles à leur fonctionnement (Barles, 2008).

Selon Buildwise « à l'horizon 2050, 70% de la population mondiale devrait vivre en zone urbaine, concentrant à la fois la population, l'activité économique, la production et la consommation. Les villes renferment simultanément les problèmes et les solutions aux enjeux de durabilité : ressources, déchets, climat, etc. » (Romné & Vrijders, 2018, p. 55).

Or, les auteurs du rapport WP5 du projet BBSM, prônent une stratégie de conception qui considère les bâtiments comme des banques de matériaux. Cette conception permet d'envisager l'environnement du bâti comme un stock de composants valorisables qui peuvent être récupérés lors de la fin de vie des ouvrages (Galle et al., 2019b, p. 45). Pour P.H. Brunner, les villes peuvent être considérées comme des réservoir de ressources, une sorte de mine future (urban mining). En partant de ce concept, le chercheur classe le métabolisme urbain selon trois types de développement :

La croissance : elle se caractérise par une demande de matériaux supérieure à la génération de déchets, dépendant donc des importations. Les impacts environnementaux de la ville seraient réduits par des choix sur la morphologie urbaine ou sur le choix des matériaux.

La stabilité : Elle représente les villes ayant une stabilité démographique et des infrastructures nécessaires à leur fonctionnement. Les villes pourraient faire appel à un réservoir de matériaux déjà présent pour leur renouvellement, limitant l'import et l'export.

La rétraction : Dans ce cas, la production de déchets serait supérieure à la demande de ressources, en conséquence les villes envisageraient l'export des matériaux excédentaires vers d'autres villes.

L'approche du métabolisme urbain est intéressante pour identifier les potentiels gisements de matériaux dans les villes. Pour que cette approche se précise, il faut des documents

d'informations à partir d'études rétrospectives de la consommation de matériaux sur une période donnée ou d'analyses des différentes typologies du bâti, en précisant leur composition matérielle. (Ghyoot et al., 2018).

1.4. Conclusion

Grâce à cet état de l'art, nous avons pu comprendre comment le secteur de la construction a un impact important sur l'environnement tant il exploite des ressources naturelles non-renouvelables et produit des déchets qui sont peu ou pas valorisés. Cet impact important s'explique par des conceptions d'ouvrages qui ne durent pas dans le temps par manque d'adaptabilité. Nous avons vu qu'il existe plusieurs types d'obsolescence et que les bâtiments étaient construits de façon trop rigide dans une économie linéaire qui favorise l'exploitation excessive de matières premières et la production de déchets.

Cependant, un nouveau paradigme économique est apparu face aux enjeux environnementaux. C'est celle de l'économie circulaire, qui cherche à maintenir les ressources dans une boucle fermée. Cette stratégie peut procurer des bénéfices pour le secteur de la construction en limitant sa production de nouveaux matériaux et donc de déchets. Pour se faire, les différents acteurs du secteur doivent apprendre à utiliser des conceptions qui favorisent ce modèle.

Dès lors, nous avons détaillé trois approches de conception qui vont dans le sens de l'économie circulaire. On retrouve l'approche pour le changement et l'adaptabilité qui cherche à maintenir et valoriser l'existant. L'approche pour la déconstruction et le démantèlement qui soutient la réutilisation des différents produits constructifs en permettant de les récupérer sans dommage. Et enfin l'approche pour des valorisations peu consommatrices d'énergie et de ressources naturelles. Cette dernière privilégie des solutions comme le réemploi ou le recyclage qui permettent de réinsérer les ressources dans la chaîne de valeur.

Nous pouvons dès lors nous demander quels sont les principes de conception qui favorisent ces trois types de conception. Ces principes sont plus amplement détaillés dans le chapitre suivant.

2. Les principes de conception architecturale circulaire

2.1. Introduction

Le précédent chapitre nous a démontré que les édifices sont actuellement conçus en tenant peu compte de la manière dont ils peuvent être modifiés spatialement ou déconstruits, or de telles méthodes engendrent des travaux de démolition avant que les bâtiments et leurs composants aient atteint leur fin de vie utile, car ils ne répondent plus à des facteurs fonctionnels, économiques ou sociaux. Selon Buildwise, les causes de dépréciation des ouvrages ne sont pas dûes à leur âge mais plus fréquemment à leurs qualités architecturales ou à leurs caractéristiques techniques (Romné & Vrijders, 2018, p. 15).

C'est la raison pour laquelle des conceptions architecturales, prenant en compte des stratégies pour limiter les facteurs d'obsolescences, représentent un levier important. Nous avons vu qu'il existe des stratégies d'adaptabilité, de déconstruction et de réemploi, qui, dans l'ordre, cherchent à prolonger les ressources existantes, à favoriser la réutilisation des produits et à réduire l'utilisation de nouvelles ressources.

Selon le site du Guide du bâtiment Durable de Bruxelles « *la conception circulaire des bâtiments permet d'envisager le bâtiment comme un élément évoluant dans le temps, avec différentes vies fonctionnelles et matérielles. Les matériaux sont alors considérés comme des ressources, qu'on peut démonter et réutiliser en fin de vie.* » (Bruxelles Environnement, 2020). Autrement dit, la conception circulaire est une manière de fabrication et de mise en œuvre des produits de construction, afin de préserver leur capital naturel durant leur vie et de favoriser leur (ré) utilisation. Dans la construction, c'est une stratégie de création des bâtiments, des systèmes constructifs ou des composants, afin qu'ils puissent prolonger leur cycle d'utilisation et être valorisés en fin de vie.

Afin de favoriser des conceptions circulaires, les concepteurs doivent adopter certains principes. Pour Bruxelles Environnement, ces principes sont : des bâtiments **flexibles et évolutifs** qui répondent à l'évolution des besoins, en évaluant le potentiel d'expansion et en envisageant les possibilités de reconversion ; des éléments de construction qui **facilitent l'entretien et le démontage** pour que les matériaux, produits et composants puissent être récupérés sans dommage ; et enfin **des choix de matériaux et de technique constructives** qui permettent le réemploi des composants en fin de vie. De plus, l'administration recommande d'organiser une réflexion avec l'ensemble des intervenants dès le début du projet et lors du

suivi de chantier, afin d'assurer le transfert des informations dans le temps (Bruxelles Environnement, 2020).

On peut d'ailleurs voir que certaines démarches sont similaires aux objectifs de conception de la société Buildwise. Selon eux, l'un des piliers d'une construction orientée vers l'économie circulaire se concentre sur la réalisation de nouveaux bâtiments qui intègrent, dès le départ, la question de leur devenir en cours et en fin de vie. Cet objectif s'appuie sur les principes suivants (Romné & Vrijders, 2018) :

L'adaptabilité des bâtiments en s'assurant qu'ils puissent être convertis à d'autres usages ou fonctions, et qu'ils puissent évoluer selon les besoins de leurs usagers

L'intégration de **strates indépendantes** en fonction des durées de vie différentes. Cela assure la possibilité d'intervenir sur certains éléments qui constituent les bâtiments sans toucher à d'autre.

La sélection de **matières à faible incidence sur l'environnement**, qui encourage l'usage de matières valorisées et en permet le recyclage et le réemploi en fin de vie.

Utilisation d'**assemblages accessibles et réversibles** afin que les éléments constructifs et les matériaux puissent être récupérés sans dommage

La prévention, la minimisation et la gestion des déchets de mise en œuvre.

Dans le guide « *concevoir la transition vers l'économie circulaire* » (Galle et al., 2019b), les auteurs recommandent seize qualités architecturales (voir figure 6), selon trois approches de conception (Concevoir pour la longévité ; Concevoir pour le désassemblage et la déconstruction ; Concevoir pour le réemploi), afin de guider et d'inspirer les acteurs de la construction . Il est de même pour l'OVAM (Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij)¹⁷ qui regroupe dans un document vingt-trois directives (voir figure 7) de conception de construction orientée vers le changement (voir figure 7) (OVAM, 2016, p. 2).

On retrouve donc plusieurs textes et documents sur les différents principes de conception architecturale circulaire. Afin de décrire ces principes-clés, nous devons entreprendre une réflexion à toutes les échelles. Les prochaines sections seront divisées selon le niveau d'analyse.

¹⁷ Agence publique flamande des déchets [traduction libre].

Le niveau **du bâtiment** reprend les principes qui permettent la flexibilité spatiale et fonctionnelle.

Le niveau **des composants** regroupe les principes qui favorisent la capacité de désassemblage et de reconversion des éléments complexes.

Et le niveau **des matériaux** décrit les choix qui limitent l'impact des ressources sur l'environnement.

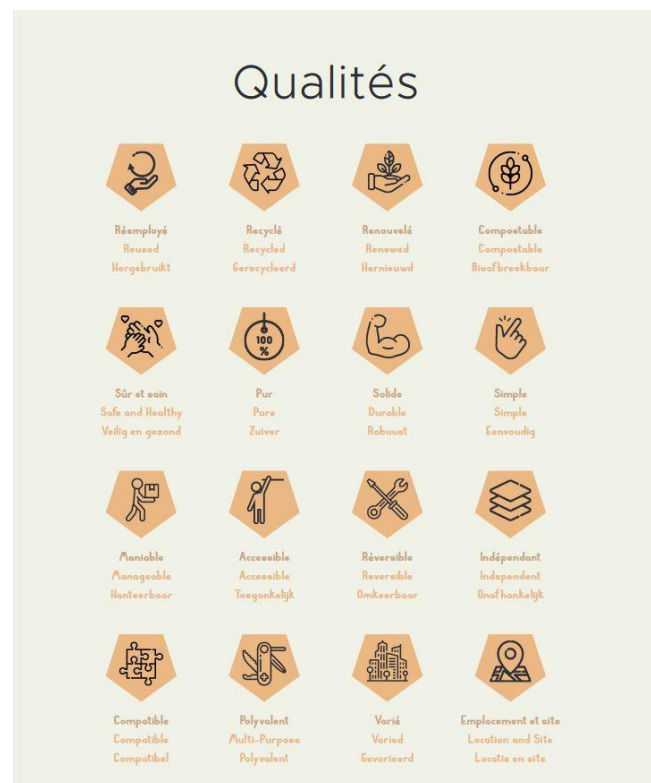


Figure 11: les 16 qualités architecturales pour une conception circulaire. (source : Galle et al., 2019b)

Qualitative Assessment and Design for Change Guidelines

	Interfaces	Sub-components	Composition
Element	Reversibility Simplicity Speed	Durability Reused Compatibility	Pace-layered Independence Prefabrication
Building	Accessibility	Demountability Reusability Extensibility	Versatility
Neighbourhood	Clear Adaptable	Retrofitted Dimensioned Removable	Unified Multipurpose Diverse Densifiable

Figure 12 : tableau des 23 directives orientées vers le changement (source: (OVAM, 2016, p. 2)

2.2. L'échelle du bâtiment :

Ce niveau d'échelle prend en compte plusieurs principes, qui ont un impact sur la spatialité et les systèmes constructifs. L'objectif de cette échelle est de réaliser des bâtiments qui accompagnent, efficacement, le changement. Les différents principes sont divisés en trois sections, qui sont des approches de conception qui reconnaissent que les exigences sont en constante évolution dans l'environnement du bâti.

La première section est **l'implantation** du bâtiment, car un site bien localisé et adapté au quartier encouragera de futurs utilisateurs à aménager ou entretenir un ouvrage plutôt qu'à le détruire.

La seconde section reprend les stratégies pour une **adaptabilité spatiale**. Afin de limiter de futur ajustement du bâti lors de nouvelles occupations, certains facteurs d'incidence spatiale doivent être pris en compte lors de la conception.

La troisième et dernière section reprend le principe de **stratification**. À partir du constat que les systèmes constructifs d'un bâtiment ont des espérances de vie différentes, on cherche à les séparer en couche pour limiter l'impact de l'une sur l'autre lors de maintenances ou de changements.

Ces différents principes entrent dans une vision de l'économie circulaire en favorisant des approches qui permettent de prolonger le cycle de vie des bâtiments.

2.2.1. L'implantation du site :

Une bonne implantation peut apporter autant au quartier qu'au bâtiment. Un site qui possède des équipements assurant le transport, la vie sociale du voisinage ou la biodiversité, favorise l'investissement des habitants dans le quartier. Un concepteur doit, dès lors, prendre en compte l'influence du quartier et l'apport que le bâtiment peut amener.

L'analyse de cas Mahatma Gandhichiwijk (Paduart et al., 2013) nous indique que l'aménagement d'espaces publics, qui soutiennent l'évolution des besoins en infrastructures locales, permet de réduire coûts environnementaux et financiers, dus aux travaux de démolition, mais aussi d'accroître la qualité sociale du quartier tout au long du cycle de vie. Un autre point soulevé par l'étude est la diversité des équipements et de l'habitat du bâtiment. Selon les auteurs, la diversité augmente la qualité de vie et la cohésion sociale. Si les infrastructures sont variées au niveau des typologies des espaces et des possibilités de scénarios d'utilisation, elles rendront le quartier plus résistant aux changements.

Le guide « *concevoir la transition circulaire* » (Galle et al., 2019b) recommande des actions qui favorisent l'optimisation de l'implantation du site. Afin de garder l'implantation attrayante au fil du temps, il faut : une accessibilité facile par plusieurs types de transport, car si les infrastructures sont éloignées et peu desservies par les transports publics alors les usagers délaisseront le quartier ; des connexions simples au raccordement des réseaux techniques et une possibilité d'ajustement (grâce à un surdimensionnement du réseau) ; des possibilités de densification du bâti afin de réduire l'urbanisation sur le territoire naturelle. Cette dernière stratégie est d'ailleurs en lien avec l'objectif « *stop béton* »¹⁸ mis en place par la Belgique. On retrouve ces points dans le texte de l'OVAM qui ajoute l'implantation d'équipement de quartier (place, cour d'école, parking, ect.) (OVAM, 2016, p. 46).

L'implantation d'un bâtiment est donc un principe important car un site bien localisé et de qualité demeure attrayant et précieux au fil du temps.

¹⁸ La formulation « BetonStop » ou « STOP au béton » est le qualificatif introduit par les médias pour désigner les projets politiques récents en matière d'urbanisme et d'aménagement du territoire – respectivement en Flandre et en Wallonie – visant à freiner de manière plus ou moins drastique l'artificialisation des sols et l'empiètement progressif des constructions sur des terrains encore non urbanisés. Sources : (Belaissaoui et al., 2019, p. 3)

2.2.2. L'adaptabilité spatiale :

Nous avons vu plus tôt dans le texte « *what is the meaning of adaptability in the building industry* » (Schmidt et al., 2010) que plusieurs termes sont liés avec le principe d'adaptabilité. Le site du développement durable de Bruxelles propose de voir l'adaptabilité des bâtiments comme une « *réversibilité spatiale* ». Cette dernière est définie comme : « *La capacité d'un bâtiment à être transformé pour mieux répondre aux changements sociétaux et fonctionnels sans provoquer de grands travaux de construction, démolition et de pertes de matériaux* » (Bruxelles Environnement, 2020). Il en est de même pour la société Buildwise qui affirme : « *Un bâtiment est adaptable s'il peut être modifié efficacement dans sa conception, sa construction et son exploitation, afin d'être mis en conformité avec les nouveaux besoins et souhaits des occupants.* » (Romné & Vrijders, 2018).

Pour les anglais C. Morgan et F. Stevenson, la règle d'or est « *d'anticiper le changement* » avec une planification étudiée. (Morgan & Stevenson, 2005, p. 23). On retrouve cette idée dans le guide « *concevoir la transition vers l'économie circulaire.* » (Galle et al., 2019b) qui préconise une conception polyvalente pour éviter l'obsolescence et réduire des rénovations nécessitant du temps et des matériaux. L'objectif de cette stratégie est de prolonger la durée de vie des bâtiments et de leurs composants.

On retrouve donc deux idées principales de l'adaptabilité ; dans un premier temps, l'édifice doit être pensé pour accueillir plusieurs scénarios d'utilisation ; dans un second temps, les bâtiments doivent pouvoir s'ajuster aux futures demandes. Dans les deux cas, ces stratégies interviennent tant sur le plan spatial que sur le plan structurel.

Les espaces doivent donc intégrer une **polyvalence** spatiale qui est décrite par L'OVAM comme des surfaces qui peuvent accueillir plusieurs formes d'activité sans intervention particulière (OVAM, 2016, p. 42). D'après les auteurs, il existe trois options la favorisant : un agencement spatial ouvert (plan libre), organisé de façon à ne nécessiter aucune modification technique importante ; l'utilisation d'éléments mobiles tels que des parois amovibles ; et des espaces transformables grâce à un démontage simple des éléments non structureaux (OVAM, 2016, p. 30)

En outre, plusieurs facteurs peuvent impacter l'adaptabilité d'un bâtiment. Dans le dossier « *construire réversible et circulaire* » de Bruxelles Environnement, on retrouve quatre indicateurs qui peuvent avoir une incidence sur la spatialité : (Bruxelles Environnement, 2020).

Un **dimensionnement** suffisant aussi bien au niveau du bâtiment que des espaces et des hauteurs sous plafond pour l'accès à la luminosité et la possibilité de diversifier les fonctions.

Une **position** réfléchie des éléments fixes (structure, gaines techniques, locaux techniques, zones de circulation, etc.) du projet qui permettent le plan libre et non une rupture des espaces. On retrouve des stratégies comme un regroupement vers un noyau central ou périphérique, mais aussi une implantation en trame de la structure.

Un **désassemblage** des éléments du projet. Cela permet de cloisonner et de décroisonner les espaces, mais aussi de modifier les façades, les toitures ou les planchers en fonction des nouveaux besoins.

Une considération des **capacités porteuses et techniques** du projet, en prévoyant des surdimensionnements pour : offrir des possibilités d'extension verticales et horizontales ; mais également prévoir l'intégration de nouvelles gaines techniques dans les distributions ; et enfin, prévoir des circulations répondant aux exigences de plusieurs scénarios.

Ce dernier indicateur est détaillé dans le texte de L'OVAM, qui décrit deux manières de prendre en compte le principe d'**extensibilité** : soit par un surdimensionnement, soit par un ajustement ou un renforcement des éléments porteurs. Si la première solution demande un coût matériel et une bonne estimation des futures changements, la seconde nécessite souvent des interventions complexes et coûteuses (OVAM, 2016, p. 29).

Le bureau français Canal architecture va plus loin dans son ouvrage « *construire réversible* » (De Collignon et al., 2017), en proposant sept principes illustrés par un projet fictif dans le but de faire avancer les réflexions. Le collectif a tenté de mettre en place des « *compromis gratifiants* » (De Collignon et al., 2017, p. 35) qui permettent de rendre compatibles différents modes d'habitat et d'usage. On retrouve des dimensions de hauteurs et de largeurs adaptées pour diverses fonctions (bureau et habitat) et pour favoriser un éclairage naturel ; ainsi qu'une structure poteaux-poutres et un regroupement de la circulation et des distributions du réseau technique qui permet d'offrir de grands plateaux ouverts.

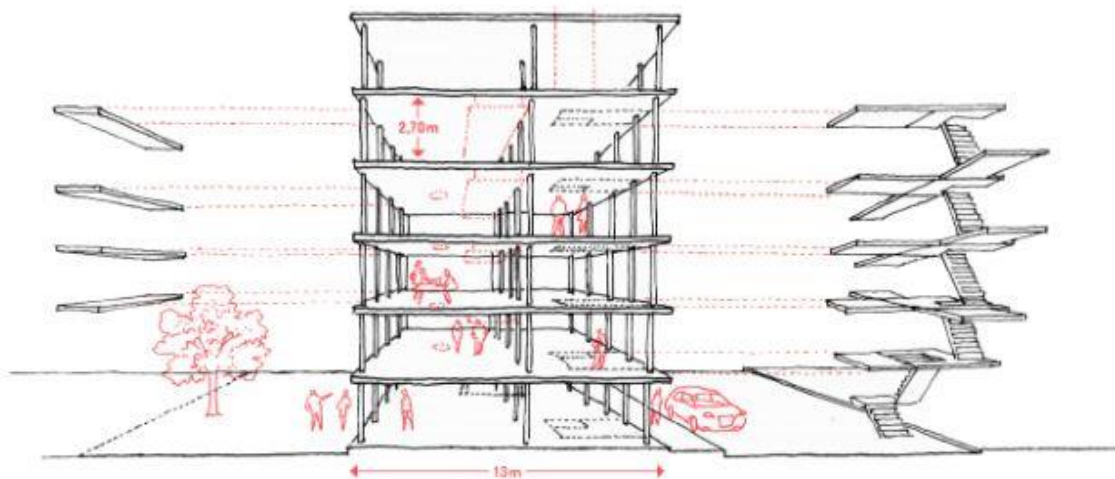


Figure 13 : schéma interprétant les sept principes de Canal Architecture (source : De Collignon et al., 2017)

Le principe d'adaptabilité spatiale a donc pour objectif de permettre aux bâtiments de garantir un prolongement d'utilisation grâce à une polyvalence spatiale et/ou grâce à un ajustement qui ne nécessite pas de grands travaux. Plusieurs facteurs peuvent impacter la spatialité, notamment le dimensionnement et la position de la structure et des noyaux fixes (circulations, distribution technique, etc.), ainsi que les stratégies en amont, en réponse à de futures fonctions.

2.2.3. Stratification des éléments:

Nous avons vu dans l'état de l'art que les parties d'un bâtiment exercent plusieurs fonctions et possèdent des durées de vie distinctes. Une grande partie des déchets générés par la construction proviennent de processus comme une rénovation, une modification d'agencement, une usure due aux intempéries ou la fin de vie de composants (Paduart et al., 2013).

Le principe de stratification est affilié à la théorie des « *couches de cisaillement* » de Steward BRAND (Brand, 1995) qui prône la séparation en strates des différentes couches constructives d'un bâtiment en fonction de leur durée de vie.

Selon Buildwise : « *La superposition des éléments de construction en couches ou strates fonctionnelles séparées physiquement est un critère de conception essentiel pour une construction dynamique, permettant de passer à travers le cycle de vie des bâtiments sans avoir à changer l'ensemble de la composition. Cette superposition contribue à ce que la performance de chaque strate fonctionnelle soit compatible avec l'évolution des besoins tout au long du cycle de vie des bâtiments.* » (Romné & Vrijders, 2018)

Pour L'OVAM, la superposition des éléments de construction dans des couches séparées permet d'adapter les performances de chacune à l'évolution des besoins au cours du cycle de vie du bâtiment et de simplifier des maintenances ou des réparations. Car certains composants requièrent d'être remplacés lors de nouvelles exigences techniques, esthétiques et autres, ou au cours de dégradations (OVAM, 2016, p. 16).

Dans le Dossier « *Construire réversible et circulaire* » (Bruxelles Environnement, 2020) les auteurs recommandent de séparer les différentes strates en fonction de leur usage et de la durée de vie de leur composants. Dans cette approche, on retrouve la durée de vie des six couches inspirées du classement de S. Brand : le **mobilier** qui représente les équipements avec la durée de vie la plus courte variant de quelques jours à quelques mois, **l'aménagement intérieur** comme des éléments de cloisonnement à durée de vie estimée entre 3 et 30 ans, les **systèmes** qui comprennent les différents réseaux techniques variant entre 7 et 15 ans, **l'enveloppe** des surfaces extérieures avec une espérance de vie d'environ 20 ans, et enfin la **structure** porteuse qui peut être maintenue sur une période de 30 à 300 ans. Quant au site, ce dernier est dit éternel car il correspond à l'emplacement géographique de l'ouvrage. Le schéma ci-dessous reprend ces séparations en fonction des durées de vie.

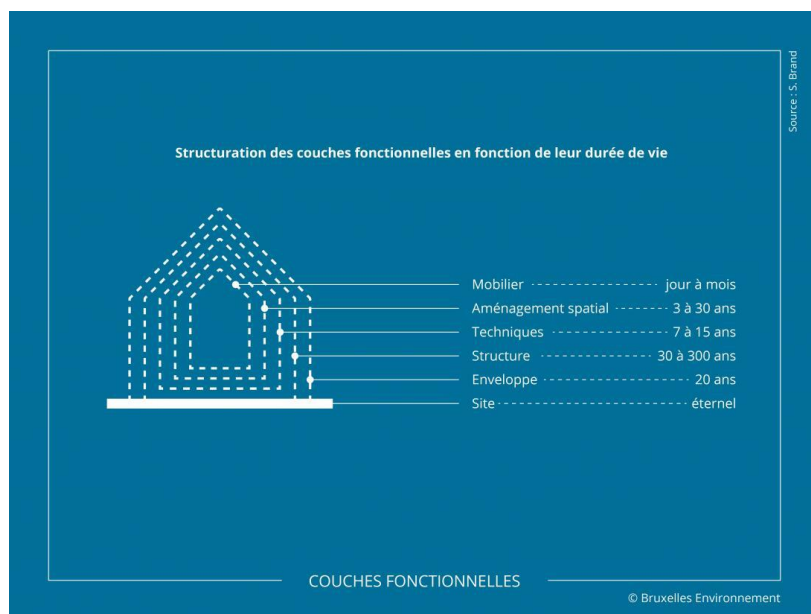


Figure 14: schéma des différentes couches et de leur durée de vie. (Source : Bruxelles Environnement, 2020)

De plus, le site du guide du bâtiment durable de Bruxelles indique qu'il n'est pas rare, dans les constructions, de devoir démonter des éléments qui ont une durée de vie longue pour atteindre des composants à durée de vie courte. Bruxelles Environnement recommande dès lors de hiérarchiser l'assemblage et le démontage des éléments en fonction de leur durée de vie

(Bruxelles Environnement, 2020). Autrement dit, que les éléments à durée de vie plus courte soient montés en dernier et démontés en premier, et qu’au contraire, les éléments à durée de vie plus longue soient assemblés en premier et désassemblés en dernier.

Pour les auteurs du document « *Vers une économie circulaire dans la construction* » (Romné & Vrijders, 2018), d’autres principes sont liés à celui de la séparation des strates. Par exemple le principe **d’indépendance**, mais aussi les principes d’**accessibilité**, de **compatibilité** ou encore de **réversibilité**. Ces derniers seront plus détaillés dans la section suivante [échelle de composants].

La superposition des éléments de construction en couches séparées physiquement par rapport à leur durée de vie fonctionnelle permet donc une adaptation efficace des différentes strates sans devoir modifier l’ensemble de la composition du bâtiment (OVAM, 2016, p. 16). Cette stratégie de stratification est un avantage pour que les éléments constituant un bâtiment puissent répondre à l’évolution des besoins et des performances tout au long du cycle de l’ouvrage.

2.2.4. Synthèse

Lors de l’analyse des enjeux du secteur de la construction, nous avons vu que les ouvrages doivent savoir évoluer en fonction des besoins des usagers, que ce soit au niveau fonctionnel, économique, culturel ou technique. Les précédents principes énumérés sont des approches qui permettent aux bâtiments de s’adapter aux changements et de prolonger leur durée de vie. Ces stratégies entrent dans la logique de l’économie circulaire en maintenant l’existant et permettant de valoriser les différents éléments qui composent l’ouvrage. Le tableau ci-dessous est un récapitulatif des principes cités dans cette section.

Tableau 1 : résumé des principes de conception à l’échelle du bâtiment	
Principe	Recommandation
Implantation	<ul style="list-style-type: none"> • Prévoir des espaces diversifiés au niveau de la typologie et des usages. • Favoriser l’accessibilité à différents moyens de transport. • Prévoir des raccordements simples et ajustables aux différents réseaux techniques publics. • Prévoir des possibilités de densification des ouvrages. • Mettre en place des espaces ou des équipements pour le quartier, ainsi que des liaisons avec ceux déjà existant.

Tableau 1 suite	
Adaptabilité spatiale.	<ul style="list-style-type: none"> • Prévoir des espaces polyvalents qui peuvent accueillir différentes fonctions. • Mettre en place des dimensionnements au niveau des hauteurs, des surfaces ou encore différents éléments (fenêtres, circulation, noyaux techniques, etc.) qui favorisent plusieurs usages et l'apport de lumière naturelle. • Réfléchir à une position stratégique des éléments fixes (structures, locaux technique, zones de circulation, etc.) qui permette un plan libre et ouvert. • Prévoir des éléments mobiles ou démontables pour faciliter des ajustements spatiaux tel que des parois amovibles. • Considérer des possibilités d'extensions verticales ou horizontales, soit en surdimensionnant les structure et les fondations, soit en prévoyant un futur renforcement de ces dernières.
Stratifications des éléments	<ul style="list-style-type: none"> • Séparer le bâtiment en différentes couches en fonction de la durée de vie fonctionnelle de chacune. • Hiérarchiser le montage et le démontage des couches en fonction de la durée de vie de leurs composants. • Prévoir une indépendance entre chacune des couches pour des interventions qui n'impactent pas la performance des autres strates.

