

Rapport de projet

Démantèlement et
recyclage des matériaux
issus du secteur de la
construction : cas des
portes et fenêtres

Équipe solution #16 –
Démantèlement des portes et
fenêtres

Étape : Partager



Auteur : Maël Lahmar

Date : Août 2022

DÉMANTÈLEMENT ET RECYCLAGE DES MATÉRIAUX ISSUS DU SECTEUR DE LA CONSTRUCTION : CAS DES PORTES ET FENÊTRES

par

Maël LAHMAR

RAPPORT DE PROJET PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAITRISE AVEC PROJET EN GÉNIE DE L'ENVIRONNEMENT
M. Ing.

MONTRÉAL, LE 3 AOUT 2022

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Maël Lahmar, 2022



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE RAPPORT DE PROJET A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Mathias Glaus, directeur de projet
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Frédéric Monette, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

AVANT-PROPOS

Ces travaux s'inscrivent dans les projets du laboratoire d'accélération en économie circulaire pour le secteur de la construction¹, porté et développé par le Centre d'études et de recherches intersectorielles en économie circulaire (CERIEC). Depuis 2020, le centre a pour objectif de déployer l'économie circulaire au Québec à travers différents programmes de recherche multidisciplinaire, en concertation avec l'ensemble des acteurs de la chaîne de l'économie, du secteur privé, jusqu'aux académies ou organismes gouvernementaux, à travers une démarche cocrée et portée par l'ensemble des parties prenantes (ÉTS, 2022).

Dans le cadre du lab construction, des tables de concertation avec l'ensemble des partenaires ont permis d'identifier les freins à la mise en place d'une économie circulaire au sein du secteur de la construction. À l'issue de ces discussions, des solutions ont été imaginées pour répondre à ces freins, et des équipes solutions ont été constituées. Ce projet s'inscrit en tant que première étape des travaux réalisés au sein d'une de ces équipes, porteuse de la solution intitulée :

Mise en place d'une plateforme de démantèlement des portes et fenêtres (P&F) issues des étapes de déconstruction en vue de leur valorisation (CERIEC, 2022).

Le présent document s'inscrit plus spécifiquement dans une partie de la dynamique qui cadre l'ensemble de ce projet sur deux années. La Figure 0.1 présente les différentes étapes de ce cadre.

¹ Aussi appelé « lab construction »

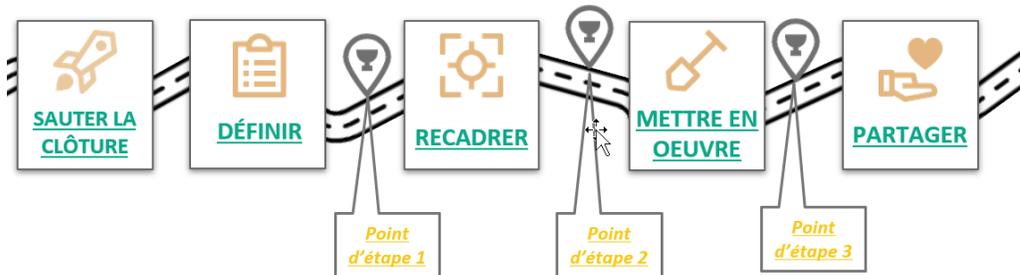


Figure 0.1 Dynamique de projet et étapes associées (tiré de : CERIEC, 2022)

Ces travaux avaient pour objectif de « sauter la clôture » en s’inspirant de retours d’expériences disponibles à l’échelle internationale, ou dans d’autres secteurs d’activités, et de fournir un premier cadre de travail propice à la réflexion de mise en place. Dans un second temps, l’objectif était de structurer l’ensemble des processus identifiés afin de définir le fonctionnement générique d’un centre de démantèlement. Par la suite, ce fonctionnement a été adapté aux réalités du terrain afin d’élaborer des scénarios de déploiement viables, notamment pour les trois centres pilotes du projet.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Mathias Glaus, mon directeur de recherche, pour sa bienveillance, son dévouement, et la justesse de ses mots. Ses nombreux commentaires pertinents, ainsi que son intérêt si communicatif auront grandement contribué à améliorer la qualité de ces travaux, et je l'espère, la qualité de ma réflexion.

Des remerciements particuliers au CERIEC, pour la confiance accordée, et particulièrement à Hortense Montoux, pour l'encadrement des travaux.

Un grand merci à Martin Dubois, directeur général chez Inter Action Travail, ainsi qu'à Florence Houle de Synergie Économique Laurentides, qui ont permis de concrétiser une grande partie de ces travaux sur le terrain.

Je souhaite aussi remercier ma partenaire de travail Domitille, pour sa bonne humeur quotidienne, qui aura permis de rendre ces travaux si intéressants sur le plan intellectuel, mais aussi sur le plan humain.

Des remerciements tous particuliers à Caroline, ma partenaire de vie, pour tout ce qu'elle m'aura apporté durant ces nombreuses années d'études.

Enfin, une dernière pensée pour mon grand-père Michel, qui m'accompagnera maintenant dans toutes mes aventures.

DÉMANTÈLEMENT ET RECYCLAGE DES MATÉRIAUX ISSUS DU SECTEUR DE LA CONSTRUCTION : CAS DES PORTES ET FENÊTRES

Maël LAHMAR

RÉSUMÉ

Les matières résiduelles issues du secteur de la CRD peuvent représenter plus de la moitié des matières entrantes au sein des écocentres du Québec. À l'échelle des centres de tri, ce sont près de deux millions de tonnes de ces matières résiduelles qui transitaient en 2015 (Recyc-Québec, 2018). Parmi ces déchets, les travaux du bâtiment constituent l'un des principaux gisements. Au sein des activités de rénovation et démolition notamment, de nombreuses portes et fenêtres sont considérées comme des déchets, et sont donc enfouies par manque de débouchés. Pourtant, une majorité des matériaux qui composent ces menuiseries pourraient être recyclés une fois désassemblés les uns des autres. Le présent document aura pour objectif d'identifier les principaux éléments de mise en place d'un centre de démantèlement pour les portes et fenêtres issues du secteur de la CRD.

Différents retours d'expérience ont permis d'identifier un cadre de travail général, notamment en explicitant le fonctionnement générique d'un chantier de déconstruction et d'un centre de démantèlement. Différents tests de démantèlement ont été réalisés et une structure préliminaire de catalogue a été initiée afin de rendre compte de la complexité de composition des menuiseries.

La performance environnementale de différentes filières de recyclage du verre sont ensuite analysées sur la base du taux de matière première secondaire inclut dans leurs procédés et des émissions de gaz à effet de serre que cela permet d'éviter. La filière de verre plat présente la pire performance concernant les économies d'émissions de GES, bien qu'elle présente une performance moyenne pour le taux de MPS incorporée. Inversement, la filière d'ajout cimentaire bénéficie d'économies d'émissions correctes, mais propose le plus bas taux de MPS. La filière de verre creux est la plus performante sur ces deux aspects, et est dotée de processus de gestion de fin de vie plus efficaces, malgré le fait que les produits en verre creux soient plus émetteurs de GES durant leur cycle de vie.

Mots-clés : centre de démantèlement; économie circulaire; filières de recyclage; analyse de cycle de vie

DISMANTLING AND RECYCLING OF MATERIALS FROM THE CONSTRUCTION SECTOR : THE CASE OF DOORS AND WINDOWS

Maël LAHMAR

ABSTRACT

Residual materials from the CRD sector can represent more than half of the materials entering Quebec's ecocentres. At the scale of sorting centers, nearly two million tons of these residual materials were in transit in 2015 (Recyc-Québec, 2018). Among these wastes, building works constitute one of the main sources. Within renovation and demolition activities in particular, many doors and windows are considered waste, and are therefore buried due to a lack of outlets. However, a majority of the materials which compose these joineries could be recycled once disassembled from each other. The objective of this document is to identify the main elements of a dismantling center for doors and windows from the CRD sector.

Different feedbacks have allowed to identify a general framework, in particular by explaining the generic functioning of a dismantling site and of a dismantling center. Different dismantling tests have been carried out and a preliminary catalog structure has been initiated in order to account for the complexity of the composition of the joinery.

The environmental performance of different glass recycling streams is then analyzed on the basis of the rate of secondary raw material included in their processes and the greenhouse gas emissions that this avoids. The flat glass sector shows the worst performance in terms of GHG emission savings, although it has an average performance in terms of the amount of SPM incorporated. Conversely, the cement additive pathway has decent emissions savings, but offers the lowest SPM rate. The hollow glass sector performs best on both counts, and has more efficient end-of-life management processes, despite the fact that hollow glass products have higher life-cycle GHG emissions.

