

Mémoire

Auteur : Bougha, Anne Claudia

Promoteur(s) : 2770; Andre, Philippe

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences et gestion de l'environnement, à finalité spécialisée

Année académique : 2023-2024

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/20876>

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.

ULIEGE - FACULTE DES SCIENCES - DEPARTEMENT DES SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT

UNI.LU – FACULTE DES SCIENCES, DE LA TECHNOLOGIE ET DE LA COMMUNICATION

**OPTIMISATION DE LA DECONSTRUCTION DES BATIMENTS EXISTANTS : UNE
APPROCHE HOLISTIQUE INTEGRANT LE MANAGEMENT DE PROJET ET LES
PRINCIPES D'ECONOMIE CIRCULAIRE**

Anne Claudia BOUGHA

MEMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DES DIPLÔMES DE

**MASTER EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT – FINALITE ENERGIES RENOUVELABLES ET
BATIMENTS DURABLES (ULIEGE)**

MASTER EN DEVELOPPEMENT DURABLE – FINALITE ENERGIE-ENVIRONNEMENT (UNI.LU)

ANNÉE ACADÉMIQUE 2022-2023

Rédigé sous la direction de Pr PHILIPPE ANDRÉ et Pr FRANK SCHOLZEN (UNI.LU)

COMITÉ DE LECTURE :

Anja Degens (Paul Wurth Geprolux S.A)

Copyright

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de l'Université de Liège et de l'Université de Luxembourg

L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'Université de Liège et de l'Université de Luxembourg

Le présent document n'engage que son auteur.

Auteur du présent document : boughanneclaudia@gmail.com

Remerciements

La rédaction d'un mémoire est un voyage académique qui m'a permis de comprendre l'importance cruciale du soutien et de la présence des personnes qui m'entourent. Ainsi, je souhaite exprimer ma profonde gratitude à toutes celles et ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

En premier lieu, je tiens à remercier chaleureusement mes encadrateurs, Anja Degens et Bianca Schmitt. Cette aventure intellectuelle n'aurait jamais atteint de tels sommets sans leur soutien indéfectible. Leur patience, leur écoute attentive, et leur rigueur académique m'ont permis de repousser mes limites et de viser l'excellence. Anja et Bianca, votre influence positive a été un phare dans les moments de doute.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance au Professeur Franck. Scholzen, dont l'encadrement perspicace a été d'une aide inestimable. Nos échanges fructueux ont illuminé ma compréhension du sujet, m'offrant des perspectives claires et précises. Merci, Professeur Scholzen, pour votre engagement et votre dévouement.

Un grand merci au Professeur André. Philippe, pour ses enseignements éclairants tout au long de ce cursus. Vos cours ont non seulement approfondi mes connaissances, mais m'ont aussi fait comprendre les enjeux majeurs de la filière des énergies renouvelables. Votre passion et votre expertise ont été une véritable source d'inspiration.

À ma famille, dont le soutien indéfectible a transcendé la distance. Un remerciement particulier à mes parents, qui n'ont jamais cessé de croire en moi. Leur amour et leur foi inébranlable m'ont donné la force de persévérer.

À mes amis et camarades Berthold Eyong., Sosthène Chagha., Aurélie Kwatcho., Arnold Kuate., Evran Fonhoue, Vos encouragements et votre présence bienveillante m'ont accompagné à chaque étape. Ensemble, nous avons surmonté de nombreux défis, et chaque moment partagé a enrichi cette période.

À mes collègues de PWGP S.A merci pour votre soutien en entreprise. Les moments inoubliables passés avec vous ont été autant d'occasions d'apprendre et de grandir. Votre présence et votre aide ont été des atouts précieux dans cette étape professionnelle

Résumé

L'étude de la déconstruction des bâtiments anciens dans une perspective d'économie circulaire nécessite une évaluation rigoureuse, car elle s'inscrit dans les objectifs européens de valorisation de 70 % des déchets de déconstruction (réemploi, réutilisation et recyclage). Ce travail avait pour but de promouvoir une telle approche en analysant la déconstruction du bâtiment de l'OAS et en proposant une méthodologie adaptée pour les futures déconstructions. L'évaluation des matériaux a démontré que, sur base de la réglementation en vigueur et grâce à la méthodologie du CRTI-B appliquée à la déconstruction de l'OAS, 65 % des fournitures et du mobilier ont été réemployés, et 98 % des déchets inertes ont été recyclés. Cependant, le béton est le seul matériau dont le processus de valorisation a été précisément évalué, incluant son concassage sur site et sa réutilisation comme fond de fouille et remblai pour la stabilisation du talus de la CFL ce type de recyclage est considéré comme du Downcycling. L'Analyse du Cycle de Vie (ACV), centrée sur le potentiel de réchauffement global (GWP), a permis de calculer les émissions potentielles de CO₂ pour trois scénarii : le recyclage sur site, le recyclage hors site, et l'utilisation de matériaux neufs. Les résultats ont montré que le concassage sur site, avec 3.922 kg CO₂ eq, est moins émetteur que le recyclage hors site (15.266 kg CO₂ eq), tandis que la production de matériaux neufs atteint 1.550.707 kg CO₂ eq, ce qui indique que cette dernière option est à éviter. Il est important de noter que ces calculs ne prennent pas en compte tous les facteurs pertinents (tels que le transport à vide, le type d'équipement de concassage, ou la fabrication des machines). Cependant, ils offrent une première estimation des émissions potentielles associées à ce type de procédé, soulignant l'importance de l'économie des ressources par la réintégration des matériaux dans le cycle d'utilisation. Enfin, une méthodologie de déconstruction basée sur le BIM a été proposée pour le futur projet de déconstruction du Siège social de Paul Wurth. Cette approche, inspirée des défis rencontrés lors de la déconstruction de l'OAS, recommande une modélisation 3D aussi complète que possible, afin de minimiser les écarts entre les quantités de matériaux estimées et celles réellement générées sur site, optimisant ainsi la gestion des ressources et évitant des coûts supplémentaires.

Abstract

The study of deconstructing old buildings through the lens of circular economy principles requires careful evaluation, as it aligns with the European objectives of achieving at least 70% valorization of deconstruction waste (reuse, recycling, and recovery). This research was conducted to promote such an approach by analyzing the deconstruction of the OAS building and proposing a methodological framework for future deconstruction projects. The assessment of materials revealed that, under the CRTI-B methodology applied to the OAS building deconstruction, 65% of furnishings and 98% of inert waste could be reused and recycled, respectively. However, concrete was the only material whose valorization process was thoroughly evaluated, including its on-site crushing and reused as backfill and for stabilizing the CFL slope considered like Downcycling. A Life Cycle Assessment (LCA) focused on the Global Warming Potential (GWP) was conducted to estimate the potential CO₂ emissions for three scenarios: on-site recycling, off-site recycling, and the use of new materials. The results indicated that on-site crushing, with 3.922 kg CO₂ eq, emits less than off-site recycling (15.266 kg CO₂ eq), while the production of new materials reached 1.550.707 kg CO₂ eq, suggesting that this last option should be avoided. It is important to note that these calculations do not account for all relevant factors (such as empty transport, the type of crushing equipment, or machinery manufacturing). However, they provide an initial estimate of the potential emissions associated with this type of process, highlighting the importance of resource conservation through the reintegration of materials into the usage cycle. Finally, a deconstruction methodology based on BIM was proposed for the future deconstruction of the Paul Wurth Headquarters. This approach, inspired by the challenges faced during the OAS building deconstruction, recommends a highly detailed 3D model to minimize discrepancies between the estimated and actual quantities of materials generated on-site, thereby optimizing resource management and avoiding additional costs.

Table des matières

1	Introduction.....	1
1.1	Problématique.....	2
1.2	Objectif.....	3
2	Revue de littérature	4
2.1	Définition et contexte de la déconstruction.....	4
2.1.1	Étapes de la déconstruction	5
2.1.1.1	Test de déconstruction	7
2.1.2	Inventaire des matériaux	8
2.1.2.1	Définition et contexte.....	8
2.1.2.2	Description de la méthode.....	9
2.1.3	Méthode de traitement des déchets	11
2.1.3.1	Définition des concepts	11
2.1.3.2	Déchets de construction.....	13
2.1.3.3	Traitement des déchets de déconstruction.....	16
2.1.4	Les décharges.....	22
2.2	Principes de gestion de projets appliqués à la déconstruction.....	22
2.2.1	Concepts de gestion des projets et importance dans la déconstruction des bâtiments existants	22
2.2.2	Méthodologies et outils spécifiques utilisés dans la gestion de projets de déconstruction	23
2.3	Economie circulaire et son application dans la déconstruction des bâtiments	24
2.3.1	Définition et importance de l'économie circulaire	24
2.3.2	Principes de l'économie circulaire	25
2.3.3	Economie circulaire et environnement	26
2.3.3.1	La méthodologie de l'ACV	26
2.4	Loi et réglementation de la gestion des déchets de construction et de déconstruction.....	28
2.4.1	Réglementations et stratégie au Européens[1].....	28
2.4.2	Loi Luxembourgeoise sur les déchets	29
2.4.3	Autorisations.....	33
2.4.3.1	Les établissements classés.....	34

2.4.3.2	Autorisation mouvement des déchets	35
2.5	Saisie digitale pour la déconstruction et BIM	36
3	Méthodologie	37
3.1	Scénario 1 : démolition/ déconstruction du projet de la CNS	37
3.1.1	Présentation du bâtiment.....	38
3.1.2	Interview	41
3.1.3	Méthodologie de démolition/déconstruction	42
3.1.3.1	Inventaire	46
3.1.4	Tri et stockage des déchets.....	51
3.1.5	Analyse du cycle de vie (Hypothèse transport)	53
3.1.5.1	Méthodologie d'Analyse du GWP.....	53
3.1.6	Résultats du projet	56
3.1.6.1	Comparaison des quantités.....	58
3.1.6.2	Gestion des déchets.....	60
3.1.6.3	Gestion du stockage.....	61
3.1.6.4	Résultats Hypothèse ACV	63
3.1.7	Performances et enjeux.....	64
3.1.7.1	Evaluation des actions	64
3.1.7.2	Challenges	65
3.2	Scénario 2 : étude de cas de la démolition/ déconstruction du projet du siège social de l'entreprise Paul Wurth S.A.....	66
3.2.1	Présentation du bâtiment siège social PW S.A.	66
3.2.2	Méthodologie de déconstruction de Paul Wurth S.A	68
4	Résultats et Discussion	76
4.1	Prise en compte de la méthodologie de L'OAS.....	77
4.2	Prise en compte l'approche méthodologique de déconstruction du S.S.P.W. .	78
4.3	Analyse du cycle de vie	80
4.4	Limites de la méthodologie BIM.....	81
5	Conclusion.....	82
6	Bibliographie.....	84

Liste des figures

Figure 1: Déroulement des étapes de déconstruction[5]	5
Figure 2: Diagramme de flux des acteurs principaux de la déconstruction[1]	7
Figure 3: Transferts d'informations pour inventaire réemploi[17].....	11
Figure 4: Catégorisation des déchets et code couleur[17]	12
Figure 5: Triangle des ressources construction/déconstruction [27].....	16
Figure 6: Recyclage des gravats de béton usagé[28]	17
Figure 7: Concassage de béton[28]	17
Figure 8: Broyage [28].....	18
Figure 9: Processus de recyclage du verre plat[32]	21
Figure 10: Cycle biologique et technologie[20].....	25
Figure 11: Phases du cycle de vie dans le secteur de la construction[40].....	27
Figure 12 : Bâtiment principal (Projet OAS)	39
Figure 13 : Pavillon modulaire	39
Figure 14: Organigramme projet de déconstruction de l'OAS (Projet OAS-PWGP).....	41
Figure 15: Diagramme de flux des CTG du CRTIB	43
Figure 16: Flux général de déconstruction (Projet OAS).....	44
Figure 17: Planning de déconstruction de l'OAS (projet OAS-PWGP).....	46
Figure 18: Maquette Revit du bâtiment de l'OAS (projet OAS-PWGP)	47
Figure 19: Isolation des couches béton (projet OAS-PWGP).....	48
Figure 20: Identification des objets sur la plateforme NAVVIS	51
Figure 21: Tri des métaux.....	52
Figure 22: Tri des dalles	52
Figure 23: Comparaison des quantités de matériaux évalués.....	59
Figure 24: Siège Social Paul Wurth S.A (photo P.W)	66
Figure 25: Approche Méthodologique de déconstruction S.S P.W.	73
Figure 26: Concassage sur site de recyclage	75
Figure 27: Production du béton recyclé	75
Figure 28: Bloc de béton produit	75
Figure 29: Récapitulatif des méthodes de traitement des déchets de l'OAS	76

Figure 30: Déchets de déconstruction générés	76
Figure 31: Stratégie de communication pour les matériaux à réemployerr[52]	80
Figure 32: Limites du modèle BIM.....	81

Liste des tableaux

Tableau 1: Inventaire des matériaux.....	9
Tableau 2: Déchets de construction et code EURAL	14
Tableau 3: méthodologie de déconstruction par phase.....	23
Tableau 4: Types de déchets et de transfert de déchets.....	35
Tableau 5: Description du bâtiment	39
Tableau 6 : Comptabilisation des couches bétons (projet OAS-PWGP)	48
Tableau 7: Récapitulatif inventaire de matériaux	49
Tableau 8: fiche d'identification du mobilier	50
Tableau 9: Définition des paramètres	55
Tableau 10: Quantité de déchets évalués.....	57
Tableau 11: Evaluation des fournitures.....	57
Tableau 12: Méthodes de recyclage des enrobes (Projet OAS-rapport Géoconseils).....	61
Tableau 13: ACV, Module C2-béton OAS	63
Tableau 14: Description détaillée du bâtiment	67
Tableau 15: base de la future méthodologie S.S. PW.....	68

Liste des abréviations

ACV : Analyse du cycle de vie

AEV : Administration de l'Environnement

CFL : Chemin de Fer Luxembourgeois

CRTI-B : Centre de Ressources des Technologies et de l'Innovation pour le Bâtiment

EC : Economie circulaire

OAS : Office des Affaires Sociales

PWGP : Paul Wurth Geprolux

S.S.PW. : Siège Social Paul Wurth

UE : Union Européenne

1 Introduction

L'Union Européenne (UE) a révélé des données préoccupantes sur la construction et l'exploitation des bâtiments, mettant en évidence leurs impacts environnementaux majeurs[1]. Les bâtiments dans l'UE représentent 50% de l'extraction totale de matériaux, 33% de la consommation d'eau, 40% de la demande en énergie, 36% des émissions de gaz à effet de serre et 38% des déchets produits[2]. Ces chiffres illustrent la nécessité impérieuse de mettre en place des pratiques de construction/déconstruction durables.

La gestion des déchets de déconstruction / démolition est un enjeu avoué comme majeur par la Commission européenne comme en témoignent les objectifs imposés par la Directive cadre 2008/98/CE sur les déchets[3]. Cet enjeu est également rappelé au niveau du Luxembourg par la loi modifiée du 21 mars 2012 relative à la gestion des déchets. Aussi, les matières premières se font de plus en plus rare et subissent des fluctuations de prix [4]. La déconstruction sélective, se présente donc comme une solution qui vise à obtenir des flux de matériaux destinés à un traitement optimal et à une remise en circulation[2]. Cependant, malgré ces initiatives, 54% des matériaux issus de la déconstruction sont encore envoyés en décharge. Ainsi, les acteurs du secteur de la construction, de l'énergie et du développement durable cherchent à diminuer la production de déchets et à promouvoir le réemploi, la réutilisation et le recyclage dans une perspective d'économie circulaire (EC)[5].

Dans ce cadre, les anciens bâtiments en fin de vie doivent être considérés comme des stocks de matières premières et plus comme des sources de déchets. De plus, au regard du contexte actuel (crise énergétique, problème de disponibilité des ressources naturelles, crise du logement), il est urgent que la transition vers l'économie circulaire dans le secteur de la déconstruction s'accélère[4].

L'un des principaux défis actuels de la déconstruction est le fait que les bâtiments existants n'aient pas été pensés et conçus dans une logique de déconstruction future[6]. Cependant plusieurs améliorations se font continuellement dans ce secteur. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail. Avec pour objectif d'organiser la déconstruction future d'un bâtiment vieillissant tout en implémentant une méthodologie efficace pour améliorer

les processus de déconstruction permettant de maximiser le réemploi, la réutilisation et le recyclage, de gestion des déchets, facilitant l'organisation circulaire et le réemploi la réutilisation et le recyclage des matériaux.

1.1 Problématique

La gestion des ressources devient d'autant plus cruciale lorsqu'on considère qu'au niveau européen, 10 à 15 % des ressources extraites pour la construction ne sont jamais utilisées et 54 % des matériaux issus de la démolition sont envoyés en décharge. Il est donc dans l'intérêt des acteurs du secteur de trouver des approvisionnements alternatifs aux matériaux neufs et de développer des solutions de gestion des ressources afin de réduire le risque de pénurie de matières premières[1].

En théorie, le secteur de la construction est celui qui peut absorber la totalité des déchets qu'il produit[7]. Mais il est difficile pour l'ingénierie civile de réutiliser des matériaux de construction devenus déchets sans compromettre la qualité de la déconstruction. Il est de ce fait essentiel de mettre en place des méthodologies pratiques pour optimiser le réemploi, la réutilisation et le recyclage[7].

Dans le cadre de l'économie circulaire, les anciens bâtiments doivent être perçus comme des réserves de matières premières à la fin de leur cycle de vie, plutôt que simplement comme des sources de déchets. Le réemploi des éléments de déconstruction, la préparation en vue de la réutilisation, et le recyclage des déchets générés peuvent non seulement réduire les besoins en matières premières, mais aussi contribuer à des économies substantielles en CO₂[8].

Paul Wurth S.A. est une entreprise basée au Luxembourg avec 150 ans d'histoire dans l'industrie du fer et de l'acier. Au vu de l'ancienneté des bâtiments centraux de cette entreprise, une déconstruction future de celle-ci est en cours de planification. Aussi, le nouveau plan directeur pour le quartier Hollerich de la ville de Luxembourg rend nécessaire une réaffectation du terrain et donc la démolition du bâtiment PW existant. Un nouveau campus avec des bureaux et d'autres offres pour le quartier est actuellement en cours de planification. Ainsi, suivant la stratégie de l'économie circulaire[4] du Luxembourg, les bâtiments, même anciens doivent être déconstruits selon les principes de l'économie circulaire. Cette approche novatrice soulève plusieurs questions

essentielles auxquelles ce travail devra répondre pour la déconstruction future des bâtiments centraux de Paul Wurth. Par conséquent, comment optimiser les processus de déconstruction pour améliorer la récupération des matériaux, réduire les déchets mis en décharge et encourager des pratiques durables ? En quoi la gestion de ce type de projet nécessite-t-elle de suivre des phases bien définies pour atteindre les objectifs fixés ? Quelles nouvelles approches peuvent être mises en œuvre dans ce contexte et quelles seraient leurs valeurs ajoutées ?

1.2 Objectif

Cette étude vise à développer une procédure complète pour la déconstruction future du siège social de société Paul Wurth, en accord avec les principes de l'économie circulaire. Elle a également pour objectif d'examiner les défis et les limitations de la déconstruction traditionnelle, d'explorer des techniques et technologies innovantes, et d'analyser les cadres réglementaires et politiques favorisant l'intégration des principes de l'économie circulaire dans la déconstruction des bâtiments anciens. De plus, ce travail fournira des perspectives stratégiques et des recommandations pour les projets de déconstruction et pour les nouveaux projets de construction.

Spécifiquement il s'agit :

- Analyser la littérature sur les méthodologies de déconstruction intégrant l'économie circulaire ;
- Analyser la déconstruction de l'ancien bâtiment de l'Office des Affaires Sociales (OAS) ;
- Identifier les challenges relatifs à la déconstruction du bâti ancien ;
- Proposer une méthodologie de déconstruction du bâtiment central de Paul Wurth basée sur une approche circulaire ;
- Explorer le rôle des méthodes digitales (BIM); dans le soutien à la déconstruction
- Evaluer des méthodes pour promouvoir l'utilisation à long terme des éléments de déconstruction.

2 Revue de littérature

Ce chapitre visait à présenter et définir les concepts liés à la déconstruction, à l'économie circulaire et à la gestion de projet, afin de poser les bases des analyses développées dans les sections suivantes.

2.1 Définition et contexte de la déconstruction

Le terme de déconstruction, regroupe les concepts de déconstruction sélective et de démolition mécanisée, nécessaires pour démanteler les structures renforcées de certains bâtiments, y compris leurs fondations. Le guide de la déconstruction rédigé par le LIST(Luxembourg Institute of Science and Technology) [5] l'a définie comme un ensemble de travaux qui impliquent un enlèvement partiel ou total des éléments d'un bâtiment. Elle inclut une évacuation de matériaux d'un chantier de déconstruction selon une séquence prédéfinie afin d'optimiser le taux de réemploi, de valorisation et de recyclage. Dans l'ancien temps (il y'a environ 150 ans), les méthodes de déconstruction des bâtiments étaient principalement manuelles, utilisant des outils simples comme les marteaux et les scies[9]. Les matériaux tels que le bois, les briques, les pierres et les métaux étaient souvent récupérés et réutilisés dans de nouvelles constructions ou fondus pour de nouveaux usages. Les artisans jouaient un rôle clé en transformant ces matériaux récupérés en produits utilisables[9]. Les pratiques de réutilisation et de recyclage étaient motivées par la valeur économique des matériaux, plutôt que par des préoccupations environnementales. Les audits pré-démolition, le tri sélectif et la documentation des matériaux, tels que pratiqués aujourd'hui, étaient moins formalisés à l'époque[10]. Par ailleurs, il y'a deux décénies, la déconstruction se faisait d'une autre manière. Un seul engin était utilisé pour toute la démolition[11]. Les déchets étaient mélangés et partaient en décharge de manière indifférenciée et un possible tri était effectué une fois arriver en décharge.

La déconstruction aujourd'hui se fait avec l'objectif d'obtenir des flux de matières « propres » et « homogènes » (c'est-à-dire sans contamination pouvant contraindre à un traitement) afin de les envoyer hors du site vers des filières de traitement optimales[2].

Le Vademécum bâtiment circulaire rédigé par Bruxelles Environnement[2], préconise que la déconstruction des éléments se fasse avec les outils adéquats et en adoptant les mesures de sécurité qui s'imposent. Les déchets dangereux devront être déconstruits en priorité afin d'éviter toute contamination des ouvriers et autres matériaux à gérer[2]. Pour des cas potentiellement compliqués, il peut être utile de prévoir des tests préalables de démontage afin de s'assurer de la démontabilité des éléments.

2.1.1 Étapes de la déconstruction

La déconstruction suit un protocole détaillé, généralement divisé en plusieurs étapes. Dans un tableau (Annexe 1 donner un peu plus de détails de cette fiche) retrouvé dans le guide de la déconstruction rédigé par le LIST en collaboration avec l'administration de l'environnement (AEV) sont récapitulés les étapes d'un chantier de déconstruction incluant les obligations, les responsabilités, les acteurs, les actions et les documents y afférents. Les acteurs du secteur s'en servent lors de la réalisation de leurs travaux de déconstruction. En complément à ce tableau, le schéma ci-après est également un descriptif de la déconstruction sur chantier.

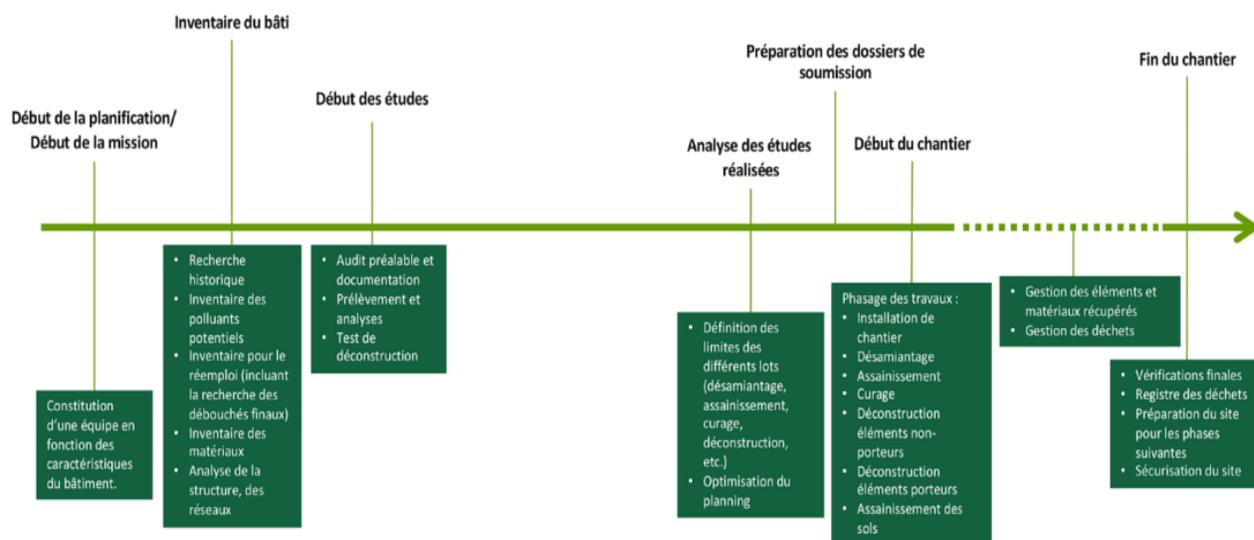


Figure 1: Déroulement des étapes de déconstruction[5]

À noter qu'il existe plusieurs techniques de déconstruction :

- Déconstruction manuelle : bien que plus précise pour certains éléments et pouvant permettre une meilleure récupération des matériaux, elle est très lente et coûteuse en main-d'œuvre.
- Explosifs et détonations de gaz : utilisée surtout pour de très grandes structures, cette méthode nécessite des précautions extrêmes en matière de sécurité et peut causer des dommages collatéraux importants.
- Thermique et chimique : ces méthodes sont souvent coûteuses et nécessitent des précautions particulières pour manipuler les produits chimiques ou les équipements de coupe thermique. Elles sont moins couramment utilisées pour les démolitions générales.
- La déconstruction mécanique est un processus de démolition qui utilise des machines lourdes telles que des pelles mécaniques, des grues et des bulldozers pour démanteler les structures de manière rapide et efficace.