2.3. L'échelle du composant :

Ce niveau d'échelle considère plusieurs principes, qui ont un impact sur les éléments et les systèmes constructifs. Ces principes prennent en compte les différents cycles de vies des composants, afin de répondre à deux objectifs : concevoir des bâtiments qui puissent être déconstruits pour extraire des composants intacts et prévoir la valorisation de ces composants par le réemploi, le recyclage, etc.

La première section englobe les principes favorisant la **réversibilité** des éléments et de leurs connexions dans le but de permettre le démontage sans dommage pour eux et leur voisinage.

La seconde section comprend des stratégies de **simplification** des méthodes de mise en œuvre, de désassemblage et de manœuvre, afin d'encourager la valorisations des composants tout au long de leur cycle de vie.

La troisième section reprend le principe de **compatibilité** des éléments entre eux. Car des composants standardisés ont une probabilité de prolonger leur durée vie utile, ainsi que celle des bâtiments.

Enfin la dernière section développe le principe de **durabilité** des composants et de leurs connexions, en vue de garantir le potentiel de réemploi des produits constructifs

Ces quatre principes entrent dans la logique de l'économie circulaire en favorisant le démontage et la réutilisation des composants, ce qui, par conséquent, permet de prolonger le cycle de vie des ouvrages et des produits les constituant.

2.3.1. Le principe de réversibilité technique

Nous avons l'avons vue dans la section précédente, la séparation de strates en fonction de leur durée de vie permet de limiter l'impact que les éléments ont entre eux. Pour ce faire il faut que les éléments et les composants soient *indépendants* les uns des autres. Buildwise décrit l'indépendance comme un principe fondamental qui permet d'« *intégrer les éléments de manière à pouvoir retirer ou rénover certaines parties sans affecter les performances des éléments ou des autres strates connectés.* » (Romné & Vrijders, 2018, p. 21).

Dans le rapport WP5 du projet BBSM, les auteurs recommandent quelques actions pour prévoir la future séparation des composants. On retrouve des stratégies comme la géométrie ou le séquençage des assemblages (Galle et al., 2019b, p. 33).

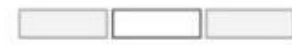
La **géométrie des assemblages** peut être distinguée en deux types, les géométries ouvertes et les géométries inter-pénétrantes. Il est préférable d'utiliser des géométries ouvertes car le deuxième type ne permet de démonter les éléments que dans un seul sens (Bruxelles Environnement, 2020).

Le **séquençage pour l'assemblage et le désassemblage** peut être distingué selon deux entités : les assemblages / désassemblages parallèles et les assemblages / désassemblages séquentiels. Le séquençage parallèle permet de monter ou de démonter les composants grâce à l'indépendance des éléments, contrairement à un assemblage séquentiel qui demande que les composants soient assemblés et désassemblés dans un ordre précis.

L'OVAM affirme que l'utilisation fréquente du principe d'indépendance permet de favoriser et simplifier le remplacement, le démontage et la réparation des composants (OVAM, 2016, p. 18). Cependant l'utilisation d'éléments de construction démontables est inutile si les liaisons rendent impossibles les mouvements des éléments (OVAM, 2016, p. 22). Pour optimiser la réutilisation des éléments de construction, il convient de privilégier des liaisons réversibles (OVAM, 2016, p. 4).

Dans le rapport WP5 du projet BBSM les auteurs recommandent d'utiliser des connexions qui peuvent être défaites plutôt que fixes, et d'éviter des connexions qui ont un impact dommageable sur le bâtiment (Galle et al., 2019b, p. 31). La réversibilité est donc pour les auteurs une méthode qui permet de défaire les connexions sans endommager les composants.

La société Buildwise distingue dans son guide deux types d'assemblages : les assemblages secs et les assemblages humides. Selon les auteurs, leur distinction est essentielle pour favoriser des perspectives de démontages et les définissent comme tels : (Romné & Vrijders, 2018, p. 32-33).



Assemblage à Géométrie ouverte.



Assemblage à géométrie inter-pénétrantes



Assemblage parallèle



Assemblage séquentiel

Figure 15: schéma des types de géométrie et de hiérarchies d'assemblage.

Les **assemblages secs (ou mécaniques)** sont des assemblages qui utilisent des méthodes d'emboîtement ou des éléments de fixations. Ce type évite tout lien liquide et peut être divisé en quatre sous-parties :

Les assemblages *secs indirects dépendants* sont des fixations pouvant se fondre dans les éléments qu'elles connectent, comme des clous ou des agrafes, etc.

Les assemblages *secs indirects indépendants* sont, à l'inverse, des fixations qui peuvent se détacher par rapport aux éléments qu'elles connectent. Par exemple des boulons ou des vis, etc.

Les assemblages *secs indirects autonomes*, sont des accessoires de raccordements entre deux éléments tels que des équerres ou des plaques de fixations, etc. Ce type d'assemblage requiert l'aide de fixation.

Les assemblages *secs directs* sont des méthodes qui ne demandent pas de fixations mais seulement des mouvements de montage particulier, par exemple lors de pose flottante, d'emboîtement, de clipsage, etc.

Les **assemblages humides (ou chimiques)** consistent en des assemblages qui nécessitent un liant liquide pour la mise en œuvre. On retrouve deux types de connecteur humides :

L'assemblage *humide indirect* permet de fixer les composants par l'intervention d'une matière supplémentaire telle que la colle, le mortier, etc.

L'assemblage *humide direct*, procède soit par fusion tel que le soudage, soit en englobant les éléments dans un liant chimique comme une armature dans un béton.

On remarque que les assemblages humides sont des fixations avec le moins de potentiel réversible, car ils nécessitent plus de travail et d'énergie pour séparer les éléments. De plus, cela provoque souvent un endommagement partiel voir total lorsque la fusion des éléments ne permet pas de les séparer ou de les récupérer. Les connexions dites sèches sont donc mieux adaptées pour un ouvrage circulaire, car elles assurent une plus vaste possibilité de démontage et de réemploi des composants. Cependant, on note qu'un assemblage *sec indirect dépendant* a un impact plus important que les connexions *sèches directes* en provoquant une détérioration de l'élément de construction.

Il faut en conséquence développer une réflexion en amont, sur le choix du type de connexions, afin de limiter leur impact sur les matériaux ou les composants. En outre, pour permettre le

démontage des composants et des éléments de façon bénéfique et sans dommage, il convient de prévoir un accès aisé aux éléments et à leurs fixations (Romné & Vrijders, 2018, p. 32).

Dans le guide de conception pour une transition vers une économie circulaire, les auteurs conseillent : de maximiser le nombre d'éléments pouvant être atteints sans en enlever d'autres ; de prévoir des espaces ergonomiques autour des composants et de leurs fixations pour faciliter le démontage (Galle et al., 2019b, p. 29). De plus, le site du guide du bâtiment durable recommande de rendre plus accessibles les éléments à courte durée de vie par rapport aux éléments à durée de vie longue, car ces derniers nécessitent moins d'intervention (Bruxelles Environnement, 2020).

Pour conclure, un ouvrage qui cherche à répondre au changement et à maintenir les produits de construction dans une chaîne circulaire, doit prévoir l'accessibilité des composants et de leurs connexions, grâce à des choix d'assemblage qui ont peu de répercussion, pour garantir l'indépendance des éléments.

2.3.2. Le principe de simplicité

Selon L'OVAM si les composants d'un bâtiment peuvent être assemblés et récupérés rapidement, les probabilités qu'ils soient valorisés en fin de cycle de vie augmentent (OVAM, 2016, p. 8). Il faut donc privilégier des solutions qui permettent d'accentuer la mise en œuvre et le démantèlement des composants.

L'une des stratégies est d'opter pour des **techniques simples** plutôt que des techniques complexes qui ne peuvent être réalisées que par des entrepreneurs spécialisés. Une trop grande complexité des ouvrages ralentirait le processus de démantèlement et engendrerait des coûts supplémentaires de main d'œuvre (OVAM, 2016, p. 6). Pour y remédier le rapport WP5 du projet BBSM conseille de limiter le nombre de types de composants et de connexions différents ; de favoriser des méthodes de construction qui ne demande aucune compétence ou aucun outil particulier ; d'introduire des tolérances et des marges dans la conception (Galle et al., 2019b, p. 26).

De plus, une bonne **maniabilité** lors de la manutention des composants permet d'aider à la faisabilité de l'ouvrage, de faciliter l'adaptation des éléments et d'optimiser le réemploi au niveau logistique. Dans le guide « *concevoir la transition vers l'économie circulaire* » les auteurs recommandent d'utiliser des composants suffisamment légers pour être installés ou désinstallés par des ouvriers avec un minimum d'aide mécanique ; et de façonner les

composants pour qu'ils puissent être transportés de manière efficace (Galle et al., 2019b, p. 27). On peut, par exemple, limiter la taille des éléments pour qu'ils puissent être adaptés aux transports ou rendre accessible les points d'ancrage pour faciliter le déplacement des éléments. D. Flemming indique que de telles pratiques sont cruciales pour optimiser le réemploi des composants de manière financièrement compétitive, mais aussi écologiquement en limitant la génération de déchets (Fleming, 2009).

Enfin, selon le site du guide du bâtiment durable de Bruxelles des solutions de préfabrication peuvent permettre une grande adaptabilité (Bruxelles Environnement, 2020). L'assemblage des composants de construction hors site présente des avantages en termes de contrôle de qualité, d'uniformité des éléments, de réduction des déchets de construction, de rapidité de mise en œuvre et de baisse du coût global du processus de construction. De plus, le pré-regroupement des éléments peut accélérer le démontage (OVAM, 2016, p. 20). On peut aussi noter que la préfabrication peut favoriser l'indépendance des différentes couches fonctionnelle, en regroupant tous les composants dans un module préfabriqué. Si les espaces sont constitués de plusieurs systèmes, divisés en modules, dont les relations sont identifiables, on parle alors d'architecture modulaire.

En conclusion, le principe de simplicité est un ensemble de réflexions qui cherche à faciliter les travaux de construction ou de déconstruction en prenant en compte en amont des solutions logistiques.

2.3.3. Le principe de compatibilité

Nous avons vu précédemment des principes qui favorisent le démontage de composants et d'éléments constructifs, pour répondre à des changements. Toujours dans cette logique de stratégies, les parties soustraites doivent pouvoir être remplacées par des composants similaires ou neufs. Or, en utilisant des composants standardisés et compatibles dont la forme et la taille sont coordonnées, les ouvrages peuvent plus facilement trouver des pièces de remplacement afin de prolonger leur durée de vie. De plus, si la durée de vie technique des composants n'est pas encore atteinte, les composants remplacés peuvent être réparés et réutilisés dans des configurations équivalentes (OVAM, 2016, p. 14)

En effet un composant est plus propice à être réutilisé s'il est compatible avec d'autres bâtiments ou d'autres systèmes constructifs. « *La compatibilité augmente la possibilité de recombinaison et de réemployer les composants à plusieurs reprises. Il est possible que la compatibilité aide*

également à rechercher des pièces de rechange et de soutien ainsi que les réparations. » (Galle et al., 2019b, p. 35). Afin de faciliter la compatibilité, les auteurs du rapport WP5 du projet BBSM préconisent :

Concevoir le bâtiment ou les systèmes constructifs selon un ou plusieurs « modules » aux dimensions récurrentes.

Utiliser des composants de forme et de taille standardisées, produits par plusieurs fabricants.

Vérifier que les composants savent être interchangeables ou qu'une configuration nouvelle peut être créée.

Rechercher la compatibilité au sein d'un même système de construction, mais aussi entre les différents systèmes.

Appliquer un modèle géométrique et des principes tels que l'échelle, la symétrie et la rotation.

Pour A. Paduart, la recherche de standardisation et de compatibilité des éléments de construction à travers leur conception et leur dimensionnement, joue un rôle crucial pour supporter une grande variété d'application (Paduart et al., 2013). Des structures ouvertes avec des principes modulaires favorisent le façonnement des composants d'après une grille similaire ou fractale¹⁹. De plus selon le « vadémécum bâtiment circulaire » (Nicodème et al., 2021) promouvoir la modularité et la standardisation aide à une permutation et un réaménagement spatial.

Si la conception d'un bâtiment devait être de préférence modulaire, car des formes complexes pourraient compliquer la déconstruction des composants, J. Kanters souligne que cela ne signifie pas nécessairement qu'une standardisation conduira à moins de liberté architecturale pour les concepteurs (Kanters, 2018, p. 4).

2.3.4. Le principe de durabilité

La réutilisation d'éléments de construction n'est possible qu'à la condition que la matérialisation des éléments de construction le permettent physiquement. Pour y parvenir des matériaux durables doivent être utilisés, c'est-à-dire qu'ils doivent durer dans le temps et qu'ils

¹⁹ Une figure fractale est un objet mathématique qui présente une structure similaire à toutes les échelles. Source Wikipédia. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Fractale>

doivent résister à l'usure due à l'utilisation intensive et au transport fréquent (OVAM, 2016, p. 10).

Dans leur livre, Christ Morgan et Fionn Stevenson affirment que des détails de construction « *correctifs* » facilitent l'entretien des éléments grâce au remplacement partiel plutôt qu'à grande échelle. Les composants doivent, dès lors, être conçus pour maximiser le nombre de fois où ils peuvent être réutilisés. Cela nécessite une attention particulière des bords connectant les pièces. Plus les bords sont robustes, plus les composants et leurs connecteurs sont susceptibles d'être réutilisés encore et encore. (Morgan & Stevenson, 2005).

On retrouve cette idée dans le rapport WP5 du projet BBSM. « *Les composants solides résistent à une utilisation intensive ainsi qu'à des désassemblages et réassemblages répétés. En conservant leur valeur, ces composants seront probablement réemployés durablement* » (Galle et al., 2019b, p. 23). Les auteurs préconisent de privilégier des composants robustes, résistant à l'usure et/ou avec longue durée de vie, de choisir des composants nécessitant un entretien limité et facilement réparable ou à mettre en œuvre, et d'anticiper les détériorations indésirables telles que la corrosion. D'autres propriétés devront être pensées telle que la qualité esthétique.

L'OVAM nous fournit quelques exemples de composants de construction qui possèdent des hautes résistances aux dégradations et qui peuvent être réemployés si les méthodes de connexions le permettent. On retrouve les briques, les tuiles (de toit), les carreaux céramiques, des éléments de bois (poutres, plancher, etc.) ou encore des profilés métalliques (OVAM, 2016, p. 10).

2.3.5. Synthèse :

Les principes cités à cette échelle sont des notions-clés qui soutiennent une flexibilité technique. Or nous l'avons vu dans le précédent chapitre : garantir qu'un bâtiment s'adapte techniquement aux changements limite l'obsolescence des ouvrages et par conséquent réduit la consommation de nouvelles ressources ou la production de déchets. Ces stratégies sont en lien avec l'économie circulaire en favorisant des conceptions d'adaptabilité, de déconstruction et de réemploi. Le tableau suivant reprend les différentes caractéristiques énumérées.

Tableau 2 : résumé des principes de conception à l'échelle du composant

Principe	Recommandation
Réversibilité technique	<ul style="list-style-type: none">• Prévoir l'indépendance des éléments pour un démontage sans dommage grâce à des géométries et des séquençages d'assemblage ouverts et parallèles.• Privilégier des connexions dites mécanique plutôt que chimiques.• Favoriser l'accessibilité au plus grand nombre de composants et de connexions possibles, particulièrement aux éléments à courte durée de vie ou qui ont besoin d'un plus grand nombre de maintenance.
Simplicité	<ul style="list-style-type: none">• Privilégier des techniques simples adaptées à des outils communs.• Limiter le nombre de types de composants et connexions différents.• Avantager des éléments qui peuvent être manutentionnés avec un minimum d'aide mécanique.• Façonner les composants pour qu'ils puissent être transportés de manière efficace.• Privilégier la préfabrication des éléments.
Compatibilité	<ul style="list-style-type: none">• Favoriser des systèmes de construction en modules et avec des dimensions récurrentes.• Utiliser des composants standardisés.• Privilégier des géométries qui permettent plusieurs configurations.
Durabilité	<ul style="list-style-type: none">• Privilégier des éléments robustes à l'usure et/ou à longue durée de vie.• Utiliser des composants qui demandent peu d'entretien et qui sont facilement réparables.• Prévoir la qualité esthétique du produit.

2.4. L'échelle du matériau :

Le choix des matériaux peut avoir un réel impact sur les bâtiments et sur leur obsolescence. Nous avons étudié plus tôt, que les matériaux peuvent avoir des conséquences sur le cycle de vie des strates, sur la réversibilité des composants ou encore leur durabilité. Dès lors différents aspects doivent être pris en compte simultanément, tel que la qualité technique, l'esthétique, l'impact environnemental, etc. De plus, il faut aussi considérer la fin de vie du matériau en prévoyant, dès le processus de conception, d'intégrer la manière dont ils peuvent être réintroduits dans le cycle de production (Romné & Vrijders, 2018, p. 26).

Pour le site du guide du développement durable de Bruxelles, afin de minimiser l'impact des matériaux de construction, il faut intégrer l'approche de cycle de vie (AVC²⁰) dès la conception (Bruxelles Environnement, 2020). Dans le livre Circubuild, cette approche est décrite comme « *une méthodologie d'évaluation normalisée et holistique qui permet de prendre en compte l'entièreté de l'influence néfaste sur l'environnement d'un matériau ou d'un bâtiment pendant tout son cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières nécessaires à sa production et à son transport jusqu'à son utilisation et au traitement des déchets* ». (M. Vandembroucke et al., 2021, p. 132). Afin de comprendre les enjeux liés au cycle de vie dans une construction ou une rénovation, Bruxelles Environnement recommande de prendre en compte les objectifs issus de l'écologie industrielle (Bruxelles Environnement, 2020). Ces derniers sont de **boucler** les flux de matières dans une chaîne de production cyclique ; d'**étanchéifier** les boucles de valorisation en minimisant les pertes ; d'**intensifier** l'usage des matériaux de façon optimale ; d'**alléger** l'impact environnemental des matériaux. Dans le but d'atteindre ces objectifs, il existe deux options de sélection des matériaux qui peuvent être complémentaires. La première favorise une future valorisation des matériaux et la seconde limite l'impact environnemental matériel.

2.4.1. Choisir les matériaux en fonction de leur potentiel de réutilisation ou de valorisation.

L'un des principes circulaires, pour la valorisation, se base sur la distinction des matériaux dit biologiques et techniques. C'est une approche tirée du concept de « *cradle to cradle* »

²⁰ En anglais Life Cycle Approach (LCA)

(McDonough & Braungart, 2011). Les matériaux biosourcés, tels que le bois, doivent être utilisés sans contaminant toxique afin qu'ils puissent retourner à la biosphère lors de leur fin de vie. Quant aux matériaux techniques type métal ou plastique, il est idéal de les maintenir un maximum dans le cycle de fabrication (Romné & Vrijders, 2018, p. 27). Dans le guide de conception vers une transition circulaire du projet BBSM, les auteurs proposent de sélectionner *des matériaux purs*, ce qui limite le mélange de composés car ces produits nécessitent moins de traitement pour un recyclage futur ou lors d'une biodégradation. Pour cela il faut privilégier des matériaux bruts, éviter les traitements à composés chimiques et, dans le cas d'un mélange de matières, favoriser la séparation des matériaux (Galle et al., 2019b, p. 21). De plus, Bruxelles Environnement recommande de privilégier des matériaux à durée de vie longue qui ont une forte résistance à l'usure pour qu'ils puissent respecter l'usage qui leur est destiné (Bruxelles Environnement, 2020).

2.4.2. Choisir les matériaux en fonction de leur impact environnemental

La société Buidwise dans son document « *vers une économie circulaire dans la construction* » recommande de privilégier des matières premières avec un faible impact environnemental (Romné & Vrijders, 2018, p. 27). Plusieurs critères permettent d'aider à faire ce choix, comme : une sélection de matériaux sur base de label ou d'outils qui prennent en compte les déclarations environnementales des produits (EPD²¹) (Bruxelles Environnement, 2020) ; une utilisation de *matériaux renouvelables*, qui peuvent se régénérer au moins aussi rapidement que leur durée de vie. (Galle et al., 2019b, p. 15). ; l'emploi de *matériaux disponibles localement* pour minimiser l'impact lié aux transport (Galle et al., 2019b, p. 15) ; ou encore l'absence d'éléments toxiques et dangereux pour la santé de l'homme ou l'environnement.

2.4.3. Synthèse

Cette échelle nous a permis de montrer les critères à prendre en compte, en amont, pour pérenniser l'utilisation des matériaux et limiter leur influence sur l'écosystème planétaire. Bien que ces choix dépendent essentiellement des fabricants ou des fournisseurs, il est néanmoins important de privilégier les matériaux et les produits qui répondent à ces critères. Le tableau ci-dessous regroupe les points précédemment cités.

²¹En anglais : Environmental Product Declarations

Tableau 3 : résumé des principes de conception à l'échelle du matériau	
Principe	Recommandations
Choix de matériaux	<ul style="list-style-type: none"> • Prendre en compte une approche d'analyse du cycle de vie des matériaux. • Favoriser l'utilisation de matériaux purs, sans mélange. • Prévoir la séparation des matériaux dans les produits. • Éviter l'utilisation de matériaux ou de traitements chimiques toxiques pour l'écosystème ou la santé humaine. • Sélectionner des matériaux qui possèdent des performances optimales vis-à-vis de leur impact environnemental • Privilégier des matériaux renouvelables et locaux • Favoriser et privilégier des matériaux de seconde main ou avec un pourcentage de recyclage.

2.5. Document d'informations (Passeport matériaux)

Afin de permettre aux entrepreneurs de la construction de mieux cerner les enjeux de la conception circulaire dans les ouvrages, il est suggéré de créer un document qui reprend tous les principes de construction mis en œuvre. L'une des propositions est le *Passeport matériaux*.

Selon le site BAMB (Building As Materials Banks), les passeports matériaux se définissent comme : « *des ensembles de données électroniques et interopérables²² qui collectent les caractéristiques des matériaux et des assemblages, permettant aux fournisseurs, concepteurs et utilisateurs de leur donner la meilleure valeur possible et de les guider vers des boucles de matériaux. La disponibilité et la pertinence de ces données, en particulier de l'historique d'utilisation et du potentiel de réutilisation d'un composant, facilitent la réutilisation, le recyclage et la biodégradation de ce composant. [...] En conséquence, le développement des passeports matériaux est considéré comme un mécanisme pour encourager la conception de produits innovants et la mise en œuvre de modèles commerciaux circulaires.* »²³

²² Interopérabilité : capacité de matériels, de logiciels ou de protocoles différents à fonctionner ensemble et à partager des informations. (Source : Larousse. <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/interopérabilité/>)

²³ <https://www.bamb2020.eu/topics/circular-built-environment/common-language/materials-passport/>

Le passeport matériaux se base sur le concept de « *Nutrient Certificates* » développé dans le livre « *Resources Repletion, Rôle of Buildings* » (Hansen et al., 2013). C'est un ensemble de données, dans un fichier informatique, qui permet aux utilisateurs de recueillir et de stocker des informations sur les matériaux ou les composants d'un bâtiment. On peut y retrouver : La fiche technique ; le potentiel de réutilisations ; le numéro d'identification ; le certificat de propriété ; les instructions de montage/démontage ; les instructions d'utilisation ; la durée de vie ; ou encore la procédure de maintenance des matériaux et des composants d'un bâtiment.

La publication « vers une économie circulaire dans la construction » (Romné & Vrijders, 2018) présente les défis du passeport de matériaux qui sont :

La collecte, la vérification et le traitement des informations relatives aux bâtiments existants qui pourront constituer une banque matérielle.

La manipulation et l'organisation des données collectées. La principale difficulté consiste à recueillir toutes les informations et les transmettre.

La mise à jour des documents en fonction des opérations de maintenance des bâtiments et de l'évolution des exigences performanciennes.

Des logiciels numériques facilitant les circulations et le stockage des informations comme l'utilisation de modèle 3D ou du BIM (Building Information Modeling)²⁴.

Le passeport matériaux constitue un outil intéressant pour l'avenir de la construction circulaire. La conservation des informations de chaque matériau et de chaque composant d'un bâtiment servira aux concepteurs pour effectuer des choix judicieux pour un démontage efficace du bâti et une valorisation optimale des éléments constituants.

²⁴ Le Building Information Model (ou modèle d'information du bâtiment) repose sur la représentation numérique d'un ouvrage grâce à un modèle géométrique (maquette numérique en 2D ou 3D) et informatif (valeur U, coût matériaux, etc..) associé à chaque élément de la construction. Toute modification des éléments revient donc à mettre à jour automatiquement les informations qui leur sont associées. (Romné & Vrijders, 2018).

2.6. Conclusion :

Nous avons vu dans l'introduction trois approches de conception qui limite l'obsolescence des ouvrages : les concepts d'adaptabilité qui prolonge la longévité des bâtiments et de leurs composants. Les concepts de déconstruction et de désassemblage dont les composants et les connexions offrent des stratégies de réversibilité technique. Et les concepts de réemploi qui valorisent les matériaux pour les maintenir dans la chaîne de production.

De ce constat, le chapitre présent a pour objectifs de décrire les différents principes clés qui favorisent la conception circulaire dans la construction selon trois niveaux d'échelles (Bâtiment, composants, matériaux). Nous y retrouvons notamment les principes d'implantation, de flexibilité spatiale, de stratification, de réversibilité technique, de durabilité, de compatibilité, de simplicité et de sélection des matériaux. Ces principes sont des qualités architecturales qui peuvent donner une valeur ajoutée immobilière et encourager les secteurs de la construction à limiter leur impact écologique.

En outre, les principes précédemment cités peuvent être bénéfiques pour le concept *d'urban mining* en facilitant la réutilisation des ressources lors de rénovation ou de déconstruction des édifices. Cette démarche offrirait des sécurités d'approvisionnement de matériaux de seconde main dans un contexte d'économie circulaire.

Par ailleurs, pour garantir que les processus de conception circulaire tout au long du cycle de vie des bâtiments, les acteurs du guide « *concevoir la transition vers l'économie circulaire* » (Galle et al., 2019b) recommandent de produire et de transmettre des documents d'information tel que le passeport matériaux, les modèle ass-built, des plans d'intervention ou de démontage, etc. Ces données pourraient indiquer les potentiels de valorisations, les instructions de montage/ démontage, les procédures de maintenance, les durées de vie, etc. aux futurs intervenants. D'autre par les informations devront être mises à jour en fonction des opérations de maintenances ou de rénovation, ainsi que lors de l'évolution des exigences performanciennes (Romné & Vrijders, 2018).

Pour conclure, les deux derniers chapitres ont permis de comprendre quelles sont les stratégies de conceptions pour orienter le secteur de la construction vers l'économie circulaire, ainsi que les avantages environnementaux qu'exerceraient ces méthodes. Nous pouvons dès lors nous demander si les principes de conceptions circulaires sont similaires aux principes consignés dans la Norme NBN ISO 20887 « conception pour la démontabilité et l'adaptabilité ».

3. Analyse de la norme ISO NBN 20887

3.1. Introduction

Sortie en mai 2021 et développée sur la base de normes existant au Canada, la norme ISO NBN 20887 « Développement durable dans les bâtiments et ouvrages de génie civil — Conception pour la démontabilité et l’adaptabilité — Principes, exigences et recommandations », a pour objectif d’aider le secteur de la construction à définir et évaluer les principes de conception et de construction circulaires.

Ce chapitre cherche à décrire les lignes directrices de la norme afin de les comparer avec les principes de construction circulaire analysés plus tôt dans ce mémoire. Cette comparaison a pour objectif de déterminer si la norme est suffisamment précise et détaillée pour être utilisée par les acteurs du secteur de la construction comme outil de décision et de conception de bâtiments circulaires mais également comme outil de prescription.

3.2. Définition préalable d’une norme technique

Selon le site NBN.be²⁵ « *Les différentes normes ont toutes un point commun : elles définissent des accords concernant un savoir-faire en matière de produits, de services ou de processus* »²⁶. Les normes sont partout présentes, dans notre vie professionnelle comme dans notre vie privée. Elles sont tantôt clairement visibles, comme le format A4 ou le kilogramme, tantôt moins visibles, comme les normes liées aux objectifs du développement durable des Nations Unis.