Keywords: dismantling center; circular economy; recycling channels; life cycle analysis

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 ÉTAT DES CONNAISSANCES	5
1.1 Gisement de matières résiduelles du secteur de la construction	5
1.1.1 Provenance des gisements de portes et fenêtre	5
1.1.2 Retours d'expérience de déconstruction	14
1.1.3 Retours d'expérience de démantèlement	17
1.2 Filières de recyclage du verre	21
1.2.1 Ajout de poudre de verre.....	23
1.2.2 Verre plat	24
1.2.3 Verre creux de bouteille.....	25
1.3 Impact environnemental du verre	26
1.3.1 Impact environnemental du verre plat	27
1.3.2 Impact environnemental des produits commercialisés en verre recyclés ..	29
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE	35
2.1 Schématisation des processus de fonctionnement	35
2.1.1 Processus génériques de déconstruction	35
2.1.2 Schéma de fonctionnement et processus décisionnels.....	37
2.2 Étapes de démantèlement.....	38
2.2.1 Conditions des tests de démantèlement	38
2.2.2 Structuration préliminaire d'un catalogue de portes et fenêtres	39
2.3 Bilans de GES des procédés de recyclage	41
2.3.1 Filière d'ajout cimentaire.....	41
2.3.2 Filières de production du verre	42
2.3.2.1 Production du verre plat.....	43
2.3.2.2 Production du verre creux.....	44
CHAPITRE 3 RÉSULTATS	45
3.1 Processus et fonctionnement.....	45
3.1.1 Processus générique de déconstruction.....	45
3.1.2 Fonctionnement théorique d'une plateforme de démantèlement.....	52
3.1.3 Processus décisionnels d'une plateforme de démantèlement	53
3.2 Apprentissages des tests de démantèlement	56
3.2.1 Apprentissages pratiques	57
3.2.2 Structure préliminaire de catalogue des portes et fenêtres.....	60
3.3 Performance des filières de recyclage du verre	65
CHAPITRE 4 DISCUSSION	69
4.1 Impact environnemental du cycle de vie des produits de verre recyclés	69
4.2 Gestion post-consommation et critères de reprise	72

4.3	Suivi du catalogue et indicateur de performance	74
4.4	Base de données des entreprises québécoises	75
4.5	Qualité de l'intrant	76
CONCLUSION.....		79
ANNEXE I SYNTHÈSE DES FREINS ET LEVIERS ISSUS DES RETOURS D'EXPÉRIENCE DE DÉCONSTRUCTION		83
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		89

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Répartition des matières sortantes aux fins de recyclage et de valorisation énergétique (tiré de : Recyc-Québec, 2020)	7
Tableau 1.2 Récapitulatif des guides développés par la FCRBE (adapté de : FCRBE, 2022)	13
Tableau 1.3 Caractéristiques des contenants de récupération des menuiseries de déconstruction (adapté de : ADEME, 2014).....	14
Tableau 1.4 Caractéristiques générales des chantiers de déconstruction.....	15
Tableau 1.5 Caractéristiques principales des retours d'expérience de démantèlement.....	17
Tableau 1.6 Bilan des procédés de démantèlement sur chantier,	20
Tableau 1.7 Résultats de l'ACV verre plat pour la catégorie d'impact "changement climatique" (adapté de : Gentil et al., 2011)	28
Tableau 1.8 Résultats de l'ACV bouteille en verre recyclé, pour la catégorie d'impact "changement climatique" (adapté de : Quantis, 2015).....	30
Tableau 1.9 Résultats de l'ACV poudre de verre en ajout cimentaire, pour la catégorie d'impact "changement climatique" (adapté de : Quantis, 2015).....	31
Tableau 2.1 Organisme en charge, lieux et référence des études de déconstruction sélectionnées	36
Tableau 2.2 Type d'organisme en charge et référence des études de démantèlement sélectionnées	37
Tableau 3.1 Freins identifiés pour les étapes syn-chantier et post-chantier	51
Tableau 3.2 Aperçu du catalogue, pour un modèle de fenêtre à battants	60
Tableau 3.3 Synthèse des résultats de performance des procédés de recyclage	65
Tableau 3.5 Classement des résultats de performance des filières de recyclage	66
Tableau 3.4 Synthèse des résultats généraux de performance des filières de recyclage	69
Tableau 3.5 Classement des filières de recyclage.....	71

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 0.1 Dynamique de projet et étapes associées (tiré de : CERIEC, 2022)	VI
Figure 0.2 Composition des matières sortant des écocentres en 2015 au Québec (tiré de : Recyc-Québec, 2018).....	2
Figure 1.1 Provenance des matières reçues par les centres de tri de résidus de CRD (tiré de : Recyc-Québec, 2020).....	6
Figure 1.2 Composition des matières prises en charge par les écocentres (adapté de : Recyc-Québec, 2020).....	8
Figure 1.3 Destination des matières sortantes des écocentres à des fins de valorisation ou recyclage (tiré de : Recyc-Québec, 2020).....	8
Figure 1.4 Matériaux utilisés pour les fabricants des portes et fenêtres (adapté de : CSMO des industries des portes et fenêtres, du meuble et des armoires de cuisine, 2016).	10
Figure 1.5 Part des matériaux issus des cadres de portes et fenêtre en France (adapté de : Insee, 2018).....	11
Figure 1.6 Processus associés aux filières de recyclage du verre (adapté de : ADEME, 2022)	22
Figure 1.7 Contribution des procédés d'ajout cimentaire pour la catégorie d'impact "changement climatique" (adapté de : Quantis, 2015).....	32
Figure 1.9 Distance de transport limite à considérer pour les produits de verre recyclé (tiré de : Recyc-Québec & Quantis, 2015)	33
Figure 2.1 Photographies des produits lors des tests de démantèlement	39
Figure 3.1 Schéma synthétique du fonctionnement du projet Saint-Vincent-de-Paul.....	46
Figure 3.2 Processus couverts par les retours d'expérience sélectionnés.....	47
Figure 3.3 Exemple de processus et pastille du retour d'expérience associé	48
Figure 3.4 Fonctionnement générique des processus de déconstruction	49
Figure 3.5 Schéma du fonctionnement théorique d'une plateforme de démantèlement.....	52
Figure 3.6 Schéma des processus décisionnels au sein d'une plateforme de démantèlement..	55

XVIII

Figure 3.7 Exemple de parclose avec joint intégré, issu des tests effectués	57
Figure 3.8 Retrait du scellant à l'aide d'une oscilleuse	58
Figure 3.9 Procédé de casse du verre et résidus de verre encore fixés au cadre.....	58
Figure 3.10 Répartition des niveaux de précision.....	61
Figure 3.11 Nombre de matériaux disponibles pour chaque niveau d'élément mono- composant	62
Figure 3.12 Aperçu graphique du catalogue d'une fenêtre à battants	63
Figure 3.13 Comparaison des filières de recyclage du verre par leur procédé de fabrication .	66
Figure 4.1 Comparaison de la performance générale des filières de recyclage.....	70
Figure 4.2 Analyse de contribution des processus du cycle de vie des produits en verre (tiré de : CIRAIIG, 2015).....	73

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ACV	: Analyse de cycle de vie
CRM	: Contenant à remplissage multiple
CRU	: Contenant à remplissage unique
GES	: Gaz à effet de serre
LET	: Lieux d'enfouissement technique
MPS	: Matière première secondaire
P&F	: Portes et fenêtres
PRP	: Potentiel de réchauffement planétaire
3RVE	: Réduction à la source, réemploi, recyclage, valorisation, enfouissement

Espèces chimiques

CO ₂	: Dioxyde de carbone
CH ₄	: Méthane
N ₂ O	: Protoxyde d'azote

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

kg	:	kilogramme
kg éq-CO ₂	:	kilogramme de CO ₂ équivalent
mm	:	millimètre
m ²	:	mètre carré
t	:	tonne
uf	:	unité fonctionnelle

INTRODUCTION

Dans le secteur de la CRD, les infrastructures routières ainsi que les travaux du bâtiment sont les deux principaux gisements de matières résiduelles qui sont envoyés en centres de tri ou en éco-centres au Québec. En 2015, la quantité de résidus de CRD expédiée au sein des 48 centres de tri répertoriés sur le territoire était de 1,85 million de tonnes. Parmi ces déchets, 71,5 % étaient triés sur chantier ou acheminés depuis le chantier (Recyc-Québec, 2018).