La déconstruction mécanique, sujet de cette étude, combine rapidité, sécurité, coût-efficacité et possibilités de recyclage, ce qui en fait une option privilégiée pour la majorité des projets de démolition[12]. Les étapes précédemment citées (figure 1) sont donc suivies lors de la déconstruction mécanique.

Les travaux de déconstruction nécessitent une cohésion entre les acteurs. Pour comprendre cette cohésion, le diagramme de flux[1] ci-après montre les différents liens qui existe entre les principaux acteurs.

2.1.2 Inventaire des matériaux

2.1.2.1 Définition et contexte

Lors de la déconstruction, un accent particulier est porté sur une phase clé : l'inventaire. Elle correspond à la liste des matériaux de construction et de déconstruction (y compris les déchets problématiques) réalisée avant la déconstruction ou la rénovation de bâtiments ou d'infrastructures[5]. Cette étape est établie à la suite des obligations de la loi modifiée du 09 juin 2022 relative aux déchets. L'inventaire évalue tant qualitativement que quantitativement les matériaux qui seront produits par un bâtiment destiné à être déconstruit ou rénové. L'établissement de l'inventaire incombe au maître d'ouvrage[5]. En cas de projets de déconstruction de bâtiments ayant un volume bâti supérieur ou égal à 3500 mètres cubes, cet inventaire doit être réalisé par un expert en la matière[14].

Dans cette même logique, l'article 26 de la loi Luxembourgeoise modifiée du 21 mars 2012 relative à la gestion des déchets (développer dans la partie 2.4) précise que sur un chantier de démolition, un inventaire des matériaux doit être établi et présenté à l'Administration de l'Environnement (AEV) sur simple demande. C'est un important instrument de planification pour une bonne gestion des ressources. Les informations de ce document devront donc être actualisées pendant le démantèlement. Le niveau de détail de l'inventaire doit être évalué le plus tôt possible et peut varier d'un projet à un autre. L'inventaire doit prioriser les matériaux présents sur site en quantité élevée[15]. Des fiches de travail du modèle d'inventaire ont été établies par le LIST et sont généralement remplies lors du processus. Les informations suivantes doivent y être renseignées :

- La description du bâtiment et de son utilisation (fiche N°1) ;
- L'inventaire proprement dit (fiche N°2) ;
- Check List des polluants.

Le tableau ci-après représente la fiche numéro 2. Dans lesquelles sont renseignées les quantités de matériaux disponibles, le type valorisation et d'autres information permettant de programmer au mieux la déconstruction et le processus de traitement des déchets. Les autres fiches sont identifiables en annexes.

démantèlement, les tickets de pesages permettent l'enregistrement des quantités de matériaux réellement identifiés[5].

Pour résumer, les tâches suivantes sont incluses dans l'établissement d'un inventaire[17] :

- Collecte et assimilation des informations déjà disponibles sur le bâtiment comme les plans du site et les relevés existants, dessins, rapports d'études sur les contaminants, etc. ;
- Visites de sites et de bâtiments, pour recueillir des informations supplémentaires sur la nature et l'état des matériaux utilisés et pour l'analyse des matériaux. La visite doit également être utilisée pour confirmer les soupçons déjà existants de contamination et, le cas échéant, pour justifier des enquêtes d'ingénierie formelles, par exemple, l'analyse en laboratoire des échantillons de matériaux de construction ;
- Estimation et appréciation des volumes de matériaux ;
- Appréciation des propriétés des matériaux, afin de pouvoir juger de leur aptitude à la réutilisation ou au recyclage et pour permettre, sur site, la séparation par tri.

Pour une bonne évaluation des travaux il y'a lieu de distinguer deux types d'inventaires : l'inventaire des éléments en vue du réemploi (non strictement obligatoire) et l'inventaire général des éléments et matériaux avant la déconstruction précédemment décrit.

Inventaire en vue du réemploi peut se faire en trois (03) étapes[5] :

- L'identification des produits potentiellement réemployables par analogie avec des produits couramment récupérés ou par évaluation via un questionnaire ;
- La qualification des produits en rassemblant les informations nécessaires ;
- Le partage des données récoltées aux potentiels futurs utilisateurs.

La figure 3 ci-après précise comment le transfert des informations lors de la réalisation d'un inventaire pour le réemploi peut être effectué.

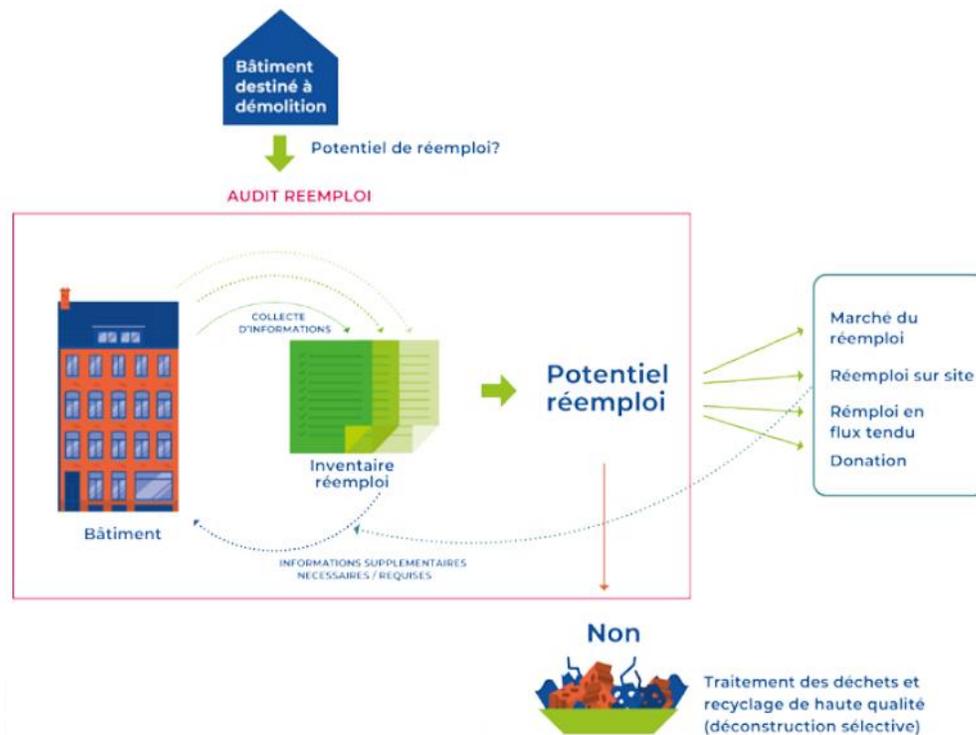


Figure 3: Transferts d'informations pour inventaire réemploi[17]

2.1.3 Méthode de traitement des déchets

2.1.3.1 Définition des concepts

Selon la loi modifiée du 21 Mars 2012 relative à la gestion des déchets[18], transposition de la directive 2008/98/CE du parlement européen, un déchet est défini comme « toute substance ou objet dont le détenteur se défait ou a l'intention ou l'obligation de se défaire ». Selon leur origine et leurs natures, ils peuvent être classés en différentes catégories :

- Déchets dangereux : présentant un risque pour la santé humaine et pour l'environnement (déchets contenant des substances toxiques)
- Déchets non dangereux : ne présente aucun danger particulier
- Déchets municipaux : produits par les ménages ainsi que les déchets similaires en termes de nature et de composition, produits par des sources commerciales, industrielles et institutionnelles.

- Déchets inertes : qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante.

La figure 4 ci-dessous démontre cette catégorisation en fonction d'un code couleur qui est suivi dans toute l'union européenne.

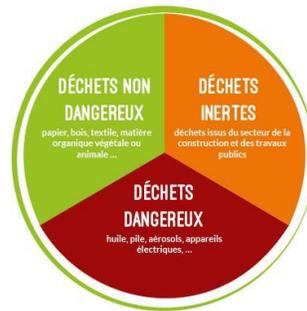


Figure 4: Catégorisation des déchets et code couleur[17]

Les concepts suivants ont été définis dans la loi Luxembourgeoise du 21 mars 2012 relative aux déchets (Loi déchets) :

Réemploi : toute opération par laquelle des produits ou des composants qui ne sont pas des déchets sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus. Le réemploi des matériaux et des composants issus du secteur de la construction permet de réduire à la fois la consommation de ressources abiotiques, l'énergie pour fabriquer les produits, la quantité de déchets et les pollutions engendrés par le secteur de la construction[19].

Recyclage : toute opération de valorisation par laquelle les déchets sont retraités en produits, matières ou substances aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins. Cela inclut le retraitement des matières organiques, mais n'inclut pas la valorisation énergétique, la conversion pour l'utilisation comme combustible ou pour des opérations de remblayage.

Réutilisation : toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui sont devenus des déchets sont utilisés de nouveau. (Loi sur les déchets)

Valorisation : toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles en remplaçant d'autres matières ou de produits qui auraient été utilisées à une fin particulière, ou que des déchets soient préparés pour être utilisés à cette fin, dans l'usine ou dans l'ensemble de l'économie.

Enfouissement : opération d'élimination consistant à déposer des déchets sur ou sous le sol. Cette méthode est considérée comme une dernière option après que les possibilités de réemploi, de recyclage, de réutilisation et de valorisation ont été épuisées.

Une synthèse des différences entre réemploi et les différentes sortes de valorisation des déchets a été mise en exergue dans la stratégie Null offall Letzerbuerg[20].

Upcycling : processus de transformation des déchets ou des produits usagés en nouveaux matériaux ou objets de meilleure qualité ou de valeur supérieure à l'original[21]. Contrairement au recyclage traditionnel, où les matériaux sont souvent dégradés, l'upcycling vise à préserver et à améliorer la valeur intrinsèque des matériaux[22]. Ce concept s'inscrit dans une démarche de durabilité en prolongeant la durée de vie des ressources tout en réduisant la nécessité de nouvelles matières premières. Les produits issus de l'upcycling sont généralement perçus comme étant plus écologiques et créatifs, offrant une seconde vie à des objets initialement destinés à être jetés[4].

Downcycling : processus de recyclage où les matériaux sont réutilisés, mais de manière à perdre de la qualité ou de la valeur par rapport à leur forme originale[22]. Au lieu d'améliorer les caractéristiques du matériau, le downcycling entraîne une dégradation de ses propriétés, le rendant apte à être utilisé pour des applications moins exigeantes. Par exemple, le recyclage du plastique ou du papier peut conduire à une diminution de la qualité du matériau recyclé, le rendant moins apte à être réutilisé dans sa fonction première[4]. Le downcycling permet de réduire les déchets, mais il ne préserve pas autant la valeur des matériaux que l'upcycling.

2.1.3.2 Déchets de construction

Une planification minutieuse doit être faite en amont, un tri minutieux doit être fait sur site et plus en aval une valorisation maximale des matériaux est essentielle pour réduire les pressions faites sur les ressources et minimiser l'impact environnemental.

Les déchets inertes constituent la fraction la plus importante de la production totale de déchets de construction et de démolition [23].

La majorité des déchets inertes provient des terres d'excavation, représentant environ 93% des déchets de construction et de démolition en 2015[24]. Cette forte proportion est due à deux facteurs principaux : l'excavation de terres non valorisables, notamment dans le sud du Luxembourg, et un taux élevé d'activités de construction sans considération suffisante des terres d'excavation. Bien que la prévention de ces terres soit exigée par l'article 26 de la loi modifiée du 21 mars 2012 sur les déchets, elle est souvent négligée lors de la planification des grands projets[25].

Les déchets inertes non contaminés sont principalement traités au Luxembourg, tandis que les déchets contaminés doivent être traités à l'étranger en raison de l'absence d'installations appropriées au Luxembourg[3].

Les déchets de déconstruction sont ceux générés au cours du démontage systématique des structures d'un bâtiment existant suivant une logique de récupération des matériaux. Le code correspond à une y liste réalisée par la commission européenne dans l'optique de classer environ 1000 types de déchets à l'aide d'un code à 6 chiffres et 20 catégories principales[16]. Des sous-catégories basées sur leurs caractéristiques spécifiques sont également relevées. Chaque déchet est identifié par une séquence de six chiffres : les deux premiers indiquent la catégorie d'origine, les deux suivants précisent le secteur d'activité ou le procédé d'où il provient, et les deux derniers identifient le déchet lui-même. Un astérisque (*) marque les déchets dangereux, ceux présentant une ou plusieurs caractéristiques de dangerosité. La catégorie 17 (Tableau 2) correspond aux déchets de construction et de démolition (y compris les déblais provenant des sites contaminés).

Tableau 2: Déchets de construction et code EURAL[16]

Catégorie	Types	Code CED
17 01 : Béton, briques, tuiles et céramiques	Béton	17 01 01
	Mélanges ou fractions séparées de béton, briques, tuiles et céramiques contenant des substances dangereuses	17 01 06*

17 02 : bois, verre et matières plastiques	Bois	17 02 01
	Verre	17 02 02
	Matières plastiques	17 02 03
	Bois, verre et matières plastiques contenant des substances dangereuses ou contaminés par de telles substances	17 02 04*
17 04 : Métaux (y compris leurs alliages)	Aluminium	17 03 01*
	Fer et acier	17 03 02
	Métaux en mélange	17 04 07
	Déchets métalliques contaminées par des substances dangereuses	17 04 09*
17 06 : matériaux d'isolation et matériaux de construction contenant de l'amiante	Matériaux d'isolation contenant de l'amiante	17 06 01*
	Autres matériaux d'isolation à base de ou contenant des substances dangereuses	17 06 03*
1703 mélanges bitumineux, goudron et produits goudronnés	Mélanges bitumineux contenant du goudron	170301
	Mélanges bitumineux autres que ceux visés à la rubrique 17 03 01	170302

La hiérarchie de traitement des déchets insiste sur le fait qu'un ordre de traitement doit être respecté en matière de prévention et de gestion. La prévention vise à éviter la production de déchets. Le réemploi prolonge la durée d'utilisation d'un produit. Le recyclage préserve la valeur des composants d'un produit ou d'un matériau. La valorisation inclut, entre autres, l'incinération avec récupération d'énergie pour générer de l'électricité. À l'extrémité inférieure de la hiérarchie, l'élimination, incluant la mise en décharge, est considérée comme la solution de dernier recours lorsque d'autres formes de traitement ne sont pas possibles[26].

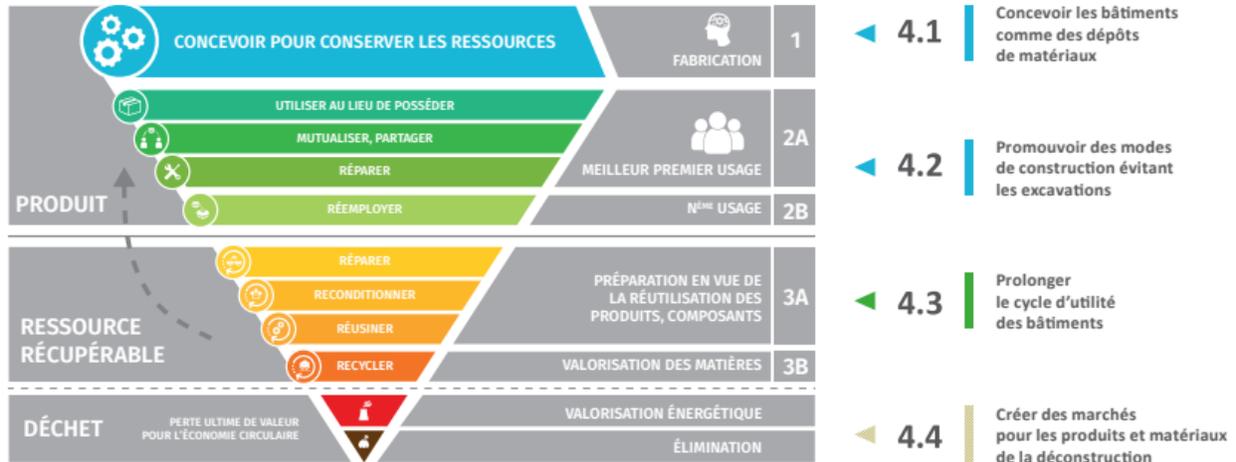


Figure 5: Triangle des ressources construction/déconstruction [27]

2.1.3.3 Traitement des déchets de déconstruction

Le Luxembourg dispose des infrastructures autorisées à entreposer les déchets préalablement à leur valorisation ou élimination. Celles-ci sont utilisées par les collecteurs et les transporteurs de déchets dans le cadre de leurs activités. La condition afin de mieux valoriser les déchets est d'éviter les mélanges. Lorsqu'aucune solution de recyclage ou valorisation n'a pu être trouvée, les déchets sont classés dans des installations de stockage.

- Cas du béton

Le processus de recyclage du béton varie d'un projet à un autre et la meilleure méthode dépend de la taille et de la forme des pièces de béton à recycler.

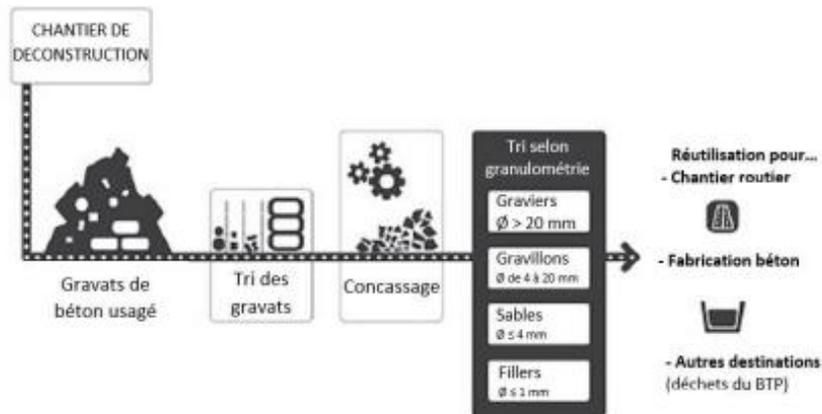


Figure 6: Recyclage des gravats de béton usagé[28]

Cette pratique génère des coûts économiques (transport, transformation et traitement, et investissement en engins et infrastructures) et une consommation des énergies fossiles. Les techniques de recyclage du béton dépendent du type de déchet de béton et de l'objectif de recyclage. Les techniques connues sont : le concassage et le broyage[28].



Figure 7: Concassage de béton[28]

Le concassage est une technique qui consiste à réduire les déchets de béton en granulats. Ces granulats peuvent être utilisés pour la fabrication de nouveaux bétons ou pour d'autres applications telles que les remblais ou les sous-bassement de routes. Le processus de concassage peut être réalisé sur le chantier (in situ) ou dans des installations spécialisées[28].

Le broyage consiste en la réduction des déchets de béton en poudre fine, appelée ciment recyclé qui peut être utilisé comme matière première pour la fabrication de nouveaux

ciments ou comme stabilisateurs de sols. Les opérations de broyage sont réalisées dans des installations spécialisées.



Figure 8: Broyage [28]

- Cas des métaux

Du fait de leur propriétés intrinsèques, les métaux sont couramment employés dans la construction. Ce sont des matériaux utilisés pour les structures, les armatures et autres renforcements. Un produit métallique arrivé en fin de vie peut être recyclé dans sa totalité. Plus de 95% des produits métalliques utilisés dans les bâtiments sont récupérés par des entrepreneurs. Selon la constitution du produit métallique, le recyclage permet, contrairement à une production primaire des économies d'énergie allant de 60% à 95% ce qui constitue un avantage tant pour l'économie que pour l'environnement. [29]

L'acier est un alliage de fer et de carbone dont la proportion massique est comprise entre 0,02% et 2 %. L'acier inoxydable (acier inox) comporte moins de 1,2 % de carbone et plus de 10,5 % de chrome. L'une de ses propriétés remarquables est d'être peu sensible à la corrosion et de ne pas s'oxyder (rouiller).

L'aluminium est un métal blanc léger. Il s'agit du métal le plus abondant de l'écorce terrestre et le plus employé après le fer. Il existe deux types d'alliages d'aluminium : les alliages d'aluminium de corroyage (destinés pour la majorité à être transformés par des techniques de laminage, filage, matriçage, forge, etc.) et les alliages d'aluminium de fonderie (ou K alliages légers L, destinés à être transformés par des techniques de fonderie)[29].

Les étapes de recyclage des métaux[30] sont établies comme suit :

- Le tri : des opérations de tri permettent la séparation de ceux-ci dans des bennes dédiées en vue de leur recyclage. De ce fait, les métaux ferreux sont séparés des non ferreux
- La collecte : des entreprises de recyclage spécialisées dans les matières métalliques collectent et acheminent les déchets vers leur centre de tri.
- Le centre de tri : les ferrailleurs séparent, broient, et préparent les métaux pour le procédé de recyclage. Ainsi, les fonderies réceptionnent ces déchets pour produire de nouveaux métaux recyclés.

Une fois séparés, les déchets d'acier et d'aluminium sont broyés, puis chauffés à basse température pour éliminer les impuretés, les vernis et les étiquettes. Ensuite, ils sont fondus et purifiés pour être transformés en matière première. Finalement, l'acier, sous forme de plaques, bobines, barres ou fils, et l'aluminium, en plaques ou lingots, seront utilisés pour fabriquer de nouveaux produits finis[30].

- **Cas du bois**

Le recyclage des déchets de bois sur un chantier de déconstruction est une démarche écologique et économique importante. Le bois est trié en différentes catégories : non traité, traité et composite. Chaque type de bois suit un processus spécifique de nettoyage et de préparation, qui inclut l'enlèvement des fixations et des contaminants[31].

Le bois non traité peut être facilement broyé et réutilisé pour fabriquer des panneaux de particules ou comme paillis, tandis que le bois traité nécessite des traitements supplémentaires pour enlever les produits chimiques. Le bois composite, quant à lui, est souvent transformé en matériaux de bois d'ingénierie ou utilisé comme source d'énergie dans les centrales de biomasse[28].

Les produits issus du recyclage du bois sont divers et variés. Les catégories distinguées sont les suivantes :

Catégorie de bois usagé A I:

- Bois usagé non traité ou seulement traité mécaniquement, qui n'a pas été significativement contaminé par des substances étrangères au bois lors de son utilisation. Seulement partiellement réutilisable non traité[32].

Catégorie de bois usagé A II:

- Bois usagé collé, peint, revêtu, laqué ou autrement traité sans composés organiques halogénés dans le revêtement et sans agents de protection du bois,

Catégorie de bois usagé A III:

- Bois usagé avec des composés organiques halogénés dans le revêtement sans agents de protection du bois.

Les catégories AII et AIII Peuvent être utilisés uniquement si les revêtements et les laques ont été préalablement enlevés. Ensuite, le bois devient une matière première secondaire pour la fabrication de panneaux de particules ou de charbon industriel, ou il est utilisé hacher comme litière pour animaux, par exemple dans les manèges.

Catégorie de bois usagé A IV:

- Bois usagé traité avec des agents de protection du bois, tels que les panneaux d'isolation et de protection acoustique traités avec des polychlorobiphényles, doivent être éliminés conformément au **règlement sur les déchets PCB/PCT**.

Le recyclage du bois réduit les déchets envoyés en décharge et diminue la demande de bois neuf, contribuant ainsi à la conservation des ressources forestières. Cependant, des défis subsistent, notamment la contamination par les traitements chimiques et les coûts associés au traitement de certains types de bois. Néanmoins, le recyclage des déchets de bois reste une pratique bénéfique pour l'environnement et l'économie, transformant une ressource souvent négligée en un matériau précieux[28].

- Cas du verre

On appelle verre plat, le verre utilisé dans le secteur du bâtiment, contrairement au verre utilisé pour les bouteilles (verre creux)[32].

Pour recycler du verre plat (figure 11) de manière optimale dans un four float, il est préférable de collecter les fenêtres intactes puis de les démanteler, afin de garantir le niveau de qualité élevé requis pour ce type de production[32].



Figure 9: Processus de recyclage du verre plat[32]

Le processus de traitement du verre après la déconstruction commence par la collecte et le tri des matériaux sur le chantier[33]. Le verre provenant de différentes sources comme les fenêtres, miroirs et portes est soigneusement séparé des autres matériaux pour éviter toute contamination. Une fois collecté, il est classé par type (verre plat, feuilleté, isolant) et par couleur (transparent, vert, brun), ce qui est essentiel pour assurer la qualité du produit final. Ensuite, le verre trié subit un nettoyage pour éliminer les contaminants tels que les adhésifs, les revêtements, les films de sécurité, et les restes de cadres ou de fixations. Cette étape de nettoyage peut inclure des méthodes manuelles ou mécaniques, telles que des bains chimiques ou des traitements par ultrasons[33].

Broyage et Recyclage : après le nettoyage, le verre est broyé en morceaux de différentes tailles, connus sous le nom de "calcin", qui servent de matière première pour le recyclage. Le calcin est ensuite fondu à haute température dans un four, ce qui permet de créer une pâte homogène tout en éliminant les impuretés restantes[33]. La pâte de verre fondu à une température de 1500 degrés Celsius et est ensuite moulée en nouveaux produits, comme des bouteilles, des conteneurs, des panneaux de verre, et autres articles[33].