Selon le site ISO.org²⁷ « *les normes reposent sur les connaissances des experts dans leur domaine de prédilection, conscients des besoins des organisations qu’ils représentent – qu’il s’agisse de fabricants, de distributeurs, d’acheteurs, d’utilisateurs, d’associations professionnelles, de consommateurs ou d’organismes de réglementation.* »

Cependant, il ne faut pas confondre norme et réglementation. Le site NBN précise « *que les textes élaborés par le gouvernement (règlements) sont d’application obligatoire, les normes sont d’application volontaire. Elles n’ont donc aucun caractère contraignant. Les normes*

²⁵ <https://www.nbn.be/fr/>.

²⁶ Source sur le site NBN : <https://www.nbn.be/fr/l-importance-des-normes/qu-est-ce-qu-une-norme>

²⁷ Site officiel de L’ISO : <https://www.iso.org/fr/standards.html>.

reflètent les meilleures pratiques autour d'un produit, d'un service, d'une méthode ou d'un processus. Elles sont élaborées sur la base d'un consensus entre les parties prenantes. Les entreprises et les organisations utilisent les normes pour répondre aux exigences de qualité et de sécurité de leurs clients. Les règlements - un règlement, un contrat ou une spécification - peuvent faire référence à une norme. Dans ce cas, la norme est obligatoire. »²⁸

Les normes techniques n'ont donc pas vocation à devenir des réglementations, elles sont des documents de référence qui donnent un cadre pour les produits et leur mise en œuvre et qui indiquent l'état de connaissances scientifiques et technologiques au moment de la rédaction. L'acronyme ISO signifiant Organisation internationale de normalisation et NBN étant le bureau de normalisation (anciennement IBN : Institut belge de normalisation) qui est l'organisme national responsable de la réalisation et la publication des normes en Belgique

3.3. Descriptif de la norme ISO NBN 20887 :

3.3.1. Introduction :

L'introduction présente la norme comme un document destiné à fournir un cadre de travail pour les principes de Conception de Démontabilité et d'Adaptabilité (Cp D/A) ainsi que les enjeux-clés. Le document considère que les conceptions industrielles actuelles sont soumises à des méthodes d'assemblage qui ne prennent pas en compte la déconstruction. De fait, lors d'un projet de rénovation ou de démolition, les produits et les matériaux ne sont pas facilement récupérables pour une valorisation et deviennent des déchets mis en décharge. C'est donc une volonté d'informer les différents acteurs de la construction que ce soit le concepteur, le Maître d'Ouvrage (MO), les entrepreneurs, les fabricants, les exploitants, etc. car la mise en œuvre de Cp D/A exigera des compromis pour faire des choix.

A partir de ce constat, la norme décrit la conception pour le démontage et l'adaptabilité (Cp D/A) comme une contribution positive au Développement Durable et en lien avec les concepts émergents de l'économie circulaire. Son objectif est d'optimiser la durée de vie prévue des bâtiments lors de leur conception, pour l'égaliser ou la dépasser. Une telle stratégie permet d'éviter des travaux supplémentaires face aux changements que peuvent rencontrer les

²⁸ Source site NBN : <https://www.nbn.be/fr/questions-frequeemment-posees#:~:text=Quelle%20est%20la%20diff%C3%A9rence%20entre,ont%20donc%20aucun%20caract%C3%A8re%20contraignant.>

ouvrages ; mais aussi d'augmenter les opérations de maintenance, de fin de vie (démontage, réemploi, recyclage, etc.) ou d'actions efficaces pour l'utilisation de ressources.

On trouve également, dans l'introduction, un descriptif des concepts.

Le concept d'adaptabilité est établi comme la réduction « *des besoins de dépose inutile ou de constructions neuves, par reconversion ou par la modification des biens immobiliers construits pour prolonger leur durée de vie et faire en sorte qu'ils soient compatibles avec un plus large éventail d'utilisations.* » (ISO & NBN, 2021, p. 8). Concevoir pour l'adaptabilité implique de prendre en compte les utilisations présentes et futures.

Quant à **la conception pour la démontabilité**, elle définit « *Des méthodes explicites, préalables à la construction, pour la valorisation optimale de produit et matériaux spécifiques, sans endommager ce qui n'est pas déposé ni les composants autour.* » (ISO & NBN, 2021, p. 8). Elle est décrite comme pouvant permettre de réduire et/ou éviter les déchets, et ainsi d'accroître l'efficacité de l'utilisation des ressources avec des solutions alternatives.

On retrouve dans l'introduction un bon aperçu des enjeux et des définitions de la conception pour la démontabilité et l'adaptabilité dans le secteur de la construction, ainsi que le lien que ces concepts ont avec le développement durable et l'économie circulaire.

3.3.2. Stratégies de conception :

Cette partie permet de définir les caractéristiques qui ont une incidence sur l'application de la Cp D/A, ainsi que les différentes échelles impliquées. De plus, on y trouve aussi une comparaison entre la Cp D/A et la durabilité tant les aspects des deux modèles sont proches.

Caractéristiques d'incidence Cp D/A :

Les priorités, selon le document, lors d'une évaluation des options de Cp D/A , sont les exigences fonctionnelles, la durée de vie, les réglementations. L'élaboration d'un scénario, l'approche en coût global et l'approche du cycle de vie permettent d'évaluer les impacts et d'aider dans l'arbitrage des choix. En outre, les caractéristiques à prendre en compte sont (ISO & NBN, 2021, p. 19) :

1. **Le contexte physique du lieu** : prise en compte des changements dus à l'économie locale, à l'occupation des sols, à la démographie etc.

2. **Le contexte culturel des lieux** : matériaux, style architectural, méthode de construction etc.
3. **Type de propriétaire** : propriétaire occupant, promoteur immobilier, investisseur, société, collectivité.
4. **Type d'usage** : bâtiments : institutionnel, médical, résidentiel, commerce de détail, commercial, éducatif, industriel, entrepôt/stockage ; ouvrage de génie civil (par exemple défense contre les inondations, fourniture d'eau, fourniture d'énergie, transport).
5. **Typologies** : bâtiments : par exemple haut, bas, isolé ; ouvrages de génie civil : infrastructures de processus industriels, infrastructures linéaires (y compris au-dessus du sol et en sous-sol), barrages et autres ouvrages fluviaux, ouvrages maritimes et espaces publics.
6. **Technologies de construction** : par exemple structure gonflable, construction à ossature croisée, pont à haubans, construction composite, bâtiment en murs-rideaux, structure en tôles pliées, bâtiment à ossature, construction à ossature à plateforme, construction à poteaux et poutres, bâtiment en béton préfabriqué, à ossature métallique.
7. **Matériaux de construction** : par exemple béton, maçonnerie, acier, bois massif, ossature en bois léger ou une combinaison de ces éléments.
8. **Dimension** : emprise au sol et hauteur, parcelle cadastrale, largeur de droit de passage, programme d'aménagement des espaces — types et destinations d'espaces, organisation spatiale, etc.
9. **Durée de vie prévue lors de la conception** : durée de vie proposée dans le cadre d'un «premier usage» et tout «usage additionnel» anticipé, identifié par le maître d'ouvrage.
10. **Objectif de performance** : relatif aux cibles environnementales, sociales et économiques du développement durable.
11. **Objectif de performance** : relatif à la construction, la fonction et l'exploitation.
12. **Effet potentiel du changement climatique** : et autres exigences relatives aux zones dangereuses.
13. **Planning** : le temps de construction et/ou de démontage de l'ouvrage, le délai jusqu'à la date de mise en service peut mener à des solutions alternatives.
14. **Et les conditions locales** : acteurs pouvant avoir une incidence sur la dégradation ou sur un contrôle et une maintenance supplémentaire.

Nous pouvons déjà remarquer que pour la mise en place des Cp A/D certains de ces critères ne sont pas en liens directs. Le **type de propriétaire** n'a d'implication que sur l'exploitation des

ouvrages sauf s'il s'agit de la même personne que le maître d'ouvrage. **Le type d'usage** ne devrait pas d'avoir d'impact si les conceptions de l'adaptabilité permettent de varier les usages sans de gros travaux. **La typologie et les technologies de construction** ne devraient pas affecter les principes de conception pour la démontabilité, mais au contraire être complémentaires. Quant au **planning**, ce dernier devrait être en lien avec les délais de la Cp D/A.

Les niveaux d'analyse :

La norme décrit les principes de conception pour l'adaptabilité et la démontabilité comme devant « être *pris en compte pour les principaux éléments, les principaux composants et l'ouvrage de construction dans son ensemble, de façon à déterminer l'efficacité globale de la conception pour permettre les usages futurs et la valorisation ou le réemploi des matériaux.* » (ISO & NBN, 2021, p. 21). Le document liste cinq niveaux d'analyse qui doivent faire partie du processus de conception, de construction et de gestion des informations.

1. **Le système** correspond à l'échelle du bâtiment.
2. **Les éléments** prennent en compte les parois ou les modules majeurs de l'ouvrage.
3. **Les composants et les assemblages** sont des combinaisons de sous-composants qui forment un ensemble.
4. **Les sous-composants** sont des pièces qui composent un ensemble.
5. **Les matériaux** sont les produits réduits à leur matérialité la plus élémentaire.

Lors de l'analyse des principes de conception circulaire (chapitre 2), trois échelles de conception ont été présentées (Bâtiment, composants et matériaux). On retrouve ces trois types d'échelle dans le texte de la norme, cependant elles ne sont pas modulées de la même manière. Le tableau ci-dessous décrit les différences d'analyse entre les deux.

Tableau 4 : comparaison des niveaux d'échelles entre le chapitre 2 et la norme ISO NBN 20887		
Échelle d'analyse de la conception circulaire	Éléments pris en compte	Échelle d'analyse de la norme ISO NBN 20887
Le Bâtiment	L'ouvrage en tant qu'ensemble	Le système
	Les modules majeurs de l'ouvrage en fonction de leur durée de vie (structure, mobilier, aménagement intérieur, réseaux techniques et enveloppe.)	Les éléments
Les composants	La combinaison de pièces qui forment un ensemble.	Les composants et les assemblages
	Les différentes pièces ou produits qui forment la connexion entre les composants	
	Les pièces qui composent les ensembles	Les sous-composants
Les matériaux	Matières premières utilisées pour la conception des produits	Les matériaux

Bien qu'il existe une différence de classement des différentes échelles du bâtiment, on retrouve néanmoins toutes les parties concernées dans les deux types d'échelle. Ces parties permettent de comprendre le contexte et les échelles pour laquelle la conception pour la démontabilité et l'adaptabilité a un impact. Elles communiquent des informations pour les futurs acteurs sur les points d'attention à prendre en compte lors de la mise en place d'une stratégie liée à CP D/A.

3.3.3. Les principes de conception pour la démontabilité et l'adaptabilité :

Les principes de Cp D/A sont divisés en deux catégories : ceux relatifs à l'adaptabilité qui concernent les changements dans l'utilisation fonctionnelle de l'espace pour les bâtiments ; ceux relatifs au démontage qui concernent les ressources de matières. Il est précisé que les principes ne sont pas forcément dans toutes les situations et que, pour chaque principe appliqué, les exigences figurant dans les présents documents doivent être suivies.

3.3.4. Principes d'adaptabilité :

3.3.4.1. Généralité

Le document décrit l'adaptabilité comme : « *nécessaire pour accompagner les changements dans le type d'usage, la démographie, les besoins des utilisateurs ou ceux dus à la nécessité de s'adapter à des facteurs extérieurs, tels que le changement climatique, afin d'assurer la*

résilience ou la pérennité. Le coût initial peut être mis en balance au regard du futur coût d'adaptation. » (ISO & NBN, 2021, p. 22).

L'adaptabilité est divisée en deux catégories :

1. **Spécifique** : pour une adaptation connue et/ou attendue. Elle peut être séquentielle si elle se produit au fil du temps ou parallèle si elle assure différentes fonctions sur une certaine période.
2. **Générale** : pour les cas adaptation future et potentiellement inconnue.

Les conceptions spécifiques sont moins abstraites pour les exigences fonctionnelles par rapport aux adaptations générales.

Les principes de conception pour l'adaptabilité sont divisés en trois (ISO & NBN, 2021, p. 23):

- a) La Polyvalence
- b) La convertibilité
- c) Et la capacité d'extension.

Analyse critique :

On retrouve une similitude entre la définition de l'adaptabilité de la norme et la définition du « *design for change* » du rapport BBSM WP5 (Galle et al., 2019a). Mais, la norme précise qu'une comparaison peut être faite entre le coût initial et les coûts d'une adaptation. Autrement dit, il faut évaluer les principes mis en place avec des scénarios d'usages futurs pour se rendre compte si le concept apporte une réelle adaptabilité à l'ouvrage, mais aussi des gains financiers et matériels. Cette méthode d'analyse présente des avantages pour aider les acteurs à mesurer l'impact d'une telle conception. Le document propose dès lors deux catégories d'adaptabilité : les adaptations prévues par un scénario et celles qui ne le sont pas. Ces catégories ne sont pas distinguées dans le chapitre 2.

Au niveau des principes cités, ils sont en corrélation avec ceux que l'on trouve dans la section adaptabilité spatiale [\[2.2.2.1\]](#), étant donné que l'on retrouve le terme de *polyvalence* et d'*extensibilité* dans les directives de l'OVAM (OVAM, 2016). On peut, dès lors, s'attendre à retrouver des critères de dimensionnement des surfaces, de positionnement des éléments fixes, ou encore des stratégies de cloisonnements mobiles et de possibilité d'extension.

3.3.4.2. *La polyvalence*

La norme définit la polyvalence comme « *la capacité d'assurer différentes fonctions en apportant des modifications mineures aux systèmes.* » (ISO & NBN, 2021, p. 23). Les structures et les espaces polyvalents sont décrits comme permettant de faciliter d'autres usages lors de son utilisation avec des modifications mineures en réduisant le nombre de réaménagements au cours du cycle de vie de l'ouvrage. Les auteurs conviennent d'envisager un système de construction dans lequel des parties construites sont interchangeable, dans une certaine mesure, et ne se limitent pas à une seule application. Il est aussi fait remarquer que dans une adaptation spécifique et générale, il est important de considérer les besoins des utilisateurs ou des futurs partenaires externes.

La norme propose de mesurer le principe de polyvalence des bâtiments en pourcentage d'espaces utile ayant plusieurs usages et sans qu'il soit nécessaire de les modifier (ISO & NBN, 2021, p. 34).

Analyse critique :

On retrouve dans un premier temps la description de la polyvalence comme une stratégie de structure et d'espaces permettant différents usages avec des modifications mineures. Cette définition peut regrouper plusieurs stratégies de conception. Dans un deuxième temps, on retrouve une description comme la capacité d'un bâtiment à pouvoir accueillir des usages simultanément, par exemple un gymnase peut devenir un centre culturel au cours de la semaine. Cette explication évoque des suggestions pour intensifier les usages des bâtiments, afin que ces derniers évitent d'être mis à l'abandon.

3.3.4.3. *La convertibilité*

La convertibilité est expliquée comme « *la capacité d'adaptation à des changements substantiels des besoins des utilisateurs par la réalisation de modifications.* » (ISO & NBN, 2021, p. 24). La polyvalence et la convertibilité ont le même but : concevoir l'espace pour plusieurs usages. Mais les deux termes se différencient par la prise en compte des modifications des espaces intérieurs. La convertibilité prévoit, lors de la conception, des modifications de l'aménagement intérieur (cloisons, faux-plafond, etc.), non structurelles. Cela permet de réduire les besoins en ressources et en énergie.

Pour se faire, la norme conseille de : utiliser de longues travées et des constructions en poteaux-poutres, afin de permettre la flexibilité d'aménagements intérieurs, par la réduction des

éléments structurels internes, et pour permettre la stabilité structurelle lors de retraits de cloisons ; et aussi, que les éléments de support (enveloppe) soient construits selon des principes génériques pour offrir un plus grand nombre de possibilités. Ce dernier conseil évoque l'utilisation d'une trame réfléchie qui favorise la flexibilité spatiale.

La norme recommande de mesurer ce principe en pourcentage d'espace utile pouvant être facilement converti (ISO & NBN, 2021, p. 34).

Analyse critique :

On retrouve dans le principe de *convertibilité* des concordances avec les principes d'adaptabilité spatiale du chapitre précédent [2.2.2.]. Notamment, des choix structurels (poteaux-poutres) et de dimensions qui facilitent le plan libre, ainsi que la mise en place de parois démontables pour diversifier le cloisonnement. En revanche, on ne trouve pas d'indication sur le positionnement des noyaux techniques (structures, circulations verticales, gaines techniques, etc.) qui peuvent limiter l'utilisation des espaces. Il n'existe pas non plus d'exemples de dimensions (hauteurs sous plafond, largeurs des espaces, etc.) qui peuvent orienter les lecteurs vers des solutions concrètes.

3.3.4.4. La capacité d'extension

La définition de la capacité d'extension est « *un système dont la conception ou la caractéristique permet de s'adapter à des changements substantiels, favorisant ou facilitant l'ajout de nouveaux espaces, de nouvelles fonctions, de nouveaux moyens et de nouvelles capacités.* » (ISO & NBN, 2021, p. 24)

La capacité d'extension implique une conception qui permet l'ajout d'éléments verticaux ou horizontaux au bâtiment. Une extension verticale implique un surdimensionnement structurel pour les charges supplémentaires ou la possibilité d'augmenter la capacité porteuse, plus tard, dans le cycle du bâti. Quant à une conception pour une extension horizontale, elle doit prévoir la démontabilité des murs, de l'enveloppe.

La norme propose d'évaluer la capacité d'extension verticale soit en termes de nombre d'étages supplémentaires, soit par le pourcentage de plancher supplémentaire, soit par un questionnaire à réponse fermée (oui/non). Pour la mesure de la capacité d'extension horizontale, la norme propose un pourcentage de la superficie cadastrale supplémentaire non couvert par l'emprise du bâtiment (ISO & NBN, 2021, p. 35)..

Analyse critique :

On retrouve dans ce principe tous les points d'attention que doivent prendre en compte les acteurs de la construction pour une future extension, tels que cités dans le chapitre précédent dans la section d'adaptabilité spatiale [\[2.2.2.\]](#).

3.3.4.5. Analyse des Principes de conception pour d'adaptabilité

Les principes d'adaptabilité du document sont des critères de conception qui favorisent la diversité des besoins d'un ouvrage. La norme fait d'ailleurs la distinction entre l'adaptabilité spécifique (flexibilité du bâtiment pour des usages connus) et générale (flexibilité du bâtiment pour des usages inconnus). On retrouve, dans ces principes, le concept du plan libre, de la façade libre, ainsi que les stratégies de flexibilité, d'ajustabilité, d'évolutivité et de mobilité du « design for change » que nous avons vues dans les chapitres précédents. Cependant, l'importance de l'implantation dans le quartier n'est pas mise en avant, alors qu'elle peut participer au principe d'adaptabilité. De plus, la prise en compte du positionnement des gaines techniques, des circulations verticales ou des éléments structurels n'est pas énumérée alors qu'elle a un impact sur l'adaptabilité des espaces.

Les tableaux ci-dessous reprennent les similitudes et les différences entre le principe d'adaptabilité de la norme et les principes circulaires du chapitre précédent.

Tableau 5 : similitudes entre les principes d'adaptabilité de la norme et les principes circulaires.		
Principe circulaire	Principe de norme ISO NBN 20887	Description
Principe d'Adaptabilité spatiale	Polyvalence	Prévoir des bâtiments qui peuvent accueillir plusieurs usages, grâce à des espaces et un mobilier pouvant répondre aux besoins de plusieurs fonctions.
Principe d'Adaptabilité spatiale	Polyvalence	Prévoir de futurs scénarios d'usages.
Principe d'Adaptabilité spatiale	Convertibilité	Prévoir des dimensions et des choix structurels qui offrent un plan libre.
Principe d'Adaptabilité spatiale	Convertibilité	Prévoir le démontage de l'aménagement intérieur pour permettre la diversification du cloisonnement, sans qu'il y ait un impact sur la structure.
Principe de stratification	Convertibilité	Prévoir des supports qui permettent de séparer l'enveloppe de la structure et d'en accueillir une nouvelle.
Principe d'Adaptabilité spatiale	Capacité d'extension	Considérer des possibilités d'extensions verticales et horizontales, soit en surdimensionnant les structures et les fondations, soit en prévoyant un futur renforcement de ces dernières.

Tableau 6 : différences entre les principes d'adaptabilité de la norme et les principes circulaires.		
Principe circulaire	Principe de norme ISO NBN 20887	Description
Implantation	Indéterminé	Identifier et valoriser les qualités du site de façon à le garder attrayant, par exemple, en favorisant l'accessibilité à l'équipement du quartier (transport public, place, etc.)
Implantation	Indéterminé	Prévoir des raccordement simples et ajustables aux différents réseaux techniques.
Adaptabilité spatiale	Indéterminé	Positionnement des noyaux fixes tels que la structure, les circulations verticales et les gaines techniques.
Indéterminé	Catégorie d'adaptabilité	Différencier les adaptabilités spécifiques des adaptabilités générales. Les premières sont une adaptation pour des scénarios connus qui peuvent être <i>séquentiels</i> si les usages se remplacent ou <i>parallèles</i> si les usages sont prévus dans une même période. Les secondes sont une adaptation pour de futurs usages indéterminés à l'avance.

3.3.5. Principes de démontage

Les principes pour le démontage sont décrits comme s'appliquant « *aux assemblages et aux systèmes au sein d'un bien immobilier construit qui peuvent être démontés en fin de vie, ou rénovés, avec la possibilité de réutiliser les composants à d'autres fins.* » (ISO & NBN, 2021, p. 25). On y trouve sept principes :

1. La facilité d'accès aux composants et services
2. L'indépendance
3. L'évitement des traitements et finitions inutiles
4. Le soutien des modèles économiques prenant en compte le réemploi.
5. La simplicité
6. La normalisation
7. La sécurité de montage

De plus, il y est nommé des pratiques soutenant ces principes comme : la prévention en amont des fixations et du dimensionnement en fonction de la manutention, l'utilisation de matériaux ou de composants qui peuvent être remplacés et prévoir des pièces de rechange.

Analyse critique :

En admettant qu'il existe un lien entre les principes circulaires et ceux cités ci-dessus, on remarque que l'on retrouve les termes *d'indépendance* et *d'accessibilité* de la section « *réversibilité technique* » [2.3.1.], mais aussi les termes de *simplicité* et de *normalisation* qui peuvent être liés réciproquement aux sections « *principe de simplicité* » [2.3.2.] et « *principe*

de compatibilité » [2.3.3.] du chapitre précédent. On peut s'attendre à retrouver des critères de réversibilité des composants et de leurs connexions, mais aussi des indications pour privilégier l'utilisation de techniques et de composants courants.

De plus, on peut supposer que le principe *éviter des traitements et finitions inutiles* peut trouver des points communs avec la section « *choisir les matériaux en fonction de leur impact environnemental* » [2.4.2.]. Quant au principe *soutien des modèles économiques prenant en compte le réemploi*, il semble correspondre à des stratégies de valorisations de déchets dites des « R », vues au chapitre 1 [1.3.3.]

Enfin, on retrouve, dans les notes des pratiques pouvant soutenir les principes, une recommandation de dimensionnement en fonction de la manutention. Ce dernier correspond au critère *maniable* du rapport WP5 BBSM (Galle et al., 2019b, p. 27) que l'on retrouve dans la section [2.3.2.]

3.3.5.1. *Facilité d'accès aux composants et services*

La facilité d'accès est décrite comme permettant d'approcher facilement un matériau, un composant ou un élément de connexion, avec un minimum de dommage et d'impact sur celui-ci et les assemblages adjacents. Afin de favoriser le démontage, les connexions doivent être visibles pour mettre en évidence le type de connexions et les mesures à prendre en compte. Ce principe est fortement lié à celui de *l'indépendance* et à la désolidarisation des « couches » du bâtiment ou des composants possédant des durées de vie différentes.

Pour la mesure de ce principe, la norme propose une échelle de classement ordinaire allant de 0 à 5, classé de la façon suivante (ISO & NBN, 2021, p. 35) :

- 0) Aucune accessibilité sans dommage
- 1) Accessibilité limitée avec un dommage important supérieur à 50%
- 2) Accessibilité limitée avec un dommage mineur supérieur à 50%
- 3) Accessibilité élevée avec des dommages mineurs inférieurs à 50%
- 4) Accessibilité élevée avec des dommages mineurs inférieurs à 25%
- 5) Accessibilité totale sans dommage

Analyse critique :

On retrouve dans ce principe une corrélation avec le principe de « *simplicité* » décrit par le rapport WP5 du projet BBSM (Galle et al., 2019b, p. 25), que nous avons vu dans le chapitre 2

[2.3.2.], qui reprend les critères d'ergonomie et de visibilité autour des connexions pour simplifier leur démontage.

3.3.5.2. *Indépendance*

La norme définit l'indépendance comme « *la qualité permettant de retirer ou de mettre à niveau les pièces, composants, modules et systèmes sans nuire aux performances des systèmes raccordés ou adjacents.* » (ISO & NBN, 2021, p. 26). L'indépendance fonctionnelle est dite essentielle pour le démontage tant elle facilite le réemploi et la maintenance des produits constructifs, mais aussi l'adaptabilité spatiale.

L'annexe C de la norme donne une description des composants fixes et des composants indépendants (ISO & NBN, 2021, p. 35 à 36).

Les **composants dépendants et fixes** sont caractérisés par :

Une intégration maximale ;

Une hiérarchie d'assemblage qui ne prend pas en compte la durée de vie du composant ni du délai d'obsolescence attendu ;

L'application de séquençage d'assemblages séquentiels.

Les **composants indépendants** sont caractérisés par :

L'application d'un assemblage/démontage parallèle ;

Une hiérarchie d'assemblage ouverte de modules distincts.

Pour mesurer l'indépendance, le document propose une échelle de classement ordinaire allant de 0 – « *aucun considération de la durée de vie du composant, de la hiérarchie et de la modularité* ». À 5 – « *assemblage parallèle et ouvert, hiérarchie modulaire* » (ISO & NBN, 2021, p. 35).

De plus, on trouve dans la description de ce principe la séparation des systèmes d'un bâtiment en « couches », car les composants des biens immobiliers ont différentes durées de vie qu'il faut prendre en compte. Le document normatif liste trois principales couches : (1) l'enveloppe et le gros œuvre ; (2) les systèmes mécaniques et électriques ; (3) l'aménagement intérieur (cloisons, plafond, revêtement de sol, etc.). Cependant il est aussi dit que la séparation de la structure et de l'enveloppe faciliterait l'adaptabilité et le démontage.

Les connexions réversibles :

On trouve aussi le principe de connexions réversibles. Ces dernières sont évoquées comme pouvant être défaites et/ou démontées pour faciliter les modifications et les ajouts à la structure. L'utilisation de connexions réversibles plutôt que fixes avantage le démontage des produits constructifs, ainsi que leur réemploi ou leur recyclage futur.

Les recommandations du document sont :

Prévoir des espacements pour faciliter l'accessibilité des connexions

Limiter le nombre de types différents de composants afin de limiter les types d'outils nécessaires à son démontage.

Utiliser des connexions standard avec des dimensions universelles pour qu'elles soient compatibles à des pratiques courantes.

Réduire au maximum la dépendance entre les matériaux, les produits, les composants ou les systèmes.

Et utiliser des joints et des éléments de connexions dont la conception supporte les utilisations répétées en limitant leur détérioration.

La norme donne des exemples de connexions réversibles (vis, boulon, rainette, languette) et non réversibles (adhésif, connexions humides et chimiques, calfeutrage) mais ces exemples sont peu détaillés.

L'annexe C, propose une évaluation du principe par un questionnaire à réponse fermée (oui/non) pour chaque connexion et de mesurer un pourcentage de connexions réversibles au niveau des composants et des éléments (ISO & NBN, 2021, p. 36).

Analyse critique :

Le principe d'*Indépendance* de la norme, regroupe plusieurs points que nous avons vu dans le chapitre précédent. On retrouve naturellement, le principe indépendance entre les composants pour assurer leur démontage, avec les caractéristiques de hiérarchie et de géométrie d'assemblage, vu dans la section [2.3.1.]. Mais également, la théorie du « shearing layers » de S. Brand (Brand, 1995) qui sépare en strates les éléments d'un bâtiment en fonction de leur durée de vie et que nous avons détaillée dans la section [2.2.3.]. Nous pouvons d'ailleurs remarquer que la séparation de l'enveloppe et de la structure est conseillée, par la norme, pour

faciliter l'adaptation et le démontage, mais les deux systèmes ne sont pas considérés comme des couches indépendantes.