Parmi les 260 éco-centres présents sur le territoire, il est estimé que 180 d'entre eux ont permis de prendre en charge près de 405 000 tonnes de matières résiduelles au total. Les résidus de CRD constituent près de 66 % d'entre eux, soit près de 270 000 tonnes de matières résiduelles issues des activités de chantier (Recyc-Québec, 2018).

Lors de la démolition ou de la déconstruction des bâtiments, la plupart des menuiseries sont alors associées à des déchets. L'absence de temps d'opération sur chantier, la complexité du démontage, le manque de formation des équipes à ce sujet peuvent aussi expliquer cette dévaluation. En aval du chantier, la question de la rentabilité à la revente est aussi un point de questionnement important qui pousse à s'assurer de l'intérêt du marché pour ces produits complexes. Par exemple, le verre de fenêtres, les matériaux en PVC, ainsi que les produits multimatières sont actuellement rejetés par les centres de tri, en raison d'un manque de filières de reprise (Recyc-Québec, 2018). Pour autant, d'autres matériaux disponibles dans les menuiseries présentent un potentiel de recyclage non nul. Par exemple, en sortie des éco-centres, 20 % des matières résiduelles sont des résidus de CRD triés. La Figure 0.1, qui en détaille la composition, montre notamment que parmi ces résidus, le bois et le métal, qui sont des matériaux pourtant souvent présents dans les portes et fenêtres, représentent respectivement 7 % et 4 % des quantités de l'ensemble de ces matières résiduelles (Recyc-Québec, 2018).

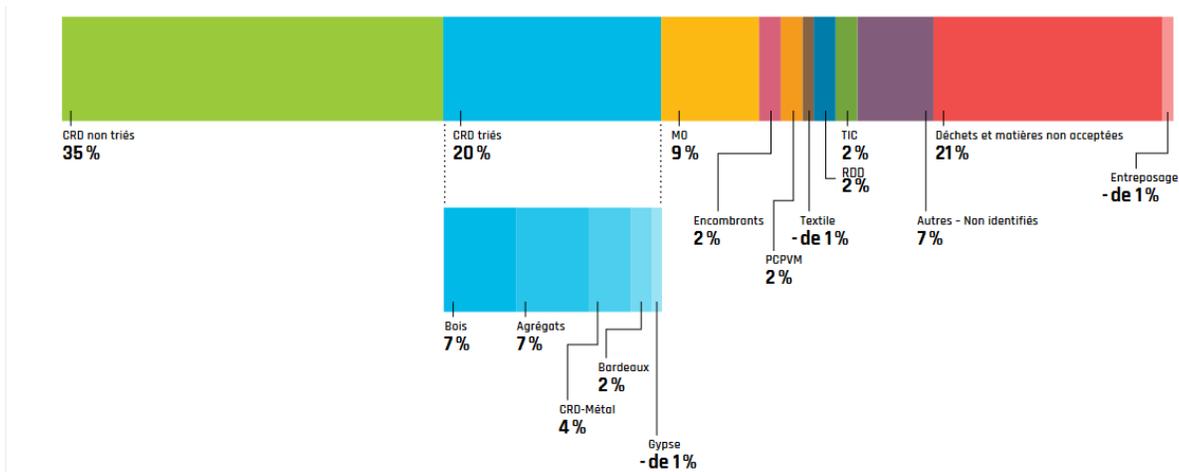


Figure 0.2 Composition des matières sortant des écocentres en 2015 au Québec (tiré de : Recyc-Québec, 2018)

Développer des procédés de désassemblage de ces différents éléments pourrait permettre d'améliorer leur potentiel de recyclage, en les séparant par matériaux de manière à être éligibles auprès des filières de valorisation. À l'échelle internationale, divers projets de démantèlement ont ainsi été expérimentés, afin de pouvoir connecter ces flux de matières résiduelles aux filières de recyclage qui pourraient circulariser ces matériaux. Cette étude a pour objectif de définir, à partir de ces retours d'expérience, un premier cadre de réflexion sur le fonctionnement d'un centre de démantèlement et des processus associés aux portes et fenêtres en fin de vie, de réaliser différents apprentissages techniques concernant les activités de démantèlement, en particulier les procédés à privilégier, les matériaux pouvant être rencontrés, les outils et installations nécessaires. Par la suite, une comparaison de trois filières potentielles pour le recyclage du verre de fenêtre sera présentée, sur la base de leurs émissions de GES.

Le premier chapitre présente l'état des connaissances à propos des expériences de déconstruction et de démantèlement menées à l'étranger, les différentes filières de recyclage qui pourraient récupérer le verre de fenêtres, ainsi que deux Analyses de Cycle de Vie (ACV) autour de produits réalisés à partir de verre recyclé. Le second chapitre présente la

méthodologie, dont les éléments utilisés pour structurer les différents processus, les conditions expérimentales des tests de démantèlement effectués, les données prise en compte dans le bilan d'émissions de GES des procédés de recyclage des filières. Le troisième chapitre présente les résultats associés aux méthodes décrites. Enfin, le dernier chapitre présente une discussion à propos des résultats obtenus, ainsi que plusieurs ouvertures pour la suite des travaux.

CHAPITRE 1

ÉTAT DES CONNAISSANCES

Ce premier chapitre reprend l'état des connaissances autour de plusieurs aspects du démantèlement de portes et fenêtres. Il présente différents retours d'expérience de construction et de démantèlement, puis il introduit le fonctionnement des procédés de plusieurs filières de recyclage du verre. Enfin, il présente et expose les résultats de deux Analyses de Cycle de Vie pour différents produits commercialisés en verre recyclé.

1.1 Gisement de matières résiduelles du secteur de la construction

Le secteur de la construction génère de nombreuses matières résiduelles au sein des différentes activités de construction, rénovation et démolition. Notamment, lors des chantiers de démolition, les portes et fenêtres peuvent se retrouver mêlées aux nombreux déchets qui sont générés. Elles sont alors envoyées en centre d'enfouissement, au sein des différents centres de tri ou bien en écocentre. Ces résidus de déconstruction répartis sur le territoire peuvent constituer un gisement de matière potentiel à valoriser. Plusieurs études ont permis de quantifier la quantité de matières résiduelles issues du secteur de la construction au Québec, d'autres ont relevé des tendances dans les matériaux composants les cadres de fenêtres.

1.1.1 Provenance des gisements de portes et fenêtre

En 2018, les secteurs du bâtiment et des infrastructures représentaient la majorité des résidus générés par les activités de CRD. Au sein des 61 centres de tri présents au Québec, la quantité totale de ces résidus a été estimée à 1 781 000 tonnes cette année-là. Ces matières résiduelles proviennent de nombreuses sources en fonction des activités de CRD réalisées. La Figure 1.1 présente la proportion de chaque gisement de matières résiduelles selon sa source de provenance (Recyc-Québec, 2020).

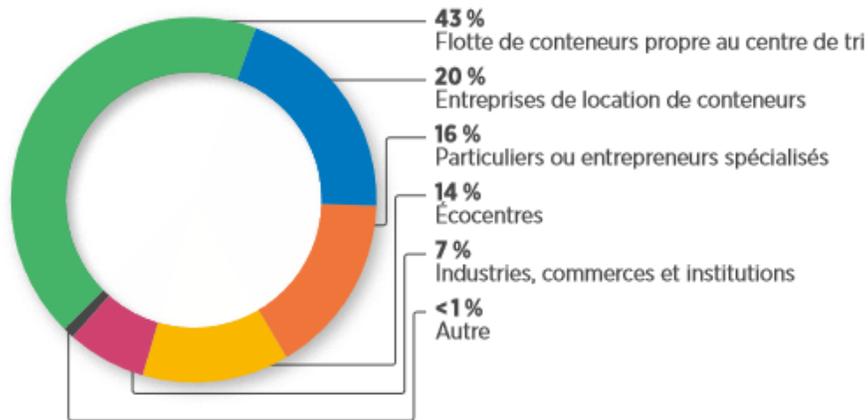


Figure 1.1 Provenance des matières reçues par les centres de tri de résidus de CRD (tiré de : Recyc-Québec, 2020)

Les flottes de conteneurs des centres de tri, qui interviennent directement sur chantier, constituent la majorité de ces gisements (43 %). Les entreprises de locations de conteneurs participent aussi à 20 % des quantités de matières résiduelles à travers les mandats émis par les entrepreneurs pour l'enlèvement des résidus. Les particuliers ou entrepreneurs spécialisés qui s'occupent personnellement de la collecte de leurs matières résiduelles représentent 16 % du gisement. Les écocentres sont eux responsables de 14 % des matières résiduelles de CRD, alors que les industries, commerces et institutions génèrent jusqu'à 7 % des quantités totales.