Le recyclage du verre offre de nombreux avantages écologiques et économiques. Il permet de réduire la consommation de matières premières naturelles, diminue l'empreinte carbone grâce à une température de fusion plus basse, et réduit les déchets envoyés en décharge. Cependant, des défis subsistent, notamment la gestion de la

contamination par le plastique, les métaux, et les produits chimiques, qui peut compliquer le processus et affecter la qualité du produit final[33]. De plus, le succès du recyclage du verre dépend de l'infrastructure de collecte et de traitement disponible, qui peut varier considérablement d'une région à l'autre.

2.1.4 Les décharges

Elles sont soumises aux dispositions du règlement du grand-ducal modifié du 24 Février 2003 relatives à la mise en décharge des déchets[24]. 04 catégories de décharges sont reconnues :

- Les décharges pour déchets dangereux ;
- Les décharges pour déchets non dangereux ;
- Les décharges pour déchets inertes du type A (valeurs limites plus stricte en déchets inertes) ;
- Les décharges pour déchets inertes du type B (valeurs limites plus larges en déchets inertes).

En application à la loi, l'élimination des déchets se fait moyennant un réseau de décharges régionales pour déchets inertes. Ces décharges régionales doivent être d'infrastructure permettant le recyclage[24].

2.2 Principes de gestion de projets appliqués à la déconstruction

La gestion du projet veille à ce que le temps, les extrants et les changements soient gérés efficacement. Des réunions régulières avec les partenaires sont organisées pour s'assurer que les résultats répondent aux attentes et aux besoins des parties prenantes[34].

2.2.1 Concepts de gestion des projets et importance dans la déconstruction des bâtiments existants

Le Lean management : tout gaspillage doit être éliminé pour atteindre la meilleure performance possible et satisfaire le client. Cela implique de rendre un travail de haute qualité en limitant les délais, les coûts et les ressources. Cette méthode permet d'atteindre de bons résultats avec des délais serrés, une petite équipe ou un petit budget[34].

2.2.2 Méthodologies et outils spécifiques utilisés dans la gestion de projets de déconstruction

Cette méthodologie est généralement définie en plusieurs phases planifiées par le gestionnaire de projet et décrit dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3: méthodologie de déconstruction par phase[34]

<i>Phases prédéconstruction</i>	<i>Description</i>
Phase d'étude	<ul style="list-style-type: none"> - Évaluation détaillée du bâtiment à déconstruire, y compris l'analyse des matériaux de construction, des risques environnementaux et des réglementations locales. - Réunion de lancement de projet ; - Demande d'autorisation ; - Compilation du dossier de soumission ; - Validation du dossier de soumission.
Phase de soumission	<ul style="list-style-type: none"> - Lancement des appels d'offres ; - Réponse à l'appel d'offre ; - Analyse des offres reçues ; - Emission de la décision d'adjudication du marché ; - Commande officielle.
Gestion des déchets et du recyclage	<ul style="list-style-type: none"> - Mise en place de systèmes de tri et de gestion des déchets pour minimiser l'impact environnemental de la déconstruction ; - Identification des matériaux recyclables et développement de partenariats avec des entreprises spécialisées dans le recyclage des matériaux de construction.
<i>Phase de déconstruction</i>	<i>Description</i>
Travaux de deconstruction	<ul style="list-style-type: none"> - Mobilisation de l'entreprise générale ; - Production des documents exe par l'entreprise générale ; - Validation des documents exe ; - Pose de la clôture du chantier ; - Etat des lieux environnants ; - Utilisation de méthodes spécifiques de démolition et de déconstruction, telles que le désamiantage, le découpage au chalumeau, la démolition mécanique, et le tri des matériaux pour le recyclage ; - Supervision étroite des travaux pour assurer la sécurité des travailleurs et la préservation des matériaux valorisables.
Communication et coordination	<ul style="list-style-type: none"> - Communication claire et transparente avec toutes les parties prenantes, y compris les clients, les sous-traitants, les autorités locales et les organismes de réglementation ; - Coordination efficace des différentes équipes impliquées dans le projet pour garantir une exécution fluide et cohérente.

Suivi et évaluation	<ul style="list-style-type: none"> - Surveillance continue de l'avancement du projet par le biais de rapports d'étape réguliers et de réunions de suivi. - Évaluation des performances du projet par rapport aux objectifs initialement fixés, avec des ajustements si nécessaire pour garantir la conformité aux exigences et aux normes[35].
Phases post déconstruction	Description
Cloture du projet	<ul style="list-style-type: none"> - Présentation et analyse des résultats - Réunion de clôture

2.3 Economie circulaire et son application dans la déconstruction des bâtiments

2.3.1 Définition et importance de l'économie circulaire

L'économie circulaire, souvent désignée par son acronyme EC, a été popularisée par la Fondation Ellen MacArthur au début des années 2010[36]. Cependant, le concept trouve ses origines dans les travaux de Pearce et Turner (1990), qui l'ont décrit comme un système où les mécanismes de rétroaction technologique ou ceux de l'écosystème naturel sont utilisés pour transformer les déchets en ressources, assurant ainsi un stock de ressources stable ou croissant au fil du temps. Depuis lors, la définition de l'EC a fait l'objet de nombreux débats[36].

L'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME en France), elle, définit l'économie circulaire comme un « système économique d'échange et de production qui, à tous les stades du cycle de vie des produits (biens et services), vise à augmenter l'efficacité de l'utilisation des ressources et à diminuer l'impact sur l'environnement tout en développant le bien être des individus »[22].

Suivant une approche circulaire, il n'est plus question de démolition mais plutôt de déconstruction sélective. Cette approche consiste en un processus de désassemblage des bâtiments afin de maximiser et de faciliter la récupération des composants des matériaux de construction améliorant ainsi les possibilités de fermer les boucles de matériaux[8]. Cette méthode est mise en avant par trois phases :

- Le décapage doux des matériaux récupérables ;
- La séparation des matériaux dangereux ;

- La démolition des éléments de structure.

2.3.2 Principes de l'économie circulaire

Le document portant sur la stratégie sur l'économie circulaire[37] au Luxembourg présente les grands principes de l'économie circulaire suivant :

- l'adoption d'une approche systémique et holistique de la gestion des produits, composants et matières tout au long de la chaîne de valeur ;
- la distinction entre les différents cycles (biologiques et technologiques) pour la consommation et l'utilisation des produits, des matériaux et des composants (figure 11). bien s'efforcer à fermer les boucles des différents nutriments technologique et biologique dans l'objectif de protéger et de conserver les écosystèmes vitaux et la santé des êtres humains ;

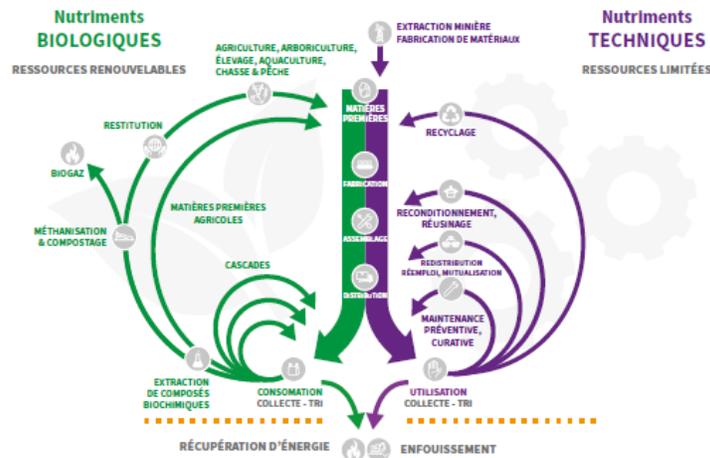


Figure 10: Cycle biologique et technologie[20]

- Conception des produits de qualité optimale qui conservent leur valeur économique et matérielle, qui ont une facilité d'utilisation durant tout le cycle d'utilisation ou de consommation ;
- L'incitation à la transparence dans la diffusion et la gestion des informations concernant les produits, les composants et les matériaux tout au long de la chaîne de valeur ;

- Créer et mettre en œuvre de nouveaux modèles économiques favorisant le partage, l'utilisation ou l'accès aux produits plutôt que leur possession, afin de valoriser la qualité des produits et l'accessibilité à l'information.

2.3.3 Economie circulaire et environnement

Le comportement des systèmes circulaire nécessite l'estimation des impacts environnementaux. De ce fait, [38] a identifié la méthodologie de l'analyse du cycle de vie (ACV) comme une technique fiable pour les études environnementales. C'est une méthode qui permet de comprendre les impacts environnementaux potentiels d'un produit ou d'un processus tout au long de son existence[32]. Cela inclut les étapes de prélèvement de ressources et les émissions associées, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fabrication des matériaux auxiliaires et consommables. Cette approche, qui respecte la norme ISO 14040, vise à offrir une base solide pour des décisions stratégiques, en intégrant des questions spécifiques dans les processus de développement et d'optimisation afin de promouvoir une production plus durable[32]. Les résultats obtenus par l'ACV peuvent être interprétés au travers plusieurs catégories d'impact en utilisant différentes méthodes en fonction de la nature de l'analyse.

2.3.3.1 La méthodologie de l'ACV

Lors de l'analyse le cycle de vie d'un matériau dans le secteur de la construction, il est possible d'évaluer de manière globale les impacts environnementaux associés à chaque étape, que ce soit au niveau des matériaux, des éléments de construction ou du bâtiment dans son ensemble. Cela inclut une évaluation, depuis la fabrication des produits (de leur création jusqu'à leur sortie d'usine : cradle to gate) jusqu'à la fin de vie du bâtiment (cradle to grave) et même au-delà (du berceau au berceau : cradle to cradle)[39]. On examine donc chaque étape : la production des matériaux, leur transport, leur mise en œuvre sur le chantier, l'utilisation du bâtiment, les éventuelles rénovations, ainsi que le démantèlement et le potentiel de recyclage des matériaux. Les normes EN 15804 et EN 15643-2 définissent ces différentes phases du cycle de vie suivantes[39] (figure13).

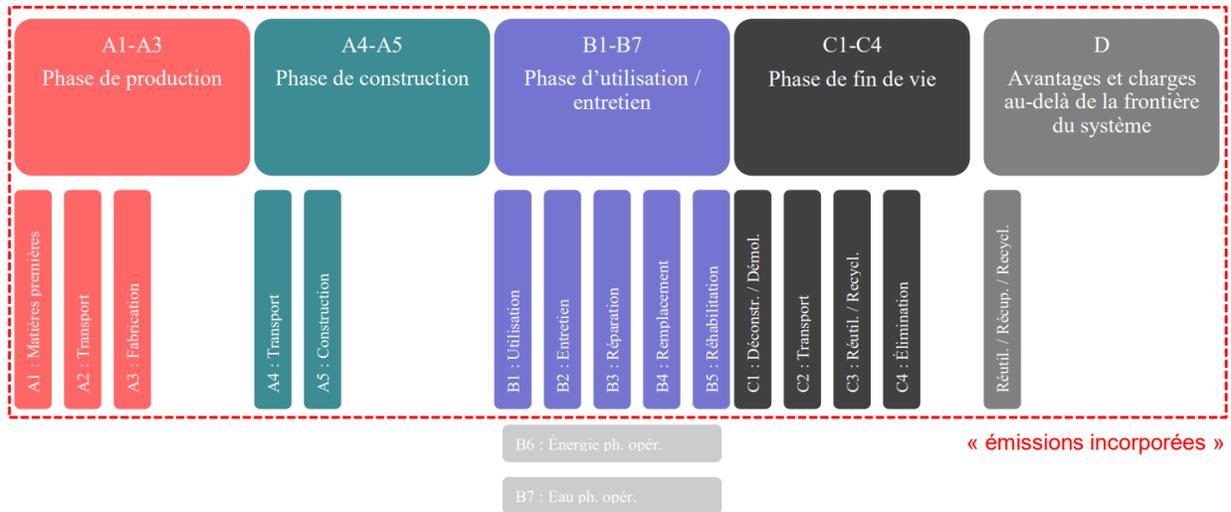


Figure 11: Phases du cycle de vie dans le secteur de la construction[40]

Il est crucial de souligner le concept d'unité fonctionnelle dans le cadre de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV). L'unité fonctionnelle sert de référence pour évaluer le système étudié, et elle permet de comparer les impacts environnementaux en rapportant ces impacts à des grandeurs spécifiques. La comparaison entre différents systèmes ou processus n'est possible que si leurs fonctions répondent aux mêmes exigences ou offrent les mêmes avantages. Dans le domaine de la construction, les unités de référence couramment utilisées sont le mètre cube de matériau de construction ou le mètre carré de surface énergétique de référence[40].

Suivant la méthodologie de l'ACV, les impacts environnementaux sont quantifiés et évalués sous forme de catégories d'impact. Ces catégories permettent d'estimer les impacts environnementaux pertinents du système ou du processus à étudier. Le choix est généralement fait parmi les catégories suivantes :

- Potentiel de réchauffement global (PRG) en "kg CO₂ équ." ;
- Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (PACO) en "kg d'éq. CFC-11" ;
- Potentiel de formation d'ozone (POCP) en "kg C H₂₄ -Eq." ;
- Potentiel d'acidification (PA) en "kg SO₂ -Eq." ;
- Potentiel d'eutrophisation (PE) en "kg PO₄ -Eq." ;
- Consommation de ressources abiotiques ;

- Potentiel de raréfaction des ressources abiotiques ;
- Besoin total en énergie primaire (PEges) ;
- Consommation d'eau en m³.

2.4 Loi et réglementation de la gestion des déchets de construction et de déconstruction

Le concept d'EC a été mis en œuvre par le biais de politiques gouvernementales aux niveaux local, régional, national et international. La mise en place des règlements sur les déchets du Luxembourg revêt une importance capitale car elle permet de réduire l'impact écologique des activités de construction, de gérer durablement et respectueusement l'environnement. Des obligations strictes ont été imposées aux entreprises de construction et de démolition. Celles-ci encouragent le tri, le recyclage et la réutilisation des matériaux. Les déchets envoyés en décharge doivent être considérablement réduits pour conserver les ressources naturelles et promouvoir l'économie circulaire.

2.4.1 Réglementations et stratégie au Européens[1]

Directive cadre déchets n°2008/98/CE du 19 novembre 2008 (niveau européen), retranscrite dans l'article L 541-1 du code de l'Environnement (niveau national)[1]

La Directive cadre déchets a posé les bases de la hiérarchisation des priorités de la gestion des déchets :

- La prévention de création des déchets, « *notamment en agissant sur la conception, la fabrication et la distribution des substances et produits et en favorisant le réemploi* » ;
- Lorsque cela n'est pas possible, il faut alors privilégier, dans l'ordre, « *la préparation en vue de la réutilisation, du recyclage, toute autre valorisation, notamment la valorisation énergétique* » et enfin, en dernier recours, l'élimination[1].

La Directive visait à atteindre un objectif de 70% de valorisation des déchets du BTP d'ici 2020. Bien que ce texte ait été partiellement modifié après l'adoption du Paquet économie circulaire par le Parlement européen, les changements n'ont pas directement impacté le secteur du BTP. Cependant, le Paquet prévoit d'établir, d'ici 2024, des

objectifs spécifiques pour le réemploi et le recyclage des déchets de construction suivant la stratégie suivante :

Paquet économie circulaire, adopté par le Parlement européen le 18 avril 2018, approuvé par les États membres le 22 mai 2018[1]

Le Paquet économie circulaire appelle les États membres à prendre des mesures pour « éviter la production de déchets » et pour cela favoriser :

- *Une utilisation efficace des ressources* » par la « *conception, fabrication et l'utilisation de produits [...] durables [...], réparables, réutilisables et de conception évolutive* ; le réemploi des produits [1] ;
- La disponibilité des informations et des moyens afin de permettre « *la réparation et le réemploi des produits* ».
- Le texte vise à accélérer la valorisation des ressources. Pour le BTP, cela implique que les États membres « *prennent des mesures pour encourager la démolition sélective afin de permettre le retrait et la manipulation en toute sécurité des substances dangereuses et de faciliter le réemploi et le recyclage de qualité élevée* »[1].
- Le texte prévoit également, avant la fin de l'année 2024, de fixer des « *objectifs de préparation en vue du réemploi et de recyclage pour les déchets de construction et de démolition et leurs fractions spécifiques en fonction des matériaux, les déchets textiles, les déchets commerciaux, les déchets industriels non dangereux et d'autres flux de déchets* »[1].

2.4.2 Loi Luxembourgeoise sur les déchets

- **Loi du 09 Juin 2022 Modifiant la loi modifiée du 21 Mars 2012 relative aux Déchets**

Relative aux déchets, cette loi impose des exigences strictes concernant la prévention, la réutilisation et le recyclage des déchets issus de la construction et de la démolition. Selon l'article 13, paragraphe 2, « *le maître d'ouvrage doit garantir que les déchets de chantier sont soumis à une collecte sélective par fractions distinctes, incluant au minimum le bois, les fractions minérales (béton, briques, tuiles et céramiques, pierres), les métaux,*

le verre, le carton, le plastique, le plâtre et les déchets dangereux. En cas de collecte mixte des déchets, une opération de séparation et de tri doit être réalisée ».

Selon l'article 26 sur les déchets inertes, déchets de construction et déchets de déconstruction :

-« Au moment de la planification d'une construction et de l'attribution d'un marché afférent, la prévention des déchets, y compris le réemploi, doit être prise en considération. Cette prévention concerne également la réduction des terres d'excavation destinées à une mise en décharge. Les maîtres de l'ouvrage doivent pouvoir prouver les considérations de prévention appliquées sur demande de l'administration compétente.

- « Préalablement à toute déconstruction d'un bâtiment d'un volume bâti de plus de 1200 mètres cubes et produisant au moins 100 mètres cubes de déchets, le maître de l'ouvrage doit établir un inventaire qui identifie les différents matériaux utilisés dans l'ouvrage à déconstruire ». Cet inventaire doit pouvoir être présenté à l'administration compétente et aux personnes visées à l'article 45, premier paragraphe, sur les lieux du chantier.

-Sur demande, une copie de l'inventaire doit être envoyée à l'administration compétente. Cet inventaire prévoit, en cas de déconstruction, une collecte séparée des différents matériaux en vue de leur traitement respectif en tenant compte des priorités fixées à l'article 9 sur la déconstruction de bâtiments ayant un volume bâti supérieur ou égal à 3500 mètres cubes, cet inventaire doit être réalisé par un organisme agréé en vertu de la loi du 21 avril 1993 relative à l'agrément de personnes physiques ou morales privées ou publiques, autres que l'État, pour l'accomplissement de tâches techniques d'étude et de vérification dans le domaine de l'environnement.

- Règlement grand-ducal du 19 juin 2020 relatif à la prévention et à la gestion de matériaux et de déchets routier

Ce règlement concerne les travaux routiers et la gestion des matériaux contenant des substances bitumineuses ou goudronneuses. Elle définit plusieurs termes clés :

- **Chantier routier** : Travaux de construction, démolition, ou réparation de routes et surfaces similaires.
- **Chantier routier d'envergure** : Travaux impliquant une route d'au moins 100 mètres ou une surface de 600 m².

- **Matériaux routiers** : Matériaux contenant des substances bitumineuses ou goudroneuses provenant de chantiers routiers.
- **Déchets routiers** : Matériaux routiers classés comme déchets selon la loi de 2012.
- **Déchets routiers non dangereux** : Ceux ayant des concentrations spécifiques d'HAP EPA 16 et de benzo[a]pyrène (B[a]P) en dessous de certains seuils.
- **Déchets routiers dangereux** : Ceux avec des concentrations de HAP EPA 16 ou de B[a]p au-dessus des seuils fixés.
- **Traitement à froid et Recyclage à froid** : Traitement des matériaux à des températures maximales de 60°C.
- **Traitement à chaud et Recyclage à chaud** : Traitement des matériaux à des températures minimales de 90°C.
- **HAP EPA 16** : Seize hydrocarbures aromatiques polycycliques spécifiques.

« Avant tout chantier routier d'envergure, une étude des matériaux présents doit être effectuée, comprenant une documentation historique, des carottages et une analyse des couches » . Pour les autres chantiers, une analyse d'échantillons représentatifs des matériaux extraits est requise. Les travaux doivent prioriser la conservation des couches en place, en les couvrant avec une couche étanche. Si nécessaire, enlever la couche de roulement de manière sélective par fraisage, sans démolition par plaques. Les matériaux routiers doivent être traités conformément aux résultats d'analyse et aux articles spécifiques de la loi. Les matériaux traités peuvent être réutilisés sur le chantier d'origine ou un autre chantier routier.

- **Loi du 21 Avril 1993 sur l'agrément des organismes**

Cette loi présente les critères et les processus d'agrément des organismes autorisés à réaliser l'inventaire pour les projets de déconstruction de bâtiments de plus de 3500 m³.

Les conditions requises sont les suivantes :

- Formation technique ou professionnelle ;
- Connaissances approfondies des normes techniques ;
- Capacités techniques et matérielles, et indépendance morale, technique et financière

Ne peuvent se faire agréer, sauf disposition légale ou réglementaire contraire, les personnes physiques ou morales de droit privé ou public qui sont :

- Le concepteur, le fournisseur, le réalisateur ou l'exploitant du projet ;
- Mandataire d'une des personnes dénommées ci-avant ;
- Tous les matériaux et éléments mis en œuvre sur le chantier devront respecter les normes et prescriptions en vigueur (ex : autorisations Commodo-Incommodo).

L'évacuation d'autres matériaux inertes dans une décharge luxembourgeoise n'est possible que si les valeurs limites fixées par le Règlement grand-ducal du 25 janvier 2017 modifiant le règlement grand-ducal modifié du 24 février 2003 concernant la mise en décharge des déchets sont respectées et qu'aucun morceau d'asphalte (bitumineux ou goudronneux) n'est présent ».

Lancée en 2019 par le ministère de l'Environnement, du Climat et du Développement Durable (MECDD), témoigne de l'engagement du Luxembourg dans le développement de l'économie circulaire. Cette stratégie soutient activement les objectifs européens du paquet « économie circulaire » en favorisant des actions de démolition et en développant des échanges de produits en vue de leur réemploi, créant ainsi des marchés pour l'offre et la demande de matériaux recyclés.

Protocole de gestion des déchets de construction et de démolition de l'UE Contexte[41] fait partie du paquet CE. Les objectifs globaux sont d'améliorer la confiance des utilisateurs dans les matériaux recyclés, d'accroître l'utilisation des matériaux recyclés dans la construction et de faciliter la mise en œuvre des meilleures pratiques en matière de gestion des déchets ménagers dangereux, comme dans le cas de l'objectif de 70% de récupération d'ici 2020.

- **La stratégie nationale intitulée « Null Offall Lëtzebuerg »**

Lancée en 2019 par le ministère de l'Environnement, du Climat et du Développement Durable (MECDD), témoigne de l'engagement du Luxembourg dans le développement de l'économie circulaire. Le 23 septembre 2020 la stratégie "Null Offall Lëtzebuerg"[20] est présentée comme celle-là qui offre une vision et un cadre de travail pour une gestion plus responsable et durable des ressources et des déchets à l'avenir, en se basant sur les principes de l'économie circulaire. Elle vise à opérer un changement de paradigme en

plaçant la valeur et la qualité des objets et des matières utilisés ou consommés au centre des mesures de gestion de nos déchets et de nos ressources, ce qui nécessite une réflexion approfondie sur nos modèles de consommation et de production. Cette stratégie met également en avant le fait de concevoir les futurs bâtiments comme des dépôts de matériaux.

- **Guide de déconstruction et bonnes pratiques**

Le guide de déconstruction, élaboré par le Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) en collaboration avec le ministère du Développement Durable et des Infrastructures, sert de référence à tous les intervenants pour tout projet de déconstruction. Ce guide rappelle au maître d'ouvrage ses rôles et obligations en matière de prévention et de gestion des déchets de chantier à différentes phases (en amont, pendant et après le chantier) et dans ses interactions avec les autres parties prenantes du projet (maîtrise d'œuvre, entreprises de travaux). En suivant ces directives, le projet visait à démontrer les avantages d'une approche de déconstruction respectueuse de l'environnement et orientée vers le réemploi des matériaux.

2.4.3 Autorisations

Au Luxembourg, plusieurs autorisations spécifiques sont nécessaires pour divers types de travaux. L'autorisation de démolition, délivrée par les autorités communales, est requise pour toute démolition partielle ou totale de structures. Elle nécessite un dossier complet comprenant des plans, une description des travaux et un plan de gestion des déchets. La permission de voirie est nécessaire pour toute intervention sur la voie publique, telle que l'installation de chantiers ou les travaux de raccordement, et doit inclure une description des travaux, la durée prévue et les mesures de sécurité[42].

Pour les activités touchant à la protection de la nature et des ressources naturelles, une autorisation environnementale est nécessaire pour les projets ayant un impact significatif sur l'environnement. Cela inclut les projets industriels ou agricoles, et peut nécessiter une évaluation d'impact environnemental (EIE). Ces démarches assurent que les projets respectent les normes de protection de l'environnement et peuvent inclure des consultations publiques et des conditions spécifiques à respecter.

2.4.3.1 Les établissements classés

Les établissements classés représentent tout établissement ou installation industriel, commercial ou artisanal, public ou privé, toute activité ou activité connexe et tout procédé, qui peuvent présenter des causes de dangers ou des inconvénients à l'égard de la protection de la sécurité, de la salubrité ou de la commodité du public, du voisinage ou du personnel de ces établissements, de la santé et de la sécurité des travailleurs ainsi qu'à l'égard de l'environnement humain et naturel[43].