Au niveau des indications des *connexions réversibles*, on retrouve des indications pour favoriser des connexions *réutilisables* par rapport à des connexions humides, mais ces dernières sont moins détaillées par rapport au document de Buildwise (Romné & Vrijders, 2018). De plus, les notions d'accessibilité, de simplicité et de normalisation des connexions pour faciliter leur démontage se retrouvent réciproquement dans les sections [2.3.1], [2.3.2.] et [2.3.3.] de cette étude.

3.3.5.3. *Évitement des traitements et finitions inutiles*

La norme décrit certains choix de finitions ou de traitements, à l'exemple des substances dangereuses, comme étant défavorable pour des options de réemploi, de recyclage de substrats. Les auteurs affirment qu'il convient d'éviter ces finitions ou traitement pour favoriser le démontage (ISO & NBN, 2021, p. 16)

La norme propose une évaluation par oui/non à la question « *le matériau est-il recouvert d'une finition et est-il recyclable ou réutilisable* » (ISO & NBN, 2021, p. 36)

Analyse critique :

Il est vraisemblable que des finitions puissent empêcher le démontage des éléments, mais ce point peut être repris dans le *principe d'indépendance* des composants pour garantir une réversibilité de ces derniers. De plus, se dispenser de traitements et finitions toxiques, qui entraîneraient des conséquences sur la valorisation des matériaux, ne correspond pas forcément au principe de conception pour la démontabilité, car ces substances n'entravent pas le démontage directement mais demande des méthodes plus complexes pour éviter des contaminations sur l'environnement et l'homme. Néanmoins, ils correspondent aux critères de la section *choix des matériaux en fonction de leur impact environnemental* [2.4.2.] puisque ces substances peuvent contaminer les produits constructifs et les empêcher d'être maintenus dans le cycle de fabrication ou d'être biodégradés.

3.3.5.4. *Soutien des modèles économiques prenant en compte le réemploi (économie circulaire)*

Ce principe concerne « *le soutien du marché des matériaux et produits réutilisés, réhabilités, reconditionnés et recyclés, présent et à venir, à l'appui des modèles d'économie circulaire.* » (ISO & NBN, 2021, p. 18). Il est dans la suite logique qu'une conception, qui fournit des

ressources pour les futurs ouvrages, se doit de favoriser l'utilisation de matériaux et de ressources secondaires.

Le document fournit une liste des différentes valorisations possibles :

a) La réutilisabilité :

La réutilisabilité est définie comme : « *l'aptitude d'un matériau, d'un produit, d'un composant ou d'un système à être utilisé dans sa forme d'origine plus d'une fois et en conservant sa valeur et ses qualités fonctionnelles pendant sa valorisation pour permettre une nouvelle application pour le même usage ou tout autre usage.* » (ISO & NBN, 2021, p. 28). Le réemploi final dépend de la valeur du matériau et la mesure dans laquelle il peut garder cette valeur après avoir été démonté. Pour cela, la norme préconise :

De prendre en compte la durée de vie dans le réemploi par rapport à son utilisation d'origine.

De choisir des matériaux pour lesquels il existera, à l'avenir, un marché pour le réemploi ou des installation adaptées à tout traitement.

De sélectionner des matériaux pouvant être réutilisés pour les mêmes usages et les mêmes formes d'origine.

b) La réparabilité

Le terme réparabilité ou réhabilitation est défini par : « *l'aptitude à remettre les caractéristiques esthétiques et fonctionnelles d'un produit, d'un bâtiment ou d'un autre bien immobilier construit dans un état approprié pour pouvoir continuer à l'utiliser.* » (ISO & NBN, 2021, p. 29). Un tel procédé est décrit comme pouvant contribuer à réduire les coûts d'exploitation et de maintenance et permet d'augmenter la durée de vie des produits de construction.

c) Le reconditionnement

Le reconditionnement est « *l'aptitude d'un produit à être désassemblé et refabriqué à la fin de sa durée de vie utile de manière à être remis en état pour pouvoir être revendu.* » (ISO & NBN, 2021, p. 29). Il se distingue de la réhabilitation en ce sens que la propriété du produit est transférée aux fabricants d'origine ou à un autre parti qui le restaure pour être revendu.

d) Développement du recyclage

L'utilisation de matériaux recyclés est décrite comme bénéfique à la fois économiquement et environnementalement pour les bâtiments ou d'autres secteurs, en réduisant l'utilisation de matériaux primaires. Pour ce faire la norme conseille : de réaliser un audit préalable à une démolition pour identifier le potentiel de recyclabilité des matériaux ou des produits, et de privilégier des matériaux homogènes pour optimiser leur futur recyclage.

e) Recyclage futur

La recyclabilité est définie par : « *l'aptitude des composants, des matériaux ou des deux à être séparés et retraités à partir des produits et systèmes puis utilisés comme intrants de matières pour la même ou une autre utilisation ou fonction. Un matériau est recyclable s'il peut être détourné du flux des déchets et réintroduit dans le circuit économique par le biais de processus, installations et marchés existants.* » (ISO & NBN, 2021, p. 30).

On retrouve dans l'annexe C plusieurs indicateurs d'évaluation. D'abord une indication du pourcentage en poids ou en volume du contenu valorisé ou recyclé. Ensuite, pour chaque matériau ou composant dans l'ouvrage, déterminer par un questionnaire à réponse fermée oui/non (ISO & NBN, 2021, p. 36) des points suivants :

La capacité de réutilisation : en fonction de la durée vie réelle par rapport à la durée de vie prévue. La norme précise que le réemploi peut comprendre des niveaux d'échelle différents allant de la totalité de la structure à la section d'un matériau.

La capacité de recyclage : en fonction des possibilités de séparation et des possibilités de retraitement pour chaque flux de matériau à des qualité attendues.

La capacité de réparabilité : en fonction de la documentation du fournisseur

La capacité de reconditionnement : en fonction de la documentation du fournisseur

Analyse critique :

Ce paragraphe reprend les différents niveaux de valorisation des produits constructifs que l'on vu au chapitre 1 [1.3.3.] avec la stratégie des R. En conséquence, cette partie n'est pas un principe de conception qui favorise la démontabilité mais plutôt un principe de choix de matériaux qui soutient l'utilisation de ressources de seconde main. De plus, on retrouve dans

ce principe des principes de compatibilité et des critères de pureté de matériau que l'on a vu, respectivement, dans les sections [2.3.3.] et [2.4.1.].

3.3.5.5. *La simplicité*

La norme présente le principe de simplicité comme « *la qualité d'un assemblage ou d'un système conçu pour être simple, facile à comprendre et qui satisfait aux exigences de performance avec le moins de customisation possible* » (ISO & NBN, 2021, p. 20).

Le principe de simplicité a pour objectif de réduire le plus possible la quantité et la diversité d'éléments, de composants ou de matériaux requis pour remplir la fonction prévue. Cela contribue à réduire les outils, les techniques et les obstacles liés au démontage. Mais également, à rendre le potentiel de retraitement plus attractif avec un plus grand nombre d'éléments similaires et une simplification de tri sur site.

La norme propose de mesurer le principe en comparant le nombre par éléments et composants (et leur dimension) similaires (ISO & NBN, 2021, p. 36).

Analyse critique :

On retrouve dans ce principe de simplicité des recommandations similaires à la section [2.3.2.]. On peut cependant noter que le principe précise de limiter les *customisations* pour des détails décoratifs qui peuvent compléxifier le bâtiment.

3.3.5.6. *Normalisation*

« *La normalisation concerne l'utilisation de composants, de produits ou de processus communs pour satisfaire une multitude d'exigences.* » (ISO & NBN, 2021, p. 31). Autrement dit, la normalisation a pour objectif d'utiliser des techniques efficaces et répétitives qui facilitent le démontage pour les entreprises du bâtiment.

Il prend en compte plusieurs aspects :

- a) **Le dimensionnement :** au niveau des hauteurs et des tailles standard permettant différents types d'utilisation.
- b) **Les composants :** grâce aux dimensions standard favorisant le futur réemploi et la facilité de remplacement.
- c) **Les connexions :** notamment les pièces de connexions qui peuvent être séparées à l'aide d'outils standard facilement disponibles.

d) La modularité : c'est-à-dire les cellules tridimensionnelles qui peuvent être ajoutées ou enlevées pour promouvoir des espaces adaptables.

La normalisation des pièces et des composants les rendant interchangeables, elle favorise la simplicité et l'adaptabilité tout au long des différentes phases de vie d'un bâtiment. De plus, elle optimise le réemploi et la mise à niveau, grâce à des matériaux aux dimensions standard qui sont plus accessibles sur le marché que des produits spécifiques. Enfin, l'utilisation d'éléments et de composants préfabriqués optimisent les ressources et réduit le travail sur site.

La norme propose d'évaluer la normalisation en pourcentage du bâti global en fonction de différentes catégories : les dimensions ; les éléments ; les connexions ; les modules et l'interopérabilité (ISO & NBN, 2021, p. 37).

Analyse critique :

On retrouve, dans ce principe, les procédés de normalisation des composants et de leurs connexions, qui permet dans un premier temps de faciliter les pratiques de montage/démontage grâce à des méthodes standardisés ; et dans un second temps de trouver plus facilement des pièces de remplacement. On décèle aussi des critères de dimensionnement spatial et de module de préfabrication qui peuvent être liés, réciproquement, au principe d'adaptabilité spatiale [2.2.2.] et au principe de simplicité [2.3.2.] du chapitre précédent.

3.3.5.7. Sécurité de démontage

Afin d'assurer la sécurité du démontage, la norme recommande un plan de démontage pour chaque composant, module ou système. Ce document servira à fournir des informations exactes sur les matériaux d'origine et les méthodes d'assemblage, ainsi que sur les rénovations ultérieures majeures. De telles données permettraient de favoriser un démontage correct et par conséquent de favoriser un futur réemploi ou recyclage et devra être mis à jour.

Le document reprend la liste des principes précédemment énumérés en justifiant leur contribution à une meilleure sécurité du démontage :

Accessibilité : permet de limiter les difficultés liées à la manipulation.

Connexions accessibles : aide pour la prise de décision.

Connexions réversibles : permet un démontage contrôlé et non destructif.

Indépendance : peut faciliter la dépose des différentes pièces, en répartissant les charges sur les couches structurelles.

Éviter les finitions inutiles : limite les risques d'exposition à des produit chimiques.

Simplicité : réduit le nombre d'éléments, de composants et de matériaux qui nécessitent des approches différentes.

Normalisation : favorise l'expérience avec des systèmes similaires.

Durabilité : limite le nombre de dommages dus à la dépose.

Analyse critique :

Le développement d'un document de démontage reprenant les informations de chaque composant et matériau est fortement lié au *passport matériaux* que l'on retrouve dans la section [2.5]. Bien qu'il ne fasse pas partie des principes de conception pour la démontabilité, il permet de soutenir celle-ci en informant les différents acteurs des techniques de construction mises en œuvre.

3.3.5.8. Durabilité

La durabilité n'est pas cataloguée comme un principe de conception pour l'adaptabilité et la démontabilité mais elle est décrite comme « [...] *une considération essentielle qui a une incidence sur la prise de décision en matières de Cp D/A.* » (ISO & NBN, 2021, p. 37)

La norme propose de mesurer le principe de *durabilité* soit par une comparaison du coût de maintenance par rapport aux prix d'achat, soit par la comparaison de la durée de vie d'un produit par rapport à d'autres produits assurant la même fonction.

3.3.5.9. Analyse des principes de conception pour la démontabilité

Les principes de démontabilité de la norme sont des concepts qui permettent aux éléments de construction d'être désassemblés et dont les composants peuvent être efficacement séparés sans dégât. On distingue les principes généraux de réversibilité technique, de simplicité, de compatibilité et de durabilité, que nous avons vu dans le chapitre précédent.

D'abord, les principes de facilité d'accès et d'indépendance regroupent des stratégies qui favorisent le démontage des composants. De plus, le principe d'indépendance reprend les concepts de connexions réversibles et de stratification qui permettent, réciproquement, de limiter les dommages lors du démontage et de séparer les « couches » fonctionnelles par rapport à leur durée de vie. Ensuite le principe de simplicité dont l'objectif est de limiter la quantité et la diversité d'éléments, de composants et de matériaux dans l'ouvrage afin de réduire le nombre

d'outils, de techniques et d'obstacles lors du démontage. Enfin on retrouve également le principe de normalisation dont l'intention est de rendre compatibles les éléments, les composants sur le marché du réemploi grâce à des dimensions ou des modules standardisés.

Cependant, contrairement à ce que l'on observe dans le chapitre précédent, la norme détaille partiellement les critères de séquençage ou de géométrie favorisant l'indépendance des composants. Il en va de même pour les connexions réversibles, pour lesquelles la norme ne distingue que les connexions « réemployables » par rapport à d'autres dites chimique (soudés ou coulées) qui limite le potentiel de démontage. Cette distinction peut être élargie comme on a pu le voir dans le texte de Buildwise (Romné & Vrijders, 2018, p. 33). De plus, la norme conseille de séparer l'enveloppe par rapport à la structure mais ne les considère pas comme deux « couches » fonctionnelles indépendantes ; or cette distinction peut avoir une importance sur la durée de vie de l'ouvrage.

Les principes de conception pour la démontabilité reprennent aussi des concepts de choix de matériaux . Ceux-ci peuvent être des choix qui limitent l'impact environnemental grâce à l'utilisation de ressources issues d'une forme de valorisation telle que réemploi ou recyclage. Il peut s'agir de choix favorisant la valorisation des produits en fin de vie tel que l'homogénéité des matériaux ou en évitant l'utilisation de matériaux toxiques pour l'homme et l'environnement. De plus, le principe de *sécurité de démontage* reprend le concept d'un document d'informations qui permet de garantir le bon maintien des principes de Cp D/A tout au long de la vie du bâtiment.

Enfin, la norme décrit, dans l'annexe C, l'importance de considérer la *Durabilité* mais ne la catalogue pas comme un principe de Cp D/A, tandis que la conception circulaire la considère comme un principe-clé.

Pour conclure, on retrouve une forte corrélation entre les principes circulaires et ceux de la norme ISO NBN 20887. Le développement des similitudes et des différences entre les deux est détaillé dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 7 : similitudes entre les principes de démontabilité de la norme et des principes circulaires.		
Principe circulaire	Principe de la norme ISO NBN 20887	Description
Principe de Réversibilité technique	Facilité d'accès aux composants et aux services	Mettre un espace dégagé autour des connexions, entre les composants, afin de les rendre visibles et faciliter le démontage.
Principe de réversibilité technique	Indépendance (annexe C)	Prévoir des géométries d'assemblages ouverts et des séquençages d'assemblages parallèles pour favoriser l'indépendance des éléments.
Principe de réversibilité technique	Indépendance (annexe C)	Privilégier des séquençages d'assemblages parallèles (opposés à des séquençages d'assemblage séquentiels) et des géométries d'assemblages ouverts
Principe de stratification	Indépendance	Séparer les différentes « couches » du bâtiment en fonction de leur durée de vie (structure, enveloppe, éléments techniques, l'aménagement intérieur.)
Principe de Réversibilité technique	Indépendance	Favoriser l'indépendance des composants et de leurs connexions pour simplifier le démontage en privilégiant des assemblages secs (mécaniques) ou humides (chimiques).
Principe de Réversibilité technique	Indépendance	Accessibilité des connexions des composants en prévoyant des espaces ergonomiques pour faciliter leur démontage.
Principe de simplicité	Indépendance	Utiliser des connexions qui ne nécessitent que des outils standard pour le montage et démontage.
Principe de compatibilité	Indépendance	Utiliser des méthodes de connexions standardisées qui n'endommagent pas les composants et ceux aux alentours.
Principe de choix de matériaux	Eviter des traitements et finitions inutiles	Éviter des traitements et des finitions contaminants qui peuvent limiter le réemploi ou une valorisation des produits constructifs.
Principe de Réversibilité technique	Eviter des traitements et finitions inutiles	Prévoir des finitions qui n'empêchent pas l'indépendance des composants sans dommage.
Principe de choix de matériaux	Soutien des modèles économiques	Favoriser l'utilisation de ressources de seconde main, afin de limiter l'exploitation de matières premières.
Principe de compatibilité	Soutien des modèles économiques	Privilégier l'utilisation de composants qui peuvent être compatibles avec plusieurs bâtiments pour le même usage.
Principe de choix de matériaux	Soutien des modèles économiques	Privilégier des matériaux homogènes car ils peuvent optimiser une valorisation par le recyclage
Principe de simplicité	Simplicité	Limiter le nombre de type de composants différents, car ils peuvent ralentir le démontage par nécessité d'outils différents ou de connaissances complexes.
Principe de compatibilité	Normalisation	Favoriser l'utilisation de composants aux dimensions standard qui peuvent répondre à plusieurs usages et faciliter le remplacement de pièce.

Tableau 7 suite		
Principe circulaire	Principe de la norme ISO NBN 20887	Description
Principe de simplicité	Normalisation	Favoriser des pièces de connexions qui ont besoin d'outils standard pour être montées et démontées.
Principe d'adaptabilité spatiale	Normalisation	Dimensionnement spatial (hauteur et tailles) standard pour accueillir plusieurs usages.
Principe de simplicité	Normalisation	Utiliser des modules de préfabrication pour optimiser les ressources et accélérer le travail sur site.
Passeport matériaux	Sécurité de démontage	Développer un document d'informations sur les principes de conception pour l'adaptabilité et la démontabilité mis en œuvre et garantir leur mise à jour tout au long de la durée de vie du bâtiment.
Choix de matériaux	Annexe B et ISO 21930	Utilisation de ressources issues d'un cycle de vie en boucle fermée
Principe de durabilité	Durabilité (Annexe C)	Privilégier des éléments résistant à l'usure par des montages et démontages répétés, en utilisant des matériaux à longue durée de vie.
Principe de durabilité	Durabilité (Annexe C)	Utiliser des composants nécessitant peu d'entretien et facilement réparables.

Tableau 8 : différences entre les principes de la norme d'adaptabilité et les principes circulaires.		
Principe circulaire	Principe de la norme ISO NBN 20887	Description
Principe de réversibilité technique	Indépendance	La séparation de la structure et de l'enveloppe est conseillée mais les deux systèmes ne sont pas considérés comme des couches indépendantes l'une de l'autre.
Principe de réversibilité technique	Indépendance	La norme distingue les connexions « réemployables » des connexions humides qui réduisent le potentiel de démontage. Toutefois, la conception circulaire détaille les différents types de connexions sèches (directe, indirecte autonome, indirecte indépendante et indirecte dépendante) et humides (directe et indirecte) par rapport à leur potentielle de réversibilité.
Principe de réversibilité technique	Indépendance	La norme ne décrit que partiellement les critères de hiérarchies d'assemblages parallèles (opposés à des hiérarchies d'assemblage séquentielles) et de géométries d'assemblages ouverts (opposés à des géométries d'assemblages inter-pénétrantes)
Principe de durabilité	Durabilité (Annexe C)	La norme ne catalogue pas le principe de durabilité comme un principe de Cp D/A contrairement à la conception circulaire.
	Indéterminé	Prendre en compte la qualité esthétique du produit.
Choix des matériaux	Indéterminé	Privilégier des matériaux renouvelables et locaux.

3.3.6. Documentation et informations

La norme recommande un document d'informations sur les concepts d'adaptabilité et de démontabilité d'un ouvrage ainsi que sa mise à jour tout au long de la vie du bâti, afin qu'il soit enregistré et transmis. On retrouve un tableau avec la liste des contrôles pour le transfert d'informations (ISO & NBN, 2021, p. 33) :

Les détails de la conception Cp D/A dans les plans, le cahier des charges, le plan de démontage, etc.

Les plans de démontage et les informations de séquençage des composants et des matériaux.

Un inventaire traçable des matériaux qui comprend les coordonnées des fournisseurs et les garanties.

Toutes ces informations sont des atouts pour évaluer le potentiel de réemploi et de recyclage des matériaux et des composants. Certains outils peuvent y contribuer comme la numérisation des données dans un modèle BIM (Building Information Modelling) ou l'étiquetage des caractéristique techniques sur les composants.

Remarque :

On retrouve dans cette partie la mise en place d'un document d'information aidant les acteurs de la construction à garantir l'optimisation des principes de Cp D/A tout au long de la durée de vie des ouvrages. Ce document fait lien avec le passeport matériaux de la section [\[2.5\]](#)

3.3.7. Mise en œuvre de la Cp D/A

Cette section de la norme nous fournit les situations qui sont impliquées dans la mise en œuvre des conceptions de démontabilité et d'adaptabilité. Cela permet de fournir un catalogue de connaissances, aux acteurs pour la mise en œuvre des principes. On retrouve :

Pendant la phase de production : les fournisseurs des produits ou des matériaux peuvent évaluer les caractéristiques, la composition et les méthodes en fonction des principes précédemment cités.

Pendant la conception : Le concepteur tient le rôle principal dans la promotion des principes avec les meilleures opportunités économiques et environnementales. Mais aussi le maître d'ouvrage qui indique la direction à prendre et le contexte.

Pendant la construction : si la plupart des décisions ont été prises en amont du chantier, il est convenu que les équipes de construction les connaissent pour les mettre en œuvres. De plus, ces équipes peuvent évaluer les difficultés liées à ces principes.

Pendant la phase de réception et d'utilisation : Il est important que les informations soient transmises au propriétaire ou aux exploitants. Une maintenance de routine ou programmée permet d'assurer que les propriétés de conception ne sont pas compromises.

Pendant les phases de réhabilitation : la réhabilitation offre l'opportunité d'intégrer la conception pour l'adaptabilité et le démontage lorsque celle-ci n'a pas déjà été appliquée. Si les principes de Cp D/A sont compris dans l'ouvrage, il est recommandé qu'ils soient exploités, préservés et améliorés si possible.

Pendant la phase de démantèlement : les principes de conception pour le démontage doivent être communiqués aux acteurs chargés du démantèlement de l'ouvrage. Une évaluation peut être faite afin d'aider à renseigner sur la conception d'autres projets et le développement d'autres produits.

Phase d'éducation et de renforcement de compétences : Les bénéfices de la conception pour l'adaptabilité et la démontabilité peuvent prendre plusieurs années avant de se matérialiser ; il est nécessaire de promouvoir activement ces aspects. Cela peut se faire par le transfert, aux tierces parties, des connaissances résultant de projets ayant adapté les principes décrits par la norme.

3.4. Conclusion

La norme ISO NBN 20887 « *Développement durable dans les bâtiments et ouvrages de génie civil — Conception pour la démontabilité et l'adaptabilité — Principes, exigences et recommandations* » est un document d'informations, développé par un groupe d'experts pour fournir un cadre de travail sur les principes liés aux conceptions pour l'adaptabilité et de réemploi. Le document met en avant, dans sa définition pour l'adaptabilité, la nécessité des ouvrages à s'adapter aux différents facteurs de changement pour assurer leur durabilité. De même, le concept de démontabilité avantage des solutions de réemploi ou de valorisation des composants.

Le tableau ci-dessous reprend les différents principes cités dans la norme ISO NBN 20887

Tableau 9 : description des principes de Cp D/A de la norme ISO NBN 20887	
Conception pour l'adaptabilité	Nécessaire pour accompagner les changements dans le type d'usage, la démographie, les besoins des utilisateurs ou ceux dus à la nécessité de s'adapter à des facteurs extérieurs, tels que le changement climatique, afin d'assurer la résilience ou la pérennité. Le coût initial peut être mis en balance en regard du futur coût d'adaptation.
Polyvalence	Capacité d'assurer différentes fonctions en apportant des modifications mineures aux systèmes.
Convertibilité	Capacité d'adaptation à des changements substantiels des besoins des utilisateurs par la réalisation de modifications.
Capacité d'extension	Système dont la conception ou la caractéristique permet de s'adapter à des changements substantiels, favorisant ou facilitant l'ajout de nouveaux espaces, de nouvelles fonctions, de nouveaux moyens et de nouvelles capacités
Conception pour la démontabilité	S'applique aux assemblages et aux systèmes au sein d'un bien immobilier construit qui peuvent être démontés en fin de vie, ou rénovés, avec la possibilité de réutiliser les composants à d'autres fins.
Facilité d'accessibilité	Permet d'approcher facilement un matériau, un composant ou un élément de connexion, avec un minimum de dommage et d'impact sur celui-ci et les assemblages adjacents.
Connexions réversibles	Peuvent être défaites et/ou démontées pour faciliter les modifications et les ajouts à la structure.
Conception des systèmes en « couches indépendantes »	Séparations des systèmes en fonction de leur durée de vie en fonction de trois principales « couches » : l'enveloppe et le gros œuvre ; les systèmes mécaniques et électriques ; l'aménagement.
Indépendance	Qualité permettant de retirer ou de mettre à niveau les pièces, composants, modules et systèmes sans nuire aux performances des systèmes raccordés ou adjacents.

Tableau 9 suite	
Évitement des traitements et finitions inutiles	Certains choix de finitions peuvent limiter les options de réemploi ou de recyclage des substrats, en particulier si les substances sont potentiellement dangereuses.
Soutien des modèles économiques	Le soutien du marché des matériaux et produits réutilisés, réhabilités, reconditionnés et recyclés, présent et à venir, en appui à des modèles d'économie circulaire.
Simplicité	Permet de supprimer les obstacles au démontage en réduisant le plus possible le nombre de types de matériaux et de composants, tout en tenant compte des exigences fonctionnelles et techniques.
Normalisation	Concerne l'utilisation de composants, de produits ou de processus communs pour satisfaire une multitude d'exigences.
Sécurité de démontage	Tout composant, module ou système à démonter nécessite un plan de démontage qui est pris en considération au début de la conception afin de s'assurer de son efficacité.

Le document normatif décrit les concepts cités comme des contributions au Développement Durable et l'Economie Circulaire, c'est pourquoi il existe une cohérence entre les principes de conception circulaire et ceux exposés dans la norme (voir tableau 2 et 3) . De fait, on constate que la norme ISO NBN 20887 reprend l'ensemble des principes de conception circulaire que nous avons décrit dans le chapitre précédent. Cependant, l'analyse a relevé plusieurs points de comparaison.

Tout d'abord, on distingue une différence des niveaux d'analyse entre la norme et le chapitre 2. Néanmoins, les deux échelles reprennent l'entièreté des parties concernées que ce soit le bâtiment, les modules majeurs de l'ouvrage, les ensembles de composants, les assemblages, les sous-composants et les matériaux, comme nous pouvons le voir dans le [tableau 4](#).

Ensuite, dans le chapitre de la conception pour l'adaptabilité, les auteurs définissent l'adaptabilité selon deux catégories (spécifique et générale), contrairement à la construction circulaire. Cette différence permet, selon la norme, de rendre les conceptions spécifiques moins abstraites par rapport aux conception générales.

En outre, on retrouve de nombreux concepts similaires au niveau de la composition spatiale permettant accueillir différentes fonctions ; mais aussi les stratégies de diversité de cloisonnement grâce à un aménagement intérieur interchangeable ; ou encore le surdimensionnement des structures pour offrir des capacités d'extension verticale et horizontale. Toutefois, le *principe d'implantation* [\[2.2.1.\]](#) qui reprend, l'identification et la

valorisation des qualités du site, la simplification du raccordement aux réseaux techniques, ou encore l'accessibilité aux équipements du quartier, n'est pas pris en compte dans la norme. De plus, les stratégies de positionnement des éléments fixes (gainés techniques, murs/ piliers porteurs, circulation verticale, etc.) est informulé, alors que ces critères peuvent entraîner des répercussions sur l'attractivité du bâtiment et sur sa capacité à accueillir de nouvelles fonctions (voir le [tableau 6](#)).

Quant à la conception pour la démontabilité, l'analyse a relevé, tout d'abord, que l'on retrouve les principes de réversibilité technique, de compatibilité, de simplicité, de durabilité et de choix de matériaux du chapitre 2 dans la norme technique (voir tableau 4). Cependant, on peut relever des points d'amélioration.

Dans un premier temps, au niveau du principe d'indépendance, on remarque que la description des hiérarchies et des géométries d'assemblage sont partiellement décrites dans l'annexe C, or la description de ces deux points peut aider les acteurs du bâtiment à comprendre l'importance de privilégier une hiérarchie d'assemblages parallèles et une géométrie ouverte. De même, les connexions réversibles sont distinguées en *connexions réemployables* et *connexions chimiques* (coulées et soudées) qui limitent le potentiel de démontage, alors que le texte de Buildwise (Romné & Vrijders, 2018) détaille les types de connexions en fonction de leur réversibilité. De plus, on constate que la norme conseille la séparation de l'enveloppe par rapport à la structure mais ne les considère pas comme deux « couches » fonctionnelles indépendantes, pourtant cette différenciation en deux strates distinctes peut optimiser la durée de vie utile du bâtiment.