En sortie des centres de tri, 26 % des matériaux ont été éliminés en centre d'enfouissement, et 21 % ont été réutilisés au sein de ces centres en tant que matériaux de recouvrement. Sur la quantité de matières résiduelles restantes, près de 56 % sont envoyées dans des filières de recyclage, et les 44 % restants sont valorisés énergétiquement. Le Tableau 1.1 présente la répartition des matières recyclées ou valorisées en sortie de ces centres de tri.

Tableau 1.1 Répartition des matières sortantes aux fins de recyclage et de valorisation énergétique (tiré de : Recyc-Québec, 2020)

MATIÈRES	RECYCLAGE	VALORISATION ÉNERGÉTIQUE	TOTAL	COMPOSITION 2018
Agrégats ²	147 000	s.o.	147 000	26,3 %
Bois	84 000	211 000	295 000	52,7 %
Bardeaux	2 000	29 000	30 000	5,4 %
Gypse	6 000	s.o.	6 000	1,1 %
Carton	21 000	0	21 000	3,8 %
Métaux	45 000	s.o.	45 000	8,1 %
Plastique, verre et autres	5 000	1 000	6 000	1,4 %
Matières mélangées	s.o.	7 000	7 000	0,9 %
Total	311 000	247 000	558 000	

Le bois représente la majorité de ces matières (52,7 %), dont les deux tiers sont utilisés en tant que valorisation énergétique, le reste étant recyclé. Les métaux représentent 8,1 % des matières sortantes, et sont uniquement destinés au recyclage. Les matières plastiques, verre et autres constituent seulement 1,4 % de ces quantités, et sont majoritairement recyclés plutôt que valorisés énergétiquement. Au total, ce sont 558 000 tonnes de matière qui sont distribuées par les centres de tri aux différentes filières de recyclage et de valorisation, au lieu d'être enfouies.

Parmi les 332 écocentres qui desservent le territoire québécois en 2018, il a été estimé que les résidus de CRD représentaient près de 53 % des matières entrantes, soit environ 298 000 tonnes pour les écocentres répondants². La Figure 1.2 rapporte la composition de ces matières entrantes.

²Le nombre d'écocentres répondants n'a pas été précisé, mais il est dit que ces écocentres récupèrent les matériaux de près de 84 % de la population québécoise (Recyc-Québec, 2020).

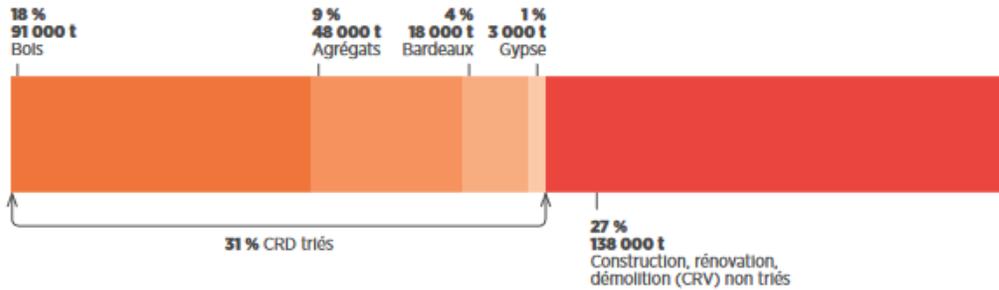


Figure 1.2 Composition des matières prises en charge par les écocentres (adapté de : Recyc-Québec, 2020)

Les résidus de CRD non triés représentent 27 % des quantités entrantes au sein des écocentres. Lorsque ces matières sont triées, cette proportion s'élève à 31 %. Parmi ces éléments triés, le bois en représente plus de la moitié, constituant près de 18 % des matières entrantes. Les agrégats participent à près de 9 %, suivis des bardeaux dont la proportion s'élève à 4 %, et le gypse à 1 %. Près de 26 % de ces éléments sont envoyés à l'enfouissement, ou réutilisés en tant que matériaux de recouvrement, pour un total de 171 000 tonnes. La Figure 1.3 précise la destination des 74 % restants au sein des différentes possibilités de reprises³.

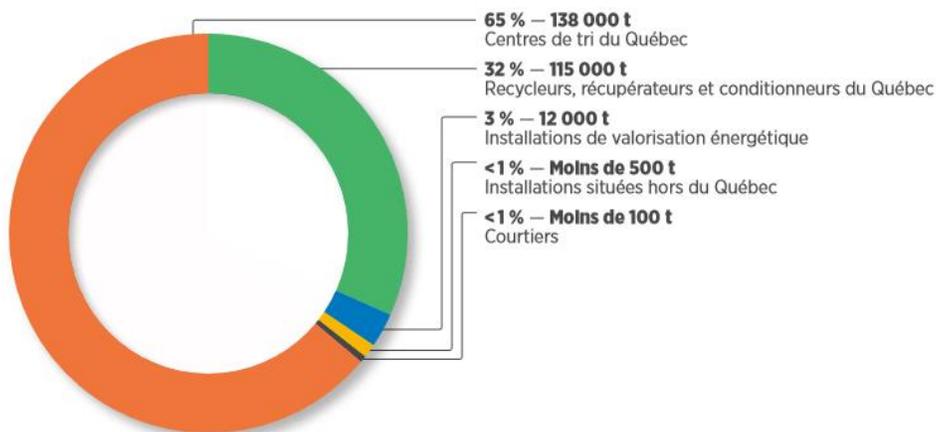


Figure 1.3 Destination des matières sortantes des écocentres à des fins de valorisation ou recyclage (tiré de : Recyc-Québec, 2020)

³ Ces quantités n'incluent pas la portion relative à l'enfouissement.

Ainsi, parmi ces quantités destinées au recyclage ou à la valorisation, 65 % sont destinés aux centres de tri, 32 % sont destinés aux récupérateurs, recycleurs et conditionneurs, et 3 % aux installations de valorisation énergétique. Cela représente près de 265 000 tonnes de matières résiduelles de CRD qui ne sont pas enfouies directement après leur arrivée dans l'écocentre.

Dans cette continuité, les politiques gouvernementales font état d'une vraie volonté de détourner ces déchets de CRD des centres d'enfouissement. Le gouvernement québécois a ainsi récemment mis sur pied un comité d'experts afin d'établir des recommandations de solutions pour réduire ces quantités, s'élevant à 28 % en 2019, en consultant l'ensemble des acteurs de l'industrie et des parties prenantes du milieu (Recyc-Québec, 2022b).

Au Québec, en 2016, plus de 246 entreprises étaient répertoriées dans les secteurs des portes et fenêtres, de la vitrerie et du traitement du verre. Pour ces entreprises, il a été estimé que sur cette année-là, les ventes ont permis de réaliser plus de 1,7 milliard de dollars. Parmi ces entreprises, 14 font partie du secteur du verre plat, 47 de la vitrerie, et 132 font partie du secteur des portes et fenêtres (CSMO des industries des portes et fenêtres, du meuble et des armoires de cuisine, 2016). La Figure 1.4 présente les différents matériaux utilisés dans la fabrication des portes et fenêtres au sein de ces entreprises⁴ pour les matériaux constituant le cadre.

⁴ Le total est supérieur à 100 %, car le questionnaire utilisé faisait l'objet de mentions multiples.