La loi du 10 juin 1999 relative aux établissements classés[44] vise à prévenir les nuisances et les risques en imposant des conditions strictes d'aménagement et d'exploitation déterminées suivant la classe de l'établissement. Lors des demandes d'autorisation, les autorités compétentes évaluent les critères environnementaux et de santé publiques et exigent l'application des conditions d'exploitation pour minimiser les nuisances et maximiser les bénéfices.[43]

Ainsi les concepts de comodo et incommodo sont appliqués lors de l'instruction des demandes d'autorisations d'exploitation desdits établissements.

Les termes comodo et incommodo sont utilisés pour quantifier les effets des activités des établissements classés. Le comodo pour désigner les aspects positifs et l'incommodo pour désigner les aspects nuisibles[43].

Les autorisations d'exploitation pour un établissement classé définissent les conditions nécessaires pour protéger l'environnement et assurer la sécurité des travailleurs, du public et du voisinage. Les établissements sont classés en plusieurs, nécessitant des autorisations spécifiques selon leur classification. Les établissements sont autorisés par différents ministres selon leur classe : environnement (1B, 3B), travail (1A, 3A), les deux ministres, ou par le bourgmestre pour la classe 2. Les établissements de classe 4 sont régis par un règlement grand-ducal spécifique[45].

Une autorisation d'exploitation d'une installation classée peut être exigée pour :

- La construction ou l'exploitation ;
- Aménagements et transformations ;
- Une modification substantielle de l'établissement concerné ;

- Le déplacement d'une activité ou d'un équipement vers un autre lieu (l'autorisation est liée à la parcelle cadastrale et non à l'opérateur)[43].

2.4.3.2 Autorisation mouvement des déchets

Pour le déplacement des déchets à l'échelle nationale ou internationale, une notification de transfert est nécessaire. L'autorité compétente capable de fournir cette notification est le service de transport et de négoce des déchets de l'administration de l'environnement. Les personnes appelées à constituer un dossier de notification sont : les producteurs de déchets, les collecteurs agréés, un négociant ou un courtier autorisé par le producteur initial[46].

Tableau 4: Types de déchets et de transfert de déchets[46]

Types de déchets	Catégories	Transfert National	Transfert international
Déchets à éliminer	Pas précisé	✓	✓
Déchets à valoriser	-Déchets annexe IV du règlement (CE) n°1013/2006 -Déchets annexe IV A du règlement (CE) n°1013/2006 - Déchets de mélange	✓	
Déchets à valoriser	repris à l'annexe IV ou IV A du règlement (CE) N° 1013/2006 ;		✓
Déchets à valoriser	-pas repris aux annexes III, III B, IV ou IV A du même règlement		✓

Au moins trois jours ouvrables avant le départ de chaque transfert international et au moins un jour ouvrable avant le départ de chaque transfert national visé par la notification, le notifiant doit transmettre une note de mouvement, rédigée selon le formulaire établi par le texte et signée conjointement par le notifiant et le transporteur, à l'autorité compétente concernée par : télécopie, courrier ou courrier électronique (copies de mouvement) ; ou par un système de transmission électronique disponible ou accepté par l'Administration de l'environnement. L'exemplaire du document de suivi est remis à l'effecteur de transport et le notifiant garde une copie. Au plus tard trois jours ouvrables après la date de réception

des déchets, l'établissement de destination met un tampon de réception des déchets sur le document de suivi et le renvoie en une copie au notifiant[47]

2.5 Saisie digitale pour la déconstruction et BIM

Pour faciliter les futures opérations de déconstruction, le Design for Deconstruction (DfD) est une démarche pertinente[19]. Il s'agit de concevoir les projets dont le désassemblage et la déconstruction sont facilités. La maquette numérique devient le support d'analyse de la démontabilité d'un bâtiment. Le projet Digital Deconstruction (DDC) [19] fait suite au projet Building As Material Bank (BAMB), il propose une méthode numérique avec la définition d'un flux de travail intégrant une plateforme et proposant quatre fonctionnalités principales accompagnant quatre pratiques actuelles dans une démarche collaborative : Le « building scan » pour les relevés et les diagnostics actuels ; le « Reversible BIM » en tant qu'aide à la Conception Assistée par Ordinateur ; « Material Database » comme catalogue pour la prescription ; et finalement la « Blockchain » qui sécurise les contenus et les échanges en remplacement des documents contractuels actuels[19].

Ainsi dans le cadre de l'économie circulaire, l'intégration de la saisie digitale revêt une importance capitale pour la gestion des déchets et le réemploi des matériaux.

De nos jours, La saisie digitale consiste est fréquemment employée dans les chantiers. Elle consiste à capturer et à intégrer des données en temps réel lors des phases de déconstruction[48]. Cela peut inclure l'utilisation de technologies telles que les scanners 3D précédemment cités, les drones, et les capteurs pour collecter des informations sur l'état des structures, les quantités de matériaux, et les conditions sur site. Ces données sont ensuite intégrées dans le modèle BIM, offrant une vue d'ensemble actualisée du projet. Cette approche permet de suivre avec précision l'avancement des travaux, de minimiser les erreurs, et de mieux anticiper les besoins logistiques[19], [48]. La saisie digitale et l'intégration des données dans le modèle BIM présentent les avantages suivants :

- **Précision et efficacité** : L'automatisation de la collecte de données réduit les erreurs humaines et permet d'obtenir des informations précises et exploitables[49].

- **Optimisation des ressources** : En identifiant plus facilement les matériaux réutilisables, la saisie digitale contribue à une gestion plus efficace des ressources, réduisant ainsi le volume des déchets[50].
- **Traçabilité** : Le suivi numérique des matériaux permet une traçabilité accrue, essentielle pour la certification des matériaux recyclés ou réutilisés[49].
- **Sécurité** : En fournissant une vue d'ensemble détaillée et en temps réel du chantier, la saisie digitale aide à identifier et à gérer les risques potentiels, améliorant ainsi la sécurité sur le site de déconstruction[49].

3 Méthodologie

Pour cette étude, une approche mixte intégrant des analyses quantitatives et qualitatives a été adoptée, ce qui a permis de mieux comprendre les méthodologies de déconstruction actuelles du bâtiment. L'objectif principal était d'examiner comment les principes de l'économie circulaire et les étapes de la gestion de projet peuvent être combinées efficacement pour permettre des améliorations dans les processus de déconstruction. Dans le même temps, il a été question de proposer une analyse des différentes quantités de déchets générés et les méthodes de traitement appliquée sur site.

Pour une meilleure évaluation nous avons décidé de classer ces analyses suivant des scénarii représentant des études de cas :

- **Scénario 1**

Projet réalisé : démolition/ déconstruction circulaire du bâtiment de l'OAS;

- **Scénario 2**

Projet futur : étude de la déconstruction circulaire du siège social Paul Wurth ;

3.1 Scénario 1 : démolition/ déconstruction du bâtiment de la CNS

Ce projet avait pour objectif, en plus de respecter l'obligation légale d'établir un inventaire des matériaux, de réaliser une séparation et une collecte aussi précises que possible des différentes catégories de déchets sur le chantier. L'entreprise chargée de la

déconstruction (Association momentanée (AM) Xardel-Sogeroute) avait l'obligation de présenter des documents attestant que les déchets provenant des travaux déconstruction ont été éliminés dans le respect de la législation au travers des tickets de pesages et des rapports sur les méthodes de gestion des déchets appliquées. L'objectif étant de garantir la traçabilité des déchets générés.

Le bureau d'études Luxplan Simon-Chirstiansen et Associés (LSC) a élaboré l'inventaire des matériaux et la proposition de déconstruction. Schroeder & Associés en collaboration avec BIM-Y ont apporté un support numérique essentiel à la déconstruction en vue du réemploi.

La gestion du projet de démolition/déconstruction a été confiée à Paul Wurth Geprolux (PWGP), qui a intégré les aspects de déconstruction circulaire (économie circulaire) dans son accompagnement. Cette partie présente un résumé des mesures mises en place, ainsi qu'une estimation des taux de réemploi, de réutilisation et de recyclage.

Une hypothèse de calcul des émissions liées au transport des matériaux béton du site de déconstruction (module C) au site de recyclage a été faite afin d'évaluer les gains de CO₂ qui pourraient être enregistrés en cas de recyclage sur site ou hors site. Dans le même ordre d'idées le potentiel de recyclage des matériaux a également été évalués et présenté.

3.1.1 Présentation du bâtiment

L'ancien bâtiment de l'Office des Affaires Sociale (OAS), était une propriété du Fonds de Compensation Commun au Régime Général de Pension (FDC) situé au centre de la ville du Luxembourg sis au 125, route d'Esch, L-1471 Luxembourg. Ce bâtiment a été déconstruit suivant les principes de l'économie circulaire, dans l'optique de démontrer les bénéfices environnementaux et économiques d'une gestion rigoureuse des déchets. Le bâtiment se présentait comme suit :

Bâtiment principal (figure 11) :

- Année de construction : 1985

- Deux sous-sols : deuxième sous-sol (parking, archives, installations techniques) ; et premier sous-sol (Archives de la CNS, bureaux)
- Rez-de-chaussée : zone d'accueil avec salle d'attente et bureaux ; salles de consultations médicales
- Étage 1 à 6 : bureaux (presque identiques) et petit escalier en bois menant au 7e étage
- 7e étage : entièrement rénové en 2012



Figure 12 : Bâtiment principal (Projet OAS) Figure 13 : Pavillon modulaire

Pavillon modulaire (construction récente exempt du risque de pollution) (figure 2) :

- Année de construction : 2008
- Construction modulaire initialement située sur le terrain de l'école européenne de Kirchberg
- Relié au bâtiment principal par un passage
- Utilisé principalement comme salle de consultation médicale

Les caractéristiques descriptives du bâtiment sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 5: Description du bâtiment

Volume (m³) de la démolition (partielle/intégrale)	Bâtiment principal : 129 700 m ³ Bâtiment annexe : 33 700 m ³ Total : 163 400 m ³
--	--

Superficie totale :	Surface bâtiment 1985 : 36 625 m ² (répartis du niveau -2 au +7) - Surface extension Nord : 5 326 m ² - Surfaces cumulées : 41 951 m ² - Parking visiteurs : 3310 m ² - Parking personnel: 7640 m ² - Surface asphaltées cumulées : 10950 m ²
Dimensions du bâtiment : Hauteur du bâtiment Nombre d'étages (souterrains) Nombre d'étages (supérieurs)	Hauteur du bâtiment : 28m Nombre de sous-terrains :2 Nombre d'étages :7

Au regard des activités purement administratives exercées dans ce bâtiment, il n'était a priori pas considéré comme un site pouvant engendrer un risque de pollution du sous-sol. Par ailleurs, le bâtiment principal présente un historique d'un réservoir de mazout selon la base de données du Cadastre des Sites Potentiellement Pollués (CASIPO).

Aussi, la société PWGP a chargé Vinçotte Luxembourg de réaliser une inspection visuelle des locaux et des espaces accessibles sans démontage ou sondage destructif des cloisons fixes. Il était question de prélever et d'analyser les matériaux suspects afin de déterminer si ceux-ci contenaient de l'amiante. L'analyse est effectuée par microscopie optique en lumière polarisée, méthode permettant la détection de fibres d'amiante ainsi que l'identification de la variété d'amiante parmi les six répertoriées au registre du Chemical Abstracts Service. L'analyse commence par un examen primaire des échantillons, ensuite une identification et enfin une inspection et un échantillonnage. Les résultats des analyses faites en décembre 2022 ont révélé la présence de fibres d'amiantes dans les échantillons. La méthodologie de déconstruction devait donc intégrer ces informations afin de respecter la réglementation en vigueur.

L'interaction entre les différents acteurs de ce projet a été essentielle pour atteindre les objectifs fixés. Dès le début du projet, un organigramme (figure 17) a été établi afin de clarifier les interactions entre eux.

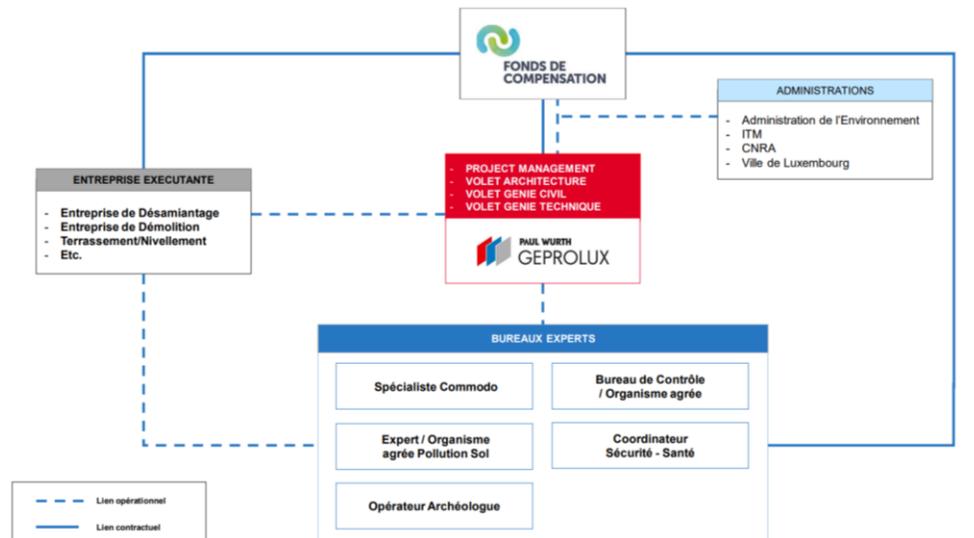


Figure 14: Organigramme projet de déconstruction de l'OAS (Projet OAS-PWGP)

3.1.2 Interview

Dans le cadre de ce projet, des fiches d'enquête (en annexe) ont été conçues en se basant sur des attentes d'un projet type de déconstruction circulaire, trouvés dans la littérature. Ces questionnaires ont été soumis à divers acteurs clés, tant internes qu'externes, incluant des professionnels du secteur de la déconstruction, des responsables de la gestion des projets, ainsi que des entreprises de recyclage et de stockage.

L'objectif principal des questionnaires était de comprendre le niveau d'implication de chaque acteur, challenges d'un point de vue pratique et les actions spécifiques entreprises. Les pratiques actuelles, les méthodologies employées, et les actions précisent qui démontrent de l'intégration des principes de l'économie circulaire dans les opérations quotidiennes ont été recherchées.

Par ailleurs, les interviews visaient également à identifier les challenges rencontrés lors de la mise en œuvre des principes de l'économie circulaire dans ce type de projets.

L'objectif ultime de cette démarche était d'obtenir une vision claire et exhaustive de l'état actuel de l'intégration des principes de l'économie circulaire dans la déconstruction.

3.1.3 Méthodologie de démolition/déconstruction

Les clauses techniques générales du Centre de Ressources des technologies et de l'innovation pour le bâtiment dans leurs dernières versions font partie intégrante du présent projet. En effet, ces clauses techniques générales (CTG003) s'appliquent à tous les travaux de déconstruction et de démolition de bâtiments, ouvrages d'art et de structures indépendamment du type de construction et de son utilisation antérieure. L'entreprise de déconstruction est censée avoir pris connaissance de celles-ci et les appliquer. En cas de contradictions entre clauses techniques, les données mentionnées du CRTIB sont prédominantes. Un diagramme (Figure 15) a été réalisé pour présenter les différentes étapes suivies au cours de ce projet par l'entreprise de démolition comme mentionnées dans les CTG 003.

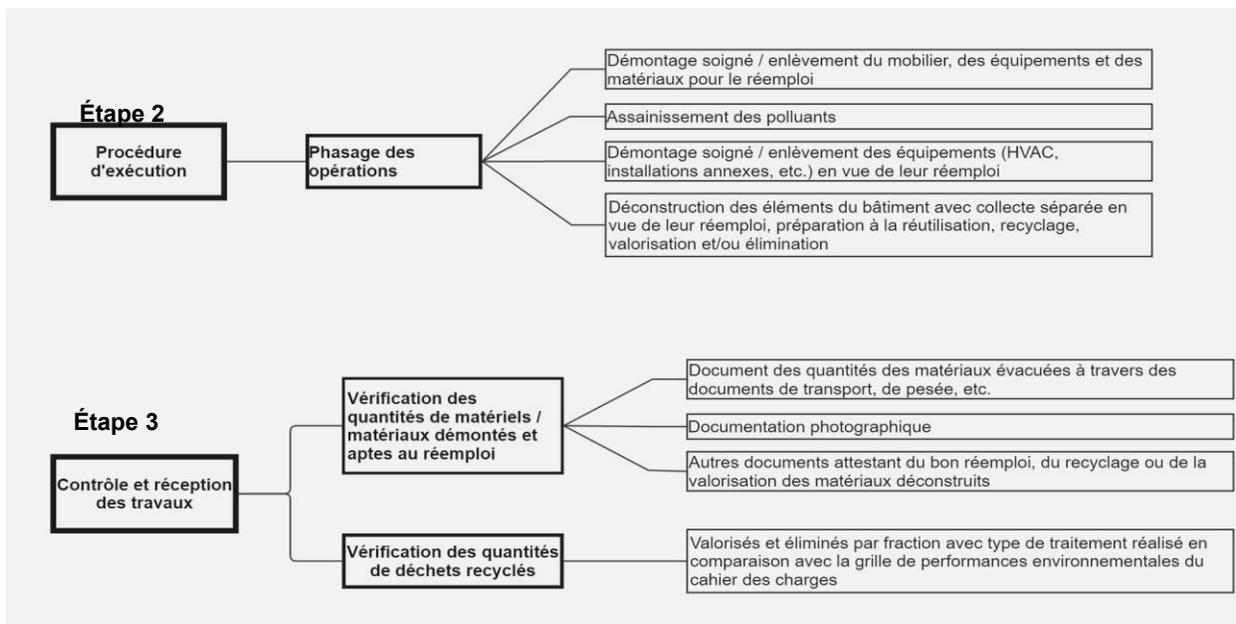
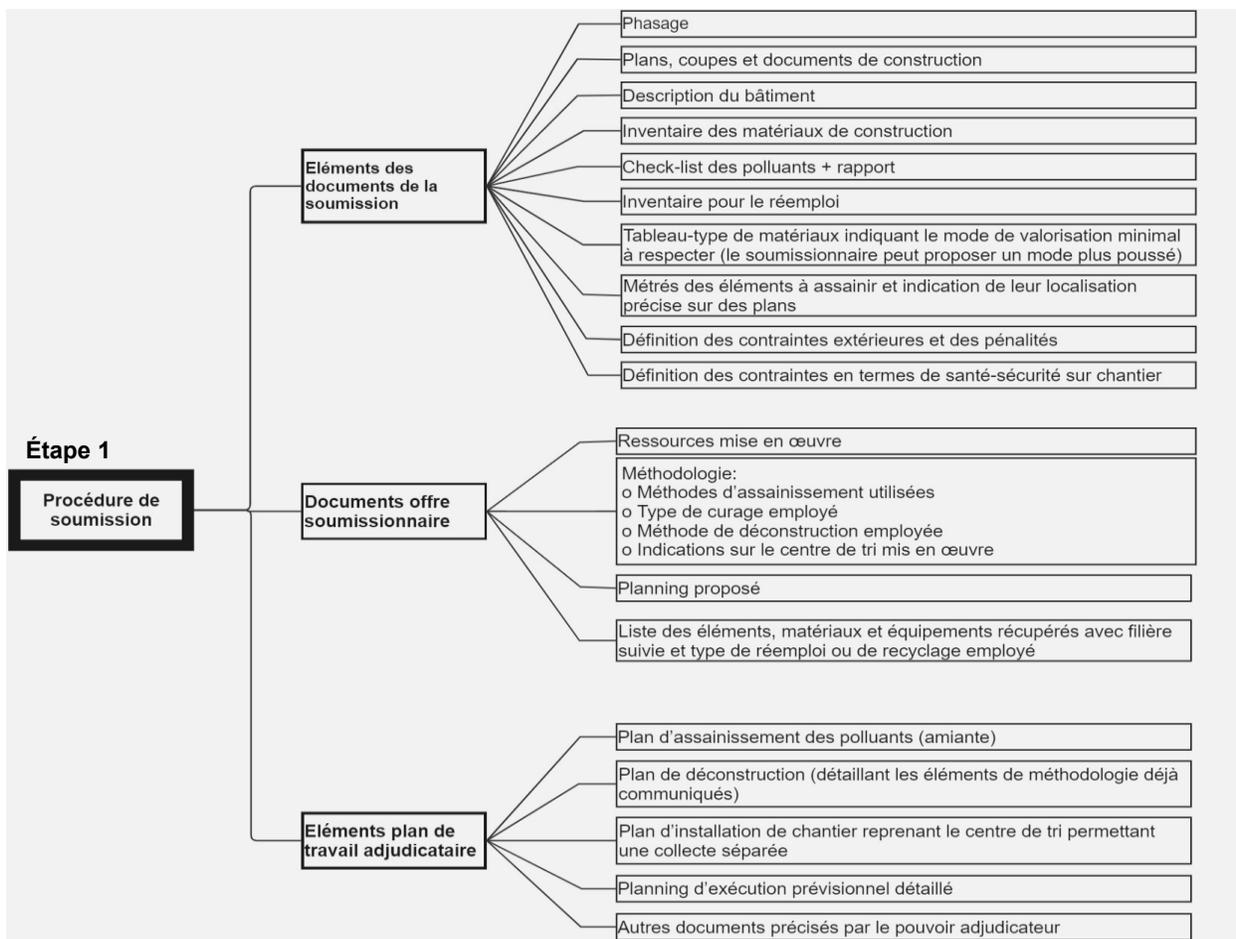


Figure 15: Diagramme de flux des CTG du CRTIB

Parallèlement aux CTG, des clauses techniques particulière (CTP) ont été mise en œuvre celles-ci précisent que l'exécution des prestations contractuelles par l'entrepreneur doit se faire conformément aux conditions générales et techniques, aux prescriptions de sécurité et de santé sur les chantiers qui sont d'application au Grand-duché de Luxembourg, aux normes nationales ou européennes en général et aux normes allemandes DIN en particulier, aux règlements des autorités locales et des services techniques compétents, aux règles professionnelles des chambres de métier, ainsi qu'aux instructions générales et détaillées de mise en œuvre ou d'application des fabricants de matériaux de construction, ceci en complément à part entière aux indications figurant de manière plus spécifique dans le descriptif des prestations faite par l'entreprise de déconstruction.

La méthodologie de déconstruction a été planifiée selon plusieurs phases clés, chacune avec des objectifs spécifiques en matière de gestion des déchets. Voici les détails de chaque phase et les actions à entreprendre pour optimiser la récupération et la réutilisation des matériaux.

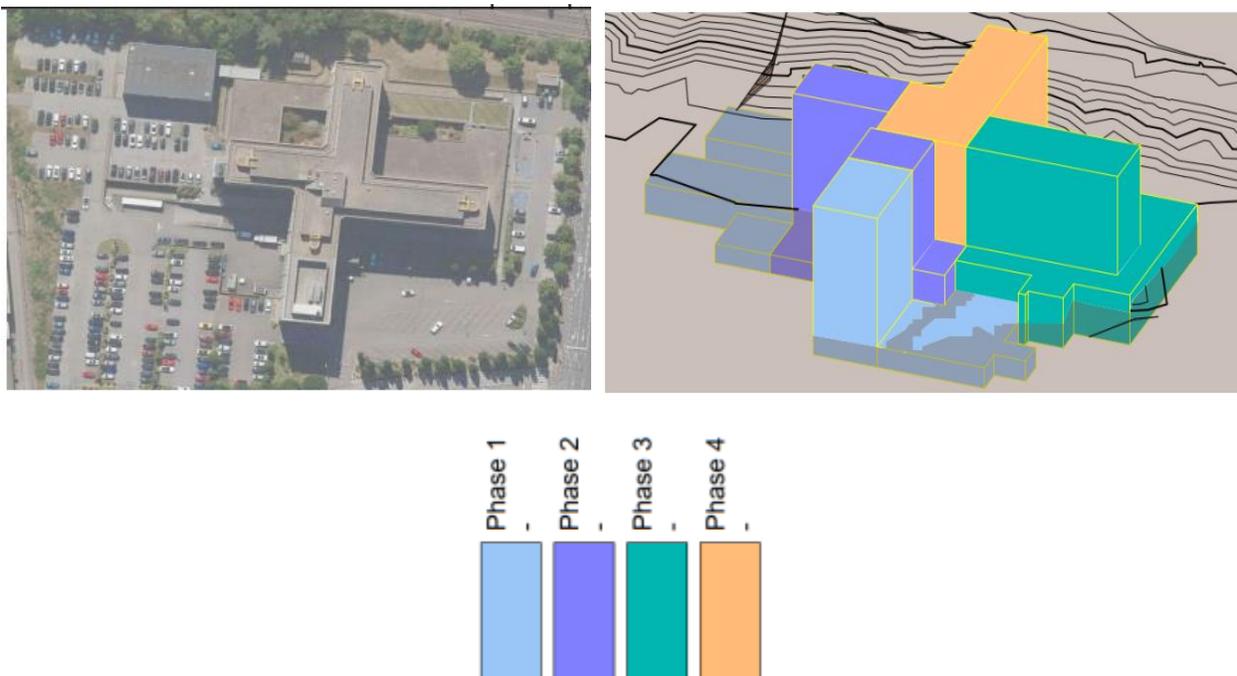


Figure 16: Flux général de déconstruction (Projet OAS)

- **Phase 1** : Les éléments impliqués dans la phase 1 doivent être démolis en premier, en entier sur tous les niveaux, en procédant du haut vers le bas. (Il est possible de conserver les niveaux de sous-sols jusqu'à la fin de la démolition, si l'entreprise souhaite avoir une plateforme de travail plus élevée que le niveau final projeté) ;
- **Phase 2,3 et 4** : Les éléments de la phase 2, 3 et 4 doivent être démolis jusqu'au niveau du rez de chaussée ;
- **Phase 5** : Terrassement ;
- **Phase 6** : Consolidation par phasage sur une partie des murs du sous-sol avec un remblais compacté ;
- **Phase 7** : Remplissage des extracteurs et de la chambre forte ;
- **Phase 8** : Démolition du reste du bâtiment (sous-sols) ;
- **Phase 9** : Protection du fond de fouille.