Ensuite, les principes d'*évitement de finitions et de traitements inutiles* [[3.3.5.3](#).] et de *soutien de modèles économiques prenant en compte le réemploi (économie circulaire)*, comprennent tous deux des critères de sélection des matériaux, tels l'homogénéité des composants ou l'élimination de substances toxiques. Par conséquent, on peut relever qu'ils n'appartiennent pas à des principes de conception pour la démontabilité mais à des principes de choix de matériaux à ampleur valorisée et/ou valorisable. Il en va de même pour le principe *sécurité de démontage* [[3.3.5.7](#)] qui reprend les caractéristiques d'un plan as-built et de démontage [[2.5](#)]. Ce dernier principe peut être en lien avec le chapitre *documentation et information* de la norme, qui recommande un document d'informations sur les Cp D/A permettant d'être suivi et mis à jour tout au long de la vie de l'ouvrage.

Puis, le principe de normalisation regroupe plusieurs concepts circulaires. D'abord le principe de compatibilité des composants grâce à des dimensions et des techniques standardisées pour

favoriser leur réutilisation sur le marché du réemploi ; mais aussi, l'utilisation de modules préfabriqués, accélérant et simplifiant la mise en œuvre sur chantier lors du montage/démontage ; ou encore, le concept de trame modulaire pour les espaces afin de permettre plusieurs types d'usages. Ce dernier concept peut être lié au principe de polyvalence.

Enfin le principe de *durabilité* n'est pas défini par la norme comme un principes de Cp D/A mais comme un concept important à prendre en compte. Cependant, le choix de composants demandant peu d'entretien ou pouvant résister à l'usure répétée des montage/démontage, est un principe-clé dans la conception circulaire, comme nous l'avons vu dans le sous-chapitre [2.3.4.].

Le tableau ci-dessous reprend les remarques d'améliorations pour chaque principe Cp D/A de la norme ISO NBN 20887.

Tableau 10 : Description des pistes d'amélioration en fonction de l'analyse du chapitre 3.	
Principe de la norme ISO NBN 20887	Remarque
	Rajouter un niveau d'échelle qui prend en compte le site
	Prendre en compte l'implantation du site dans les principes de conception pour l'adaptabilité
Polyvalence	Détailler les stratégies de positionnement des éléments porteurs fixes ; des circulations verticales et horizontales ; des locaux et des distribution des techniques.
Convertibilité	
Indépendance	Détailler les concepts de hiérarchie et de géométrie d'assemblage. (Parallèle/séquentielle ; ouvert/inter-pénétrante)
Séparation des « couches » fonctionnelles	Considérer l'enveloppe et la structure comme deux « couches » fonctionnelles indépendantes.
Réversibilité des connexions	Détailler les types de connexions en fonction de leur potentiel de réversibilité.
Evitement de traitement et de finitions inutile	Détailler ces parties dans un principe de choix de matériaux par/pour le réemploi et la valorisation des produits constructifs.
Soutien de modèles économiques circulaires	
Normalisation	Rapprendre les principes de dimensionnement spatial et de modularité dans les principes de conception pour l'adaptabilité.
Sécurité de démontage	Décrire les critères de ce principe dans le chapitre « <i>documentation et informations</i> » de la norme.
Durabilité	Considérer la durabilité comme un principe de conception pour la démontabilité.

En conclusion, la norme ISO NBN 20887 regroupe et définit l'ensemble des principes de conception circulaire, malgré certaines différences notables. Par conséquent le document normatif offre un cadre suffisant, pour aider les acteurs de la construction belge à évoluer vers des méthodes plus écoresponsables et dans la logique d'économie circulaire. On doit alors se

demander où se situent les pratiques des conceptions pour la démontabilité et d'adaptabilité dans le secteur de la construction et dans quelles mesures la norme peut être un levier.

4. Pratiques de conception et construction circulaire à Bruxelles et en Wallonie.

4.1. Introduction :

Ce chapitre a pour objectif de cartographier les pratiques des conceptions circulaires en Belgique. Dans un premier temps, il s'agit d'analyser les habitudes des concepteurs lors de la mise en place d'un projet, ainsi que leurs remarques sur les principes de conceptions alternatives circulaires vu dans les deux premiers chapitres. Ensuite, nous analyserons les freins et les obstacles actuels liés à la construction et à la conception circulaire. Enfin, nous étudierons les leviers et les outils qui participent à faire émerger la conception circulaire dans le secteur de la construction.

Ces points d'attention permettent de déterminer les besoins pour faire émerger le nouveau paradigme qu'est l'économie circulaire dans la construction. Cette partie a été élaborée sur la base de la littérature et d'interviews des facilitateurs « construction circulaire » à Bruxelles et en Wallonie. Ces derniers sont réciproquement : A.L. Maerckx anciennement manager advies dans le bureau d'étude Cenergie (Facilitatrice RBC) ; S. Breels, Project manager dans la construction durable chez le bureau d'ingénierie MATRIciel (Facilitateur RBC) ; et A. Romné Project manager pour l'économie circulaire et la transition climatique chez l'ICEDD asbl (Institut de Conseil et d'Études en Développement Durable) (Facilitateur RW)

4.2. Habitudes et pratiques de conception des architectes :

De 2014 à 2020, le projet BBSM (le Bâti Bruxellois Sources de nouveaux Matériaux) réunit différents partenaires autour d'une mission : « *démontrer que les matériaux en fin de vie sont des ressources et que leur réintroduction dans le processus cyclique est positive pour le développement durable de la région de Bruxelles-Capitale.* »²⁹ L'objectif du projet est d'établir une approche bottom-up³⁰ du métabolisme urbain de la région bruxelloise pour ce qui concernent le secteur de la construction. C'est dans ce cadre qu'un texte sur l'état des connaissances et pratiques des acteurs du secteur de la construction est réalisé (Gobbo & Trachte, 2016). On y trouve une série de questions sur le choix des matériaux, la conception

²⁹ Sources : <https://www.bbsm.brussels/en/home/>

³⁰ Il s'agit d'une analyse où l'on part du détail, c'est-à-dire de l'échelon le plus bas pour opérer progressivement une synthèse. Source Wikipédia : https://fr.wikipedia.org/wiki/Approches_ascendante_et_descendante.

pour l'adaptabilité, ou encore le choix de techniques constructives, auxquelles plusieurs bureaux d'architecture, de différentes tailles, ont répondu.

Cette photographie de l'état des pratiques chez les acteurs du secteur et l'interview de trois facilitateurs en construction/rénovation durable et circulaire dans les régions Bruxelles-Capitales et Wallonie ont permis de fournir les informations nécessaires aux sections suivantes pour comprendre où se situe le secteur de la construction belge dans l'utilisation de principes circulaires.

4.2.1. Pratiques d'adaptabilité spatiale

Sur le sujet de l'adaptabilité de l'occupation, la plupart des bureaux prévoient des principes qui permettent de faire varier le scénario d'utilisation. « *Les principes généraux utilisés par les architectes pour répondre à une adaptabilité dans le temps sont les suivants : plan libre/ façade non portante, trame modulaire, standardisation, durabilité des éléments dans le temps, flexibilité structurelle (hauteur et profondeur du bâti), réflexion sur le positionnement des gaines et techniques, cloisonnement léger et connexions réversibles, anticipation de l'évolution des performances et techniques, limitation du nombre d'éléments, etc.* » (Gobbo & Trachte, 2016, p. 18).

D'après l'interview du facilitateur S. Breels, la région Bruxelles-Capitale (RBC) a intégré la réflexion sur la notion d'adaptabilité dans tous les nouveaux projets avec le PREC (Plan Régional en Économie Circulaire). Ces stratégies se traduisent : au niveau spatial par la détermination des surfaces, des hauteurs libres et du volume construit ; au niveau structurel par la gestion des systèmes poteaux-poutres plutôt que des voiles béton ou des maçonneries qui ne sont pas réversibles ; et au niveau technique par le positionnement stratégique des installations techniques (localisation des trémies, tailles des trémies, possibilités d'accueil de techniques complémentaires, etc.) (S. Breels, communication personnelle, 2023). Cependant d'après les témoignages des architectes, le secteur résidentiel est moins préoccupé par le renouvellement de scénarii que le secteur tertiaire comme les bureaux (Gobbo & Trachte, 2016). Selon le facilitateur de la région Wallonne (RW), lors de l'interview, cette ambition de flexibilité spatiale pour les bâtiments « bureaux » est due à la prise de conscience des travaux de réhabilitation qu'engendre une perte de capacité (A. Romné, communication personnelle, 2023).

Sur le principe de la capacité d'extension tant latérale que verticale, le facilitateur en RBC de MATRIciel, affirme que les implications techniques dépendent de la typologie du projet. L'extension verticale est une pratique qui reste compliquée et est parfois contre-productive par rapport à l'objectif de rationalité constructive et de préservation de ressources. En effet, elle demande un coût économique et matériel supplémentaire pour renforcer la structure et/ou les fondations, sans garantie qu'il existera d'étage supplémentaire. Quant à l'extension horizontale, en fonction de la capacité et de la qualité du terrain, elle aura moins d'implication dans la mesure où elle demande seulement un processus de raccordement au niveau de la façade et au niveau de certaines gaines techniques. Cette méthode est d'ailleurs fréquente dans la construction (S. Breels, communication personnelle, 2023).

Quant à la maintenance des éléments de construction, l'architecte affirme qu'il « *n'est pas toujours aisé de prendre ce paramètre en considération : il ne concerne parfois que certains éléments (comme les techniques) et dépend fortement de l'utilisateur final.* » (Gobbo & Trachte, 2016, p. 19).

On remarque que l'adaptabilité spatiale n'est pas un concept nouveau. Déjà utilisé depuis des années grâce au modernisme, les principes de plan libre, façade non porteuse, sont fréquemment utilisés par les architectes. Cependant, on peut déduire du témoignage des concepteurs que ces pratiques ne sont utilisées que dans le cadre de projet du secteur tertiaire. Il existe donc des réflexions sur les principes de flexibilité spatiale et sur l'impact d'un bâtiment sur l'environnement. Cependant l'aspect financier des projets ainsi que l'avis du maître d'ouvrage restent prioritaires.

Tableau 11 : Analyse des pratiques d'adaptabilité en RW et RBC liées aux principes de Cp D /A et circulaires			
Pratique de conception	Échelle quantitative	Principe circulaire	Principe de la norme ISO NBN 20887
Plan libre / façade non portante	Fréquent bâtiment tertiaire	Adaptabilité spatiale et stratification	Convertibilité
Trame modulaire et standardisation module	Fréquent dans les bâtiments tertiaires	Adaptabilité spatiale et Compatibilité	Normalisation
Resistance des éléments dans le temp, au niveau de leur performance	Fréquent	Durabilité	
Flexibilité structurelle (hauteur, largeur)	Fréquent dans les bâtiments tertiaires	Adaptabilité spatiale	Convertibilité et normalisation
Choix de systèmes structurels plus flexibles (poteaux-poutres)	Fréquent dans les bâtiments tertiaires	Adaptabilité spatiale	Convertibilité
Positionnement stratégiques des gaines et techniques	Fréquent dans les bâtiments tertiaires	Adaptabilité spatiale	
Mis en place de cloisonnement légers indépendants	Fréquent bâtiments tertiaires	Stratification	Convertibilité
Prévision d'un scénario d'usage futur	Épisodique	Adaptabilité spatiale	Adaptabilité spécifique
Extension verticale	Rare	Adaptabilité spatiale	Capacité d'extension
Extension horizontale	Épisodique	Adaptabilité spatiale	Capacité d'extension

4.2.2. Pratiques de réversibilité technique

La question de la prise en compte de la fin de vie du bâtiment dès la conception reste difficilement appréhendable pour les architectes. La plupart des bureaux d'architectures conçoivent de façon à ce que les bâtiments durent dans le temps, mais admettent privilégier l'aspect financier à des principes de réversibilité ou de démantèlement (Gobbo & Trachte, 2016, p. 17).

En ce qui concerne la réversibilité des assemblages, plusieurs architectes disent l'intégrer dans leur réflexion, récemment. Cependant, ils affirment que cette pratique reste difficile à mettre en œuvre et ne concernent que certains éléments spécifiques. En outre, intégrer la réversibilité est fortement dépendant des principes d'assemblages communiqués par les fabricants et de la collaboration de l'entrepreneur (Gobbo & Trachte, 2016, p. 17). D'après le facilitateur RW, on observe néanmoins, aujourd'hui, une forte évolution des industriels qui s'y intéressent de plus en plus (A. Romné, communication personnelle, 2023). Lors de l'interview, le facilitatrice

RBC, nous a fait remarquer qu'il existe déjà des produits et des systèmes de construction réversible sur le marché et qu'il y en a d'autres en phases de recherche et de développement (A.-L. Mareckx, communication personnelle, 2023).

Dans l'état de l'art du projet BBSM les auteurs affirment que : « [...] *si certains pensent réversibilité des assemblages, ils n'intègrent pas toujours à leur réflexion l'accessibilité des connexions, nécessaire au démontage des assemblages. Certains partent du principe qu'un élément peut être détruit pour assurer l'accès aux connexions et au démontage qui s'ensuit.* » (Gobbo & Trachte, 2016, p. 17). Cependant, du retour d'expérience de la facilitatrice RBC, la facilité d'accès varie en fonction des éléments : pour des installations techniques cette stratégie est fréquente ; pour l'aménagement intérieur, elle se développe, étant plus en plus utilisée ; et dans le cadre des façades, elle est en train de se développer (A.-L. Mareckx, communication personnelle, 2023).

Pour la pratique de la stratification des couches en fonction de leur durée de vie (Shearing Layers), le facilitateur RBC de MATRIciel, souligne que malgré quelques exemples, on n'en trouve actuellement pas assez dans la construction. De son retour d'expérience, le secteur n'est pas encore dans une logique de durée de vie ; cependant, il observe des projets qui prévoient des systèmes constructifs en vue d'une déconstruction. Si certains intègrent des principes d'assemblages pour le démantèlement d'éléments tels qu'une façade, il est plus anecdotique qu'ils pensent aux démantèlements de ces éléments pour récupérer les composants (S. Breels, communication personnelle, 2023). Pour la facilitatrice RBC, on retrouve des cas, notamment dans les immeubles de bureaux. Il existe une réflexion sur l'aménagement intérieur et les installations techniques car le cadre y est propice. En ce qui concerne la structure et l'enveloppe, il existe des réflexes pour éviter que la façade soit porteuse, en revanche ces dernières sont peu souvent réversibles car elles sont très liées aux éléments de finitions ou aux caractéristiques de performances (étanchéité à l'air et à l'eau, etc...) (A.-L. Mareckx, communication personnelle, 2023).

Quant à la préfabrication, elle semble être une pratique courante, ce qui permet de limiter la production de déchets sur chantier. L'un des inconvénients cités est lié au coût pour les petits projets ou l'accessibilité pour les chantiers en milieu urbain. En outre, la plupart des acteurs interrogés décrivent la normalisation des composants comme une pratique fréquente. Cependant, dans un article sur l'analyse du terme *normalisation* présenté par la norme ISO 20887, les auteurs constatent « *qu'il n'existe actuellement aucune norme disponible qui définit*

ces composants de taille standard, ni les systèmes de connexion standard dont la norme ISO 20887 prétend qu'ils doivent être appliqués. » (Anastasiades et al., 2021).

Enfin sur la question de la simplification du nombre d'outils et de techniques en limitant le nombres de matériaux et de composants, la facilitatrice souligne que ce n'est pas un principe fréquemment appliqué ; cependant l'outil TOTEM aborde ce principe pour amener la réflexion auprès des concepteurs (A.-L. Mareckx, communication personnelle, 2023).

La flexibilité technique reste donc encore peu développée dans les pratiques de conception. De plus, les bâtiments sont conçus pour durer dans le temps, sans réel prise en compte de leur impact en fin de vie. Il existe néanmoins des réflexions pour le permettre, même si la plupart ne dépendent pas uniquement du concepteur mais aussi du maître d'ouvrage, des fabricants et des entrepreneurs.

Tableau 12 : Analyse des pratiques de réversibilité technique en RW et RBC liées aux principes de Cp D /A et circulaires			
Pratique de conception	Échelle quantitative	Principe circulaire	Principe de la norme ISO NBN 20887
Prise en compte de la fin de vie du bâtiment	Rare	Stratification	Indépendance
Assemblages et pièces de connexions réversibles.	Épisodique, dépend des fabricants	Réversibilité technique	Indépendance
Indépendance des composants dans les éléments	Rare	Réversibilité technique	Indépendance
Accessibilité des composants et leur connexions	Rare mais en développement	Réversibilité technique	Facilité d'accessibilité
Indépendance des principales couches du bâtiment en fonction de leur durée de vie.	Fréquente pour l'aménagement intérieur et les installations techniques. Rare pour l'enveloppe et la structure.	Stratification	Indépendance
Utilisation module préfabrique	Fréquent dans les gros chantiers	Simplicité	Normalisation
Utilisation de composants ou de connexions standardisés	Fréquent	Compatibilité	Normalisation
Utilisation de composants ou de connexions avec des dimensions universelles	Manquant	Compatibilité	Normalisation
Simplifier le nombre d'outils, de techniques différents ou complexes.	Rare	Simplicité	Simplicité

4.2.3. Le choix des matériaux

Au niveau du choix des matériaux les concepteurs affirment que leurs premiers critères sont : « **le coût et le budget disponible (ou optimum économique entre aspects financiers et performances), l'esthétique et les performances visées (acoustique, thermique, résistance, etc.). L'aspect environnemental (origine, énergie grise, etc.) est également souvent évoqué mais ne constitue pas, pour la plupart, un critère prioritaire (en tout cas par rapport aux 3 premiers cités).** » (Gobbo & Trachte, 2016, p. 13).

En outre, sur la question du réemploi d'éléments, les architectes semblent davantage l'utiliser in situ que via des revendeurs. Cette pratique est plus souvent répandue « *dans les projets privés dont l'échelle est limitée ou dans le cas de projets patrimoniaux.* » (Gobbo & Trachte, 2016, p. 17). Selon la facilitatrice RBC, la recherche d'informations sur les matériaux présents dans un bâtiment et la manière dont ils sont assemblés prend énormément de temps, car il faut analyser le potentiel de démontage sans dommage et sans utiliser trop de moyens. Nous observons que cette pratique reste difficile pour les acteurs (A.-L. Mareckx, communication personnelle, 2023).

Dans un rapport du FCRBE, les auteurs ont établi une liste de produits avec un haut potentiel de revente et connus pour avoir déjà été réemployés. On retrouve notamment des équipements techniques, des faux plancher et leur système de support, des rouleaux d'isolation. etc. Ce sont généralement des produits faciles à démonter soigneusement, facilement entreposables, possédant des dimensions standard, faisant preuve de qualité et étant présents en grande quantité (Smeyers et al., 2022).

De plus, on retrouve des obstacles techniques car une multitude de documents techniques et normatifs sont adaptés à une production contrôlée et par conséquent ne conviennent pas aux produits de réemploi. Il importe dès lors de développer de nouvelle méthode d'évaluation. Toutefois cela implique la question de la responsabilité par rapport aux performances déclarées (Poncelet & Vrijders, 2021). De même, il existe aussi des obstacles juridiques. Le régime à appliquer aux produits de construction du réemploi selon le RPC (Règlement des Produits de Constructions) est tenu sous silence car actuellement les instruments s'intéressent uniquement à la phase de production des produits neufs jusqu'à leur mise sur le marché mais ne prend pas en compte la réutilisation de ceux-ci. Néanmoins, le marquage CE³¹ n'est pas obligatoire pour

³¹ Le marquage CE doit être apposé sur de nombreux produits avant que ceux-ci puissent être vendus dans l'UE. Il indique qu'un produit a été évalué par le fabricant et qu'il a été jugé conforme aux exigences de l'UE en matière de sécurité, de santé et de protection de l'environnement.

les produits de seconde main mais peut être apposé si l’opérateur le souhaite. (Seys, 2017, p. 48).

En outre, sur la question des matériaux recyclés ou de l’analyse du cycle de vie, les concepteurs disent rencontrer des difficultés à cause du manque d’informations disponibles sur ces sujets, surtout sur la réelle plus-value environnementale de l’opération. Cette méfiance peut s’expliquer par le concept de *greenwashing* qui permet à certaines entreprises de paraître plus soucieuses de l’environnement qu’elles ne le sont vraiment (Gobbo & Trachte, 2016, p. 17).

Le choix des matériaux est donc, pour le moment, toujours régit par des stratégies financières et de performances et est en butte à des obstacles juridiques, techniques et de manque de données. En outre, même si les questions environnementales font partie de la réflexion des architectes, le choix de matériaux de réemploi ou de recyclage manque encore d’informations et d’attraits pour concurrencer des matériaux neufs.

Tableau 13 : Analyse des pratiques de choix de matériaux en RW et RBC liées aux principes de Cp D /A et circulaires			
Pratique de conception	Échelle quantitative	Principe circulaire	Principe de la norme ISO NBN 20887
Choix des matériaux en fonction de leur impact environnemental	Fréquent mais les critères de performance, d’esthétisme et de coût sont privilégiés	Choix de matériaux	Sécurité de démontage
Utilisation de matériaux de réemploi	Fréquent dans les petits et moyens chantiers. Épisodique pour les grands projets du fait d’obstacles juridiques et techniques	Choix de matériaux	Soutien de modèles économiques circulaires
Utilisation de matériaux de recyclage	Épisodique à cause du manque d’informations	Choix de matériaux	Soutien de modèles économiques circulaires

4.2.4. La gestion des données

Il a été demandé aux architectes s’ils créaient un dossier pour la transmission des informations. Ils ont répondu qu’il existe un dossier appelé DIU (Dossier d’interventions Ultérieurs), qu’il était obligatoire et comportait les informations constitutives du bâti ainsi que (normalement) l’historique des modifications opérées au fil du temps. Si les architectes sont impliqués dans la réalisation, c’est le coordinateur santé et sécurité (S&S) qui se charge de la transmission.

Le marquage CE est obligatoire pour les produits fabriqués partout dans le monde et qui vont être commercialisés dans l’UE. Source : https://europa.eu/youreurope/business/product-requirements/labels-markings/ce-marking/index_fr.htm

Cependant, la plupart des bureaux avoue ne pas vérifier la transmission (Gobbo & Trachte, 2016).

« D’après ce que nous avons pu rassembler dans les témoignages, les informations contenues dans le DIU comprennent : les plans as-built, les fiches techniques, les PV et décisions importantes prises sur chantier, les informations de maintenance et modes d’emploi, les photos de chantier, des remarques éventuelles, les coordonnées des entreprises et sous-traitants, les possibles évolutions futures du bâtiment, etc. » (Gobbo & Trachte, 2016, p. 22) Nous remarquons qu’il existe déjà l’implantation de dossiers qui cartographient les bâtiments, mais il n’existe pas de suivi de ces documents dans leur mise à jour ou leur stockage. Il est donc difficile de déterminer si ces documents seront utiles dans le futur du bâti.

Pour, la facilitatrice RBC, il n’y a pas encore, pour le moment, d’études sur la digitalisation d’informations comme un modèle BIM ou le passeport matériaux, etc. C’est, pour elle, le « gros point d’interrogation » car le transfert d’informations dépend de plusieurs facteurs dont celui de l’utilisateur de l’ouvrage. Les projets publics ne sont pas forcément utilisés par le maître d’ouvrage qui a suivi le chantier, il est donc difficile de savoir comment se déroulera la gestion du bâtiment. De plus, on peut se demander si les utilisateurs sauront gérer et mettre à jour des données telles que les modèles BIM ou des maquettes 3D (A.-L. Mareckx, communication personnelle, 2023).

Pratique de conception	Niveau de pratique	Principe circulaire	Principe de la norme ISO NBN 20887
Mise en place et transmission d’un document d’informations reprenant les données conception mises en œuvre, de démontage et de valorisation des produits en fin de vie.	Manquant	Passeport matériaux	Document d’information

4.2.5. Les freins et les obstacles en Belgique

Dans un rapport d’étude de l’ICEDD sur la construction et la rénovation circulaires, les auteurs affirment qu’il existe de nombreux obstacles au développement de l’économie circulaire dans la construction. Certains sont globaux, comme le manque de sentiment d’urgence face aux enjeux environnementaux, le faible intérêt des acteurs pour investir dans le long terme ou encore la faible confiance dans la chaîne de valorisation. D’autres sont plus particuliers tel que la qualification des matériaux de réemploi, etc. (Carême et al., 2020, p. 23)

Si en Belgique de nombreuses initiatives sont menées ou sont en cours dans le secteur de la construction, l'étude relève que trois changements sont essentiels pour soutenir une transition vers l'économie circulaire : « *une transformation de culture de conception, une modification de la définition de valeur et une mutation des modes de collaboration.* » (Carême et al., 2020, p. 23).

Dans l'état de connaissances et des pratiques des acteurs de la construction de BBSM, les principaux freins énoncés par les concepteurs sont : un critère de coût par rapport au temps et à la charge de travail ; un manque de sensibilisation et de connaissances de la part des acteurs du secteur ; le manque d'obligations réglementaires ; et un manque de garanties des composants et des matériaux réemployés face aux contraintes de performances actuelles ; et enfin une inertie du secteur à modifier ses pratiques de conception (Gobbo & Trachte, 2016, p. 23).

Lors de l'interview avec les facilitateurs de la construction circulaire en Belgique, les freins cités ont été :

Un frein de connaissance : la facilitatrice RBC relève qu'il existe une méconnaissance de ce qu'englobe le concept de construction circulaire, certains raccourcissant à du recyclage ou du réemploi. Pour les facilitateurs RW et RBC, il manque actuellement d'acteurs (maître d'ouvrage, bureau d'étude ou d'architecture, etc...) qui ont les connaissances ou les capacités de mettre en pratique les concepts de la construction circulaire.

Un frein technologique : pour optimiser les ressources et les produits durant tout leur cycle de vie.

Un frein économique et social : Que ce soit pour le promoteur et les maîtres d'ouvrage qui ne veulent pas investir dans un avenir dit « incertain », ou pour les bureaux par la surcharge de travail, etc.

Et un frein réglementaire et politique : le facilitateur RW souligne qu'il existe des contradictions entre la réglementation actuelle et les concepts circulaires que les acteurs essaient de mettre en place. Pour le facilitateur RBC, il manque un cadre normatif et réglementaire qui limiterait l'importance de l'aspect économique dans les choix des acteurs.

On remarque donc que les obstacles majeurs cités par les exemples précédents sont le manque de connaissance des différents intervenants du secteur de la construction sur les principes

circulaires ; un manque d'exemples ou de garanties au niveau financier et technique ; et un manque de réglementations qui incite les acteurs à choisir des solutions de construction circulaire.

Afin de répondre à ces enjeux, le rapport d'étude du ICEDD³² préconise des actions tenues par le pouvoir fédéral afin de constituer le cadre d'une feuille de route de l'économie circulaire dans la construction au niveau belge qui s'étendrait vers les différents niveaux de pouvoir en Belgique. Ces opérations interviendraient sur plusieurs points (Carême et al., 2020, p. 27) :

Le développement d'un cadre normatif et technique ainsi que d'outils standardisés.

Le financement de projets de recherche et d'innovation.

L'aménagement d'un cadre économique et fiscal durable et incitant.

Une politique qui encourage le réemploi et le recyclage de haute valeur des produits et matériaux de construction.

Et des enseignements et des formations adaptés aux futures pratiques circulaires.

L'application de ces actions permettrait de répondre aux stratégies de la commission européenne : créer un environnement bâti durable (Carême et al., 2020, p. 25). De plus, nous verrons dans la section suivante qu'il existe des outils et des leviers pour intensifier la pratique de conception circulaire dans le secteur de la construction.

4.3. Les outils et les leviers au niveau de la conception circulaire en Belgique :

4.3.1. Introduction :

Nous avons vu dans la partie précédente que les pratiques circulaires sont aujourd'hui encore trop peu exercées par les architectes. Cependant, il existe de nombreux outils ou leviers pour aider les acteurs. Afin de mieux comprendre la position de la Belgique dans ces avancées vers les conceptions circulaires, nous allons énumérer quelques organismes et outils qui contribuent à l'avancée du circulaire.