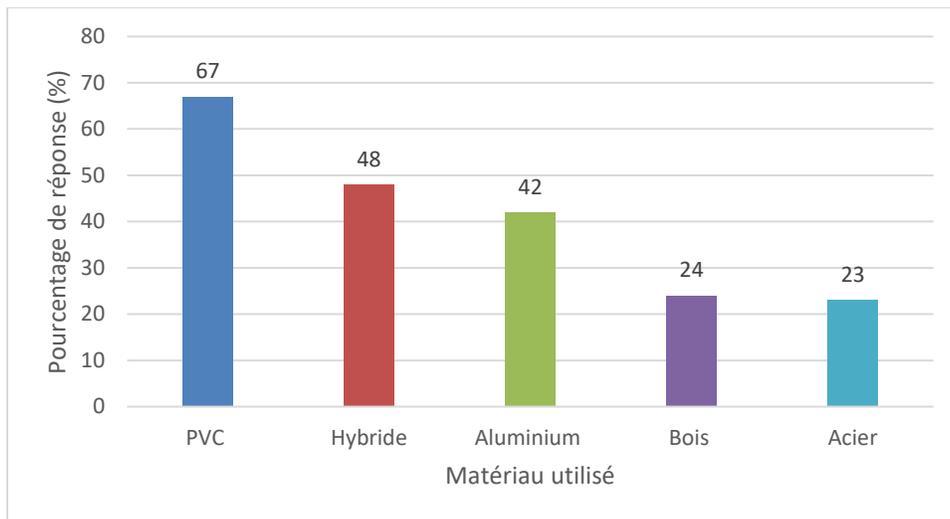


Figure 1.4 Matériaux utilisés pour les fabricants des portes et fenêtres (adapté de : CSMO des industries des portes et fenêtres, du meuble et des armoires de cuisine, 2016).

Ainsi, près de 67 % des manufacturiers déclarent produire des cadres en PVC. Ils sont aussi 48 % à produire des modèles de cadre hybrides, c'est-à-dire constitués de plusieurs matériaux. Une grande partie d'entre eux, soit 42 %, produisent des cadres en aluminium. Le bois et l'acier sont encore respectivement utilisés par près de 24 % et 23 % des manufacturiers. Ces derniers sont représentatifs des compositions des fenêtres anciennes qui arrivent en fin de vie à l'heure actuelle et qui représenteront une part importante des gisements. En effet, la grande majorité des menuiseries arrivant à l'écocentre sont de vieux éléments en bois que les particuliers remplacent lors de leurs rénovations (Communication personnelle, 2022b).

À l'échelle internationale, et en France notamment, pour l'année 2016, ce sont 1646 entreprises qui produisent des portes et fenêtres. Pour ces entreprises, la production vaut 10 milliards de dollars⁵ (Insee, 2018). La Figure 1.5 représente cette fois-ci la part de fenêtres produites en France, selon le type de matériau du cadre.

⁵ Résultat exprimé en euros, soit 6,64 milliards €. Le taux de change utilisé vaut 0,74 au 3 juillet 2022.

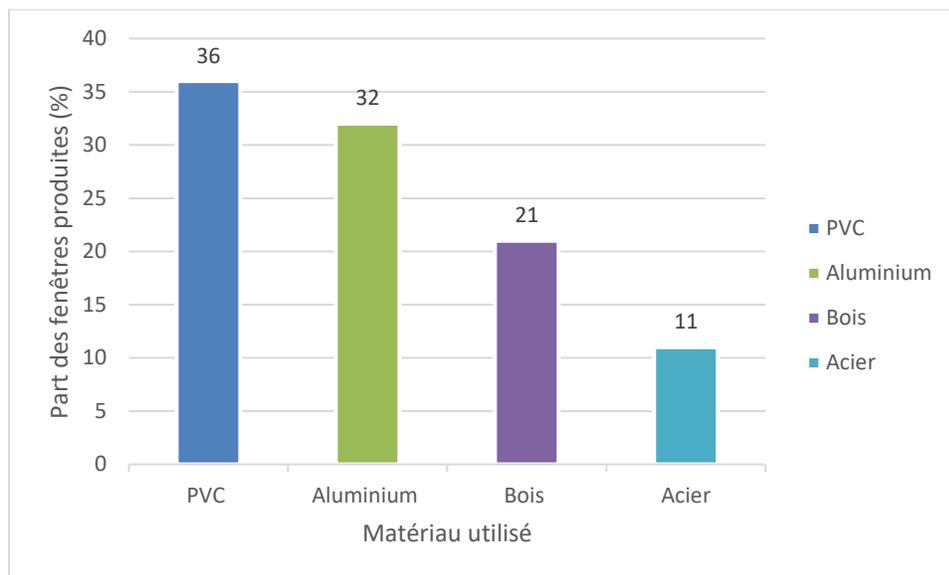


Figure 1.5 Part des matériaux issus des cadres de portes et fenêtre en France (adapté de : Insee, 2018)

Les cadres en PVC représentent la majorité des menuiseries, constituant 36 % des fenêtres produites. L'aluminium représente 32 % du marché, le bois et l'acier représentent respectivement 21 % et 11 % de la production. Aucune mention n'est cependant faite des cadres hybrides. La France et le Québec présentent des marchés de taille différente, que ce soit en termes de chiffre d'affaires ou de nombre d'acteurs. La proportion de cadre utilisée est assez similaire, le cadre PVC représente une grande partie du marché des portes et fenêtres, suivi de l'aluminium, du bois, et de l'acier. Lorsque le cadre est en PVC, il est estimé qu'il compte pour 45 % du poids total de la fenêtre, la vitre représentant environ 55 % de la masse totale de la menuiserie (ADEME, 2014).

Cette diversité dans la composition des fenêtres présentes sur le marché complexifie les tentatives d'automatisation des processus d'un centre de démantèlement. Parmi la dizaine de types de fenêtres disponibles sur le marché actuellement, chaque modèle peut se décliner en plusieurs versions selon la marque, les types de matériaux utilisés, les options de recouvrement extérieur, les options de vitrage. Cependant, développer des techniques et outils spécifiques pour le démantèlement nécessite de connaître la composition de ces gisements de portes et fenêtres. Et sans connaissances de cette dernière, il peut être complexe de se projeter sur l'état

et la composition des matériaux après démantèlement, et donc de savoir en amont si les matériaux correspondront aux conditions de reprises filières.

À défaut de connaissances particulières sur la composition précise des gisements potentiels, il est possible d'utiliser les activités de démantèlement comme source d'information dans un premier temps. Ces informations pourraient être colligées dans un catalogue, afin d'identifier chaque composant d'une fenêtre, les matériaux associés, et ainsi permettre d'appréhender la composition des autres fenêtres similaires dès leur arrivée. La possibilité de modéliser ces gisements permettrait, en amont, de définir quels sont les composants à démanteler, et d'identifier les procédés les plus efficaces au sein des activités.

La réussite d'un chantier de déconstruction s'inscrit dans de nombreuses phases de développement du projet. La FCRBE, un organisme européen chargé de faciliter la circulation des éléments récupérés au sein des bâtiments en Europe du Nord-Ouest, a ainsi établi une série de guides afin d'aider les nombreuses parties prenantes à mettre en place un chantier de déconstruction efficace. Ces guides s'adressent autant aux acteurs terrains qu'aux décideurs politiques, et concernent de nombreux aspects tel que les méthodes de déconstruction ou encore les objectifs à inscrire dans les appels d'offres. Le Tableau 1.2 propose un récapitulatif de ces différents guides, des cibles auxquelles ils s'adressent, de leur portée, et de leur disponibilité (FCRBE, 2022).

Tableau 1.2 Récapitulatif des guides développés par la FCRBE (adapté de : FCRBE, 2022)

Guide	Cible	Portée	Disponibilité
Méthode d'audit de récupération	Maîtres d'ouvrage, Maîtres d'œuvre, architectes, entrepreneurs	Identifier les matériaux réutilisables en prévision de la démolition d'un bâtiment	2021
Guide sur les stratégies d'approvisionnement	Promoteurs immobiliers, Maîtres d'ouvrage	Intégrer les objectifs de réemploi dans les procédures d'appel d'offres publiques	2021
Fiche de collecte des matériaux	Prescripteurs, architectes, Maîtres d'ouvrage	Techniques de réemploi et de valorisation des matériaux, caractéristiques connues, disponibilités sur le marché	2021
Retours d'expériences du terrain	Promoteurs immobiliers, Maîtres d'ouvrage, architectes, entrepreneurs	Renseigner sur les projets déjà conduits	2021
Méthode concernant les objectifs de récupération	Promoteurs immobiliers, Maîtres d'ouvrage, décideurs politiques	Définir, mesurer et partager les objectifs de réutilisation dans les appels d'offres, la mise en œuvre des projets et les politiques publiques	2022 - 2023
Programme de formation d'audit de remise en état	Professionnels de la construction	Équiper les acteurs terrain des outils pour une mise en œuvre directe des principes et techniques de réutilisation	Non communiqué

D'autres étapes de fin de chantier, comme les étapes de conditionnement et de transport, peuvent aussi compromettre la qualité du produit récupéré. Sans prise en compte de la place disponible sur chantier, des conditions de travail, ou du débit de déconstruction, les produits récupérés peuvent être abîmés ou contaminés, les rendant alors impropres au réemploi, à la réutilisation, mais aussi potentiellement au recyclage ou à la valorisation. En 2014, L'ADEME a testé différents modèles de tri et de démantèlement des menuiseries auprès de 8 chantiers de construction en France (ADEME, 2014). Le Tableau 1.3 présente notamment différents moyens de collecte et de conditionnement qui ont été utilisés durant cette période-là.