Précisément, il s'agissait pour la démolition de d'abord démonter toutes les façades (au moins dans la phase de démolition concernée), afin de minimiser l'emprise au vent. Une zone de stockage pour le mobilier/éléments à conserver a été réservée.

Pour le système charpente métallique, bac acier avec le béton, il a été proposé un démontage en premier lieu le démantèlement des dalles, puis des poutres puis des colonnes. Cet ordre est à répéter à tous les étages, en commençant par le dernier étage de la structure de la phase considérée.

Pour le système de dalles précontraintes, le même procédé serait à mettre en place. Un étage après l'autre, les dalles doivent être enlevées puis les poutres/acrotères et enfin les colonnes. Le planning de déconstruction avait été réalisé sur MS Project par PWGP afin de respecter le phasage établi sur base du temps imparti. Une partie de ce planning est présentée par la figure 19 ci-dessous et la suite et la fin de celui-ci peut être retrouvée en annexe.

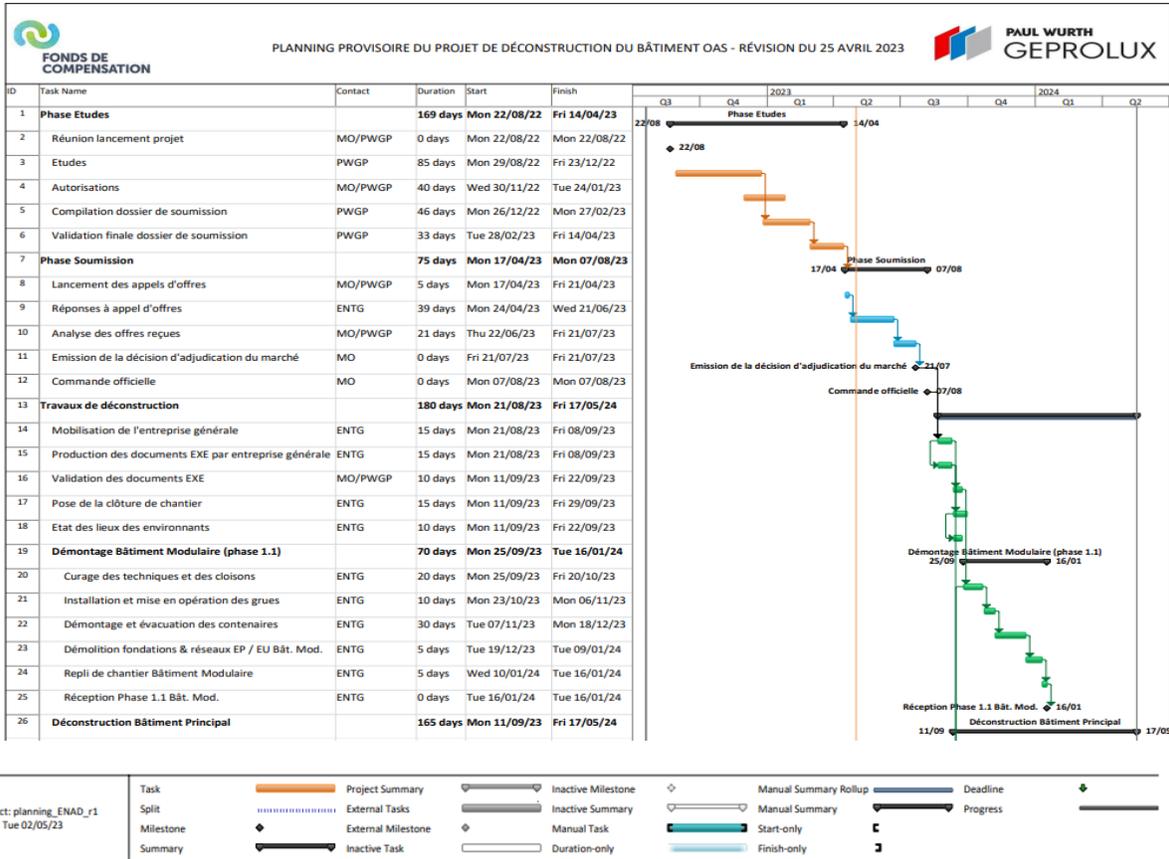


Figure 17: Planning de déconstruction de l'OAS (projet OAS-PWGP)

3.1.3.1 Inventaire

Avant la déconstruction du bâtiment existant, un inventaire des matériaux et des éléments de construction produits doit être établi et soumis à l'administration de l'environnement du Luxembourg. L'entreprise en charge de cet inventaire (LSC) au travers de son bureau d'étude Géoconseils a pu obtenir à la suite d'une visite du bâtiment des informations qui ont été exploitées dans un fichier Excel prévu à cet effet. Ainsi, pendant trois heures de visite, les différents étages et sections du bâtiment ont été inspectés.

Des moyens au service du BIM tels que le relevé par scanner laser 3D (nuage de points 3D, photos panoramiques) et la remodelisation dans le logiciel revit (Figure 20) ont été employés. En général ces deux moyens en plus des plans et de l'historique du bâtiment servent de base de connaissance de l'existant. Ici il s'agissait de réaliser un inventaire

virtuel pour aider à la compréhension de l'existant et pour comptabiliser plus facilement les matériaux du bâtiment. Des photos ont été prises pour documenter les détails desdits matériaux. Ces photos peuvent être retrouvées dans le fichier des inventaires en annexe 2.

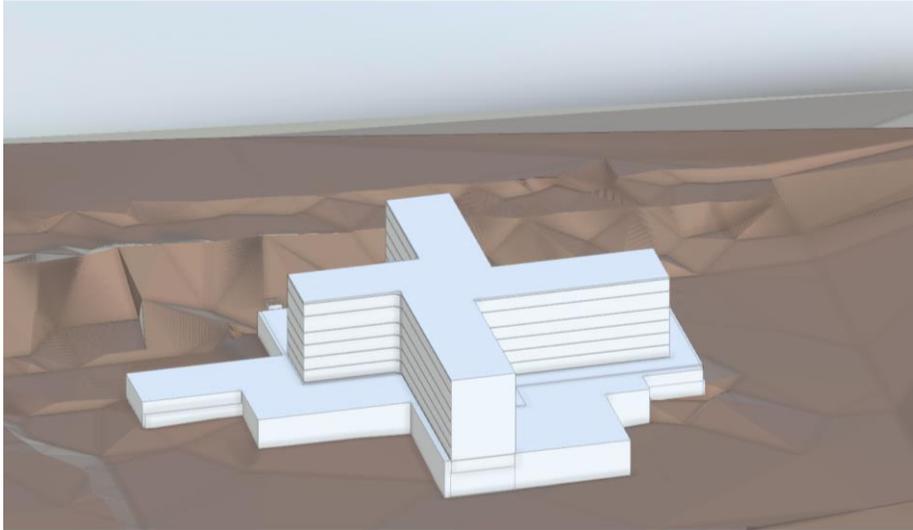


Figure 18: Maquette Revit du bâtiment de l'OAS (projet OAS-PWGP)

En raison de la taille du bâtiment et du temps limité de la visite, des hypothèses ont été formulées concernant les quantités et les poids des matériaux. Ces hypothèses ne reflètent pas nécessairement la réalité et ne sont que des estimations. Géoconseils a précisé qu'ils n'assument aucune responsabilité quant à l'exactitude des quantités indiquées. Les éléments de structure ont été quantifiés à l'aide de la maquette. En effet, celle-ci permet d'isoler les différents matériaux constitutifs du bâtiment et de les comptabiliser, comme le montrent les figures ci-dessous.

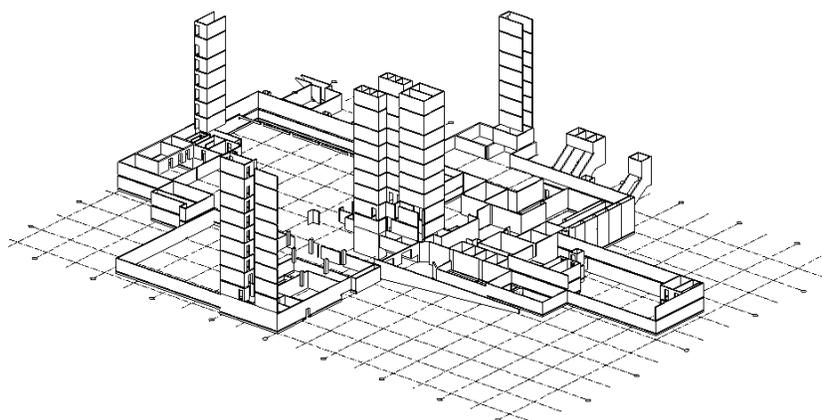


Figure 19: Isolation des couches béton (projet OAS-PWGP)

Tableau 6 : Comptabilisation des couches bétons (projet OAS-PWGP)

<SC_Quantité voile BA>							
A	B	C	D	E	F	G	H
Matériau structurel	Longueur	Hauteur non contrainte	Largeur	Matériau: Volume	Contrainte supérieure	Type	Commentaires
SC Béton	<multiples>	<multiples>	15.00	33.18 m ³	<multiples>	SC - Mur béton 15cm	Béton
SC_Béton	<multiples>	<multiples>	20.00	546.99 m ³	<multiples>	SC - Mur béton 20cm	Béton
SC_Béton	<multiples>	<multiples>	24.00	1336.28 m ³	<multiples>	SC - Mur béton 24cm	Béton
SC_Béton	<multiples>	<multiples>	25.00	536.92 m ³	<multiples>	SC - Mur béton 25cm	Béton
SC_Béton	<multiples>	<multiples>	30.00	47.39 m ³	<multiples>	SC - Mur béton 30cm	Béton
SC_Béton	<multiples>	<multiples>	35.00	10.13 m ³	<multiples>	SC - Mur béton 35cm	Béton
SC_Béton	<multiples>	<multiples>	40.00	101.23 m ³	<multiples>	SC - Mur béton 40cm	Béton
				2612.11 m ³			

Conformément aux recommandations de l'AEV et LIST, il est nécessaire à la suite de la quantification, de proposer une méthode de gestion (réemploi, réutilisation, recyclage et élimination). Pour cela, le Template Excel proposé par ces deux organismes (dans le guide de la déconstruction), doit être rempli pendant l'inventaire. Ce fichier comprend trois feuilles prédéfinies où les informations suivantes doivent obligatoirement être renseignées :

- Description du bâtiment ;
- Inventaire des matériaux ;
- Check-list des polluants.

Des données supplémentaires incluses dans ce fichier d'inventaire (Annexe2) permettent de visualiser les différents calculs et les hypothèses choisies. Elles sont présentées dans quatre feuilles additionnelles à la suite des 3 précédentes.

- Inventaire détails Bâtiment Principal
- Inventaire détails Pavillon
- Détails carrelages WC murs
- Détails sols

Pour cette étude, le choix des matériaux à étudier a été limité à quatre matériaux spécifiques : les métaux (acier, aluminium, cuivre), le béton, le bois, et le verre. Ce choix a été justifié par le fait que ces matériaux ont été identifiés en grande quantité le bâtiment de l'OAS lors de l'inventaire et les feuilles Excel de l'inventaire global en annexe le confirme. Les données retenues peuvent être consultées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 7: Récapitulatif inventaire de matériaux

Type de matériau dominant	Estimatif déchets inventoriés (tonnes)	Méthodologie de gestion des déchets
Fer et Acier	3660	Recyclage des métaux par société agréée.
Béton	28415	Recyclage du béton dans concasseur sur site. Le béton concassé sera réemployé sur site comme matériau de remblais
Bois	457	Recyclage ou réutilisation
Verre	54	Le recyclage est envisagé mais rendu difficile, en raison des tailles non standardisées des fenêtres.

L'analyse des matériaux pollués n'a pas particulièrement été détaillée dans cette étude mais les informations allant au-delà, relatives à leur identification et leur élimination, peuvent être consultées dans les prescriptions légales et dans la littérature spécialisée correspondante.

- Inventaire fourniture

L'inventaire des fournitures a été réalisé et complété par celui des éléments de structure. Il consistait en un processus systématique de recensement des meubles et des objets présents dans les bâtiments de ce projet.

Le mobilier a été identifié et répertorié dans des fiches Excel prévues à cet effet. Cela inclut des meubles tels que des bureaux, des armoires, des tables, ainsi que d'autres

objets comme les équipements électroniques, les réfrigérateurs, les cuisines, les micro-ondes, etc. Une description détaillée a été associée à chaque identification, incluant la taille et l'emplacement dans le bâtiment (Annexe 2).

Un fichier Excel représenté par le tableau a permis de suivre les objets et les fournitures récupérés pour le réemploi, ainsi que de recenser les pertes éventuelles.

Tableau 8: fiche d'identification du mobilier

Salle		Groupe	Fonction	Bureaux			Tables			Chaises			Armoires			Tiroirs		Writeboard mural		Writeboard pied	Porte-mante au	Pare-vue		Extras	
n°	Nom			P.	M.	G.	P.	M.	G.	Bureau	Normal	Tabouret	P.	M.	G.	P.	G.	P.	G.			P.	G.		
	Autres	Stock				1		1	3	4	2	1				5									
	Autres	Climatisation				1					2										1				4 plaques
	Autres	Amorçak				1						1	2												
	Autres	Stock sol														6									
	Autres	Garage														1									
	Autres	Vestiaire																							
	Autres	Archives 1				3	7		10	20		11			2		1				1				2 petits bancs 80 casiers métalliques 4 étagères Plus que 30 chaises 46 casiers métalliques
	Autres	Archives 2						2		1	1				3	12	2								Toile murale
	Autres	Stock portes, mur, fenêtres	1																						
SS7	Autres	Technique	4			2	1	1	4	11							2			1		3	1		2 étagères
SS14	Autres	Chaufferie et ventilation	1			1			1						2		2								5 étagères, table en inox
	Autres	Salle de réunion	4			1			5					3											11 étagères
SS13	Autres	Groupe diesel													2										
SS10	Autres	Batterie													2										1 rack
SS11	Autres	No-break/Arilage				1				1						1									
	Autres	Réserve				1				1	1			2	2						1				21 étagères

De plus, Schroeder et Associés en collaboration avec BIM-Y (plateforme numérique développée par BIM&CO qui se concentre sur le BIM et la gestion des données dans les projets de construction) ont fourni un support digital en proposant des prestations telles que la cartographie 3D, la création d'un inventaire automatique. Ils ont également assuré l'identification des objets, l'implémentation des données et leur traitement pour les appels d'offres. Il était prévu de calculer les performances environnementales, mais cette option n'a finalement pas été activée.

La plateforme **NAVVIS** a été utilisée comme support numérique pour cette étude. L'accès à cette plateforme est réservé aux entreprises spécialisées dans le réemploi, la réutilisation, et le recyclage, ainsi qu'aux revendeurs et entrepreneurs. Grâce à cette plateforme, une visite virtuelle du bâtiment, comme le montre les figures 20 ci-jointes, a été réalisée. Les objets et matériaux d'intérêt pour les acheteurs ont pu être identifiés, et

les responsables de la gestion de ces matériaux pouvaient être notifiés pour faciliter leur acquisition.

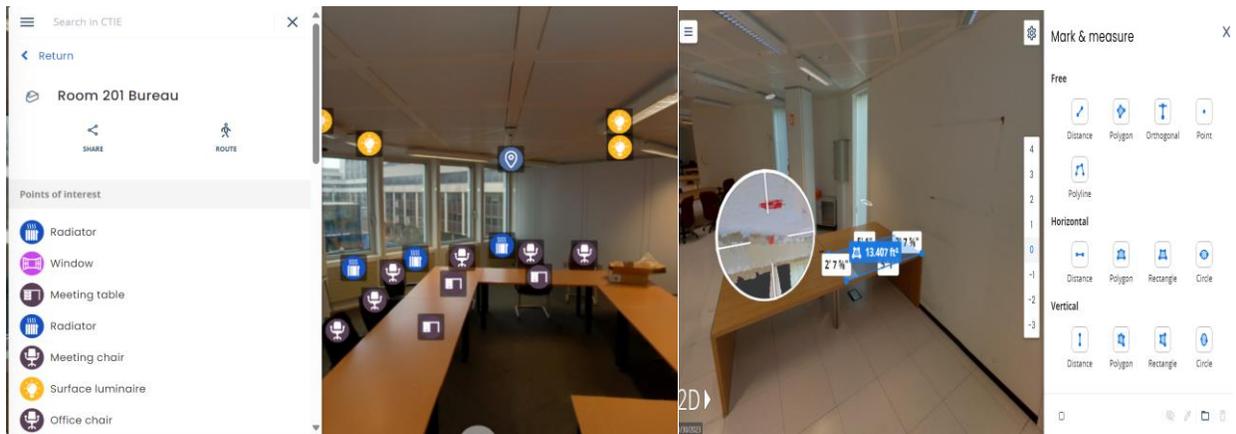


Figure 20: Identification des objets sur la plateforme NAVVIS

3.1.4 Tri et stockage des déchets

Les déchets identifiés ont été regroupés en 3 grandes catégories :

- **Les déchets dangereux** (présence d'amiante) : retirés hors du site pour élimination, et collectés dans les règles de l'art, conformément à la réglementation en vigueur au Grand-Duché du Luxembourg.
- **Les déchets non dangereux** : évalués pour réemploi, réutilisation, et recyclage.
- **Les déchets inertes (compris dans cette catégorie les déchets industriels banals)** : évalués pour réemploi, réutilisation, et recyclage.

Sur base des clauses contractuelles, l'entreprise de démolition (Association Momentanée (AM) :Xardel-Sogeroute) a établie sur le site de la déconstruction un espace de tri avec des conteneurs pour la séparation des déchets ordinaires ; et les fractions suivantes y sont actuellement incluses :

- Déchets minéraux ;
- Matériaux recyclables ;
- Déchets mélangés ;
- Déchets dangereux.

L'AM s'est engagée à suivre une méthodologie de tri des déchets qui respecte les exigences légales[41] dans une logique de préservation des ressources :

- La priorité a été accordée au réemploi ;
- La réutilisation potentielle des matériaux de la couche portante et des remblais a été évaluée non seulement par rapport à leurs propriétés environnementales, mais aussi par rapport à leur qualité géotechnique ;
- Le tri, le chargement et l'enlèvement des débris non réutilisables vers une décharge autorisée ;
- Le stockage sur chantier a été fait pour des matériaux de déconstruction à réutiliser et ou recyclé ;
- Le stockage de l'ensemble du mobilier du bâtiment sur un emplacement désigné dans l'enceinte du chantier par le FDC, afin de permettre la reprise des éléments de mobilier par les repreneurs intéressés.

Les figures ci-dessous représentent quelques clichés du fer et des dalles triées sur site.



Figure 21: Tri des métaux



Figure 22: Tri des dalles

3.1.5 Analyse du cycle de vie (Hypothèse transport)

Dans cette étude, seul le GWP a été analysé pour le concassage du béton et l'utilisation des granulats comme remblais.

Le GWP représente le potentiel de réchauffement global de la planète, mesuré en kg CO₂ équivalent. Le béton a été choisi comme matériau de référence en raison de son abondance sur le site, avec une quantité estimée à 11 700 tonnes. Les calculs ont été effectués en s'appuyant sur des données provenant d'interviews sur site, de la revue de littérature et de bases de données spécialisées (INIES).

3.1.5.1 Méthodologie d'Analyse du GWP

Pour cette analyse, différents scénarios ont été défini et comparés :

- Scénario 1 : béton recyclé sur site

Dans ce scénario, le béton est concassé sur site pour produire des granulats de granulométrie 0/100. Les émissions de CO₂ générées au cours du processus de concassage sont enregistrées et calculées selon les formules suivantes :

$$GWP_{concassage-SS} = Q * (E_{con} * f_{CO2,el} * C_{carb-concass} * f_{CO2,comb})$$

Sachant que $E_{Concassage} = Puissance_{Concasneur} * Temps_{Concassage}$

La formule finale suivante est obtenue :

$$GWP_{concassage-SS} = Q * (P * T * f_{CO2,el} + C_{carb-cons} * f_{CO2,comb})$$

- Scénario 2 : Béton recyclé hors site

Pour calculer les émissions générées hors site, c'est-à-dire sur un site de recyclage situé à une distance spécifique du site de déconstruction (dans ce cas, l'entreprise SOLID Luxembourg S.A., située à 42 km du site de déconstruction de l'OAS), les formules suivantes ont été appliquées.

$$GWP_{Transport-HS} = Q * D_{Transp} * C_{carb-cons} * f_{CO2,comb}$$

À ce stade, une hypothèse a été posée : étant donné que l'objectif était de concasser le béton pour l'utiliser sur le site de déconstruction, il a été supposé que les émissions calculées lors du processus de concassage sur site soient identiques à celles générées lors du concassage hors site, en partant du principe que le processus de concassage et les machines utilisées sont les mêmes

$$GWP_{concassage-SS} = GWP_{concassage-HS}$$

Les émissions globales obtenues hors site sont donc calculées suivant la formule suivante :

$$GWP_{Emission-HS} = GWP_{Transpt-HS} + GWP_{concassage-HS}$$

- Scénario 3 Extraction et production des nouveaux granulats

Dans ce cas, les matières premières sont des matériaux naturels tels que le calcaire, le granit, le grès, ou d'autres types de roches. Le scénario consiste à extraire ces matériaux pour produire des granulats neufs, qui auraient pu être utilisés pour combler le fond de fouille de l'OAS et stabiliser le talus de la CFL, si ceux présents sur site avaient été contaminés ou jugés de qualité insuffisante pour ces travaux (processus de concassage semblable à celui sur site de déconstruction). Les formules suivantes ont été appliquées pour ce calcul et pour 11700 tonnes de béton :

a- $GWP_{Extraction} = Q * f_{CO2,extraction}$

b- $GWP_{Production} = Q * f_{CO2,Production}$

c- $GWP_{Transport-E \rightarrow SP} = Q * (D_{Extraction \rightarrow production} * C_{carb-con} * f_{CO2,comb})$

d- $GWP_{Transport granulats} = Q * (D_{production \rightarrow déconstruction} * C_{carb-cons} * f_{CO2,comb})$

$$e- GWP_{Granulats neufs} = GWP_{Extraction} + GWP_{Production} + GWP_{Transport-E \rightarrow SP} + GWP_{Transport granulats}$$

La dernière formule est celle qui a permis de déterminer le GWP pour l'utilisation des matériaux neufs.

Avec :

Tableau 9: Définition des paramètres

Quantité totale de béton à concasser	Q
Distance de transport pour le cas hors site :	D_{Transp}
Consommation de carburant pour le transport :	$C_{carb-cons}$
Facteur d'émission pour le carburant :	$f_{CO2,comb} = 3,17$
Consommation énergétique pour le concassage	E_{con}
Facteur d'émission pour l'électricité	$f_{CO2,el} = 0,231$
Consommation de carburant pour le concassage :	$C_{carb-cons}$
Facteur d'émission pour l'extraction	$f_{CO2,extration} = 0,01$
Facteur d'émission pour la production	$f_{CO2,Production} = 0,0003$
Données	
Type de concasseur	Concasseur à mâchoire
Puissance du concasseur (KW)	75
Capacité de concassage (t/h)	100
Temps de concassage	117
Quantité de béton générée (Kg)	11700
Distance Décons-Recy (Km)	42
Distance Extrac-Prod(Km)	50
Distance Pro-Déconst (Km)	42

Facteur CO2 élec (kg CO2 eq/kWhe)	0,367
Facteur CO2 Combust (kg CO2 /kWhe)	0,3
Facteur CO2 extrac (kg CO2 eq)	65,3
Facteur CO2 Prod (kg CO2 eq)	65,3
Consommation carburant (l/t)	0,2
Distance totale (km)	91
consommation carburant (l/100km)	39,2
Facteur Diesel (kWh/l)	10,6
Consommation totale de carburant (l)	3567,2
Carburant consommé concassage	2340

3.1.6 Résultats du projet

- *Matériaux*

L'évaluation précise des déchets générés au cours de ce projet a été effectuée conformément à l'article 26 de la loi modifiée du 21 mars 2012 relative aux déchets. Cette loi exige que les déchets de chantier soient, dans toute la mesure du possible, soumis à une collecte séparée des différentes fractions. Sur la base de l'inventaire préalable réalisé par le LSC, une quantification des matériaux générés en fin de déconstruction a été réalisée. Les processus de traitement des déchets n'ont pas été spécifiquement étudiés par l'AM. La plupart des déchets ont été triés pour être ensuite récupérés par des sociétés agréées qui en assuraient le stockage et le traitement. La réalisation de cet inventaire témoigne du respect de la réglementation dans le cadre de ce projet et de la priorisation des processus de déconstruction sélective (prévention).