³² Institut de Conseil et d'Études en Développement Durable. Site : <https://www.icedd.be/>.

4.3.2. Les leviers de la région Flandre

La région de Flandre possède plusieurs acteurs dans l'avancée de la construction circulaire. On peut notamment citer les publications de l'OVAM, l'outil de conception GRO et le « Green Deal ».

OVAM (Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij)³³ est une agence interne indépendante dont certaines de ces responsabilités sont ³⁴:

La protection des personnes et de l'environnement contre les effets néfastes de la production, de l'utilisation et de la gestion des déchets et des matériaux.

Assurer la qualité des sols et remédier à leur contamination.

Encourager l'utilisation durable (prévention et réutilisation) des matériaux et prévenir l'épuisement des ressources.

Développer l'économie circulaire pour répondre aux besoins économiques de matières premières.

Cette société est donc un acteur privilégié pour répondre à l'enjeu des déchets et de la gestion des ressources naturelles. On retrouve sur leur site des documents qui développent la thématique de bâtiments orientés vers le changement et d'ambition circulaire, dont une publication reprend vingt-quatre directives de conception de construction orientées vers le changement (OVAM, 2016). Ces critères ont été développés avec la collaboration de la VUB, le VITO et KU Leuven³⁵, ainsi que plusieurs bureaux d'architecture. Ils sont dans la continuité du programme politique flamand 2014-2020 « matériel-friendly construction in cycles » qui se concentre sur la gestion du cycle de vie des matériaux et des éléments de construction³⁶. Ces 23 lignes directrices de conception forment un cadre d'évaluation pour les concepteurs et les clients afin qu'ils aient un aperçu des solutions de construction (OVAM, 2016) ; mais aussi, un catalogue basé sur le doctorat de M.L. Vandenbroucke, qui reprend les lignes directrices de solutions

³³ Agence publique flamande des déchets [traduction libre].

³⁴ Source : <https://www.vlaanderen.be/organisaties/administratieve-diensten-van-de-vlaamse-overheid/beleidsdomein-omgeving/openbare-vlaamse-afvalstoffenmaatschappij>.

³⁵ VUB est l'université de Bruxelles. VITO est un organisme indépendant dans le domaine de la technologie propre et du développement durable. KU Leuven est l'université catholique de Louvain.

³⁶ OVAM. (2016). 24 ontwerprichtlijnen veranderingsgericht bouwen . OVAM. (p.2) https://ovam.vlaanderen.be/documents/177281/310282/24_Ontwerprichtlijnen_veranderingsgericht_bouwen.pdf/111e8c9f-4dee-4166-ad1c-68590f10f258?version=1.0&t=1622636059926&download=true.

concrètes pour aider les différents acteurs à mettre en œuvre des systèmes de construction adaptable et démontable de manière optimale (M. Vandenbroucke & Brancart, 2020) ; ou encore, une carte d'ambition pour la construction circulaire qui décrit plusieurs actions selon cinq stratégies : minimiser la quantité de matériaux ; minimiser l'impact environnemental ; prolonger la durée de vie des immeubles ; maximiser la réutilisation des éléments ; maximiser le recyclage des matériaux (Voir [annexe 5](#)).

De même, en 2017, l'*Agentschap Facilitair Bedrijf* du gouvernement flamand met en place l'outil GRO³⁷. Ce document a pour objectif de mettre « *un niveau d'ambition uniforme et global dans les projets de construction en termes de durabilité.* » (GRO, 2020, p. 8). Grâce à un éventail d'aspects de durabilité, l'outil GRO permet d'accompagner les clients, le concepteur et les ingénieurs à réaliser des bâtiments tournés vers l'avenir. On retrouve des catégories sur la circularité des matières et des éléments de construction qui impliquent notamment :

MAT 1 et 3 : cette section a deux objectifs, limiter l'utilisation de nouveaux matériaux grâce aux réparations, au réemploi et au recyclage, et lorsque cela n'est pas possible, d'opter pour des ressources à faibles impact environnemental en les intégrant dans le cycle de valorisation des produits à l'aide d'un passeport matériaux.

TOE : « *concevoir le projet de façon circulaire et tournée vers l'avenir en misant sur la flexibilité, la neutralité de fonctions, la démontabilité et l'utilisation par des tiers.*»³⁸

L'outil GRO comporte un manuel d'utilisation et des tableurs dont on peut voir un exemple ci-dessous

L'outil GRO et les documents de l'OVAM donnent des directives aux acteurs sous forme de questions afin de les aider à juger et à mettre en œuvre des potentiels d'adaptabilité et de démontabilité dans leur bâtiment.

Ensuite, en 2019, Circular Flanders lance le « *Green Deal* »³⁹ du VCB (Vlaamse Confederatie Bouw)⁴⁰ et de l'OVAM sur la construction circulaire. « *Le Green Deal Circulair Bouwen est une initiative du gouvernement flamand qui a rassemblé dans un engagement commun un large*

³⁷ Site GRO : <https://www.gro-tool.be/?lang=fr>.

³⁸ Source site GRO-tool.be : <https://www.gro-tool.be/exemples/?lang=fr>.

³⁹ Sources : <https://vlaanderen-circulair.be/nl/onze-projecten/detail/green-deal-circulair-bouwen>.

⁴⁰ Confédération Flamande de la Construction [traduction libre].

éventail d'acteurs (300 environ) du secteur de la construction, qui se sont engagés à démarrer des projets circulaires. » (M. Vandenbroucke et al., 2021).

4.3.3. Les leviers de la région Bruxelles - Capitale

La région Bruxelles-Capitale est l'une des régions les plus actives au niveau des outils favorisant les principes de la circularité dans la construction.

On peut citer le site de Bruxelles environnements⁴¹ qui a lancé en 2016 le Programme régional en Economie circulaire (PREC), également connu sous le nom de be.circular. Avec l'aide de 91 autres organisations, l'objectif est de positionner la région comme précurseur en matière de politique publique de soutien au développement de l'économie circulaire.

Be.circular est un appel à projets pour aider financièrement les indépendants et les entreprises bruxelloises à mettre sur pied des projets innovants en lien avec l'économie circulaire. On retrouve notamment des chantiers circulaires qui font la promotion des principes de conception circulaire.⁴²

De plus, d'autres agences liées à be.circular participent à mettre en avant des chantiers aux conceptions circulaires. On peut notamment citer **Renolution** qui, sous la responsabilité d'un comité de pilotage interministériel et d'un comité stratégique mixte public-privé, est une stratégie de la région pour mieux rénover le bâti à Bruxelles⁴³. Ils ont lancé Renolab.B⁴⁴ qui sont des appels à projets pour soutenir la conception et/ou la réalisation de projets de rénovation durable et circulaire du patrimoine du bâti bruxellois.

On peut également parler de Urban.brussels⁴⁵ qui lance aussi des appels à projets, appelés be.exemplary pour stimuler et récompenser les projets de construction et de rénovation exemplaires en termes de développement urbain durable⁴⁶.

⁴¹ Source environnement.brussel : <https://environnement.brussels/>.

⁴² Site des lauréats de l'appel de projet de be.circular : <https://www.circulareconomy.brussels/category/laureats/>.

⁴³ Source : <https://renolution.brussels/fr/la-renolution-bruxelloise>.

⁴⁴ Lien des projets lauréats sur le site : <https://renolution.brussels/fr/renolabb>.

⁴⁵ Ancienne Bruxelles Urbanisme et Patrimoine est une administration qui soutient le développement territorial de la région de manière durable. Source : <https://urban.brussels/fr/about>.

⁴⁶ Lien des projets lauréats sur le site : <http://beexemplary.brussels/>.

Dans la continuité de la stimulation de construction et de rénovation durable, Bruxelles Environnement a mis en œuvre *Le Guide Bâtiment Durable*. Son objectif consiste à soutenir la conception, la gestion, la réalisation et la rénovation de bâtiment à hautes performances environnementales et énergétiques.⁴⁷ Parmi ces guides, on trouve une section « économie circulaire » qui reprend notamment une checklist des conceptions réversibles, des protocoles de déconstruction, des études de cas etc.⁴⁸

De plus, plusieurs projets de recherche menés par des équipes bruxelloises ont été financés par l'Union Européenne, tels que : le projet FEDER BBSM⁴⁹ qui a fait l'étude du métabolisme urbain de la Région Bruxelles-Capitale afin d'encourager des boucles à valeur positive et d'éliminer la notion de déchets⁵⁰.

Mais également le projet BAMB (*Buildings As Materials Banks*⁵¹) dans le cadre du programme Horizon 2020⁵². La mission était de « permettre un changement systémique dans le secteur de la construction en créant des solutions circulaires »⁵³ Ce qui permet de développer des outils tels que le passeport matériaux et les conceptions de bâtiment réversible.

Ou encore, le projet FCRBE (Facilitating the Circulation of Reclaimed Building elements in Northwestern Europe)⁵⁴ d'Interreg⁵⁵ qui cherche à augmenter de plus de 50% la quantité

⁴⁷ Source sur le site environnemental.brussels : <https://environnement.brussels/pro/outils-et-donnees/sites-web-et-outils/guide-batiment-durable-concevoir-ou-renover-des-batiments-haute-qualite-environnementale>.

⁴⁸ Lien de la section « économie circulaire » du Guide Bâtiment Durable : <https://www.guidebatimentdurable.brussels/economie-circulaire>.

⁴⁹ FEDER ((Fonds Européen de Développement Régional). BBSM ((Bâti Bruxellois Sources de nouveaux Matériaux).

⁵⁰ Source : <https://www.bbsm.brussels/fr/a-propos-fr/description-et-objectifs/>.

⁵¹ Les bâtiments comme banques de matériaux. [Traduction libre]

⁵² Horizon 2020 ou H2020 est le programme européen pour la recherche et le développement pour la période 2014-2020. Sources wikipédia : https://fr.wikipedia.org/wiki/Horizon_2020.

⁵³ Source sur le site bamb2020.eu : <https://www.bamb2020.eu/about-bamb/>.

⁵⁴ Faciliter la circulation des éléments de construction récupérés en Europe du Nord-Ouest. [traduction libre]

⁵⁵ Interreg est un programme de coopération territoriale européen dans une volonté de favoriser les échanges transfrontaliers entre les régions du Nord-Ouest de l'Europe. Source : <https://www.interreg-fwvl.eu/fr>.

d'éléments de construction récupérés, en mettant en place un partenariat international pour associer les organismes, les centres de recherche etc. ⁵⁶

4.3.4. Les leviers de la région Wallonne

La région wallonne n'est pas en reste face au développement de l'économie circulaire. Le 4 février 2021, le gouvernement wallon adopte **Circular Wallonia**, la première stratégie de déploiement de l'économie circulaire dans la région. Il lance la même année des appels à projet avec plusieurs objectifs⁵⁷ :

Stimuler la conception de bâtiments et l'exécution de chantiers innovants en économie circulaire, en région wallonne.

Faire émerger des pratiques pilotes en termes de circularité dans le secteur de la construction, en termes de services accompagnant les chantiers, et de développement de produits et matériaux circulaires à destination du secteur de la construction.

Faire connaître les outils financiers et d'accompagnement en matière d'économie circulaire dans le secteur de la construction.

Les lauréats sont ensuite cités en exemple pour inspirer les futurs acteurs de chantier à se tourner vers les conceptions circulaires.

4.3.5. Les autres leviers en Belgique

Il existe de nombreux autres leviers développés en Belgique. En 2018, les trois régions ont développé un outil belge qui permet de comparer des variantes de conception architecturale et de matériaux en fonction de leur impact environnemental afin de mieux évaluer les bâtiments tout au long de leur cycle de vie. L'outil s'appelle TOTEM pour « Tool to Optimize the Total Environmental impact of Material » et l'objectif est de stimuler son usage dans les commandes publiques pour offrir un cadre au secteur de la construction lors de missions de conception de bâtiment, ainsi que de préparer le déploiement réglementaire en Belgique.⁵⁸

Mais les gouvernements régionaux ne sont pas les seuls services à développer des outils pour aider les différents acteurs de la construction à évoluer vers des constructions circulaires.

⁵⁶ Sources sur le site Vb.nweurope.eu : <https://vb.nweurope.eu/projects/project-search/fcrbe-facilitating-the-circulation-of-reclaimed-building-elements-in-northwestern-europe/>.

⁵⁷ Source : <https://economiecirculaire.wallonie.be/appele-projets-chantiers-services-circulaires-2023>.

⁵⁸ Source et lien pour l'outil. <https://www.totem-building.be/pages/home.xhtml>.

En Belgique, il existe des associations ou des services privés qui, en coopération avec les gouvernements, apportent leur contribution pour améliorer le secteur de la construction dans sa gestion des ressources.

On peut notamment citer le bureau d'étude et de conseil indépendant Cenergie qui est né d'une initiative de l'université d'Anvers, pour développer de nouvelles solutions en vue d'une utilisation et d'une gestion durable de l'énergie dans les bâtiments⁵⁹. La société crée l'outil C-CalC qui permet d'évaluer la circularité d'un projet de construction ou de rénovation. Cet outil permet d'attribuer un label au projet de A à H sur plusieurs critères d'évaluation, englobant au mieux les différents concepts circulaires. Cela indique aux concepteurs les points d'économie circulaire qui ont été pris en compte comme⁶⁰ :

Les matériaux entrants et sortants du chantier : permet de quantifier les matériaux d'entrée et de les juger selon leur provenance et leur impact, et aussi sur leur destination en fin de vie.

La prise en compte de l'adaptabilité et flexibilité du bâtiment : le but est de valoriser les bâtiments qui ont été conçus pour être adaptables, pour permettre le changement de fonction et pour permettre le réagencement de l'espace.

La gestion du projet et des données : Cette partie prend en compte la qualité de gestion du projet, comme le travail en bouwteam, la centralisation des informations et la transmission de celles-ci au maître de l'ouvrage.

On peut également évoquer l'outil **Circulair Gebouwd** qui a été développé dans le cadre du projet d'Interreg 2 Seas Mers Zeeën nommé CBCI (Circular Biobased Construction Industry). Cet Outil, financé par l'Europe et en partenariat avec plusieurs Organisation des pays du Nord-Ouest de l'Europe dont la Belgique, étudie comment utiliser plus efficacement la matière première dans la construction. Sur le site officiel on retrouve un guide qui permet d'accompagner les acteurs à concrétiser leur ambition circulaire selon quatre thèmes⁶¹ :

L'application de directives de conception circulaire : qui reprend des directives pour des conceptions orientées vers le changement et des conceptions pour le réemploi et le recyclage.

⁵⁹ Sources Cenergie : <https://www.cenergie.be/fr/a-propos>.

⁶⁰ Source C-CalC.be. <https://www.c-calc.be/fr/a-propos/>.

⁶¹ Source sur le site circularbuilt.be : <https://circularbuilt.be/practical-guide/aspects-circular-building>.

La mise en circulation et le maintien des matériaux de construction : Qui reprend la valorisation de l'existant et l'intégration des matériaux recyclés et récupérés.

Objectif d'un faible impact environnemental : Avec la prise en compte de matériaux éco-responsable ainsi que leur calcul ACV (Analyse du Cycle de Vie).

Et la mise en place d'une transition : en cherchant une synergie pour prévenir et réduire la consommation de matière et d'énergie ainsi qu'en partageant les informations pour un meilleur suivi.

Cette partie détaille quelques leviers et outils présents en Belgique. Bien entendu, cette liste est non- exhaustive et il existe d'autres acteurs qui cherchent à faire évoluer le secteur de la construction vers une économie circulaire. On peut notamment citer **circubuild.be** qui est une initiative du bureau Palindroom, spécialisé dans la rédaction d'articles dans le domaine de la construction dont la construction circulaire⁶² ; ou encore **Build circular.Brussel**, qui est un projet lancé en 2020 par Embuild.Brussels et Construcity.Brussels⁶³ pour accompagner les professionnels à faire passer le secteur de la construction vers l'économie circulaire⁶⁴ ; mais aussi Buildwise⁶⁵ qui participe à la documentation des avancées circulaires dans la construction ; et bien d'autres encore.

4.3.6. Positionnement de la norme face aux leviers existants.

L'analyse des leviers nous a permis de mettre en lumière deux points importants sur les pratiques belges. Nous avons pu observer que plusieurs institutions, sociétés ou association, travaillent ensemble pour faire avancer la circularité dans la construction, afin de limiter l'impact des bâtiments sur l'environnement ; mais également qu'il existe de nombreux soutiens au niveau financier, technique ou d'informations pour accompagner les protagonistes de projets à réaliser des constructions circulaires.

⁶² Source sur le site circubuild.be : <https://www.circubuild.be/fr/a-propos-de-nous/>.

⁶³ The Embuild est une association de construction belge dont la mission est la défense des entreprises du secteur de la construction dans la région Bruxelles-Capitale. Quant à construcity.brussels c'est un pôle de formation et d'emploi de la construction à Bruxelles. Sources : <https://embuild.brussels/fr> et <https://www.construcity.brussels/>.

⁶⁴ Source sur le site build.circular.brussels : <https://buildcircular.brussels/a-propos/>.

⁶⁵ Buildwise est le nouveau nom du centre scientifique et technique de la construction qui soutient les professionnels de la construction dans leurs tâches quotidiennes. Sources : <https://www.buildwise.be/fr/a-propos-de-buildwise/>.

Afin de pouvoir comprendre la position de la norme ISO NBN 20887 face aux outils, le tableau ci-dessous analyse les critères similaires entre l’outil **GRO** et **Reversibles Building Design Tools**. Cette analyse ne sera pas faite avec l’outil **C-Calc** et **Circulaire Gebouwd** car ces derniers sont des données dont l’accès est privé.

Tableau 15 : comparaison de la Checklist de l’outil GRO avec les principes de Cp D/A de la norme ISO NBN 20887		
Critères TOE conception circulaire et orienté vers l’avenir	Concordance avec la norme	
Possibilité d’agrandissement ou de rétrécissement	Oui	Capacité d’extension
Bâtiment polyvalent	Oui	Polyvalence
Structure portante uniforme	Non	
Position stratégique du système structurel	Oui	Convertibilité
Structure indépendante	Oui	Indépendance
80% des murs sont non porteurs	Non	
Surdimensionnement structurel pour une surélévation	Oui	Capacité d’extension
Hauteurs libres pour accueillir différentes fonction	Oui	Normalisation
Division du bâtiment en unité indépendante	Oui	Normalisation
Mise en place de circulations et de gaines distinctes pour diviser le bâtiment en unité indépendante	Non	
Trame fixe au niveau de plan du sol	Oui	Convertibilité
Trame fixe pour la façade	Oui	Convertibilité
Composition de façade offrant une flexibilité fonctionnelle le long de la façade.	Non	
Mur intérieur indépendant et interchangeable	Oui	Convertibilité
Unité de logement neutre	Non	
Adaptabilité pour les personnes à mobilité réduite	Non	
Flexibilité énergétique	Non	
Adaptabilité des installations techniques	Non	
Façade indépendante	Oui	Indépendance
Éléments intégrés indépendants	Oui	Indépendance
Joints assemblés et désassemblés avec des outils standards	Oui	Simplicité
Éviter l’utilisation de joint collés ou cloués	Oui	Indépendance
Éviter l’utilisation de mortier ciment	Oui	Indépendance
Utilisation d’assemblage réversible	Oui	Indépendance
Les composants sont assemblés indépendamment les uns des autres	Oui	Indépendance
Élément et matériaux sont séparés en fonction de leur durée de vie	Oui	Indépendance
Limiter le nombre d’étapes et la complexité nécessaire au démantèlement	Oui	Simplicité
Limiter le nombre de matériaux utilisés	Oui	Simplicité
Composants aux dimensions standard pour garantir une compatibilité	Oui	Normalisation
Matériaux homogènes	Oui	Simplicité
Éviter l’utilisation de finitions ou de substances qui défavorise le réemploi des matériaux et des composants	Oui	Evitement de traitement et de finitions inutiles

Tableau 16 : comparaison de la Checklist de l'outil Réversible Building Design Tools avec les principes de Cp D/A de la norme ISO NBN 20887		
Stratégies de réversibilité spatiales	Concordance avec la norme	
Implantation et orientation du volume bâti	Non	
Dimension des profondeurs permettant différents scénarios d'usage	Oui	Normalisation
Dimension des hauteurs permettant différents scénarios d'usage	Oui	Normalisation
Regroupement et limitations des éléments fixes	Non	
Indépendances de couches fonctionnelles	Oui	Indépendance
Trame modulaire du plan et des coupes	Oui	Convertibilité
Trame modulaire des façades	Oui	Convertibilité
Modularité des éléments	Oui	Normalisation
Nombre d'accès et de circulation (et leur emplacement) permettant de modifier l'utilisation du bâtiment	Non	
L'organisation de la circulation permet de diviser le bâtiment	Non	
Le dimensionnement et le positionnement des accès et des circulations permet de répondre à des critères de sécurité incendie, d'occupation, etc. pour plusieurs scénarios	Non	
La structure permet des espaces polyvalents	Oui	Polyvalence et normalisation
L'aménagement spatial horizontal peut être modifié	Oui	Convertibilité
L'aménagement spatial vertical peut être modifié (nouveaux escaliers, etc.)	Non	
L'aménagement permet des modifications des distributions (gaines techniques)	Oui	Polyvalence
La capacité portante peut accueillir différents scénarios	Oui	Polyvalence
La conception de la façade permet des modifications de l'aménagement intérieur	Oui	Convertibilité
Prise en compte des parties ouvrantes et vitrés permettant différents scénarios d'usage	Non	
Positionnement des locaux techniques permettant différents scénarios d'usage	Non	
Dimensionnement des locaux techniques permettant différents scénarios d'usage	Oui	Polyvalence
Accessibilité des locaux techniques pour des maintenances ou des modifications	Non	
Emplacement des distributions techniques permettant différents scénarios d'usage	Oui	Polyvalence
Dimensionnement des distributions techniques permettant différents scénarios d'usage	Oui	Normalisation
Accessibilité des gaines techniques pour des maintenances ou des modifications	Oui	Facilité d'accessibilité
Stratégies de réversibilité technique	Concordance avec la norme	
Indépendance des composants et des couches	Oui	Indépendance
Ordre de composition en fonction de la durée de vie	Non	
Privilégier des géométries ouvertes	Non	
Accessibilité des composants	Oui	Facilité d'accessibilité
Connexions simples	Oui	Simplicité
Limiter le nombre de composants différents	Oui	Simplicité
Composants courants sur le marché	Oui	Normalisation

Tableau 16 suite		
Stratégies de réversibilité technique	Concordance avec la norme	
Dimensionnement standard des composants	Oui	Normalisation
Utilisation de matériaux homogènes	Oui	Soutien d'un modèle économique circulaire
Éviter la contamination de matériaux	Oui	Évitement de traitement et de finitions inutiles
Réversibilité des connexions	Oui	Indépendance
Privilégier géométrie de connexions ouvertes	Non	
Connexions accessibles	Oui	Facilité d'accessibilité

D'après l'analyse de ces tableaux on peut conclure que la plupart des critères ou des stratégies de conception des outils **GRO** et **Reversibles Building Design** sont liés aux principes de Cp D/A de la norme ISO NBN 20887. La norme peut dès lors être un soutien pour les outils en attestant que les stratégies de conceptions énoncées sont reconnues au niveau international.

Il en va de même pour les autres leviers qui peuvent utiliser la norme pour, dans un premier temps, les aider à se renseigner sur les principes de conception favorables à la construction circulaire, et pour, dans un deuxième temps, « légitimer » le choix de ces principes en montrant qu'elles sont affiliées à des documentations de notoriété internationale.

4.4. Les exemples de bâtiments circulaires

Ces dernières années, plusieurs projets pilotes ont permis de tester et d'améliorer les nouvelles approches de construction visant à créer des bâtiments flexibles et réversibles. Ces réalisations ont contribué à expérimenter les différentes manières de transformer et désassembler les éléments de construction, ainsi qu'à limiter la production de déchets et l'utilisation de ressources naturelles. Pour cette sous-partie, nous décrivons trois études de cas à logique de conception circulaire.

4.4.1. Le projet Hôpital Joseph Bracops.

4.4.1.1. Description :

L'Hôpital Joseph Bracops se situant dans la commune Anderlecht est l'un des maillons du réseau hospitalier Bruxellois IRIS Sud en Belgique. Le projet, remporté par le bureau

Archipelago⁶⁶, a été pensé selon les principes de construction circulaire tels que des matériaux locaux et durables, réversibilité des bâtiments et préfabrication réfléchie.

Selon une interview du cabinet d'architecte Archipelago par le circubuild⁶⁷, le projet a été retenu par la ville de Bruxelles comme un test d'outil de conception « Reverse Building Design » (RDB) qui est un outil d'analyse de critères sur la capacité de transformation et le potentiel de réutilisation d'un bâtiment. Ce dernier a été développé dans le cadre du projet de recherche BAMB 2020 (Horizon 2020)⁶⁸ (Polspoel, 2022).

4.4.1.2. Les principes architecturaux circulaires :

Afin de comprendre les principes circulaires mis en place dans le projet de l'hôpital Joseph Bracops, nous utilisons les données fournies par le site « *Guide du bâtiment durable .brussels* »⁶⁹. Le site classe ces stratégies selon deux types : **la réversibilité spatiale et la réversibilité technique** qui ont été développées sur la base d'un scénario qui permet un changement d'utilisation et de fonction à l'avenir.

Le plan du bâtiment comprend un patio et des stratégies pour accueillir différents programmes. D'abord, le noyau de circulation verticale et les locaux techniques principalement concentrés sur une façade pour offrir un plan ouvert. Le dimensionnement des circulations verticales est adapté à un large éventail de programmes et aux distances d'évacuation de la plupart des types d'occupation. Puis, la hauteur libre des étages (3,45 mètres de plancher fini sous dalle) et la profondeur de dalles permettent d'apporter un éclairage naturel sur toute la surface. Enfin, Les colonnes sont appliquées selon une grille qui peut former des espaces de 7,5 x 7,5 mètres et sont positionnées de façon à être indépendantes de la façade pour permettre des ajustements de cette dernière.

La façade non porteuse est dimensionnée selon des modules préfabriqués de 7,5 mètres composés de sous-module (3,25 mètres, 3 mètres et 75 centimètres), pour permettre une grande variation dans le positionnement des parois intérieurs, et avec des ouvertures prévues pour la

⁶⁶Site archelago : <https://archipelago.be/fr/projets/comment-repenser-un-hopital-urbain-selon-les-principes-durables-de-leconomie-circulaire/>.

⁶⁷ Circubuild est une initiative du Bureau Palindroom, spécialisé dans la rédaction et l'écriture de textes et d'articles dans le domaine de l'architecture et de la construction. Le site met en avant des articles sur le thème de la construction circulaire. Source site Circubuild.be : <https://www.circubuild.be/fr/a-propos-de-nous/>.

⁶⁸ <https://www.bamb2020.eu/>.

⁶⁹ <https://www.guidebatimentdurable.brussels/hopital-joseph-bracops-anderlecht/conception-reversible>.

ventilation naturelle tous les 3 mètres. Cette façade est composée de modules d'éléments réversibles, « *ces éléments peuvent donc être démontés dans leur intégralité, sans devoir toucher fondamentalement aux autres parties du bâtiments.* » (Bruxelles Environnement, 2023). Pour ce faire, la façade préfabriquée est fixée à la structure porteuse principale par des connexions sèches et facilement accessibles ; exemple : la finition de la façade composée de carreaux de façade en céramique placés sans chevauchement et fixés à sec ; ou encore, un profilé d'angle qui fait office de base indépendante entre la base de la structure (base de plancher) et les panneaux de façades.

En outre, le bâtiment est majoritairement constitué d'éléments préfabriqués, à l'exception du béton, ce qui permet au projet de prévoir des séquences de démontage ultérieur conformément à la logique de durée de vie prévues des éléments. Par exemple, les parois intérieures ont des systèmes de supports indépendants sur lesquels sont fixés des panneaux de finition amovibles, qui sont reliés avec des connexions en velcro industriel pour les rendre réversibles.

Les systèmes de plafond, des placards, des blocs sanitaires, etc. sont modulaires et peuvent subir des modifications sans impacter les fonctions adjacentes. Quant au mobilier des espaces, ce sont des modules reconfigurables.

Enfin, le réseau de distribution horizontale et verticale des techniques est positionné pour ne pas desservir la structure et le déplacement des parois, et les zones accueillant le réseau sont surdimensionnées pour favoriser une maintenance ou un ajout ultérieur. Les gaines verticales sont centralisées afin de limiter la longueur des gaines, cependant que des zones prédécoupées dans la dalle des structures porteuses peuvent accueillir des futures techniques lors d'une réaffectation. Quant aux gaines horizontales, elles sont alignées sur la circulation, ce qui facilite une future modification.