Tableau 1.3 Caractéristiques des contenants de récupération des menuiseries de déconstruction (adapté de : ADEME, 2014)

Contenant	Avantages	Inconvénients
Benne classique à chaînes	Peu d'organisation demandée	Nettoyage préalable, précautions pour éviter la contamination
Benne bi flux	Optimisation de l'espace pour le tri	Nettoyage préalable, coût de location supplémentaire
Benne mixte	Optimisation de l'espace pour le tri	Nettoyage préalable, organisation nécessaire
Chevalet et palette	Utile pour les faibles débits	Contenants rapidement remplis, équipement de transport et de conditionnement spécifiques

Quatre contenants sont présentés dans cette étude. La benne classique à chaîne propose une grande facilité dans l'organisation des matériaux. Elle nécessite cependant de faire attention aux différentes contaminations qui pourraient s'y accumuler. La benne bi flux est réputée pour son encombrement moindre. Elle occasionne cependant des coûts supplémentaires et nécessite d'être nettoyée avant utilisation. La benne mixte reprend les mêmes avantages et inconvénients que la précédente, sans pour autant occasionner de coût supplémentaire, son utilisation nécessite cependant une organisation importante pour le tri des matériaux. Enfin, les chevalets et les palettes sont couramment rencontrés dans le domaine des portes et fenêtres. Ils sont utiles pour de faibles débits, même s'ils se remplissent vite, et nécessitent des conditions de transport spécifiques.

1.1.2 Retours d'expérience de déconstruction

À l'échelle internationale, différents projets de déconstruction ont ainsi été initiés. Ces études permettent de découvrir, tester et valider les conditions qui garantissent le succès d'une opération de déconstruction, et donc circulariser ces matériaux. Le Tableau 1.4. présente les caractéristiques générales de certains des retours d'expérience considérés à travers le monde.

Tableau 1.4 Caractéristiques générales des chantiers de déconstruction

Étude	Portée	Année	Localisation
Our Town Hall Project	Rénovation d'un centre historique	2018	Royaume-Uni
L'autre Soie	Aménagement de quartier	2021	France
Saint-Jean-sur-Richelieu	Étude de cas de déconstruction	2003	Canada
Saint-Vincent-de-Paul	Réhabilitation d'un centre hospitalier	2018	France
Deconstruction Grant Program	Programme d'aide à la déconstruction	2015	Etats-Unis
Riley Park	Étude de cas de déconstruction	2018	Canada

Our Town Hall Project est un chantier de rénovation à Manchester ayant pour objectif de rénover l'ancien hôtel de ville tout en maximisant les quantités de matériaux réemployés au sein même du site. Il a été mandaté par le conseil de la ville de Manchester et piloté par la FRCBE. En l'occurrence, c'est plus de 500 m³ de granit et 476 milliers de briques qui seront récupérés. Ils sont alors réutilisés au sein même du chantier lorsque possible. Le cas échéant, ils sont envoyés à des récupérateurs en Angleterre, en utilisant les réseaux de revendeurs professionnels de matériaux de construction réutilisables déjà existant dans le pays (FCRBE, 2021b).

L'autre Soie est un programme d'aménagement de quartier à Lyon en 2021 dans lequel le Maître d'ouvrage a souhaité mettre en place des principes de réemploi au sein des différentes activités, comme les constructions neuves, les démolitions ou rénovations. Chantier de grande envergure avec plus de 23 000 m², il fait intervenir de nombreux partenariats pour chaque activité, qui sont chacune divisée en lot, et pilotées par une équipe de projet spécifique. Un assistant réemploi est nommé pour prendre en charge l'organisation du réemploi au sein de ces équipes, il réalise notamment un inventaire des matériaux disponibles et un recensement des filières de réemploi potentielles (FCRBE, 2021a).

Au Québec, un projet de déconstruction a aussi eu lieu en 2003 à Saint-Jean-sur-Richelieu. Il avait pour objectif de démontrer la faisabilité technique de déconstruction sur site, ainsi que d'explorer les impacts de telles activités sur la faisabilité économique, à travers notamment une vision de déplacement des coûts. Finalement, c'est un taux de récupération affiché à plus

de 85 % concernant divers matériaux comme des appareils électriques, la brique et la pierre, la structure d'acier, la laine isolante, ou encore les portes en bois (Fortin, 2003).

Dans le quartier de Saint-Vincent-de-Paul à Paris, un hôpital ayant fermé ses portes en 2011 est désormais réhabilité afin de le transformer en quartier résidentiel et multifonction. Près de 60 % des bâtiments seront conservés, et des objectifs forts de réemplois et d'inclusion sociale sont ancrés dans le projet. En 2018, les chantiers de rénovation commencent, et de nombreux matériaux comme les radiateurs, les parois de briques, les escaliers, les éléments électriques ou encore les menuiseries sont réemployées (Direction de la communication & Métropole Aménagement, 2020). Lorsque le réemploi ne peut pas être privilégié, certains éléments sont alors réutilisés, près de 1200 ouvrants ont ainsi servi de matière première pour réaliser du mobilier (Métropole Aménagement, 2022).

Deconstruction Grant Program est un projet initié en 2015 afin d'augmenter les activités de déconstruction à Portland. S'appliquant surtout aux logements des particuliers, il a accompagné différents projets de déconstruction (plus de 16 en 2016). Après le désamiantage du bâtiment, des organisations locales sans but lucratif peuvent venir récupérer de nombreux éléments comme les portes et fenêtres, plomberies, luminaires, puis le chantier continue avec la déconstruction des éléments structurels. Ces éléments ainsi déconstruits ont conservé leur intégrité physique et sont dès lors disponibles à la revente. Ils présentent ainsi une grande valeur ajoutée, surtout lorsque ce sont des matériaux comme le sapin ancien qui constitue la majorité de la structure des maisons de Portland (Christiana, 2021).

À Riley Park un quartier de Vancouver, une étude de cas a été réalisée autour de la déconstruction d'une habitation en 2018. Elle a permis de constater la part, sur l'ensemble des matériaux récupérés, de réemploi et de recyclage. Parmi eux, 19 % furent réemployés, notamment les appareils ménagers, les portes, les parquets et les poutres. Le plâtre, le béton et les poutres courtes furent recyclés en partie, totalisant 65 % de la quantité de matériaux totale. Seulement 16 % du bâtiment fut déposé en enfouissement. Cette expérience a généré plusieurs bénéfices sur le plan environnemental, sur le plan économique grâce à un abaissement de la

facture totale⁶, mais aussi sur le plan social par la création d'emplois locaux pour la déconstruction et pour la mise en place de filières de recyclage ou de récupération (Christiana, 2021). Des entreprises comme Unbuilders en Colombie-Britannique ont ainsi développé des modèles d'affaires uniquement basés sur la déconstruction (Unbuilders, 2022).

1.1.3 Retours d'expérience de démantèlement

Quelques ressources sont progressivement développées concernant les activités de démantèlement des portes et fenêtres. Le Tableau 1.5 présente les caractéristiques principales de ces retours d'expérience de démantèlement.

Tableau 1.5 Caractéristiques principales des retours d'expérience de démantèlement

Étude	Portée	Année	Localisation
Démarche REVALO	Étude de cas de traitement et démantèlement à grande échelle	2012	France
MENREC	Processus complet de la collecte au recyclage	2021	
UFME	Éléments de traitement	2019	
HTROGW	Éléments de réemploi	2022	
Eco-Retour	Processus complet de traitement et démantèlement	2010	

La démarche REVALO est un projet porté par GTM bâtiment, et piloté par l'ADEME autour de la recherche de filières de valorisation des déchets du secteur de la construction. Dans ce projet, il est question d'aborder les enjeux de recyclage associés aux chantiers de rénovation, dont le taux de valorisation des déchets dangereux est encore bas pour atteindre les directives environnementales⁷. L'ADEME propose donc de mettre en place une filière opérationnelle de recyclage du verre, ainsi que de confirmer la faisabilité d'une filière de recyclage du PVC. Le projet s'axe en quatre parties distinctes, dont l'optimisation des processus de séparation du

⁶ Les matières réemployables peuvent faire l'objet de donation à des organismes sans but lucratif, occasionnant alors des crédits d'impôts pour les donateurs, typiquement 45 % de la valeur du don pour ces entrepreneurs-là (Christiana, 2021).