Tableau 10: Quantité de déchets évalués

Type de Déchet	Déchet inventoriés (tonnes)	Quantité Générée (tonnes)	Processus de Gestion (Réemploi, Recyclage, Élimination)	Destination des Matériaux
Ferraille	3 660	1 896	Recyclage	Société agréée
Aluminium	Non défini	175	Recyclage	Société agréée
Cuivre	Non défini	45	Recyclage	Société agréée
Béton	28 415	11 700	Recyclage	Société agréée
Bois	457	445	Recyclage	Société agréée
Plâtre	Non défini	86	Recyclage	Société agréée
Roofing	Non défini	50	Recyclage	Société agréée
Verre	55	41	Recyclage	Société agréée
Déchets amiantés	Non précisé	50	Élimination	Société agréée
DIB	173	1019	Recyclage	Société agréée
Total	/	15 507		

Sur un total de 15 507 tonnes de déchets générés au cours de ce projet, le recyclage est le principal processus de traitement utilisé. Ainsi, un taux de recyclage de 75% a été atteint pour le béton ce qui représente plus de la moitié des matériaux recyclés sur site.

- Mobilier

Les mobiliers et fournitures réemployés ont fait l'objet d'une analyse particulière, avec les résultats récapitulés dans le tableau ci-dessous. Une foire du mobilier a été organisée, des distributions internes et des dons à des associations ont permis le réemploi de ces éléments.

Tableau 11: Evaluation des fournitures

Désignation	Inventaire	Unité (pieces)	Réemploi		Reste
Chaises	1306	pcs	1167	89%	139
Tables/Bureaux	1171	pcs	277	24%	894

Amoires/Tiroirs	3129	pcs	783	25%	2346
Kitchenette	4	pcs	3	75%	1
Faux planchers	5900	m2	3540	80%	2360
Sanitaires	219	pcs	153,3	60%	65,7
Cuisine professionnelle	1	ensemble	1	100%	0
Taux réemploi				65%	

Toutes les actions entreprises pour le réemploi de ces fournitures ont permis d'atteindre un taux de réemploi de 65%. Ce taux aurait pu être plus élevé, mais le fait que l'accès aux locaux de l'OAS ait été restreint pour des raisons de confidentialité a constitué un frein.

Les plateformes numériques facilitent la gestion et le suivi des équipements disponibles pour le réemploi, améliorant ainsi l'efficacité et la transparence du processus. Cette innovation non seulement répond aux exigences légales, mais favorise également une gestion plus durable des ressources en réduisant l'empreinte carbone associée au transport et au stockage des matériaux.

Toutefois, pour ce projet, il a été constaté de manière évidente que la plateforme **NAVVIS** n'a pas eu d'impact positif sur le réemploi des matériaux et des fournitures. Les matériaux n'ont pas suscité un intérêt particulier des entrepreneurs et des repreneurs via cette plateforme. Aucune explication n'a été fournie pour justifier cette inefficacité, bien que la plateforme aurait dû constituer un outil précieux pour réduire les coûts environnementaux et économiques du transport, ainsi que pour limiter les problèmes de temps et d'espace de stockage, qui sont déjà des enjeux majeurs au Luxembourg.

Par ailleurs ces efforts illustrent une adoption proactive des nouvelles technologies pour soutenir des pratiques plus écologiques et économiquement avantageuses dans le secteur de la construction et de la déconstruction. Cependant, cette méthodologie nécessite des ajustements pour améliorer l'efficacité des outils mis en place.

3.1.6.1 Comparaison des quantités

Les quantités de déchets prévues à l'inventaire ne correspondent pas aux quantités réellement déconstruites sur site. Ceci s'explique par plusieurs freins, tels que : les contraintes de temps ainsi que l'absence ou l'obsolescence des fiches techniques des matériaux ; les pertes ou des découvertes de nouveaux matériaux durant le processus

Le diagramme ci-dessous (figure 22) permet de constater que les quantités de bois et de verre inventoriées et générées sont relativement semblables, ce qui indique une bonne précision dans l'estimation de ces deux matériaux. Cette précision peut être attribuée au fait les informations obtenues durant l'inventaire étaient plus détaillée.

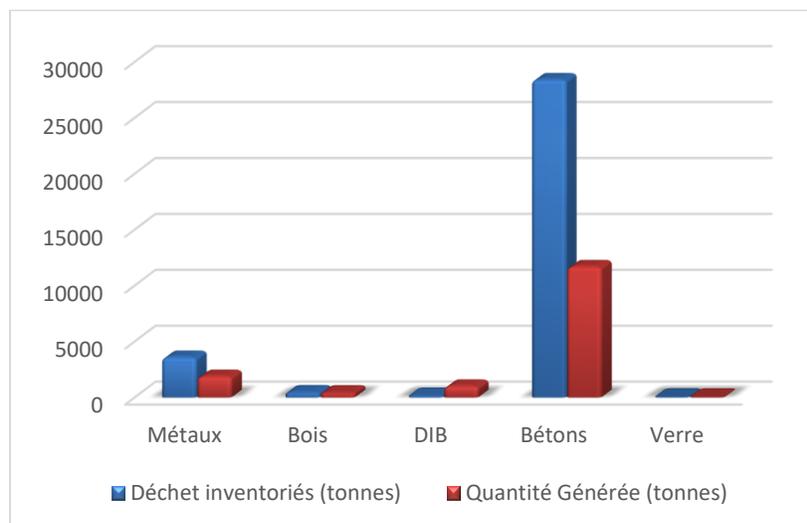


Figure 23: Comparaison des quantités de matériaux évalués

Contrairement au bois et au verre, une importante différence entre les quantités de béton inventoriées et générées a été identifiée. Ce qui était également le cas pour les métaux. Cela était dû à des estimations initiales excessives des quantités.

Les écarts entre les quantités inventoriées et générées peuvent avoir plusieurs impacts environnementaux négatifs tels que l'augmentation des émissions de CO₂. Ceci s'explique par un transport additionnel des quantités excédentaires nécessitant souvent des trajets supplémentaires, augmentant ainsi les émissions de CO₂ liées au transport. à noter aussi que le transport de quantité en plus engendre des coûts supplémentaires.

3.1.6.2 Gestion des déchets

- Béton armé

La gestion du béton sur site a été réalisée conformément aux prévisions de l'inventaire initial. Après la phase de déconstruction, des travaux de terrassement ont été entrepris. À cet effet, 11 700 tonnes de béton ont été concassées sur site, avec une granulométrie allant de 0 à 100 mm (0/100). La diversité des tailles des particules permet une meilleure compaction et stabilité, essentielle pour ces types de travaux. Ces concassés ont donc été utilisés en fond de fouille en attendant les futurs travaux prévus sur site en 2026 ; également pour la stabilisation du talus du chemin de fer Luxembourgeois (CFL).

Le concassage et la réutilisation du béton s'inscrivent parfaitement dans la réglementation relative à la gestion des déchets de construction et de déconstruction. La réutilisation de quantités aussi importantes démontre clairement les avantages de cette approche en termes de réduction des déchets. En concassant le béton directement sur site, non seulement les besoins en transport ont été réduits, mais l'empreinte carbone associée au transport du site de déconstruction au site de recyclage.

- Enrobés

Les enrobés n'ont pas été quantifiés durant la phase d'inventaire pour des raisons de difficulté d'évaluation évoquées par l'entreprise en charge de l'inventaire LSC. Cependant, environ 2600 tonnes d'asphalte ont été produites lors des travaux d'excavation. Le processus de recyclage de ces enrobés a débuté sur site avec le fraisage sur chantier des anciens revêtements. Les matériaux récupérés ont ensuite été collectés et transportés vers des entreprises spécialisées dans le recyclage qui déterminent le processus de traitement adéquat. Le tableau 3 présente une analyse des options de traitement, de recyclage et d'évacuation des échantillons des enrobés/asphaltes présentées par Géoconseils dans son offre.

**Tableau 12: Méthodes de recyclage des enrobes (Projet OAS-rapport
Géoconseils)**

Matériau	Echantillon	Recyclage	Evacuation
Enrobé/Asphalte	RKS1.1, RKS3.1, RKS6.1, RKS7.1, RKS8.1, RKS9.1	Traitement à chaud ou traitement à froid sans liants (Article 7, 9 (1))	Décharge à l'étranger – CED 17 03 01* - « mélange bitumineux contenant du goudron »
	RKS2.1, RKS4.1, RKS5.1	Traitement à froid avec liants (Article 8 (1))	Décharge à l'étranger – CED 17 03 01* - « mélange bitumineux contenant du goudron »
Couche portante	RKS2.2, RKS3.3	Non recommandé	Décharge à l'étranger – CED 17 03 01* - « mélange bitumineux contenant du goudron »
	RKS1.2, RKS4.2, RKS5.2, RKS6.2, RKS7.2	Dépend des caractéristiques géotechniques	Décharge luxembourgeoise Type A
Remblai	RKS3.4	Non recommandé	Décharge luxembourgeoise Type B

- Métaux

Les métaux ont été séparés par catégorie afin de permettre leur recyclage. Le fer, l'aluminium et le cuivre ont été identifiés et triés en conséquence. Les entreprises spécialisées dans le recyclage se chargent de collecter ces matériaux, de les traiter et de les transformer. Une fois recyclés, ces métaux sont remis en circulation, permettant ainsi de réduire la demande de nouvelles matières premières et de minimiser l'impact environnemental lié à l'extraction et à la production de métaux neufs. Ce processus contribue de manière significative à une économie circulaire, en maximisant la réutilisation des ressources existantes et en favorisant la durabilité. Cependant, le processus de recyclage de ces matériaux n'a pas pu être identifié dans le cadre de ce projet.

3.1.6.3 Gestion du stockage

Après le tri des matériaux, la gestion du stockage temporaire sur un chantier (in situ) de déconstruction revêt une importance cruciale en raison des potentiels problèmes de circulation. Pour ce projet, le maître d'ouvrage a sollicité plusieurs entreprises

spécialisées dans la gestion des matériaux et des déchets. Les diagrammes ci-dessous indiquent les différentes quantités de matériaux stockées en dehors du site.

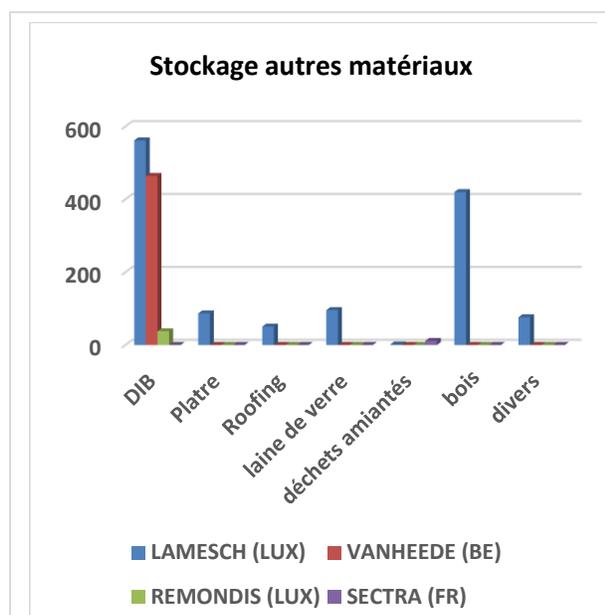


Figure 17: Stockage des métaux

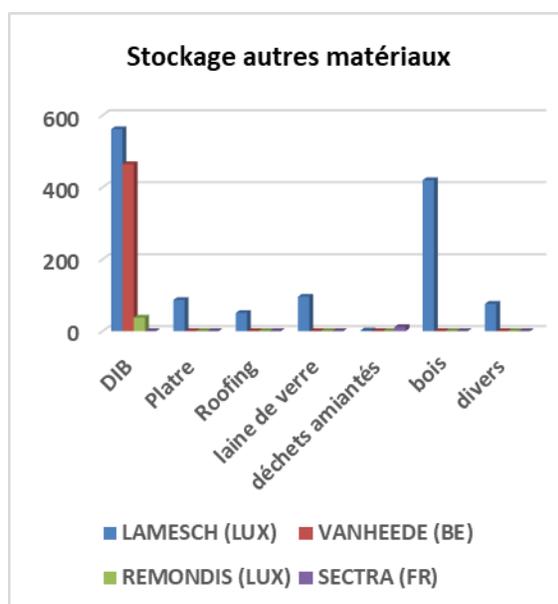


Figure 18 : Stockage des matériaux

Le stockage des métaux par des entreprises spécialisées (WS LOGISTICS, ECORE, LIEBAERT) permet de s'assurer que ceux-ci seront réintroduits dans le cycle économique plutôt qu'éliminés.

WS LOGISTICS (FR) stocke une quantité significativement plus élevée de ferraille, indiquant leur capacité de gestion de ce type de matériau. Ce point fut bénéfique pour ce projet vu les quantités de ferraille (1896 tonnes) évaluées sur site. En effet, cette entreprise est spécialisée en entreposage, stockage et achats de vieux fer et métaux. La ferraille stockée a été recyclée dans le but de promouvoir la diminution des pressions faites sur les ressources. Par ailleurs, le fait que WS LOGISTICS soit basée à la frontière de la France avec le sud du Luxembourg et que le projet de l'OAS soit implanté au Luxembourg pose effectivement plusieurs défis et impacts en termes de transport (émissions de CO₂ et consommation de carburant, entre autres).

Le deuxième diagramme indique que la majorité des autres déchets (non structuraux) ont été collectés par l'entreprise LAMESCH, une entreprise de recyclage basée au

Luxembourg. L'engagement des parties prenantes du projet à recycler localement les déchets contribue à réduire les émissions causées par le transport.

3.1.6.4 Résultats Hypothèse ACV

L'analyse des résultats présentés dans le tableau ci-dessous met en évidence le fait que le traitement des déchets de béton sur le site de déconstruction (en remblai) est beaucoup plus avantageux d'un point de vue environnemental que le transport vers un site de recyclage. Cela est particulièrement vrai en ce qui concerne les émissions potentielles de CO₂. En réduisant les distances parcourues par les matériaux, le recyclage sur site permet de minimiser significativement les impacts environnementaux.

Le transport des déchets vers un site de recyclage engendre un impact carbone (GWP) considérablement plus élevé que leur traitement sur place. De plus, la production de granulats neufs entraîne également des émissions potentielles très importantes. Cette option ne devrait même pas être envisagée sur un site de déconstruction. Il est important de noter que les émissions liées à la fabrication des machines de concassage n'ont pas été incluses dans ce calcul. Par ailleurs, les distances estimées pour les différents transports ne reflètent pas la réalité, ce qui pourrait également biaiser les résultats.

Tableau 13: ACV, Module C2-béton OAS

Paramètre	Unité	Résultat
Energie concassage	kWhe	8.775
Energie Transport	kWhe	37.812
GWP -Transport (D-R)	kgCO2eq	11.344
GWP-Concassage-SS	kgCO2eq	3.922
GWP-emission HS	kgCO2eq	15.266
GWP-Extraction	kgCO2eq	764.010
GWP-Transport (E-P)	kgCO2eq	11.344

GWP-Production	kgCO2eq	764.010
GWP-Transport (P-C)	kgCO2eq	11.344
GWP-Extract-prod	kgCO2eq	1.550.707

Par ailleurs il n'en demeure pas moins que le recyclage du béton sur site reste la solution la plus avantageuses en termes d'économie de ressources et d'émissions CO₂

3.1.7 Performances et enjeux

La déconstruction de l'OAS a été marquée par des efforts de gestion des déchets très encourageant mais aussi par des défis significatifs qui ont permis de dégager plusieurs enseignements.

3.1.7.1 Evaluation des actions

La bonne gestion des matériaux de ce projet s'est étendue au niveau de :

- La planification des travaux de déconstruction en se basant sur des réglementations en vigueur et du guide de la déconstruction et des bonnes pratiques ;
- La réalisation d'un inventaire préalable des matériaux tant numériques que physiques ;
- L'identification en amont des déchets dangereux afin de les traiter directement dans des filières spécifiques ;
- La maximisation du tri pendant la déconstruction par séparation des différents flux de déchets acier, aluminium ; bois et déchets en mélange ;
- Réalisation des déposes sélectives dans des contenants adaptés sur site.

Ces actions démontrent une gestion engagée et proactive des déchets, conformément aux normes légales et aux meilleures pratiques, permettant de réduire l'impact environnemental et de favoriser le développement de l'économie circulaire.

3.1.7.2 Challenges

Malgré la bonne volonté des parties prenantes de ce projet et l'engagement du FDC à vouloir maximiser la gestion des déchets, plusieurs défis ont été rencontrés :

- **Lenteurs administratives** : Un volume important de coffrage aurait pu être utilisé comme soubassement de la future route nationale passant par ce site, nécessitant des autorisations du ministère. Les délais pour obtenir ces autorisations n'étaient cependant pas compatibles avec ceux du projet, ce qui a conduit à la décision d'envoyer ces matériaux en décharge, réduisant ainsi le taux de réutilisation possible pour ce projet.
- **Manque d'information sur le devenir des matériaux** : Il y avait un manque d'informations claires sur le devenir des matériaux et les destinataires finaux.
- **Évaluation des quantités de CO2** : L'évaluation des quantités de CO2 impliquées dans tout le processus de déconstruction nécessitait une prise en compte de tous les paramètres du projet dans sa globalité dès le départ.
- **Plateforme de récupération des matériaux** : La plateforme mise en place pour la récupération des matériaux de second œuvre et du mobilier ne s'est pas avérée optimale pour le réemploi par des repreneurs, en raison du manque d'informations détaillées sur les matériaux disponibles.
- **Exigence de Confidentialité** : La demande de confidentialité du FDC sur les anciens locaux de l'OAS a conduit à une restriction de l'accès au site, compliquant ainsi l'inventaire et la récupération des matériaux de second œuvre et du mobilier pour le réemploi.

3.2 Scénario 2 : Démolition/ Déconstruction future du siège social de l'entreprise Paul Wurth S.A

Pour ce projet, l'objectif était de partir de la méthodologie utilisée dans le projet de l'OAS pour évaluer son applicabilité et identifier les opportunités d'amélioration. Il a donc été nécessaire d'analyser les plans du siège social de Paul Wurth S.A. et de proposer une approche de déconstruction adaptée à ce contexte en mettant l'accent sur les stratégies d'économie circulaires liées à ce secteur.

3.2.1 Présentation du bâtiment siège social PW S.A.

Situé au 32 rue de l'alsace L-1122 Luxembourg, le bâtiment à déconstruire est le siège social PW.S.A. Cet immeuble comprend un bâtiment construit en quatre étapes, avec une surface totale de plancher d'environ 11 800 m². Pour une étude plus détaillée, il est judicieux de diviser le bâtiment en trois parties distinctes comme le présente la figure ci-dessous :



Figure 24: Siège Social Paul Wurth S.A (photo P.W)

La description détaillée du bâtiment peut être identifiée dans le tableau suivant.

Tableau 14: Description détaillée du bâtiment

Bâtiment	Année de construction	Utilisation	Superficie (m ²)	Nombre d'étages	Description avancée
Bâtiment A + Surélévation	1952 1992	Immeuble de bureau	5172	4 2	<ul style="list-style-type: none"> - Ossature métallique de 6 étages - Structure de toit avec salle de séminaire - Cave - Rez-de-chaussée (l'entrée principale et la réception) - Noyau en béton armé accueille 2 ascenseurs pour la desserte verticale. - En 1992, le bâtiment a été surélevé de deux étages et largement rénové (y compris la façade).
Bâtiment B	1974	Immeuble de bureau, incluant le bâtiment de liaison et la cage d'escalier.	4860	6 étages + 1 sous-sol	<ul style="list-style-type: none"> - Ossature métallique de 6 étages et 1 sous-sol - rez-de chaussé : un centre de calcul moyen - Caves : entrepôt et centre technique ; - Des éléments de liaison de 6 étages avec la partie A du bâtiment - Des locaux sociaux et des kitchenettes - D'une cage d'escalier centrale - Escalier en acier extérieur - 1992 rénovation optique de la façade par des éléments en aluminium - 2007 rénovations de la couverture du toit et renforcement de l'isolation thermique
Bâtiment C	2002	Pavillon représentant l'extension	1781	4	<ul style="list-style-type: none"> - Immeuble de bureaux ; - Sous-sol : bureaux ; - Ossature en béton armé de 4 étages ; - Cage d'escalier ; - Murs extérieurs en éléments préfabriqués recouverts d'éléments en aluminium excepté la façade Nord.

3.2.2 Méthodologie de déconstruction de Paul Wurth S.A

Pour l'élaboration de la méthodologie de déconstruction future du siège social de P.W., les méthodologies existantes décrites dans les documents tirés de la revue de littérature ont été examinées. Les challenges rencontrés lors de la déconstruction du bâtiment de l'OAS ont également été pris en compte. Enfin, des interviews relatives à l'intégration d'une méthodologie BIM poussée ont été réalisées

Il convient de rappeler que la méthodologie proposée repose sur le respect de la réglementation en vigueur au Luxembourg développée au point 2.4 de ce travail. Ceci permet d'établir des bases communes. Il a été observé pour le projet de l'OAS que, le maître d'ouvrage a exigé une méthodologie de déconstruction spécifique, ce qui a conduit l'AM à se baser sur les clauses techniques générales du CRTI-B et à proposer des clauses techniques particulières adaptées. L'approche proposée ici partira également de cette méthodologie.

Cependant, il a été jugé nécessaire de l'enrichir en intégrant des critères trouvés dans la revue de littérature, afin d'améliorer la gestion des déchets et des matériaux de déconstruction.

Il est important de noter que cette approche reste théorique et ne garantit pas un réemploi, une réutilisation ou un recyclage à 100 % des déchets générés en pratique. Des tests de validation et des essais seront nécessaires pour assurer sa duplicabilité dans d'autres projets comme il sera le cas pour le S.S. PW. La méthodologie proposée est axée sur l'optimisation de la remise en circulation des matériaux et sur l'amélioration des méthodes de contrôle et de gestion des déchets.

Les challenges identifiés avec la méthodologie appliquée au projet de l'OAS ont été regroupés et présentés dans le tableau suivant :

Tableau 15: base de la future méthodologie S.S. PW

Phase	Critères	Challenge	Solution proposée	Référence
Etape 1 Procédure d'exécution	Inventaire des matériaux	- Difficulté à comptabiliser les matériaux en raison l'absence de détail	Lors de la phase d'étude d'un projet de construction ou de déconstruction, le niveau de détail de la maquette joue un rôle crucial. Une maquette	Déconstruction digitale [51]

		au niveau de la maquette - Absence d'unité fonctionnelle bien définie - Méthode de traitement non définie	numérique, souvent réalisée en BIM (Building Information Modeling), sert de base pour planifier et simuler diverses phases du projet. Le niveau de détail (LOD - Level of Detail) de cette maquette doit être adapté en fonction des objectifs de l'étude.	
	Inventaire pour le réemploi	- Difficulté à écouler les fournitures en raison d'une plateforme numérique insuffisamment descriptive. - Accès limité aux locaux.	- Fournir plus de détails sur les matériaux (mètres, fonctionnalité) - Rendre le site accessible aux entrepreneurs des 3 frontières - Maximiser la communication	Plateforme Opalis [52] Plateforme Reuse [53]
Phase 3	Fiches de suivi des déchets sur site	Difficulté à évaluer les méthodes de traitement des déchets	Proposition d'une fiche complète pour le suivi et traitement des déchets sur site	Interreg[54]
	Evaluation du module C2 de l'analyse du cycle	Difficulté d'évaluation dû au manque d'information et sur les matériaux évaluer, Le mode de traitement et utilisation finale de ceux-ci	- Elaboration des fiches de suivi des quantités des matériaux ; - Caractéristiques des modes de transport utilisés pour le déplacement sur site et du site de déconstruction au site de recyclage - Distance parcourue - Méthodes de traitement des déchets	Analyse du cycle de vie en construction et démolition[50]

Selon les travaux de [55] étudiés dans la revue de littérature, 3 critères sont essentiels pour évaluer les stratégies de déconstruction circulaire : la durée des travaux (en jours), le coût du chantier, le taux de valorisation des matériaux (en % massique), et les émissions de gaz à effet de serre (en kg CO₂ eq). Les deux premiers critères ont été vérifiés sur le chantier de l'OAS, où les délais étaient prioritaires et chaque étape de l'exécution était facturée. Ces critères sont généralement mis en avant pour tout type de projet.

Le troisième critère, le taux de valorisation des matériaux en pourcentage massique, permet de comparer les résultats obtenus en appliquant une méthodologie de déconstruction à l'objectif réglementaire de 70 %.

Toujours selon cette étude, le modèle d'optimisation d'une procédure de réemplois, réutilisation et recyclage repose sur trois catégories de variables :

- **Variables de décision** : elles permettent de définir la méthodologie de déconstruction, précisant comment les travaux seront réalisés et comment les déchets seront gérés. La gestion des déchets doit inclure le type de contenants et d'équipements utilisés pour leur évacuation, les sites de destination, et les traitements appliqués. Il est essentiel de ne pas se limiter aux tickets de pesage émis par les entreprises de recyclage. Les superviseurs de chantier devraient également disposer d'une fiche de suivi détaillée des déchets. Ainsi, les quantités de déchets récupérés et valorisés dépendent directement de la stratégie de travaux adoptée.
- **Connaissances** : Elles varient selon l'entreprise et le contexte spécifique du chantier. Ces connaissances sont transversales et peuvent être adaptées et appliquées efficacement à différents chantiers. Cela implique que le personnel doit être compétent.
- **Variables liées au chantier** : propres au cas d'étude, ces variables représentent les caractéristiques du bâtiment, telles que sa superficie, le volume de déchets potentiels qu'il génère, et les contraintes qui pourraient entraver le déroulement des travaux. Ces variables doivent être estimées par un professionnel à partir des documents du bâtiment (plans, diagnostics, métrés)

La méthodologie de déconstruction à adopter pour le S.S P.W devra s'axer prioritairement sur une phase d'étude préalable basée sur une approche BIM (Building Information Modeling).