L'hôpital Joseph Bracops a été intégré comme projet pilote par Bruxelles Environnement⁷⁰ pour développer un protocole de conception réversible dont l'ambition est de définir des bases normatives au niveau européen. Cette collaboration a permis d'évaluer la capacité de réversibilité du projet et de garantir la valeur ajoutée des concepts⁷¹. (Architecture Hospitalière,

⁷⁰ <https://environnement.brussels/>.

⁷¹ Interview de Laurent Grisay, ingénieur civil architecte pour le magazine « Architecture Hospitalière 37 » de 2020 : <https://www.architecture-hospitaliere.fr/wp-content/uploads/2020/12/Lire-la-suite-archipelago.pdf>.

2020). Les données de l’outil ont été comparées avec d’autres outils d’évaluation de design circulaire tel que GRO, C-Calc, label circular gebouw, etc.

Le tableau ci-dessous (tableau 15) reprend les différents principes de conception du projet et les compare avec des principes de Cp D/A de la norme ISO NBN 20887.

Pratique de conception	Principe circulaire	Principe de la norme ISO NBN 20887
<ul style="list-style-type: none"> • Système structurel (poteaux-poutres) et dimensions adaptées pour accueillir différents usages 	Adaptabilité spatiale	Polyvalence
<ul style="list-style-type: none"> • Positionnement stratégique des locaux techniques et des circulations 	Adaptabilité spatiale	
<ul style="list-style-type: none"> • Aménagements intérieurs interchangeables 	Adaptabilité spatiale	Convertibilité
<ul style="list-style-type: none"> • Indépendance de l’aménagement intérieur, des systèmes techniques, de la structure et de l’enveloppe. 	Stratification	Séparation des « couches »
<ul style="list-style-type: none"> • Accessibilité des connexions pour les modules d’aménagement 	Réversibilité technique	Facilité d’accessibilité
<ul style="list-style-type: none"> • Enveloppe et aménagement intérieur (cloison, blocs sanitaires, plafond, etc.) en modules préfabriqués 	Simplicité	Normalisation
<ul style="list-style-type: none"> • Séquence de démontage des éléments prévue et adaptée pour éviter d’impacter les éléments adjacents 	Réversibilité technique	Indépendance

4.4.2. Le projet MUNDO LLN (Louvain-La-Neuve)

4.4.2.1. Description :

Mundo Louvain-la-neuve fait partie d’un ensemble de cinq autres centres construits et gérés par la société Mundo-Lab. Ce sont des centres de bureaux qui cherchent à regrouper et à offrir des outils aux associations, aux ONG et aux entreprises de l’économie sociale⁷². Les bâtiments sont conçus de façon à minimiser leur impact environnemental et le projet Mundo-LLN a été récompensé par la région wallonne en devenant le lauréat de l’appel à projet « chantiers et services circulaires »⁷³. Le chantier comprend la rénovation d’une ferme et la création d’un nouveau bâtiment dont la construction est en cours et devrait finir pour novembre 2023.

⁷² Source sur le site Mundo-lln.org : https://mundo-lln.org/fr/A_propos_de_Mundo/Qu_est_ce_que_Mundo/.

⁷³ Source sur le site circular wallonia : <https://economiecirculaire.wallonie.be/fr/appel-projets-chantiers-services-circulaires-2023>.

4.4.2.2. Principe de conception circulaire

Lors d'une interview pour le site Circubuild, l'ingénieur de Mundo-Lab J. Willem décrit les ambitions du projet en termes de circularité et de modularité. (Dupont, 2023).

Le cloisonnement des espaces est élaboré de façon modulaire, comme pour les châssis, les stores, les faux plafonds et les faux-planchers. Le parking en sous-sol de Mundo-LLN est conçu pour pouvoir s'adapter dans le temps. En anticipant la future évolution de la mobilité, le bureau de A2M et l'ingénieur de Mundo-Lab, ont prévu la transformation du parking à moindre coût et à moindre effort. La hauteur sous plafond est adaptée pour répondre à un environnement de bureaux, et tout le long du boulevard de Wallonie, a été installée une structure poteaux-poutres, avec remplissage en prémur afin de créer de futures ouvertures. Toujours dans cette optique, les techniques, comme les descentes d'eau, ne sont pas enterrées devant ces murs pour faciliter un potentiel terrassement.

Un autre point important du projet est l'utilisation d'un maximum d'éléments de réemploi. Premièrement, les carreaux de ciment de l'ancien bâtiment ont été récupérés pour être remis en œuvre dans le projet actuel. Deuxièmement, la société Mundo-Lab utilise de nombreux éléments issus d'autres chantiers grâce à un réseau d'acteurs immobiliers. La société a pu acquérir 120 luminaires qui, avec quelques transformations, seront moins énergivores. Les sanitaires et certains plancher en bois seront également issus du réemploi.

Cependant l'aspect circulaire le plus impressionnant du projet est l'utilisation d'une ossature en acier récupérée car seuls quelques projets en Europe ont essayé. Cette stratégie est rare car elle demande de nombreuses responsabilités dont celle impliquant la stabilité. Les éléments structurels en acier ont été trouvés aux Pays-Bas chez Swanenbeg⁷⁴, puis contrôlés pour « *confirmer leur résistance, leur soudabilité et l'état de leur fatigue* » (Dupont, 2023) avant d'être installés sur site. Ce type de démarche demande donc tout un travail préparatoire et l'aide de nombreux acteurs.

Si la construction circulaire se développe plus lentement en Wallonie que dans les autres régions, Mundo-LLN est une initiative qui permet de faire avancer le secteur. La modularité et le réemploi mis en place sont des exemples circulaires qui ouvrent la voie pour de nouvelles expérimentations.

⁷⁴ <https://www.swanenbeg.com/?lang=fr>.

Le tableau ci-dessous (tableau 16) reprend les différents principes de conception du projet et les compare en fonction des principes de Cp D/A de la norme ISO NBN 20887.

Tableau 18 : comparaison des concepts du Projet MUNDO LLN et principes de conception Cp D/A et circulaires		
Pratique de conception	Principe circulaire	Principe de la norme ISO NBN 20887
<ul style="list-style-type: none"> • Système structurel (poteaux-poutres) • Dimension adaptée pour accueillir de futures fonctions (bureau) 	Adaptabilité spatiale	Polyvalence
<ul style="list-style-type: none"> • Indépendance d'une partie de l'enveloppe du parking par rapport à la structure 	Stratification	Indépendance
<ul style="list-style-type: none"> • Facilitation d'un futur terrassement d'une partie du terrain en évitant l'enterrement de techniques comme les descentes d'eau. • Les prémurs permettent de créer de futures ouvertures. 	Adaptabilité spatiale	Capacité d'extension
<ul style="list-style-type: none"> • Les joints des prémurs en sous-sol sont visibles 	Réversibilité technique	Facilité d'accessibilité
<ul style="list-style-type: none"> • L'aménagement intérieur utilise des parois réversibles. 	Adaptabilité spatiale	Convertibilité
<ul style="list-style-type: none"> • Enormément d'éléments sont issus du réemploi. • La structure en poteaux -poutres est issue d'acier réemployé. 	Choix de matériaux	Soutien d'un modèle économique circulaire.

4.4.3. Le projet ZIN

4.4.3.1. Description :

Le projet ZIN⁷⁵ est un chantier de rénovation et de transformation des tours 1 et 2 du World Trade Center (WTC) de Bruxelles. Dans un contexte de quartier où les bâtiments monofonctionnels ont été démolis, le projet s'inscrit dans les aspects de flexibilité, d'accessibilité, de biodiversité et d'économie circulaire. Le maître d'ouvrage est le groupe Befimmo⁷⁶ qui sont des investisseurs et développeurs immobiliers dans l'objectif de créer des environnements de travail dans un avenir plus durable (Urban Brussels, 2021). Le projet est lauréat de be.circular et be.exemplary qui sont des appels à projet exemplaires dans le secteur de la construction.

⁷⁵ <https://zin.brussels/fr/>.

⁷⁶ Site Befimmo.be : <https://www.befimmo.be/fr/befimmo-en-un-coup-doeil>.

4.4.3.2. Principe de conception circulaire

Le projet ZIN a un programme composé de quatre axes principaux : Construire un nouveau mode développement urbain, créer un cadre multifonctionnel (Bureaux, appartements, hôtel) et utiliser une conception durable et modulable (Urban Brussels, 2021).

Les concepteurs ont cherché à maintenir un maximum le bâti existant en sauvegardant 65 % des tours existantes et en recyclant environ 85 % des déchets, comme 30.000 tonnes de gravats issus de la démolition, qui transformés en agrégats A+, ont été utilisés dans le nouveau béton (Urban Brussels, 2021). En outre, ils ont aussi réutilisé plus de 1.000 tonnes de matériaux de finitions dont : 10.000 m² d'isolant ; 1.800 m² de dalles de tapis ; 13.000m² de panneaux en bois ; 4.350 m² de dalles de silex ; 6.000 m² de faux planchers, 2.800 pièces de multiplex, 7.700 m² de dalle PVC, 23.000m² de faux plafond, etc... trouvé sur et hors site. (Knipping & Bruxelles Environnement, 2021).

Le projet prend aussi en compte des possibilités de futurs changements. Les équipes ont mis en place un plan en grilles ouvertes fixes avec des dimensions adaptées pour différents programmes (Bureau, hôtel et logement) dont chaque circulation est séparée. Ils ont aussi couplé les trémies verticales au noyau de circulation et instauré des aménagements intérieurs modulaires réversibles (Cavens & Bruxelles Environnement, 2019). Toutes ces stratégies ont permis de créer des espaces « hybrides » sur chaque étage afin que les fonctions puissent être interverties.

Quant aux nouveaux matériaux, près de 95 % de la partie bureau sont certifiés C2C⁷⁷ ou équivalent tels que le vitrage, les profilés aluminium, le faux plancher, les cloisons mobiles, le plafonnage, etc... ou encore les matériaux neufs avec une composition de bois certifiés FSC et PEFC⁷⁸. (Knipping & Bruxelles Environnement, 2021).

Le projet ZIN est donc un projet exemplaire, dont les équipes de concepteurs ont adapté des concepts durables et circulaires pour construire le bâtiment . On retrouve un plan flexible, un aménagement intérieur réversible et des matériaux recyclés et réemployés ou pensés pour l'être.

⁷⁷ Le certificat C2C (Cradle to Cradle) est une norme de conception et de fabrication de produit qui permet un avenir sain, équitable et durable. La norme se base sur 5 critères : l'impact matériel ; la circularité du produit; la protection du climat et d'un air pur, la gestion de eaux et des sols ; et l'équité sociale. Source C2Cplatform.eu : <https://www.c2cplatform.eu/c2c-certified/?lang=fr>.

⁷⁸ FSC (Forest Stewardship Council) et PEFC (Pan European Forest Certification) sont des organisations internationales de certification forestière qui font la promotion d'une gestion écologique et durable des forêts dans le monde. source wikipédia : https://fr.wikipedia.org/wiki/Forest_Stewardship_Council.

Ce projet est modèle pour les futurs chantiers qui ont des ambitions de construction circulaire et durable.

Le tableau ci-dessous (tableau 17) reprend les différents principes de conception du projet et les compare en fonction des principes de Cp D/A de la norme ISO NBN 20887.

Pratique de conception	Principe circulaire	Principe de la norme ISO NBN 20887
<ul style="list-style-type: none"> • Dimension adaptée pour une multifonctionnalité (Bureau, hôtel et appartements) 	Adaptabilité spatiale	Polyvalence
<ul style="list-style-type: none"> • La partie bureaux comprend des cloisonnements réversibles. 	Adaptabilité spatiale	Convertibilité
<ul style="list-style-type: none"> • Les aménagements intérieurs des bureaux ont des parois modulaires composées de connexions réversibles. 	Réversibilité technique	Indépendance
<ul style="list-style-type: none"> • Séparation des strates d'aménagement intérieur, de structure/façade et de réseau technique 	Stratification	Indépendance
<ul style="list-style-type: none"> • Démantèlement et recyclage de l'ancien bâtiment. • Réemploi d'une majorité du bâtiment d'origine ainsi qu'une partie de dalle en silex. • Utilisation de matériaux issus du réemploi. • Utilisation de matériaux certifié C2C ou équivalent. 	Choix de matériaux	Soutien modèles économiques circulaires
<ul style="list-style-type: none"> • Aménagement intérieur modulaire 	Simplicité	Normalisation
<ul style="list-style-type: none"> • Facilitation d'une future intervention liée au démontage. 		Sécurité de démontage

4.5. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de prendre connaissance de l'utilisation des pratiques de conception circulaire en Belgique, de déterminer les obstacles, et d'entrevoir les leviers qui favorisent une transition vers une construction circulaire. Ces informations nous permettent de comprendre dans quel contexte la norme ISO NBN 20887 apparait, au niveau de l'application des principes circulaires, dans le secteur Belge.

En premier lieu, grâce au rapport sur les connaissances des acteurs du projet BBSM (Gobbo & Trachte, 2016) et des interviews des facilitateurs en construction durable et circulaire, nous pouvons évaluer des difficultés de mise en œuvres des conceptions citées dans la norme . Les pratiques d'adaptabilité, mis à part les capacité d'extension, sont majoritairement utilisées dans les bâtiments tertiaires car ils présentent des avantages pour les propriétaires lorsque les ouvrages doivent subir des changements d'usage. Pour les conceptions de démontabilité, la

plupart des principes sont très peu mis en place. S'il existe des exemples d'acteurs qui utilisent des stratégies pour prévoir un futur démantèlement de l'ouvrage, ce sont le plus souvent des choix qui se portent sur l'aspects financier ou sur les performances des composants qui sont priorités. Enfin pour le choix des matériaux, il existe une prise de conscience. La plupart se base sur des labels environnement pour limiter l'impact sur l'écosystème. Du point de vue des produits valorisés, les acteurs affirment qu'il manque d'informations sur les produits au niveau de leur performance. On aperçoit néanmoins des exemples de réemploi, mais ils sont majoritairement in-situ et limités aux projets privés ou patrimoniaux (Gobbo & Trachte, 2016, p. 17).

Le tableau ci-dessous est une analyse des différents principes de Cp D / A cités par la norme ISO NBN 20887 en fonction de leur niveau de pratique dans le secteur de la construction.

Tableau 20 : Analyse du niveau de pratique des principes de conception d'adaptabilité et démontrabilité dans le secteur construction.		
Principe de Cp D / A de la norme ISO NBN 20887	Échelle quantitative	Remarque
Polyvalence	Fréquent dans les bâtiments tertiaires	On trouve de plus en plus de bâtiment qui utilisent des systèmes structurels pour avantager le plan libre afin d'accueillir plusieurs fonctions.
Convertibilité	Fréquent dans les bâtiments tertiaires	On retrouve des stratégies d'aménagements intérieurs amovibles dans les immeubles bureaux car ce secteur est plus préoccupé par le renouvellement de scénarios.
Capacité d'extension	Rare	Les MO éprouvent des difficultés à mettre en place des capacités d'extension verticale, car elles engendrent des coûts matériels et financiers supplémentaires sans garantie qu'il existe des étages supplémentaires.
	Épisodique	L'extension horizontale demande un raccordement technique aux bâtiments d'origine et un espace suffisant à côté du bâti.
Facilité d'accessibilité	Rare	Il y a un manque d'attention au niveau de l'accessibilité des composants et de leurs assemblages.
Indépendance	Rare	Il existe des exemples d'indépendance d'éléments, afin qu'ils soient démantelés. Mais il est plus rare que les composants les constituant le soient.
Séparation des « couches »	Fréquent (Rare pour l'enveloppe et la structure)	On observe une séparations des couches au niveau des systèmes techniques, des aménagement intérieurs et de la structure dans les bâtiments tertiaires. On trouve aussi des façades non porteuses mais elles souvent liées aux structures.

Tableau 20 suite		
Principe de Cp D / A de la norme ISO NBN 20887	Échelle quantitative	Remarque
Connexions réversibles	Épisodique	La réversibilité des assemblages dépend fortement des informations communiquées par les fabricants et de la collaboration avec les entrepreneurs.
Simplicité	Rare	Ce principe n'est pas fréquemment appliqué.
Normalisation	Fréquent	Il existe des standardisations de dimensionnement au niveau de la spatialité et des composants. On note cependant qu'il n'existe pas de module universel intégrant tous les types de composants.
Soutien d'un modèle économique circulaire	Épisodique	Bien qu'il existe de nombreux exemples d'utilisation de matériaux de réemploi ou avec un pourcentage de matériaux recyclés dans la construction, on note qu'il existe de nombreux freins techniques, juridiques, financiers et de documentation par rapport aux matériaux neufs.
Éviter les traitements et les finitions inutiles	Fréquent	Il existe une prise en compte de l'impact environnemental des composants même si ce sont des critères de coût, d'esthétisme et de performance qui sont privilégiés.
Sécurité de démontage	Manquant	Il existe un dossier DIU qui reprend les plans as-built, les fiches techniques, les informations de maintenance, etc. cependant il n'y a pas de suivi dans la transmission de ce dossier, ni dans sa mise à jour.

Grâce au tableau ci-dessus, on remarque que la plupart des principes de conception pour l'adaptabilité et la démontabilité ne sont pas fréquents dans les pratiques de construction des bâtiments. Ce constat peut s'expliquer par de nombreux freins tels qu'un manque de *connaissances*, que ce soit au niveau des définitions des concepts circulaires ou au niveau des compétences de mise en pratique (A. Romné, communication personnelle, 2023) ; un manque de procédés *techniques* pour optimiser les produits de construction afin d'être plus durables (A. Romné, communication personnelle, 2023) ; des difficultés *économiques et sociales* que ce soit au niveau des maîtres d'ouvrage qui ont des réticences à investir dans un avenir « incertain » et au niveau des architectes et des entrepreneurs qui voient leurs charges augmenter en temps et en main-d'œuvre (Bos & Trachte, 2021) ; et des obstacles au niveau *réglementaire et politique* par le manque de cadres qui soutiennent les pratiques circulaires (S. Breels, communication personnelle, 2023).

Cependant, il existe des leviers et des outils qui cherchent à aider les acteurs à pratiquer des approches de conception circulaire en Belgique. Ces derniers permettent de développer et de récompenser des projets qui utilisent des principes innovants pour pallier les difficultés des bâtiments à faire face aux changements. L'analyse de certains de ces projets pilotes a permis de

confirmer, dans un premier temps, qu'ils étaient des modèles pour les futures constructions qui veulent s'inscrire dans des réflexions d'économie circulaire, et, dans un second temps, que l'on retrouve des principes de conception similaire à ceux évoquer par la norme ISO NBN 20887.

Le tableau ci-dessous analyse les stratégies de conception que l'on retrouve dans les outils **GRO** et **Reversibles Building Design**, ainsi que ceux présent dans les trois projets pilotes qui ont été sélectionné dans ce TFE, en fonction des principes Cp D/A de la norme ISO NBN 20887.

Tableau 21 : comparatif des Cp D/A de la norme ISO NBN 20887 présents dans les projets pilotes et les outils					
Principe de la norme ISO NBN 20887	GRO	Reversible Building Design Tools	Projet Hôpital Joseph Bracops	Projet MUNDO LLN	Projet ZIN
Polyvalence	X	X	X	X	X
Convertibilité	X	X	X	X	X
Capacité d'extension	X	X		X	
Accessibilité	X	X	X	X	
Indépendance	X	X	X	X	X
Connexions réversibles	X	X	X		X
Séparation des « couches »	X	X	X	X	X
Simplicité	X	X	X		
Normalisation	X	X	X		X
Limitation de finitions et de traitements inutiles	X	X			
Soutien d'un modèle économique circulaire	X			X	X
Sécurité de démontage					X

Grâce au tableau précédent, on s'aperçoit que les outils et les projets pilotes reprennent une grande majorité des principes de conception décrit dans la norme ISO NBN 20887. Ce résultat permet de démontrer que la norme peut être un soutien pour les constructions circulaires en « validant » l'utilisation de concepts d'adaptabilité et de démontabilité admis par des organismes internationaux, comme des pratiques requises.

5. Discussion

La transformation du secteur de la construction vers des principes de conception circulaire semble être un processus lent à cause de nombreux freins et de l'inertie des méthodes linéaires à évoluer, mais est inévitable. La renommée de l'économie circulaire dans le secteur du bâtiment est très populaire car ce paradigme peut renforcer le modèle Développement Durable dans lequel les bâtiments et leurs produits constructifs (éléments, composants et matériaux) sont maintenus dans un cycle de vie en boucle fermée permettant de limiter la production de déchets et l'exploitation intensive des ressources naturelles.

Les principes de conception circulaire peuvent être davantage intégrés dans les pratiques de constructions grâce à la norme ISO NBN 20887 en renforçant la notoriété des documentations, des leviers et des outils présents en Belgique. Ces derniers aideront à accentuer les connaissances des acteurs du bâtiment, qui, par conséquent, pourront mettre en œuvre ou développer de nouvelles méthodes exemplaires de construction entrant dans une logique de circularité des ressources. De plus, les protagonistes institutionnels peuvent s'appuyer sur la norme pour accentuer dans les documents réglementaires la mise en place de concepts circulaires afin d'enrayer le gaspillage des ressources naturelles et de limiter l'impact environnemental du secteur du bâtiment.

Toutefois, dans un objectif d'insérer la société dans un modèle d'économie circulaire, il faut mettre en place l'un des trois piliers cités dans le texte « *vers une économie circulaire dans la construction* » (Romné & Vrijders, 2018, p. 13), celui du concept d'*urban mining*. Les ouvrages doivent être considérés comme des futures ressources en matériaux et en composants car de tels procédés permettront de contrebalancer le système économique actuel. Il va sans dire que la norme ISO NBN 20887 peut être un soutien dans la mise en place du concept d'Urban Mining.

Un dernier point, qui a été soulevé lors de l'interview avec la facilitatrice RBC, est le manque de retour au sujet des bâtiments exemplaires en fin de vie. Ces dernières années, plusieurs projets pilotes ont vu le jour et ont permis des retours d'expérience ; cependant, il n'y a que très peu d'ouvrages qui ont atteint leur fin de vie et dont il existe une étude sur l'impact qu'ont eu les principes de conception d'adaptabilité et de démontage sur le démontage et le réemploi des éléments, des composants ou des matériaux. Il serait intéressant de développer en aval de ce TFE l'impact qu'ont les principes de Cp D/A, cités dans la norme ISO NBN 20887, lors de la fin de vie des ouvrages.

Pour conclure, ce TFE a pour objectif d'analyser la norme ISO NBN 20887 et de déterminer si elle peut-être un levier pour la conception circulaire. L'une des répercussions de cette analyse est d'avoir développé des pistes de réflexions propres à la norme. Le tableau ci-dessous reprend ces remarques d'améliorations.

Tableau 22 : regroupement des réflexions pouvant améliorer la norme.	
Principe de la norme ISO NBN 20887	Remarque d'amélioration
	Rajouter un niveau d'échelle qui prend en compte le site
	Prendre en compte l'implantation du site et l'impact de celui -ci dans les principes de conception pour l'adaptabilité
Polyvalence Convertibilité	Détailler les stratégies de positionnement des éléments porteurs fixes ; des circulations verticales et horizontales ; des locaux et des distributions des techniques.
Polyvalence Convertibilité	Intensifier les détails de dimensions (hauteurs sous plafond ; structure horizontale ; sécurité incendie, etc.) qui peuvent être utiles à plusieurs usages.
Capacité d'extension	Séparer les principes de capacité d'extension verticale et horizontale, car elles ne demandent pas les mêmes exigences de conception.
Indépendance	Détailler les concepts de hiérarchie et de géométrie d'assemblage. (Parallèle/séquentielle ; ouvert/inter-pénétrante)
Séparation des « couches » fonctionnelles	Considérer l'enveloppe et la structure comme deux « couches » fonctionnelles indépendantes.
Réversibilité des connexions	Détailler les types de connexions en fonction de leur potentiel de réversibilité.
Evitement de traitements et de finitions inutiles	Détailler ces parties dans un principe de choix de matériaux par/pour le réemploi et la valorisation des produits constructifs.
Soutien de modèles économiques circulaires	
Normalisation	Rapprendre les principes de dimensionnement spatial et de modularité dans les principes de conception pour l'adaptabilité.
Sécurité de démontage	Décrire les critères de ce principe dans le chapitre « <i>documentation et informations</i> » de la norme.
Durabilité	Considérer la durabilité comme un principe de conception pour la démontabilité.
Documentation et informations	Approfondir et détailler la mise en place d'un document d'information reprenant les détails de Cp D/A, ainsi que les caractéristiques des éléments, des composants et des matériaux ; et leur potentiel de valorisation en fin de vie.

6. Conclusion générale

Ce mémoire a pour ambition d'évaluer si la nouvelle norme NBN ISO 20887 « *développement durable dans les bâtiments et les ouvrages de génie civil– Conception pour la démontabilité et l'adaptabilité – principes, exigences et recommandations* » est un réel levier pour renforcer et intensifier les pratiques de conception circulaire en Belgique.

Il a fallu, dans un premier temps, définir les enjeux de la construction et les notions d'économie circulaire, d'adaptabilité et de démontabilité. Par l'analyse de textes scientifiques, il a été possible de comprendre l'impact du secteur de la construction sur l'environnement ; en effet, il constitue l'un des plus gros consommateurs de ressources naturelles et producteur de déchets (Oberle et al., 2019). Ceci est dû à des conceptions qui n'anticipent pas les facteurs de changement qui rendent obsolètes les bâtiments, à savoir des facteurs fonctionnels, technologiques, économiques et sociaux (Iselin & Lemer, 1993). De plus, le secteur s'inscrit dans un paradigme d'économie linéaire qui ne permet pas de valoriser les déchets de construction.

Cependant, nous voyons qu'il existe des alternatives, grâce à un nouveaux courant : l'économie circulaire. Ce modèle économique cherche à maintenir les ressources dans une boucle fermée grâce à des stratégie de valorisation pour pérenniser le système (Romné & Vrijders, 2018, p. 12). En outre, le modèle privilégie des conceptions qui favorisent le maintien ou le réemploi des bâtiments et de leurs composants, tels que la conception pour l'adaptabilité spatiale, la conception pour le démontage des composants et la conception pour le réemploi des éléments et des matériaux (Durmisevic, 2006b). En effet, la conception pour l'adaptabilité a pour objectif de limiter l'impact dû à des changements d'usage ou d'exigence performancielle (M. L. Vandenbroucke & Galle, 2015). Quant à la conception pour la déconstruction et le démontage, elle correspond à un ensemble de stratégies qui vise à faciliter la séparation des composants sans dégâts (Galle et al., 2019a).

Ces conceptions sont donc des atouts pour favoriser des stratégies en lien avec l'économie circulaire. Il convenait alors, dans un deuxième temps, de prendre connaissances des principes qui favorisent la conception circulaire. Avec l'aide de guides qui regroupent des directives pour aider les acteurs à évoluer vers des constructions circulaires, nous avons décrit un ensemble de principes selon trois niveaux d'échelles : celui du bâtiment, du composant et du matériaux. Il ressort de la première échelle, que les concepteurs doivent prévoir une implantation intégrant les besoins du quartier afin de soutenir une cohésion sociale ; mais aussi de prendre en compte

des dimensions spatiales et des positions des noyaux fixes, pour permettre aux bâtiments d'accueillir différents usages dans le temps, avec peu d'ajustement ; et enfin de séparer en strates les éléments par rapport à la durée de vie de leurs fonctions et de leurs matériaux. Au niveau de l'échelle des composants, les principes cités sont une réversibilité des éléments et de leurs connexions ; une simplification des besoins techniques pour le montage / démontage des produits ; une compatibilité grâce à des composants standardisés ; et finalement une durabilité en privilégiant des produits robustes à l'usure, avec une durée de vie longue et un faible besoin de maintenance. Puis, à la dernière échelle, nous avons constaté que les choix de matériaux influencent leur future valorisation et leur impact environnemental. A partir de ce constat, nous pouvons comparer les principes de conceptions de démontabilité et d'adaptabilité et déterminer les similitudes et les différences avec la norme NBN ISO 20887

La troisième partie, dès lors, est une analyse de la norme NBN ISO 20887 et de ses principes de conception afin de déterminer si le document est en corrélation avec les approches circulaires. On distingue dans le texte les principes de polyvalence, de convertibilité et de capacité d'extension qui correspondent aux enjeux d'adaptabilité ; également, les principes de simplicité, de normalisation, d'indépendance, d'accessibilité et de réversibilité des connexions dans la partie des concepts pour la démontabilité ; de plus, on retrouve les principes de valorisations des éléments constructifs (réemploi, recyclage, réparation, etc.) et de choix de matériaux. Grâce à cette analyse, nous constatons que la norme comporte majoritairement les mêmes points d'attention que les principes de conception circulaire, malgré quelques différences. Ainsi ce chapitre nous permet d'apporter un début de réponse à notre problématique.