⁷ La directive 2008/98/CE fixe ce taux à 70 % (ADEME, 2014).

verre de fenêtres, l'expérimentation du recyclage de ce verre, la conception du matériel de transport, et la modélisation de la chaîne logistique du verre (ADEME, 2014).

MENREC est une société située en Bretagne et mise en place par la volonté de plusieurs entreprises du secteur de portes et fenêtres d'insérer une plus grande quantité de matières recyclées au sein de leurs procédés de fabrication. Ces entreprises ont donc décidé de mettre en place leur propre filière de récupération pour les produits qu'ils contribuaient à mettre sur le marché. Depuis 2021, MENREC loue des bennes sur chantier pour la dépose des menuiseries. Après leur remplissage, les bennes sont récoltées, puis acheminées au sein de l'unité de démantèlement MENREC où elles sont démantelées, triées et stockées dans l'un des entrepôts d'une entreprise partenaire. Ces matières sont ensuite envoyées dans les centres de recyclage correspondants pour être transformées en matière première secondaire qui est ensuite incluse dans les procédés de fabrication des fenêtres des entreprises (Technic'Baie, 2020).

L'Union Française des Menuiseries (UFME) est un syndicat professionnel regroupant de nombreuses entreprises issues du secteur des portes et fenêtres en France. De nombreux types d'entreprises sont présents, comme les installateurs, les fabricants, les extrudeurs, ou encore les autres professions associées au secteur. Plusieurs ressources de collecte, démantèlement et recyclage ont ainsi été développées pour aider tous ces adhérents à mettre en place des démarches circulaires. Parmi ces initiatives, une charte d'engagement pour recycler les menuiseries en fin de vie, des engagements sur les objectifs de recyclage de certains matériaux, ou des guides de collecte et de tri des produits en fin de vie associés à différents points de dépôt et de collecte sur l'ensemble du territoire français (UFME, 2020).

How To Recycle Old Glass Windows (HROGW) est un portail d'informations du traitement du verre pour les professionnels des Etats-Unis. Face à des menuiseries en fin de vie, différentes opportunités de recyclage sont établies pour un particulier, notamment le réemploi et la réutilisation. L'auteur aborde notamment plusieurs conditions de recyclage pour les anciens modèles de menuiserie couverts de peinture, plusieurs autres conditions autour du recyclage du verre en centre de tri. Une technique rapide de démantèlement de la vitre est aussi présentée,

elle suggère de recouvrir la vitre d'une protection, et d'ensuite la séparer par cassage et retrait du verre (Rogers, 2022).

RU-Edition est une société fondée en 2010 par le groupe Millet, un fabricant de menuiseries en France. Avec son service Eco-Retour, la société se donne pour mission de récupérer les fenêtres en fin de vie afin de les réutiliser en tant que matière première pour réaliser de nouveaux produits finis. Ainsi, les menuiseries en fin de vie sont retirées chez les clients pour être ensuite démantelées au sein des locaux de l'entreprise. Les matériaux issus de ces procédés sont triés, puis envoyés aux filières de recyclage correspondantes. Seuls les profils de cadre de fenêtres sont récupérés pour être ensuite transformés en meubles par découpe et assemblage (Groupe Millet, 2020).

Dans le second volet de la démarche REVALO, différentes techniques de démantèlement ont été identifiées dans le secteur de l'automobile. Une partie d'entre elles ont été testées dans des conditions de chantier lors d'atelier de séparation du verre, pour tester leur répliquabilité. Le Tableau 1.6 présente le bilan des procédés de démantèlement testés ainsi que leurs principales caractéristiques (ADEME, 2014).

Tableau 1.6 Bilan des procédés de démantèlement sur chantier,
(tiré de : ADEME, 2014)

Procédés	Avantages	Inconvénients	Faisabilité sur chantier
Casse du verre	Rapide, peu d'investissement matériel, peu pénible	Verre cassé en sortie, possibles pollutions, restes de mastic, sécurité	Non
Coupe du verre (coupe verre)	Gros morceaux, propreté parfaite, peu d'investissement	Durée du tracé, châssis avec du verre sur tout le pourtour	Non
Coupe du verre (scie Makita)	Gros morceaux, propreté parfaite	Chronophage, coût de la scie élevé, production de liquide abrasif, nettoyage régulier, recharge en eau toutes les 10 minutes	Non
Démastiquage	Gros morceaux, propreté parfaite	Chronophage, coût élevé de la machine oscillante Fein	Non
Coupe d'un coin	Très peu pénible	Double Vitrage entier nécessitant le passage par un recycleur, temps de coupe du coin élevé, coût élevé de la machine oscillante Fein	Non
Casse d'un coin	Pas d'investissement, très rapide	Très pénible, Double Vitrage entier nécessitant le passage par un recycleur	Oui
Déparclosage	Pas d'investissement, assez rapide, peu pénible	Double Vitrage entier nécessitant le passage par un recycleur	Oui
Déparclosage Fein	Très peu pénible	Double Vitrage entier nécessitant le passage par un recycleur, chronophage, coût élevé de la machine oscillante Fein	Non

Cette synthèse livre des indications sur les avantages et inconvénients de chacun de ces procédés. Une majorité d'entre eux n'est pas réalisable sur chantier, notamment du fait du temps d'opération qui peut être long pour certains, ou parce que le matériel nécessaire serait inadapté aux conditions de travail. Néanmoins, le procédé de casse d'un coin fait partie des deux procédés faisables sur chantier. Il s'opère en brisant un coin de fenêtre par choc avec le sol pour pouvoir séparer plus facilement les montants. Cette opération est rapide, mais peut être pénible à effectuer pour l'opérateur, en plus de ne pas permettre de démanteler le contenu des doubles vitrages, ce qui les laisse donc à l'état multimatériau. Le déparclosage, qui consiste à démonter la fenêtre dans l'ordre de son assemblage, pour libérer la vitre et accéder plus simplement au reste des constituants, est un processus rapide et peu pénible, mais qui ne permet

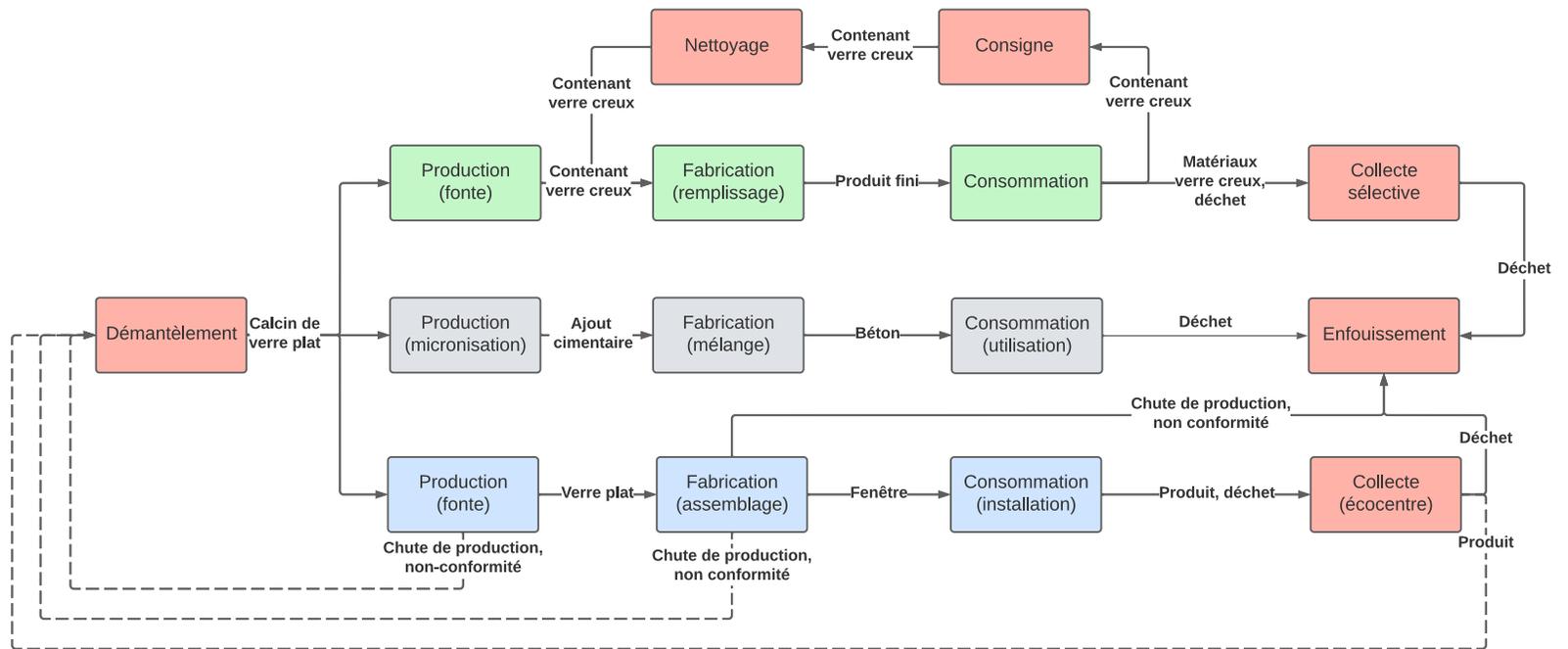
cependant pas non plus de démanteler de doubles vitrages. Par sécurité, ces techniques ne peuvent pas non plus se réaliser sur des simples vitrages, ce qui exclut les menuiseries trop anciennes.