Cette proposition découle d'une interview réalisée auprès des acteurs du BIM (voir annexe 3). Selon eux, il est préférable de collecter le maximum d'informations sur le bâtiment afin de mieux reproduire ces données dans le modèle BIM. Les composants de la maquette numérique peuvent ainsi inclure des détails spécifiques sur chaque matériau, tels que la date de pose, les indices de réparabilité, et, pour les constructions futures, une notice de désassemblage (solution plausible pour les nouvelles constructions). Les options suivantes sont celles qui ont été mises en avant dans la méthodologie présentée

dans la figure 25. À noter que les clauses techniques générales (CTG003) proposées par le CRTI-B restent prises en compte dans cette méthodologie.

- **Détection des Matériaux Contaminés :**

Cette étape permet d'identifier les éléments dangereux ou contaminés dans le bâtiment, ce qui est crucial pour la gestion sécurisée des déchets et la protection de l'environnement. Un modèle BIM précis aide à repérer ces matériaux à travers les informations issues du carottage et des analyses des échantillons. Une fois les matériaux dangereux identifiés, il est possible de les repérer sur la maquette et de planifier les phases de décontamination.

- **Identification des Espaces Répétitifs :**

En identifiant les espaces qui se répètent dans le bâtiment (comme des bureaux standards), il est possible d'optimiser les processus de démolition et de gestion des déchets. La reconnaissance de ces répétitions permet de rationaliser les efforts de déconstruction, rendant le processus plus rapide.

- **Évaluation du Potentiel de Recyclage et de Réutilisation des Matériaux :**

Cette évaluation permet de déterminer quels matériaux peuvent être recyclés ou réutilisés ou envoyé en décharge après la déconstruction. Le modèle BIM aide à identifier les matériaux valorisables, réduisant ainsi la quantité de déchets envoyés en décharge et favorisant une approche plus durable de la déconstruction.

- **Identification des Opportunités de Valorisation :**

Le modèle BIM aide à repérer les marchés et secteurs où les matériaux récupérés peuvent être réutilisés ou valorisés. Cela inclut des secteurs comme la construction de nouveaux bâtiments, l'aménagement paysager, ou même la production de nouveaux matériaux. Cette étape est essentielle pour maximiser la valeur économique des matériaux déconstructibles.

- **Évaluation des Contraintes de Coût et de Stockage :**

Avant de procéder à la déconstruction, il est important d'analyser les coûts associés et les défis de stockage des matériaux récupérés. Le BIM permet de simuler différents scénarios pour évaluer les coûts potentiels et prévoir les besoins en stockage, facilitant ainsi une planification financière et logistique plus précise.

- **Simulation des Émissions de Carbone Associées aux Matériaux :**

Une des utilisations avancées du BIM est la simulation des émissions de carbone liées à chaque matériau. Cette étape permet de comprendre l'impact environnemental des choix de déconstruction et de recyclage, et d'optimiser le projet pour minimiser l'empreinte carbone, alignant ainsi le projet avec des objectifs de développement durable.

Dans le cadre de ce travail la variable de décision est celle sur laquelle nous nous sommes appuyés et nous avons décidé de l'orienter sur du BIM management suite aux interviews réalisées.

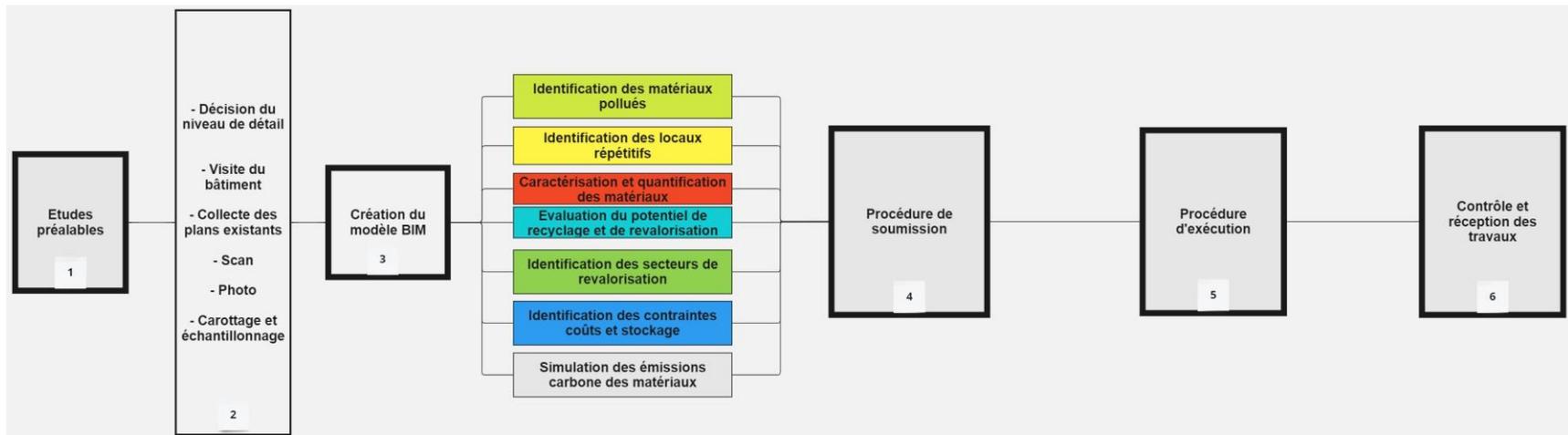


Figure 25: Approche Méthodologique de déconstruction S.S P.W.

Une déclaration systématique des flux de déchets est essentielle. La fiche d'inventaire établie pour la déconstruction de l'OAS peut être réutilisée pour évaluer les quantités des matériaux du bâtiment. Cette fiche peut être complétée par celle élaborée dans cette étude et présentée dans le tableau 16. Cette fiche pourra être proposée au superviseur de chantier de démolition du S.S P W. Elle devra être remplie sur site pour une meilleure traçabilité et devra toujours être disponible à la demande.

Tableau 16 : fiche de suivi de la gestion des déchets sur site

Projet									
Site									
Responsable du suivi									
Date de début									
Date de fin									
Type de déchets	Estimation poids	Quantité générée (tonnes)	Quantité traitée Sur site (tonnes)	Pertes	Quantité traitée Hors site (tonnes)	Type de traitement réalisé	Description du traitement ou fiche descriptive	Localisation du site de stockge	Localisation du site de recyclage

Dans le cadre de la déconstruction future du S.S.P.W., un procédé alternatif de recyclage du béton (Figure 29, 30, 31) a été exploré, en complément de son utilisation classique comme remblai. Étant donné les grandes quantités de béton générées lors de la déconstruction des bâtiments, des entreprises comme SOLID Luxembourg S.A. récupèrent ce béton pour produire du nouveau béton, comme illustré dans les figures ci-contre. Le processus de production de béton recyclé chez SOLID suit plusieurs étapes clés :

- Concassage
- Criblage et nettoyage
- Production du béton recyclé
- Contrôle qualité
- Utilisation dans la construction

Les trois premières étapes sont typiques du recyclage du béton. La quatrième étape, où le recyclage joue un rôle crucial, consiste à mélanger les granulats recyclés avec du ciment, de l'eau, et parfois d'autres additifs, pour produire du nouveau béton. Ce béton intègre un pourcentage variable d'agréats recyclés, en fonction des exigences spécifiques du projet.

Les deux dernières phases sont essentielles pour garantir que le produit final répond aux normes de qualité et de résistance requises pour une utilisation en construction. Si ces

critères sont remplis, le béton est ensuite transporté vers les chantiers de construction, participant ainsi à l'économie circulaire.



Figure 26: Concassage sur site de recyclage



Figure 27: Production du béton recyclé



Figure 28: Bloc de béton produit

4 Résultats et Discussion

La déconstruction de l'OAS a produit les quantités de déchets évaluées dans la partie 3.1.4. La répartition de ces déchets est présentée par les **figures 32 et 33** ci-dessous. On peut constater que le fer et le béton sont les matériaux abondants comme dans la majorité des chantiers de déconstruction. Et ces matériaux subissent pour un processus de recyclage qui permettra de les remettre dans le circuit des matériaux de construction.

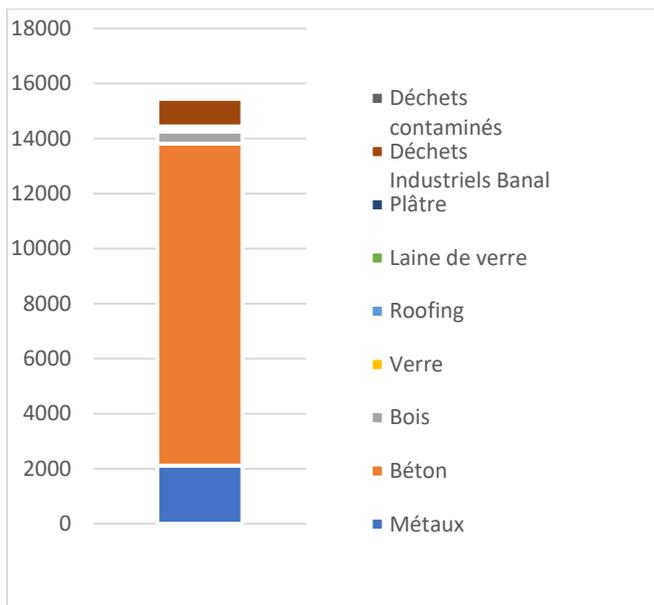


Figure 30: Déchets de déconstruction générés

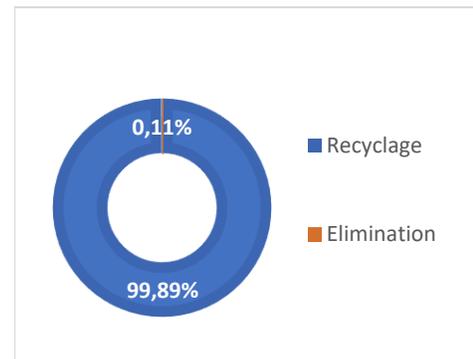


Figure 29: Récapitulatif des méthodes de traitement des déchets de l'OAS

Toutefois, l'unique processus de recyclage réellement vérifié ici est celui du béton comme fond de fouille du futur bâtiment qui sera construit sur ce site et comme remblais pour la stabilisation du talus CFL. Les autres matériaux sont envoyés dans des sites de stockage qui eux, vont les acheminer vers des sites de recyclage. Par ailleurs, l'information du recyclage réel de ces matériaux reste encore inconnue des acteurs du projet. D'où la mise en place d'une fiche de suivi effective pour le S.S.P.W. Le maître d'ouvrage doit être capable de retracer de manière fluide le parcours des déchets de son chantier. Il est donc important qu'une étroite collaboration subsiste entre les parties prenantes. Sur le

chantier de l'OAS le constat était qu'une fois l'échange de propriété effectuée pour les déchets, uniquement les entreprises de déconstruction disposaient encore des données là-dessus. Pourquoi ne même pas faire un suivi de ces déchets grâce au BIM au moins jusqu'à la porte de l'entreprise de recyclage.

4.1 Prise en compte de la méthodologie de L'OAS

Dans cette section, les résultats sont basés sur l'hypothèse selon laquelle le bâtiment du S.S.P.W. est 32 % plus petit que celui de l'O.A.S. En supposant que la même méthodologie de déconstruction utilisée pour l'O.A.S. soit appliquée au S.S.P.W., les quantités de déchets générés seront proportionnellement réduites.

Comme le montre le tableau ci-dessous, ces déchets représenteront environ 32 % de ceux produits lors de la déconstruction de l'O.A.S., en fonction de la comparaison des surfaces.

Tableau 17: Comparaisons des résultats des 2 scénarii suivant les CTG003 du CRTI-B

Scénarii	Surface (m2)	Quantité générée (tonnes)	Taux de réemploi (%)	Quantités recyclage (tonnes)	Quantités éliminées (tonnes)
Scénario 1 (OAS)	36625	15507	65%	15507	12
Scénario 2(S.S PW)	11813	5002	21%	5002	4

Par ailleurs, il est important de noter que les quantités de déchets générées lors d'un projet de déconstruction sont spécifiques à chaque bâtiment (d'après l'interview réalisée auprès du superviseur des travaux de déconstruction). En effet, il est rare de trouver deux bâtiments construits avec des quantités identiques de matériaux. Dans le cas de l'O.A.S., en raison de l'ancienneté et de l'absence de certain plan, il n'était pas possible d'identifier tous les matériaux. Des quantités de béton ont été découvertes dans les fondations alors qu'elles n'apparaissaient pas sur le plan disponible. L'entreprise de déconstruction s'est donc retrouvée avec un surplus de béton à gérer, non prévu initialement. Ces quantités n'ont pas pu être évaluées dans cette étude, car les pesées finales n'ont pas encore été effectuées.

Cela souligne que l'hypothèse de proportionnalité des déchets, formulée précédemment, ne serait valable que si les matériaux des deux bâtiments avaient été évalués avec précision et si leur composition était pratiquement identique. Cette incertitude s'applique également aux quantités de matériaux recyclés, réemployés, et éliminés.

4.2 Prise en compte l'approche méthodologique de déconstruction du S.S.P.W.

Dans le cadre de la déconstruction du S.S.P.W., une nouvelle méthodologie a été proposée, s'appuyant sur les données de la littérature qui montrent qu'une déconstruction menée avec soin, selon les principes de l'économie circulaire, peut atteindre des taux de valorisation de 70% (en masse) pour les bâtiments et les travaux publics. Sont compris dans ces méthodes gestion et de traitement des déchets : le réemploi, la réutilisation, le recyclage, et le réaménagement de site (remblai) [40]. Et en prenant ce taux et en l'appliquant à la déconstruction du bâtiment de l'OAS les résultats attendus sont ceux présentés le dans le tableau ci-après. 70% pour chaque matériau valorisé.

Table 18: Recyclage des matériaux à un taux de 70%

Scénarii	Surface (m2)	Quantité générée (tonnes)	Quantités recyclage (tonnes)	Quantités éliminées (tonnes)
Scénario 1	36625	15507	15507	12
Scénario 2	11813	10854,9	10854,9	8,4

Cette approche vise à maximiser la réutilisation et le recyclage des matériaux en suivant un processus rigoureux d'inventaire et de tri, appuyé par la modélisation BIM. Contrairement aux méthodes antérieures, cette nouvelle méthodologie garantit que chaque matériau est correctement identifié, caractérisé et séparé, permettant une gestion plus efficace. En appliquant cette méthodologie au S.S.P.W., on peut s'attendre à des pratiques de recyclage permettant des usages plus diversifiés du béton, au-delà du simple remblai qui représente même du Downcycling, comme le fait SOLID Luxembourg, qui permet la réutilisation le béton recyclé dans de nouvelles constructions. Ainsi, le béton

pourra être transformé en nouveaux agrégats, le fer et le bois seront réutilisés dans d'autres projets, et le verre sera converti pour de nouvelles applications dans un cas idéal.

Il est important de noter que, bien que les données spécifiques sur le recyclage du bois et du fer sur site n'aient pas été étudiées ici, le processus général reste conforme à celui décrit dans la revue de la littérature. Ces efforts devraient permettre de réduire au minimum les déchets envoyés en décharge et de maximiser la valeur récupérable des matériaux issus de la déconstruction.

Cette nouvelle approche, intégrée dès la phase de planification, assure que les spécificités du S.S.P.W. sont bien prises en compte, limitant ainsi les imprévus, comme ceux rencontrés lors de la déconstruction de l'O.A.S., où des quantités de matériaux non prévues ont été découvertes.

Pour le réemploi des fournitures et du mobilier, les résultats obtenus sur le projet de l'OAS montrent un taux de réemploi de 65 %, inférieur au taux réglementaire de 70 %. Ce taux réduit s'explique par un accès restreint aux locaux pour des raisons de confidentialité, ainsi que par les difficultés de navigation et l'accès limité à la plateforme NAVVIS.

Concernant le futur projet de déconstruction du S.S.P.W., il serait pertinent d'établir un inventaire des repreneurs et revendeurs situés d'abord dans un rayon de 120 km autour du site de déconstruction, puis à l'échelle de la ville entière, comme cela a été fait dans des projets similaires. Les revendeurs des pays voisins devraient également être pris en considération. La plateforme Opalis.be constitue une bonne ressource pour ce type de recherche. Cependant, il est important de noter que les revendeurs hésitent souvent à parcourir de longues distances pour récupérer des fournitures et du mobilier.

Si l'accès au bâtiment est restreint dans le cadre du projet S.S.P.W., il sera crucial de diffuser largement l'information sur les matériaux disponibles, en ciblant des entrepreneurs sélectionnés. Ces derniers se chargeront de relayer l'information auprès de leur réseau de revendeurs comme présenté sur la figure ci-dessous.

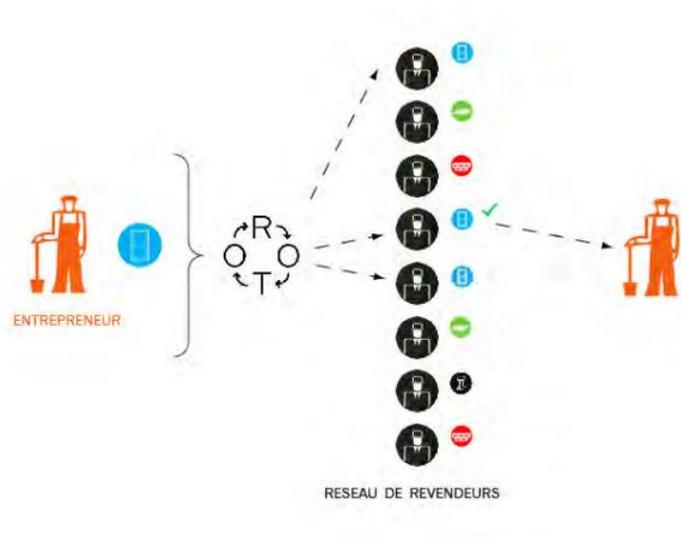


Figure 31: Stratégie de communication pour les matériaux à réemployerr[52]

Pour assurer l'entrepreneur de la réemployabilité des matériaux, des fiches peuvent être élaborées par matériaux. Sur la plateforme Navvis par exemple un clic sur un matériau, doit être capable de retrouver les propriétés de celui-ci permettant une facilité dans la prise de décision.

4.3 Analyse du cycle de vie

Dans la perspective d'intégrer une Analyse du Cycle de Vie (ACV) pour le futur projet de déconstruction du S.S.P.W., il est essentiel de se doter d'outils adéquats pour assurer une évaluation précise et complète. La création d'une fiche détaillant tous les éléments à intégrer dans cette analyse est primordiale. Un tableau Excel regroupant les matériaux, classés par catégories, permettrait de faciliter le calcul des émissions de CO₂ liées à la déconstruction de ces matériaux. Ce travail de calcul exige non seulement une expertise technique, mais aussi une parfaite maîtrise des nombreux paramètres impliqués dans le processus de déconstruction.

Cependant, l'objectif de l'ACV ne se limite pas uniquement à l'évaluation des émissions de CO₂. Il s'agit également d'analyser la quantité de ressources économisées et de déterminer la pertinence économique du réemploi des matériaux recyclés. Ces aspects nécessitent des études complémentaires approfondies, car ils sont cruciaux pour justifier le choix du recyclage dans une optique durable.

L'intégration du BIM (Building Information Modeling) dans cette analyse pourrait s'avérer très efficace, à condition que les données soient d'une grande précision et que tous les acteurs du projet soient pleinement impliqués. Pour que cette démarche soit fructueuse, il est nécessaire que chaque maillon de la chaîne, depuis la planification jusqu'à la mise en œuvre, dispose des informations nécessaires pour garantir une traçabilité et une évaluation correcte des impacts environnementaux à chaque étape.

4.4 Limites de la méthodologie BIM

Bien que le Building Information Modeling (BIM) offre de nombreux avantages pour la gestion des projets de construction et de déconstruction, son intégration dans les pratiques actuelles présente certaines limites. Le digramme suivant a été élaboré pour permettre de visualiser comment ces limites sont vu suivant différents aspects :

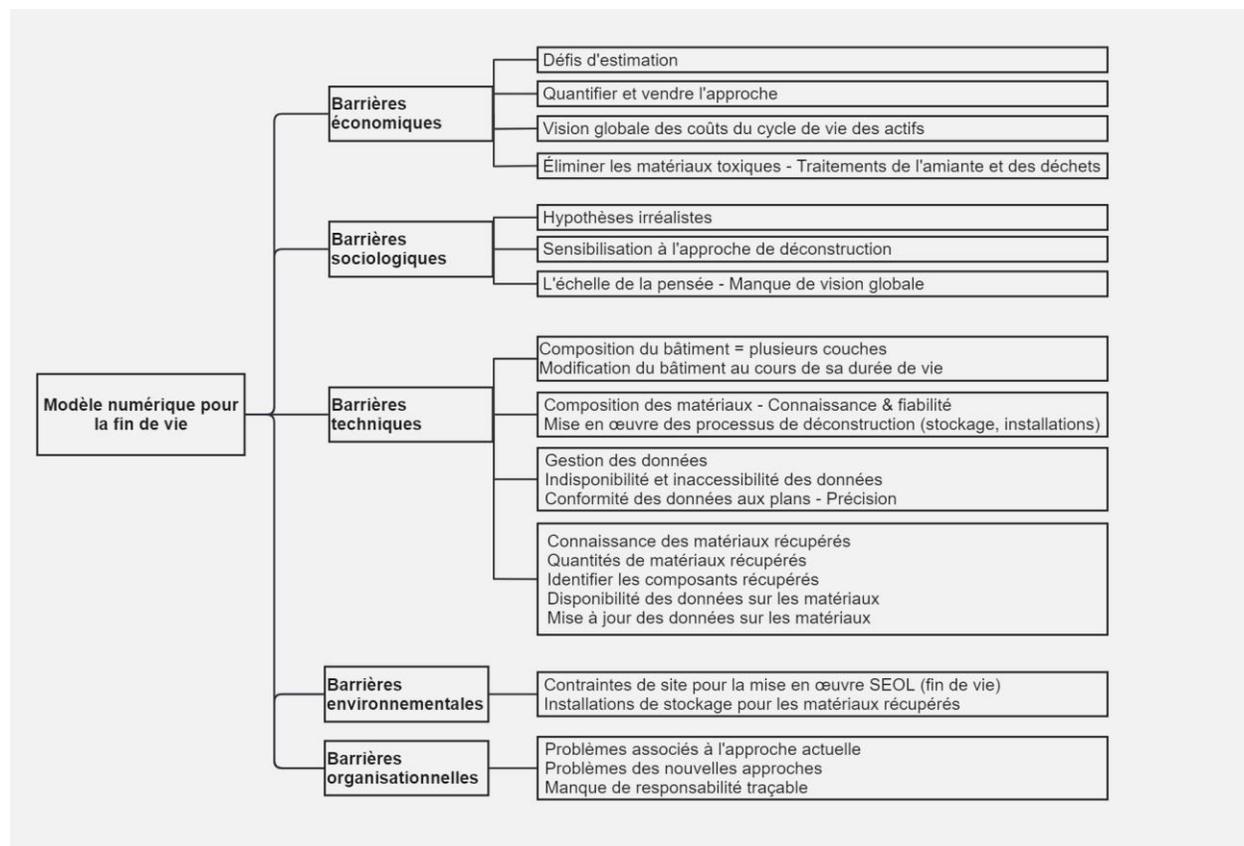


Figure 32: Limites du modèle BIM

5 Conclusion

La déconstruction des bâtiments existants représente un défi majeur pour l'industrie du bâtiment, où les mentalités sont souvent attachées à des méthodes traditionnelles de construction. L'idée même de déconstruction circulaire d'un bâtiment qui n'a pas été conçu dans cette optique peut sembler intimidante, voire irréalisable. Pourtant, ce travail a démontré que, avec une méthodologie appropriée, il est possible de maximiser la réutilisation, le réemploi, et le recyclage des matériaux.

En étudiant la déconstruction de l'ancien bâtiment de l'OAS et en proposant une méthodologie pour le futur chantier du S.S.P.W., nous avons mis en lumière le potentiel énorme de l'économie circulaire dans le secteur de la construction. La méthodologie adoptée, inspirée par les pratiques du CRTI-B, a permis de réemployer 65 % des matériaux du second œuvre et de recycler 98 % des matériaux du gros œuvre. Ce succès est en grande partie dû au béton, qui a représenté 75 % des matériaux recyclés, utilisés notamment pour stabiliser le talus de la CFL et comme sous-bassement pour le futur projet du FDC sur ce site.

Cependant, cette forme de recyclage, souvent qualifiée de « downcycling », ne doit pas être une finalité. Le défi pour le S.S.P.W. est de viser une déconstruction encore plus ambitieuse, en atteignant l'objectif européen de 70 % de réemploi, réutilisation et recyclage. Pour y parvenir, l'intégration du BIM management dans la planification de la déconstruction s'impose comme une nécessité. En identifiant précisément dans la maquette BIM les matériaux susceptibles d'être réemployés, réutilisés ou recyclés, il est possible d'optimiser chaque étape du processus, de la planification à la valorisation des déchets.

L'analyse du cycle de vie (ACV) réalisée au cours de ce projet a également souligné l'importance de disposer de données détaillées sur les matériaux et les méthodes de traitement impliquées, afin d'estimer précisément les émissions de CO₂. Ces informations sont cruciales, car elles orientent la méthodologie de déconstruction à adopter et permettent d'anticiper l'impact environnemental.