Enfin, nous nous sommes penchés sur la mise en pratiques des conceptions circulaires. L'objectif était de quantifier les pratiques de constructions circulaires, mais également identifier les freins et les leviers d'une transition du secteur de la construction vers une économie circulaire. Grâce à l'interview de facilitateurs en construction durables et circulaires, ainsi qu'à l'analyse du rapport WP1 du projet BBSM (Gobbo & Trachte, 2016) nous déterminons qu'il est majoritairement compliqué pour les acteurs de la construction d'appliquer des principes circulaires. Si certains principes sont fréquemment appliqués dans la conception de bâtiments tertiaires et s'il existe une volonté de la part des bureaux d'architecture à participer activement à des solutions circulaires, il subsiste un manque de connaissances des principes circulaires et ce sont des choix financiers, de performance, d'esthétisme qui sont privilégiés. Nous relevons quatre types de frein à la construction circulaire en Belgique. D'abord un frein de connaissances

et de capacités de mise en pratique des concepts de construction circulaire. Puis des freins techniques au niveau des produits pour qu'ils restent de qualité optimale tout au long de leur vie. Ensuite, des freins économiques et sociaux au niveau des acteurs qui ont soit des difficultés à investir dans l'avenir, soit des difficultés de surcharge de travail. Enfin des freins réglementaires par manque de cadre normatif de la part des politiques. Néanmoins, nous voyons qu'il existe de nombreux leviers financiers et d'aide à l'application des principes circulaires au niveau des trois régions de Belgique. Il existe aussi de nombreux projets qui font évoluer la réflexion sur les concepts circulaires en apportant des exemples de mise en œuvre. Cet ensemble de sources permet de générer un contexte porteur pour le pays dans sa transition vers une économie circulaire. La norme peut être un soutien pour les différents leviers et outils présent en Belgique en, dans un premier temps, les aidant à renseigner sur les principes de conception favorables à la construction circulaire, et, dans un deuxième temps, en « légitimant » le choix de ces principes qui sont affiliées à des documentations de notoriété internationale.

En conclusion, nous notons que les principes de conception circulaire de la norme sont en corrélation avec les approches circulaires listées dans les différents guides sur le sujet. En conséquence, nous reconnaissons que ce sont des conceptions permettant de réduire l'impact environnemental du secteur de la construction, en limitant l'apport de ressources naturelles et la production de déchets. De plus, le document normatif arrive dans un contexte favorable où l'émergence de solutions économiquement circulaires sont de plus en plus demandées. La norme NBN ISO 20887 est donc un levier pour faire avancer le secteur de la construction vers des solutions circulaires, car elle offre un langage commun au niveau fédéral. Ce résultat peut favoriser l'utilisation et l'enseignement des concepts circulaires par les différents acteurs ; donner des pistes d'exploration aux chercheurs ou aux entreprises pour développer des nouvelles technologies ; et être un appui pour le développement d'une réglementation qui préconise l'économie circulaire dans le secteur de la construction.

Ainsi, la norme permet de démocratiser les concepts d'adaptabilité et de démontage, qui sont des éléments-clés pour faire évoluer le secteur de la construction vers une économie circulaire. Cela permet d'accélérer les réflexions pour réduire nos impacts sur l'environnement. On peut dès lors se demander quelles sont les prochaines étapes pour améliorer nos manières de bâtir tout en garantissant une sécurité d'avenir.

« Nous n'héritons pas de la terre de nos parents, nous l'empruntons à nos enfants. »

Antoine de Saint-Exupéry

Bibliographie

- (Anastasiades et al., 2021)** Anastasiades, K., Goffin, J., Rinke, M., Buyle, M., Audenaert, A., & Blom, J. (2021). Standardisation: An essential enabler for the circular reuse of construction components? A trajectory for a cleaner European construction industry. *Journal of Cleaner Production*, 298, 126864. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126864>
- (Architecture Hospitalière, 2020)** Architecture Hospitalière. (2020). CONCEPTION ET ENVIRONNEMENT archipelago : Comment repenser un hôpital urbain selon les principes de l'économie circulaire ? *Architecture Hospitalière*, 37, 92-95.
- (Barles, 2008)** Barles, S. (2008). Comprendre et maîtriser le métabolisme urbain et l'empreinte environnementale des villes. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, 52(4), 21-26. <https://doi.org/10.3917/re.052.0021>
- (Belaïssaoui et al., 2019)** Belaïssaoui, F., Lakhsadi, Z., Gilles, M., & Ramiamanana, N. (2019). *Rapport d'analyse de projets urbains*.
- (Bos & Trachte, 2021)** Bos, M., & Trachte, S. (2021). *Projet Feder BBSM: Rapport scientifique WP3/4 - Analyse des filières existantes en RBC* (UCL-Université Catholique de Louvain). Article UCL-Université Catholique de Louvain. <https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/object/boreal:257593>
- (Brand, 1995)** Brand, S. (1995). *How Buildings Learn: What Happens After They're Built*. Penguin.
- (S. Breels, communication personnelle, 2023)** Breels, S. (2023). *Communication personnelle : Interview du project manager chez MATRIciel*. [Communication personnelle]. (voir [annexe 8](#))
- (Bruxelles Environnement, 2020)** Bruxelles Environnement. (2020). *Construire réversible et circulaire*. Guide Bâtiment Durable.brussels. <https://www.guidebatimentdurable.brussels/construire-reversible-circulaire>

- (Bruxelles Environnement, 2023)** Bruxelles Environnement. (2023). *Conception réversible : Etude de cas hôpital Joseph Bracops* [Documentation sur la conception des bâtiments à Bruxelles]. Guide du bâtiment durable.brussels. <https://www.guidebatimentdurable.brussels/hopital-joseph-bracops-anderlecht/conception-reversible>
- (Bruxelles Environnement & Gawlik, 2021)** Bruxelles Environnement, & Gawlik, K. (2021). *Formation Bâtiment Durable, Conception circulaire et réversibles : Retour d'expérience polyclinique Hôpital Bracops*. [Formation Bâtiment Durable]. https://environnement.brussels/sites/default/files/user_files/f04_eccr_211019_1_5_brac_fr.pdf
- (Carême et al., 2020)** Carême, A., Deheneffe, A., & Romné, A. (2020). *Construction et rénovation circulaire—Action et recommandations d'accélération de l'économie circulaire dans la construction à l'attention fédéral. Rapport final d'étude*. (p. 32). ICEDD (Institut de Conseil et d'Etudes en Développement Durable). https://frdo-cfdd.be/wp-content/uploads/2022/08/ecocircons_rapportfinal_icedd_20201106_fr.pdf
- (Cavens & Bruxelles Environnement, 2019)** Cavens, O., & Bruxelles Environnement. (2019). *Rénovation des tours Bruxelloises. Zin : Processus de transformation des tours WTC I & II*. [Séminaire Bâtiments Durables]. Séminaire Bâtiments Durables. https://environnement.brussels/sites/default/files/user_files/sem02-191108-08-oc-fr_light.pdf
- (Chebli, 2016)** Chebli, Z. (2016). *Demontagevermogen en Demontagebehoefte : De relevantie van demontage voor gebouwen binnen de circulaire economie* (p. Delft University of Technology).
- (Chini & Schultmann, 2002)** Chini, A. R., & Schultmann, F. (2002). design for deconstruction and materials reuse -groupe de travailCIB 39—Réunion de déconstruction. *Groupe de TravailCIB 39 - Réunion de Déconstruction*, 244.
- (Crowther, 2000)** Crowther, P. (2000). Developing Guidelines for Designing for Deconstruction. In *Deconstruction—Closing the Loop Conference Proceedings*. Deconstruction - Closing the Loop, Watford, United Kingdom. Building Research Council. <https://eprints.qut.edu.au/2847/>

- (Crowther, 2005b)** Crowther, P. (2005). Design for Disassembly – Themes and Principles. *Environment Design Guide*, 1-7.
- (De Collignon et al., 2017)** De Collignon, V., Fèvres, A.-M., Hennequez, C., Glaconnelli, A., Muys, C., & Rubin, P. (2017). *Construire réversible* (Canal architecture). Patrick RUBIN.
- (Dupont, 2023)** Dupont, J. (2023). *Etude de cas : MUNDO LLN (Louvain-La-Neuve)* [Documentation sur la conception des bâtiments à Bruxelles]. Circubuild. <https://www.circubuild.be/fr/actualite/etude-de-cas-mundo-lln-louvain-la-neuve/>
- (Durmisevic, 2006a)** Durmisevic, E. (2006a). *Structures de bâtiments transformables : Conception pour le démontage comme moyen d'introduire l'ingénierie durable dans la conception et la construction de bâtiments.* [European Comission]. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/MEMO_15_6204
- (Durmisevic, 2006b)** Durmisevic, E. (2006b). *Transformable building structures: Design for disassembly as a way to introduce sustainable engineering to building design & construction.* <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A9d2406e5-0cce-4788-8ee0-c19cbf38ea9a>
- (Durmisevic & Yeang, 2009)** Durmisevic, E., & Yeang, K. (2009). Designing for Disassembly (DfD). *Architectural Design*, 79(6), 134-137. <https://doi.org/10.1002/ad.994>
- (Ellen McArthur Foundation, 2013)** Ellen McArthur Foundation. (2013). *Towards a circular economy: Business rationale for an accelerated transition* (<https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-a-circular-economy-business-rationale-for-an-accelerated-transition>). *J. Ind. Ecol.* <https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-a-circular-economy-business-rationale-for-an-accelerated-transition>
- (Erkman, 1997)** Erkman, S. (1997). Industrial ecology: An historical view. *Journal of Cleaner Production*, 5(1), 1-10. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(97\)00003-6](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(97)00003-6)

- (Erkman, 2004)** Erkman, S. (2004). *Vers une écologie industrielle*. ECLM. Eurocodes. (s. d.). *AFNOR Normalisation*. Consulté 9 février 2023, à l'adresse <https://normalisation.afnor.org/thematiques/eurocodes/>
- (Fénard, 2021)** Fénard, G. (2021). *Mémoire de fin d'études : « Conception circulaire et réemploi en architecture, expertises et acteurs : le rôle du valoriste »* (Université de Liège). <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/12556>
- (Fleming, 2009)** Fleming, D. L. (2009). *Design for Deconstruction* [University of Cincinnati]. https://etd.ohiolink.edu/apexprod/rws_olink/r/1501/10?clear=10&p10_accession_num=ucin1242668277
- (Galle et al., 2019a)** Galle, W., Vandervaeren, C., De Temmerman, N., Herthogs, P., Poppe, J., Tavernier, I., Cambier, C., Elsen, S., & Lanckriet, W. (2019a). *Concevoir la transition vers l'économie circulaire. : Le bâti, un environnement dynamique*. Vrije Universiteit Brussel, VUB Architectural Engineering. <https://www.vub.be/arch/page/circulardesign>
- (Galle et al., 2019b)** Galle, W., Vandervaeren, C., Poppe, J., Cambier, C., Elsen, S., Lanckriet, W., Tavernier, I., & De Temmerman, N. (2019b). *Concevoir la transition vers l'économie circulaire. : Des critères de conception pour guider et inspirer tous les acteurs de la construction*. Vrije Universiteit Brussel, VUB Architectural Engineering. <https://www.vub.be/arch/page/circulardesign>
- (Ghyoot et al., 2018)** Ghyoot, M., Devlieger, L., Billiet, L., Warnier, A., & ROTOR. (2018). *Déconstruction et réemploi : Comment faire circulaire les éléments de construction* (Alma ULiège; Lausanne : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes).
- (Giarini & Stahel, 2012)** Giarini, O., & Stahel, W. (1991). *The limits to certainty: Facing risks in the new service economy*.
- (Gobbo, 2015)** Gobbo, E. (2015). *Déchets de construction, matières à conception : Analyse des stocks et flux de matières dans le cadre des opérations de rénovation énergétique en Région de Bruxelles-Capitale* [UCL - Université Catholique de Louvain]. <https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/object/boreal:167680>

- (Gobbo & Trachte, 2016)** Gobbo, E., & Trachte, S. (2016). *BBSM-WPI État de l'Art - Photographie de l'état des connaissances et pratiques chez les acteurs du secteur : Déchets de construction et économie circulaire* (UCL-Université Catholique de Louvain). Article UCL-Université Catholique de Louvain. <https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/object/boreal:208063>
- (Graedel & Lifset, 2016)** Graedel, T. E., & Lifset, R. J. (2016). *Industrial ecology's first decade. Taking stock of industrial ecology* (Centre for Environmental Strategy University of Surrey Guildford).
Graham, P. (2005). Design for Adaptability—An Introduction to the Principles and Basic Strategies. *Environment Design Guide*, 1-9.
- (GRO, 2020)** GRO. (2020). *GRO, op weg naar toekomstgerichte bouwprojecten : Gebruikershandleiding – versie 2020.1*. Agentschap Facilitair Bedrijf Vlaamse overheid. <https://www.gro-tool.be/download-gro/>.
- (Guy & Shell, 2006)** Guy, B., & Shell, S. (2006). Design For Deconstruction and matériaux reuse. *Actes Du Groupe de Travail CIB, Citeseer*.
- (Iselin & Lemer, 1993)** Iselin, D. G., & Lemer, A. C. (1993). *Fourth Dimension in Building: Strategies for Avoiding Obsolescence*. National Academies Press.
- (ISO & NBN, 2021)** ISO, & NBN. (2021). *Développement durable dans les bâtiments et ouvrages de génie civil—Conception pour la démontabilité et l'adaptabilité Principes, exigences et recommandations (ISO 20887:2020)* (MonNBN - RO PdfMeta). ISO copyright office. <https://edu.mynbn.be/nbnframework/index.php/pdfMeta/RO/585555?l=F>
- (JUUNOO, 2022)** JUUNOO. (2022). *Documentation technique*. <https://www.juunoo.com/wp-content/uploads/2021/05/JUUNOO-Documentation-technique-FR.pdf>
- (Kanters, 2018)** Kanters, J. (2018). Design for Deconstruction in the Design Process : State of the Art. *Buildings*, 8(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/buildings8110150>

- (Knipping & Bruxelles Environnement, 2021)** Knipping, G., & Bruxelles Environnement. (2021). *Économie circulaire, gestion de chantier : ZIN retour d'expérience d'un curage circulaire*. [Formation Bâtiment Durable]. Formation Bâtiment Durable.
https://environnement.brussels/sites/default/files/user_files/f09_ecgc_211213_2_3_befi_fr.pdf
- (Lyle, 1996)** Lyle, J. T. (1996). *Regenerative Design for Sustainable Development*. John Wiley & Sons.
- (A.-L. Mareckx, communication personnelle, 2023)** Mareckx, A.-L. (2023). *Communication personnelle : Interview de la manager advies de du bureau d'étude Cenergie*. [Communication personnelle]. (Voir [annexe 6](#))
- (MATRIciel, 2020)** MATRIciel. (2020). *ESSEnciel—Comment incorporer les principes de l'économie circulaire dans la pratique architecturale ?*
- (McAloone & Bey, 2009)** McAloone, T. C., & Bey, N. (2009). *environmental improvment through product development: A guide* (Danish Environmental Protection Agency).
<https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/3996106/mpu-elektronisk-uk.pdf>
- (McDonough & Braungart, 2011)** McDonough, W., & Braungart, M. (2011). *Cradle to Cradle : Créer et recycler à l'infini*. Alternatives.
- (Meadows et al., 2017)** Meadows, D., Meadows, D., Randers, J., El Kaïm, A., & Jancovici, J. M. (2017). *Les limites à la croissance (dans un monde fini) : Le rapport Meadows, 30 ans après*. Éditions de l'échiquier.
- (Morgan & Stevenson, 2005)** Morgan, C., & Stevenson, F. (2005). Design and Detailing for Deconstruction. *SEDA (Scottish Ecological Design Association)*.
- (Morris, 2016)** Morris, A. (2016). *L'analyse de flux de matières au Québec : Méthodes et enjeux d'opérationnalisation dans une perspective d'économie circulaire*. [Essai, université de sherbrooke et Université de technologie de Troyes].
https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/8173/Morris_Audrey_MEnv_2016.pdf

- (Nicodème et al., 2021)** Nicodème, H., Boswell, Sobotka, I., Henrotay, C., Deheneffe, A., Paduart, J., & Noël, L. (2021). *Vadémécum Bâtiment circulaire : À l'attention des maitres d'ouvrages publics pour une gestion des ressources durables et circualires*. Bruxelles Environnement - F. Fontaine & B. Dewulf - Avenue du Port 86C/3000 - 1000 Bruxelles.
- (Oberle et al., 2019)** Oberle, B., Bringezu, S., Hatfield-Dodds, S., Hellweg, S., Schandl, H., & Clement, J. (2019). *Global Resources Outlook 2019: Natural resources for the future we want* (Programe des Nations Unis pour l'environnement) [De Panel international environnement.]. International Resource Panel. <https://www.resourcepanel.org/fr/rapports/perspectives-des-ressources-mondiales>
- (OVAM, 2016)** OVAM. (2016). *24 ontwerprichtlijnen veranderingsgericht bouwen*. OVAM. https://ovam.vlaanderen.be/documents/177281/310282/24_Ontwerprichtlijnen_veranderingsgericht_bouwen.pdf/111e8c9f-4dee-4166-ad1c-68590f10f258?version=1.0&t=1622636059926&download=true
- (Paduart et al., 2013)** Paduart, A., De Temmerman, N., Trigaux, D., De Troyer, F., Debacker, W., & Danschutter, S. (2013). *Casestudy ontwerp van gebouwen in functie van aanpasbaarheid: Mahatma Gandhiwijk Mechelen*. <https://lirias.kuleuven.be/1954264>
- (Pearce & Turner, 1989)** Pearce, D. W., & Turner, R. K. (1989). *Economics of Natural Resources and the Environment*. JHU Press.
- (Polspoel, 2022)** Polspoel, W. (2022, février 22). *Etude de cas : Hôpital Joseph Bracops, Anderlecht* [Rédaction d'article sur la construction circulaire]. Circubuild. <https://www.circubuild.be/fr/actualite/etude-de-cas-hopital-joseph-bracops-anderlecht/>
- (Poncelet & Vrijders, 2021)** Poncelet, F., & Vrijders, J. (2021). Cadre technique des matériaux de réemploi : Comment justifier les performances techniques des matériaux de réemploi ? BBSM. <https://www.bbsm.brussels/fr/publications-fr/>
- (Remkes, 2019)** Remkes, R. (2019). *Wat is de circulaire economie?* Circular Company Makers.

- (A. Romné, communication personnelle, 2023)** Romné, A., & Vrijders, J. (2018). *Vers une économie circulaire dans la construction : Introduction aux principes de l'économie circulaire dans le secteur de la construction*. (Jan Venstermans). Buildwise (CSTC). (voir [annexe 7](#))
- (Romné & Vrijders, 2018)** Romné, A., & Vrijders, J. (2018). *Vers une économie circulaire dans la construction : Introduction aux principes de l'économie circulaire dans le secteur de la construction*. (Jan Venstermans). Buildwise (CSTC).
- (Sanchez & Haas, 2018)** Sanchez, B., & Haas, C. (2018). Capital project planning for a circular economy. *Construction Management and Economics*, 36(6), 303-312. <https://doi.org/10.1080/01446193.2018.1435895>
- (Schmidt et al., 2010)** Schmidt, R. E., Eguchi, T., Austin, S., & Gibb, A. (2010). *What is the meaning of adaptability in the building industry ? In proceedings of the CIB 16th international Conference on Open and Sustainable Building*.
- (Seys, 2017)** Seys, S. (2017). Vers un dépassement des freins réglementaires au réemploi des éléments de construction. BBSM. <https://www.bbsm.brussels/fr/publications-fr/>
- (Smeyers et al., 2022)** Smeyers, T., Deweerdt, M., & Mertens, M. (2022). *L'inventaire réemploi : Un guide pour l'identification du potentiel de réemploi des produits de construction avant la démolition*. FCRBE. <https://vb.nweurope.eu/projects/project-search/fcrbe-facilitating-the-circulation-of-reclaimed-building-elements-in-northwestern-europe/news/fcrbe-guides-extraction/>
- (Sobotka et al., 2019)** Sobotka, I., De Viron, M., Carbonelle, S., Pèrez Duenas, L., Romné, A., Maerckx, A.-L., Van Ginderbeuren, P., Dubois, H., Kevyn, C.-A., Smets, N., & Ghyoot, M. (2019). *Be circular be.brussels » Découvrez la feuille de route des acteurs de la construction vers une économie circulaire !* <https://www.circulareconomy.brussels/decouvrez-la-feuille-de-route-des-acteurs-de-la-construction-vers-une-economie-circulaire/>
- (Stahel & Reday-Mulvey, 1981)** Stahel, W., & Reday-Mulvey, G. (1981). *Jobs for tomorrow: The potential for substituting manpower for energy*.

- (Steffen et al., 2007)** Steffen, W., Crutzen, P. J., & McNeill, J. R. (2007). The Anthropocene: Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 36(8), 614-621. [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2007\)36\[614:TAAHNO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36[614:TAAHNO]2.0.CO;2)
- (Urban Brussels, 2021)** Urban Brussels. (2021). Zin – Be.exemplary [Site d’information sur les projets exemplaire à Bruxelles]. *Urban.brussels, be.exemplary*. <http://beexemplary.brussels/zin/>
- (M. Vandebroucke et al., 2021)** Vandebroucke, M., Brancart, S., Roekens, J., de Wolf, C., Ost, T., Mallants, E., Van Daele, R., Humbeck, B., Maerckx, A.-L., Verbonck, J., Declercq, J., Girolami, D., Vanneste, J., Vrijders, J., Blykers, K., Goos, C., Rau, T., De Wael, J., Galle, W., ... Neven, R. (2021). *Circubuild: Livre de référence pour la construction circulaire* (Bureau Palindrome).
- (M. Vandebroucke & Brancart, 2020)** Vandebroucke, M., & Brancart, S. (2020). Catalogus veranderingsgericht bouwen: Functionele lagen. VU OVAM. <https://ovam.vlaanderen.be/documents/177281/310282/Veranderingsgericht+bouwen+Catalogus+LR+versie+juni+2020.pdf/9e7c6be3-6805-c8fe-ef8b-2a8ec103b92b?version=1.0&t=1653386384087&download=tru>.
- (M. L. Vandebroucke & Galle, 2015)** Vandebroucke, M. L., & Galle, W. (2015). Design for Change : Élaboration d’une politique et d’un cadre de transition (résumé). *OVAM*.
- (Willem, 2022)** Willem, Julien. (2022). *L’éco-conception des immeubles Munda : Cas concret et retour d’expérience*.

Webographie

BAMB :	https://www.bamb2020.eu/ .
Be.circular :	https://www.circulareconomy.brussels/ .
Be.exemplary :	http://beexemplary.brussels/ .
Build Circular	https://buildcircular.brussels/ .
Buildwise :	https://www.buildwise.be/fr/ .
C-CalC :	https://www.c-calc.be/fr/accueil/ .
Cenergie :	https://www.cenergie.be/index.php/fr .
Circubuild :	https://www.circubuild.be/fr .
Circulair Gebouwd :	https://circularbuilt.be/nl .
Circular Wallonia :	https://economiecirculaire.wallonie.be/ .
Construcity.Brussels :	https://www.construcity.brussels/ .
Embuild :	https://embuild.brussels/fr .
Environnement.Brussels :	https://environnement.brussels/ .
FCRBE :	https://vb.nweurope.eu/projects/project-search/fcrbe-facilitating-the-circulation-of-reclaimed-building-elements-in-northwestern-europe/ .
Guide Bâtiment durable .Brussels :	https://www.guidebatimentdurable.brussels/ .
GRO – Tool :	https://www.gro-tool.be/exemples/?lang=fr .
Interreg :	https://www.interreg-fwvl.eu/fr .
Opalis :	https://opalis.eu/fr .
OVAM :	https://ovam.vlaanderen.be/ .
Renolution.brussels :	https://renolution.brussels/fr .
Rotor DB :	https://www.rotordb.org/en .
Rotor DC :	https://rotordc.com/ .
Totem :	https://www.totem-building.be/pages/welcome.xhtml .
Urban.brussels :	https://urban.brussels/fr .

Table des illustrations

Figure 1 : schéma des différentes déclinaisons du déchet de construction tirées d'architecture et climat (source : Bos & Trachte, 2021).

Figure 2 : schéma de l'économie circulaire selon la fondation McArthur (source Towards a circular economy, 2015).

Figure 3 : schéma des modèles économiques (Source : Vlaanderen Circulair).

Figure 4 : Schéma des principes de l'économie circulaire dans la chaîne de valeur de la construction (source : (Romné & Vrijders, 2018).

Figure 5 : schéma des trois dimensions de la transformation d'un bâtiment selon E. Durmisevic. (source : Durmisevic, 2006, p. 93).

Figure 7 : cartographie de la littérature par rapport à la stratégie adaptable (Source : Schmidt et al ; 2010).

Figure 8 : schéma de différentes couches de cisaillement selon Brand .S (source : Brand, 1995).

Figure 9 : Tableau reprenant la stratégies des 9 R (source : Remkes, 2019, p. 5).

Figure 10 : hiérarchie des traitements de déchets (source : Fénard, 2021).

Figure 11: les 16 qualités architecturales pour une conception circulaire. (Source : Galle et al., 2019b).

Figure 12 : tableau des 23 directives orientées vers le changement (source: (OVAM, 2016, p. 2).

Figure 13 : schéma interprétant les sept principes de Canal Architecture (source : De Collignon et al., 2017).

Figure 14 : schéma des différentes couches et de leur durée de vie. (Source : Bruxelles Environnement, 2020).

Tableau

Tableau 1 : résumé des principes de conception à l'échelle du bâtiment.

Tableau 2 : résumé des principes de conception à l'échelle du composant.

Tableau 3 : résumé des principes de conception à l'échelle du matériau.

Tableau 4 : comparaison des niveaux d'échelles entre le chapitre 2 et la norme ISO NBN 20887.

Tableau 5 : similitudes entre les principes d'adaptabilité de la norme et les principes circulaires.

Tableau 6 : différences entre les principes d'adaptabilité de la norme et les principes circulaires.

Tableau 7 : similitudes entre les principes de démontabilité de la norme et des principes circulaires.

Tableau 8 : différences entre les principes de la norme d'adaptabilité et les principes circulaires.

Tableau 9 : description des principes de Cp D/A de la norme ISO NBN 20887.

Tableau 10 : Description des pistes d'amélioration en fonction de l'analyse du chapitre 3.

Tableau 11 : Analyse des pratiques d'adaptabilité en RW et RBC liées aux principes de Cp D/A et circulaires.

Tableau 12 : Analyse des pratiques de réversibilité technique en RW et RBC liées aux principes de Cp D /A et circulaires.

Tableau 13 : Analyse des pratiques de choix de matériaux en RW et RBC liées aux principes de Cp D /A et circulaires.

Tableau 14 : Analyse de la mise en place d'un document d'information par rapport aux indications de la norme ISO NBN 20887 et du concept de passeport matériaux.

Tableau 15 : comparaison de la Checklist de l'outil GRO avec les principes de Cp D/A de la norme ISO NBN 20887.

Tableau 16 : comparaison de la Checklist de l'outil Réversible Building Design Tools avec les principes de Cp D/A de la norme ISO NBN 20887.

Tableau 17 : comparaison des concepts du Projet Hôpital Joseph Bracops et principes de conception Cp D/A et circulaires.

Tableau 18 : comparaison des concepts du Projet MUNDO LLN et principes de conception Cp D/A et circulaires.

Tableau 19 : comparaison des concepts du Projet ZIN et principes de conception Cp D/A et circulaires.

Tableau 20 : Analyse du niveau de pratique des principes de conception d'adaptabilité et démontrabilité dans le secteur construction.

Tableau 21 : comparatif des Cp D/A de la norme ISO NBN 20887 présents dans les projets pilotes et les outils.

Tableau 22 : regroupement des réflexions pouvant améliorer la norme.