Pour aller plus loin, il est essentiel d'explorer des solutions innovantes pour le recyclage du béton. Le concept de recyclage que propose ici, offre une perspective prometteuse. Plutôt que de simplement réutiliser le béton en remblai, pourquoi ne pas l'intégrer dans la production de nouveaux agrégats pour un béton de haute qualité, comme le propose l'entreprise SOLID Luxembourg S.A. ? Cette approche, à appliquer au projet du S.S.P.W., permettrait non seulement de valoriser le béton recyclé, mais aussi de réintroduire des matériaux améliorés dans le cycle de construction.

En somme, ce projet de déconstruction ouvre la voie à une réflexion plus large sur l'avenir du bâtiment. Il montre que la déconstruction du bâti ancien ne doit pas être perçue comme une contrainte, mais comme une opportunité de transformer les défis en leviers d'innovation, pour une construction plus durable et respectueuse de l'environnement.

6 Bibliographie

- [1] “guide_comment_mieux_deconstruire_et_valoriser_les_dechets_du_ptp document important”.
- [2] “vademecum-batiment-circulaire”.
- [3] “Déchets de démolition et déconstruction.” [Online]. Available: www.record-net.org
- [4] S. Kreeslafwirtschaft and L. Fr, “Stratégie pour une économie circulaire Luxembourg.”
- [5] “GUIDE DE LA DÉCONSTRUCTION D’ËMWELTVERWALTUNG Am Déngscht vu Mënsch an Ëmwelt.”
- [6] A. R. Chini and S. F. Bruening, “REPORT 10 DECONSTRUCTION AND MATERIALS REUSE IN THE UNITED STATES.”
- [7] A. Enseignants and L. Dimitriadi, “Recyclage des déchets du chantier Une comparaison entre le Brésil et la France Enseignants responsables: Robert LEROY , professeur HDR.” [Online]. Available: http://www.cifful.ulg.ac.be/images/stories/Guide_reemploi_materiaux_lecture_2013.pdf
- [8] “économie circulaire matièreS premières production des éléments de Construction design & engineering utilisation et maintenance Rénovation Déconstruction MANIFESTE POUR UNE (DÉ)CONSTRUCTION CIRCULAIRE DANS LE BÂTIMENT AU LUXEMBOURG.”
- [9] A. Oikonomou, F. Bougiatioti, and P. Georgopoulos, “The Course of Building Materials in Historic Buildings and Monuments,” in *10th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin*, Springer International Publishing, 2018, pp. 433–443. doi: 10.1007/978-3-319-78093-1_46.
- [10] E. Nikolić, I. Delić-Nikolić, M. Jovičić, L. Miličić, and N. Mijatović, “Recycling and Reuse of Building Materials in a Historical Landscape—Viminacium Natural Brick (Serbia),” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 3, Feb. 2023, doi: 10.3390/su15032824.
- [11] C. J. Kibert and C. J. Kibert, “GREEN BUILDINGS: AN OVERVIEW OF PROGRESS.” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/236144351>
- [12] “Travaux de Démolition et Déconstruction : Prix, Permis et Méthodes.” Accessed: Jul. 06, 2024. [Online]. Available: <https://www.guide-renovation.be/terrassement/travaux-demolition>
- [13] “important-La protection des sols pollués”.
- [14] “Projet de CTG. 003 DECONSTRUCTION ET DEMOLITION.” [Online]. Available: www.crtib.lu

- [15] “CHAMBRE DES DEPUTES P R O J E T D E L O I modifiant la loi modifiée du 21 mars 2012 relative aux déchets”.
- [16] “CED2: Code Européen de Déchets Version 2”.
- [17] A. Zum Erstellen, “DÉCHETS ET RESSOURCES 1 DÉCHETS ET RESSOURCES.”
- [18] “L U X E M B O U R G.”
- [19] F. Collin and P. Marin, “Matériaux d’architecture Outil numérique d’assistance à la circularité dans la construction.”
- [20] P. Schosseler, J. Schroeder Autres contributeurs, K. Hansen, and D. Mulhall, “Null Offall Lëtzebuerg Ministère de l’Environnement, du Climat et du Développement Durable,” 2020.
- [21] B. Bayram and K. Greiff, “Life cycle assessment on construction and demolition waste recycling: a systematic review analyzing three important quality aspects,” Aug. 01, 2023, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*. doi: 10.1007/s11367-023-02145-1.
- [22] A. Athanassiadis, “Economie Circulaire dans le secteur de la Construction à Bruxelles: Etats des lieux, enjeux et modèle à venir.” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/321156948>
- [23] “PNGD”.
- [24] G. Klimaschutz, “Informations sur la prévention, la collecte et la valorisation des produits de déchets, ainsi que la certification du label ‚SDK fir Betriber‘ Aktiounen vum Ministère fir Ëmwelt, Klima an nohalteg Entwécklung mat de Gemengen SuperDrecksKëscht ® fir Betriber-gestion écologique des déchets selon le modèle de la SDK.”
- [25] A. 4 Définitions, “LOI DU 9 JUIN 2022 MODIFIANT LA LOI MODIFIEE DU 21 MARS 2012 RELATIVE AUX DECHETS RESUME DES NOUVELLES DISPOSITIONS.”
- [26] D. ’ Ëmweltverwaltung, “VADE-MECUM POUR LES COMMUNES RELATIVE AUX DÉCHETS”.
- [27] D. ’ Ëmweltverwaltung, “VADE-MECUM POUR LES COMMUNES RELATIVE AUX DÉCHETS.”
- [28] “Le recyclage et la valorisation de vos déchets de bois.” Accessed: Jul. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.ecodrop.net/recyclage-et-valorisation-des-dechets-de-bois-batiment/>
- [29] “LES MÉTAUX DANS LE BÂTIMENT Essentiels & 100 % recyclables.”
- [30] “Recyclage des métaux en entreprise.” Accessed: Jul. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.urbyn.co/fiche-dechets/ferrailleurs-recyclage-metal/>

- [31] M. Erlandsson and J.-O. Sundquist, “Environmental consequences of different recycling alternatives for wood waste A report to a Nordic cooperation project on the EC recovery target for construction and demolition waste (CDW),” 2014. [Online]. Available: www.ivl.se,
- [32] D. Maarten *et al.*, “DUURZAAM BEHEER VAN VLAKGLAS IN DE BOUW Een stand van zaken,” 2013.
- [33] A. Bouchikhi, “Optimisation de la valorisation des déchets de verre et de sédiments dans des liants recomposés : Activation-Formulation de mortiers-Stabilisation physico-chimique.” [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-03279034>
- [34] F. Hübner, R. Volk, A. Kühlen, and F. Schultmann, “Review of Project Planning Methods for Deconstruction Projects of Buildings.”
- [35] “Lean construction | Guide Bâtiment Durable.” Accessed: Jul. 08, 2024. [Online]. Available: <https://guidebatimentdurable.brussels/lean-construction>
- [36] J. Kirchherr and R. van Santen, “Research on the circular economy: A critique of the field,” Dec. 01, 2019, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.resconrec.2019.104480.
- [37] S. Kreeslafwirtschaft and L. Fr, “Stratégie pour une économie circulaire Luxembourg”.
- [38] “TesisV210825c (1) fr”.
- [39] “Normes | Guide Bâtiment Durable.” Accessed: Aug. 03, 2024. [Online]. Available: <https://guidebatimentdurable.brussels/cycle-vie-matiere-analyse-sources-dinformation-outils-daide-choix/normes>
- [40] “Environmental management : life cycle assessment : requirements and guidelines,” p. 51, 2021, Accessed: Aug. 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.en-standard.eu/bs-en-iso-14044-2006-a2-2020-environmental-management-life-cycle-assessment-requirements-and-guidelines/>
- [41] “Protocole européen de traitement des déchets de construction et de démolition,” 2016.
- [42] von Ute Dechantsreiter *et al.*, “Instrumente zur Wiederverwendung von Bauteilen und hochwertigen Verwertung von Baustoffen.” [Online]. Available: www.umweltbundesamt.de
- [43] “Klassifizierte Einrichtungen (Commodo/Incommodo) - Guichet.lu - Luxembourg.” Accessed: Jul. 16, 2024. [Online]. Available: <https://guichet.public.lu/de/entreprises/urbanisme-environnement/commodo-incommodo/autorisations-commodo/commodo.html>
- [44] “eli-etat-leg-memorial-1999-a100-fr-pdf”.
- [45] C. Incommodo Luxembourg, . “Généralités Informations et procédure.” [Online]. Available: <https://guichet.public.lu/de/entreprises/urbanisme-environnement.html>

- [46] “Règlement - 1013/2006 - EN - EUR-Lex.” Accessed: Jul. 17, 2024. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?qid=1480495460257&uri=CELEX:32006R1013>
- [47] “Arrêté grand-ducal du 7 mars 2019 portant publi... - Legilux.” Accessed: Jul. 17, 2024. [Online]. Available: <https://legilux.public.lu/eli/etat/leg/agd/2019/03/07/a155/jo>
- [48] J. Xiao, L. Zeng, T. Ding, H. Xu, and H. Tang, “Deconstruction evaluation method of building structures based on digital technology,” *Journal of Building Engineering*, vol. 66, p. 105901, May 2023, doi: 10.1016/J.JOBE.2023.105901.
- [49] “FACILITATING THE CIRCULATION OF RECLAIMED BUILDING ELEMENTS, AN INTERREG NWE PROJECT”.
- [50] B. Bayram and K. Greiff, “Life cycle assessment on construction and demolition waste recycling: a systematic review analyzing three important quality aspects,” Aug. 01, 2023, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*. doi: 10.1007/s11367-023-02145-1.
- [51] “Séminaire Bâtiment Durable Protocole de déconstruction et outils applicables Gestion de chantier circulaire : Vers une optimisation des flux.”
- [52] “matériaux | Opalis.” Accessed: Aug. 11, 2024. [Online]. Available: <https://opalis.eu/fr/materiaux>
- [53] “Home | reuse.lu.” Accessed: Aug. 11, 2024. [Online]. Available: <https://reuse.lu/>
- [54] “Stratégies de démolition et de déconstruction. Conception de bâtiments préventive des déchets L'économie Circulaire des RCD pour l'adaptation au changement climatique.”
- [55] Q. Eva, “Optimisation multi-objectif d'une stratégie de déconstruction de bâtiments.”

ANNEXES

Annexe 1

Étape	Obligation	Responsabilité	Réalisation	Actions-clefs	Documents-clefs	Page
Préparation	Recommandé	Maître d'ouvrage	Maître d'ouvrage / bureau d'études	Réunir les experts nécessaires	Définition des objectifs et contraintes	27
Inventaire des polluants	OUI	Maître d'ouvrage	Bureaux agréés / experts	Rechercher les polluants / amiante / plomb / PCB...	Inventaire amiante – Inventaire pollutions (y compris analyses)	32
Inventaire pour le réemploi	Recommandé	Maître d'ouvrage	Expert / bureau d'études / maître d'ouvrage (selon envergure)	Identifier et repérer les éléments, les matériaux récupérables (propices au réemploi / à la réutilisation)	Fichiers reusé de base et fichiers détaillés	34
Inventaire des matériaux	OUI	Maître d'ouvrage	Expert / bureau d'études / maître d'ouvrage (selon envergure)	Identifier et repérer l'ensemble matériaux sujets à la déconstruction	Fichier inventaire des matériaux	42
Test de déconstruction	Recommandé	Maître d'ouvrage	Expert / bureau d'études / maître d'ouvrage (avant la soumission) ou entreprise de déconstruction (avant travaux)	Tester la déconstructibilité et lever les doutes et incertitudes sur l'agencement et la structuration des différents matériaux	Rapport de déconstruction	44
Rédaction du dossier de soumission	OUI	Maître d'ouvrage	Maître d'ouvrage / bureau d'études	Définir les différents lots de soumission	Documents de soumission (voir liste des pièces)	45
Définition des critères extra-financiers	Recommandé	Maître d'ouvrage	Maître d'ouvrage / bureau d'études	Définir les conditions d'attribution y compris les pénalités	Clauses techniques particulières	47
Réception des offres des soumissionnaires et adjudication	OUI	Maître d'ouvrage	Maître d'ouvrage / bureau d'études	Vérifier la nature et la pertinence des informations demandées – désigner un adjudicataire	Offres détaillées (voir liste des pièces)	48
Réception du plan de travail de l'entreprise adjudicataire	OUI si amiante (Recommandé sinon)	Maître d'ouvrage	Maître d'ouvrage / bureau d'études	Vérifier la nature et la pertinence des informations demandées	Plan de travail approuvé y compris autorisation de l'ITM (si amiante)	49
Installation de chantier	OUI (clôture)	Entreprise adjudicataire	Entreprise adjudicataire	Clôture / zone de tri de déchets / (bascule)	Plan d'implantation et plan d'aménagement de la zone de tri de déchets	49
Désamiantage	OUI	Maître d'ouvrage	Entreprise spécialisée adjudicataire / organisme agréé	Assainir selon les règles de l'art et sous la supervision d'un organisme agréé	Rapport de libération du chantier (y compris analyses) (organisme agréé)	50, 33
Assainissement	OUI	Maître d'ouvrage	Entreprise spécialisée adjudicataire / organisme agréé (selon ampleur des travaux)	Dépolluer selon les règles de l'art (supervision selon ampleur des travaux)	Rapport d'assainissement / de nettoyage (analyses le cas échéant)	50, 33
Démontage des éléments récupérés	Selon besoin	Entreprise adjudicataire	Entreprise adjudicataire	Démonter soigneusement – identifier – conditionner - transporter	Liste des éléments / matériaux récupérés (y compris destinataires)	51
Travaux de curage	Selon besoin	Entreprise adjudicataire	Entreprise adjudicataire (ou sous-traitant éventuel)	Retirer les éléments de second œuvre, de parachèvement, les équipements techniques – collecter séparément les déchets – évacuer du chantier	Bordereaux de suivi des déchets – certificats récapitulatifs (entreprise agréée)	51
Déconstruction des éléments non porteurs puis des éléments porteurs	Selon besoin	Entreprise adjudicataire	Entreprise adjudicataire (ou sous-traitant éventuel)	Enlever les matériaux selon séquence définie – collecter séparément les déchets – évacuer du chantier	Bordereaux de suivi des déchets – certificats récapitulatifs (entreprise agréée)	52
Assainissement des sols (le cas échéant)	OUI (le cas échéant)	Maître d'ouvrage	Entreprise adjudicataire	Enlever les sols pollués (ou les traiter in situ) – conditionner – évacuer du chantier	Bordereaux de suivi des sols pollués (entreprise agréée) – rapport d'assainissement (organisme agréé)	52
Vérifications finales	Recommandé	Maître d'ouvrage	Expert / bureau d'études / maître d'ouvrage (selon envergure)	Vérifier le récolement entre les inventaires initiaux et les quantités évacuées pour les éléments récupérés et pour les déchets	Registre des déchets (à conserver 3 ans) – documents de récolement (pour décomptes finaux)	53
Sécurisation du site (pour mémoire)	OUI (si nécessaire)	Maître d'ouvrage, Propriétaire du terrain	Entreprise adjudicataire	Prendre les mesures nécessaires pour sécuriser le site avant les travaux ultérieurs (clôture, balisage, etc.)		52

Annexe 2

Objet	Photo	Type de déchets	Hypothèse	Dimensions	Etage	Pièces	Longueur (m)	Surface (m ²)	Volume (m ³)	Pièces en total	Longueur totale (m)	Surface totale (m ²)	Volume total (m ³)	Estimations poids (en kg par (m, m ² , m ³))	Estimations poids totales en kg	Estimations poids totales en to		
Béton armé		Béton 170101/Fer et acier 170106-170107	Estimations sur base du modèle Revit. Uniquement les éléments s sur la visible pris en maquette ont été en considération (raisons de fondation pour des annexe 2.7 simplification). Voir										11366	2500	28,415,000.00	28,415.00		
Acier		Fer et acier 170106-170107	Estimations sur base du modèle Revit. Voir annexe 2.7												250,000.00	250.00		
Poteaux mixte		Béton 170101/Fer et acier 170106-170107	Estimations sur base du modèle Revit. Voir annexe 2.7. Un poteau type pour toute la construction a été crée (mix béton et acier)										75		Pas de précision	Pas de précision		
Tapis		Déchets de construction et de démolition en mélange autres que ceux visés aux rubriques 170901, 170902 et 170903 - 170904	Voir annexe 2.5.4		-2-1 RCH 1			0 572 887 1645 1645 1645							1	10,762.00	10.76	
Linoleum		Plastiques 1702203	Voir annexe 2.5.4		-2-1 RCH 1			0 1068 1496 0 2 0 0 4 0 5 0 6 0 7 513				2745		3	8,235.00	8.24		
Carrelages cage d'escaliers		Tuiles et céramique 170103	Ce type de carrelages se trouve uniquement dans les cages d'escaliers. Voir annexe 2.5.4		-2-1 RCH 1			53 77 76 51 4 51 51 51 54 11				536		25	13,400.00	13.40		
Faux plafond -1		Déchets de construction et de démolition en mélange autres que ceux visés aux rubriques 170901, 170902 et 170903 - 170904	Ce type de faux plafond se trouve uniquement à l'étage. Voir annexe 2.5.2		-2 -1 RCH 1										678	12	8,136.00	8.14
Faux plafond -1		Déchets de construction et de démolition en mélange autres que ceux visés aux rubriques 170901, 170902 et 170903 - 170904	Ce type de faux plafond se trouve uniquement à l'étage. Voir annexe 2.5.2		-2 -1 RCH 1										756	12	9,072.00	9.07
Faux plafond étage type		Déchets de construction et de démolition en mélange autres que ceux visés aux rubriques 170901, 170902 et 170903 - 170904	Ce faux type de faux plafond couvre tous les plafond de l'étage type. Voir annexe 2.5.2		-2 -1 RCH 1										10998	12	131,976.00	131.98
Faux plafond RCH		Métaux en mélange 170407	Ce type de faux plafond se trouve uniquement au RCH, espace entrée. Voir annexe 2.5.2		-2 -1 RCH 1				274						274	12	3,288.00	3.29
Faux plafond RCH		Métaux en mélange 170407	Ce type de faux plafond se trouve uniquement au RCH. Voir annexe 2.5.2		-2 -1 RCH 1				1800						1800	12	21,600.00	21.60
Faux plafond étage 7		Métaux en mélange 170407	Ce type de faux plafond se trouve uniquement sur l'étage et toute l'étage est couvert par ce type de faux plancher. Voir annexe 2.5.2		-2 -1 RCH 1										502	12	6,024.00	6.02
Faux plancher -1		Bois 170201	Le faux plancher se trouve uniquement à quelques endroits sur l'étage -1. Voir annexe 2.5.4		-2 -1 RCH 1				732						732	50	36,600.00	36.60

Carrelages hall d'entrée		Terres et cailloux autres que ceux visés à la rubrique 170503-170504	Ce type de carrelages se trouve uniquement dans le hall d'entrée au RCH. Voir annexe 2.5.4	-2-1 RCH 1 3 4 5 4	0 0 410 0 0 0 0 0 0							45	18,450.00	18.45
Carrelages WC sol		Tuiles et céramique 170103	Toutes les installations sanitaires du bâtiment et du pavillon ont été considérées d'avoir du carrelage sur le sol. Voir annexe 2.5.4	-2-1 RCH 1 2 3 6 7	0 44 101 27 27 27 27 27 27 20						304	23	6,992.00	6.99

Annexe 3

Questionnaire sur l'approche intégrant le management

Questionnaire on the approach integrating

de projet et les principes d'économie circulaire dans le secteur de la construction

project management and circular economy principles

Date : 25/07/2024

Date

Nom :	Collin
Name	
Poste :	Architecte BIM Manager
Position	
Projet :	Demolition OAS
Project	

1- Comment le BIM permet-il d'optimiser l'efficacité des opérations et de réduire les impacts environnementaux dans le projet de déconstruction de la CNS ?

How does BIM maximize the efficiency of operations and minimize environmental impacts in the CNS deconstruction project?

La collaboration BIM n'a pas été utilisée sur le projet de démolition de l'OAS. Cependant des moyens au service du BIM ont été employés : le relevé par scanner laser 3D et la remodelisation logicielle. En général ces deux moyens servent de base de connaissance de l'existant et pour les études architecturales et techniques du nouveau projet.

Ici il s'agissait de réaliser un inventaire virtuel pour aider à la compréhension de l'existant et pour comptabiliser plus facilement les quantités de matériaux et d'éléments. C'est un procédé qui a de l'avenir. C'est en cela que des outils du BIM ont été utilisés pour mieux l'inventaire.

2- Pouvez-vous décrire les phases de conception, de modélisation et de planification de ce projet à partir des outils du BIM ? comment les principes de circularité sont-ils intégrés dans ce processus ?

Can you describe the design, modeling and planning phases of this project using BIM tools? How are circularity principles integrated into this process?

Le BIM ne change rien au déroulé des phases d'un projet. C'est une méthodologie, c'est-à-dire des outils et des méthodes, qui servent le déroulé et les tâches du projet.

L'emploi de cette méthodologie trouve tout son sens dans la réalisation des "cas d'usage", qui sont les raisons de faire du BIM.

Ces cas d'usage sont liés aux phases des projets : études et travaux

En phase étude la construction est totalement virtuelle et peut servir pour simuler et éprouver ses futurs caractéristiques, telles que la thermique, l'acoustique, la statique, mais aussi l'impact environnemental.

Au Luxembourg la simulation de l'impact environnemental au travers de la collaboration BIM est décrite dans le cas d'usage n° 11.

La collaboration BIM permet de coordonner les disciplines entre elles et d'optimiser les études. Parmi les études se trouve la définition des enveloppes et des équipements énergétiques de la future construction. Ainsi il est possible de définir les performances optimales ainsi que les caractéristiques intrinsèques environnementale des équipements eux-même (Ressources utilisées pour la fabrication de l'enveloppe et des équipements).

3- Quels sont les éléments pris en compte dans le BIM pour garantir la conformité aux normes et aux réglementations tout au long du cycle de vie de ce projet ?

What elements are considered in BIM to ensure compliance with standards and regulations throughout the life cycle of this project?

Le travail de conformité aux « normes » et surtout aux lois, se fait en phases étude chez les architectes et les ingénieurs. La démarche BIM peut venir accompagner ce travail.

Parmi les cas d'usage, il existe la simulation réalisée sur les modèles 3D permettant de contrôler la conformité des projet, tels que l'accessibilité ou l'incendie.

En ce qui concerne le cycle de vie, on peut comprendre la durabilité des matériaux et composant de la construction. Ainsi les composants de la maquette numérique peuvent contenir leurs propres caractéristiques telles que les matériaux utilisés, la date de pose, de garantie, un indice de réparabilité, et pourquoi pas une notice de désassemblage (ce qui n'existe pas encore)

4- Quels sont les outils du BIM qui sont particulièrement efficaces et donc qui facilitent la collaboration entre les différents intervenants de ce projet ?

What are the main BIM's tools that are particularly effective and therefore facilitate collaboration between the various stakeholders in this project?

Un outil crucial est la plateforme collaborative qui peut centraliser les informations, les documents et les communications.

Il en existe de nombreuses sur le marché mondial, mais ne se valent pas toutes.

5- Avez-vous des exemples de situation dans ce projet où le BIM a conduit à des réels gains en termes d'efficacité opérationnelle, de réduction de coûts ?

Do you have any examples of situations in this project where BIM has led to real gains in terms of operational efficiency and cost reduction?

Non, car la démarche collaborative BIM n'a pas été utilisée en tant que telle

6- En quoi le BIM a-t-il été décisif lors de la phase de programmation de déconstruction de la CNS ?

How was BIM decisive during the deconstruction programming phase of the CNS?

7- Comment se passe la collaboration des différentes parties prenantes dans le BIM ? *How does the collaboration of the different stakeholders work in BIM?*

En résumé, le travail de chaque discipline (architecture, ingénierie) se trouve représenté par une maquette qui contient de la géométrie et des informations sur les composants de la construction. Ces maquettes qui évoluent en permanence vers plus de détail, sont le support des échanges entre disciplines pour concevoir au fur et à mesure le bâtiment. Les disciplines entrent naturellement en conflit dans les études. Les confronter en amont virtuellement permet de régler les problèmes plus facilement.

8- Savez-vous si le BIM a-t-il été aligné avec des certifications de durabilité (comme BREEAM, etc.) pour soutenir la conception et la construction et la déconstruction de bâtiments circulaires ?

Do you know if BIM has been aligned with sustainability certifications (like BREEAM, etc.) to support the design and construction and deconstruction of circular buildings?

Oui le BIM permet d'appuyer les études qui souhaitent être labellisées. Grâce à des outils tels que ONE CLIC LCA, il est possible de confronter les études aux labels, afin de concevoir au mieux.

9- Quels sont les défis rencontrés lors de l'utilisation d'outils BIM dans ce projet et les stratégies pour les surmonter (avec accent porté sur l'optimisation des processus) ? *What are the challenges encountered when using BIM tools in this project and strategies to overcome them (with a focus on process optimization taking into account circular economy principles)*

Les "Outils BIM" utilisés dans ce projet - scan laser, modélisation 3D et plateforme numérique - n'ont pas vraiment été utilisés par les concepteurs pour réaliser leur projet

10- y'a-t-il à ce niveau du projet quelque chose que vous auriez fait différemment dans la gestion ou la mise en œuvre ?

Is there anything at this stage of the project that you would have done differently in terms of project management or implementation?

J'aurais réalisé une modélisation plus fidèle à la réalité afin d'obtenir des quantités exploitables. Ainsi moins d'erreur de quantité réelles auraient impactés le chantier, et un calcul d'impact environnemental aurait pu être réalisé.