1.2 Filières de recyclage du verre

Les cadres de portes et fenêtres peuvent être composés de divers matériaux comme le bois, le PVC, l'aluminium ou une combinaison d'entre eux dans le cas des cadres hybrides. Parmi cette diversité des matériaux disponibles, le verre est un élément présent dans de nombreuses portes, mais aussi dans chaque fenêtre, représentant plus de la moitié de leur poids total (ADEME, 2014). Théoriquement recyclable à l'infini, le verre de fenêtre fait pourtant partie des nombreux éléments qui sont éliminés au sein des centres de tri, par manque de débouchés (Recyc Québec, 2018).

Pourtant, le verre est un matériau qui s'inscrit fortement dans le concept des 3RVE, un principe de priorisation des méthodes de gestion des matières résiduelles qui privilégie dans l'ordre la Réduction à la source, le Réemploi, le Recyclage, la Valorisation, et ultimement l'Enfouissement (Recyc-Québec, 2022a). Par exemple, le système de consigne dont bénéficient déjà les bouteilles de verre permet de les retraiter pour un réemploi. De même, différentes filières de recyclage existent sur le territoire québécois. Il est alors utilisé en incorporation dans différents procédés de fabrication comme ajout de matière première secondaire, ou en tant que matériau principal pour fabriquer des produits à valeur ajoutée.

Malgré tout, des enjeux techniques sont encore présents et poussent à raffiner les procédés pour augmenter leur viabilité énergétique, environnementale et économique. En Europe, la Fédération européenne du verre d'emballage a ainsi dévoilé en 2020 le projet d'élaboration d'un four verrier électrique hybride. Cette première mondiale pourrait permettre de fondre de grandes quantités de verre avec une énergie potentiellement moins carbonée que le fioul ou le gaz dans le futur (Collen, 2020). La Figure 1.6 présente trois de ces filières potentielles de recyclage, par un ensemble de processus schématisant le cycle de vie du produit.



Légende :

— Processus actuel
 - - - Processus avec plateforme



Figure 1.6 Processus associés aux filières de recyclage du verre (adapté de : ADEME, 2022)

Ces trois filières ont été sélectionnées comme scénarios de recyclage pour le calcin issu du verre plat. Chacune d'entre elle est caractérisée par un type de recyclage différent:

- un recyclage extra sectoriel en contenant en verre recyclable (filière verre creux);
- un recyclage extra sectoriel en poudre de verre non recyclable (filière ajout cimentaire);
- un recyclage intersectoriel en verre de fenêtre recyclable (filière verre plat).

Les trois produits associés à ces filières de recyclage passent par les mêmes étapes de production, fabrication et consommation. Après l'étape de consommation, les processus de gestion de fin de vie diffèrent. Ainsi, avant sa recirculation sur le marché, le verre creux, est généralement consigné ou récupéré par les services de collecte, et sera alors réemployé, recyclé de nouveau en verre creux, ou enfoui. Dans le cas où du calcin de verre plat devient du verre creux, il est donc question de recyclage extra sectoriel puisque ce verre n'est alors plus disponible pour le secteur des portes et fenêtres. Dans le cas des ciments, ils sont démolis puis enfouis après avoir été utilisés dans le domaine du bâtiment. Le recyclage du verre contenu à l'intérieur n'est donc pas assuré. De la même manière, ces ciments incorporés de verre ne participent pas au secteur des menuiseries. Il est donc question de recyclage extra sectoriel, mais non recyclable. La filière du verre plat considérée permet de produire de nouveau du verre plat de fenêtre à partir de calcin de verre plat ce qui la caractérise en tant que recyclage intersectoriel recyclable (ADEME, 2022).

1.2.1 Ajout de poudre de verre

Lorsqu'il est réduit en poudre, le verre plat peut être utilisé en tant que complément de charge au sein de divers matériaux afin d'en modifier les propriétés. Pur, il peut être incorporé dans les bétons en tant qu'ajout cimentaire. Couplé avec du plastique, il peut être ajouté au sein des enduits caoutchoutés (Communication personnelle, 2022a).

La Fondation Ellen Macarthur publie en 2016 une étude de cas sur le verre utilisé en tant qu'ajout cimentaire pour béton. Elle expose les grandes quantités de béton produites aux États-Unis, le défi que cela implique en termes d'émissions de CO₂, ainsi que l'utilisation de verre

creux post-consommation en tant qu'ajout cimentaire. Il est notamment indiqué que le remplacement des substituts actuellement utilisés en tant qu'ajout cimentaire serait plus bénéfique d'un point de vue environnemental (Fondation Ellen Macarthur, 2016).

En effet, l'industrie du ciment utilise déjà des substituts de matière première, tels que l'utilisation de cendres volantes issues de la production du charbon. L'ajout de ces matériaux permet généralement d'augmenter la résistance du béton, tout en réduisant son coût. Les cendres volantes peuvent cependant présenter des taux élevés de mercure, et participent, en fin de compte, à soutenir l'industrie d'extraction du charbon et des ressources fossiles. En tant qu'ajout cimentaire, la poudre de verre permet de remplacer ces matériaux en conservant les propriétés recherchées, tout en abaissant le bilan de GES, par des procédés moins émetteurs (Fondation Ellen Macarthur, 2016).

Verrox est une des entreprises québécoises qui produit des ajouts cimentaires. Mise en place par le centre de tri Tricentris afin de trouver un débouché à ces verres post-consommation qui arrivaient sur le site, l'entreprise s'est dotée d'une usine de micronisation pour transformer ce verre destiné à l'enfouissement en produit à haute valeur ajoutée.

1.2.2 Verre plat

La production du verre plat vierge se réalise généralement par le procédé de verre flotté qui se compose de différentes étapes. En premier lieu, la fusion nécessite trois matières premières, le sable de silice, présent à près de 73 % correspond à la matière qui va vitrifier. Le carbonate de calcium, présent à 9 % sert d'agent stabilisant. Enfin, le sulfate de sodium, présent à 13 % est un agent fondant pour abaisser le point de fusion. Le mélange est ensuite humidifié puis porté à plus de 1550 °C dans des fours continus. Une fois le point de fusion atteint, le mélange est versé sur un bain d'étain à plus de 1000 °C, qui va permettre au verre de s'étaler par flottaison en plaques lisses et planes. Il va ensuite être étiré ou compressé jusqu'à obtenir l'épaisseur désirée, puis recuit à 500 °C pour lui permettre de refroidir de manière contrôlée afin de lui conférer ses propriétés finales. Cette étape est importante puisqu'elle va conditionner la

manière dont le verre réagira aux chocs ou à la cassure, en modifiant les contraintes internes du matériau (Vitrum Life, 2020).

Les matières premières utilisées pour le mélange peuvent être remplacées par des matières premières secondaires, comme du calcin⁸ de verre plat. L'utilisation de ce verre recyclé peut être portée à des hauts taux de remplacement sans modification de la qualité du produit fini. De même, elle présente des impacts moindres sur l'épuisement des ressources, puisque le verre est circularisé. Son incorporation permet aussi de réduire les émissions de GES, car le calcin modifie en partie les procédés thermochimiques au sein du four (Fédération de l'Industrie du Verre, 2013).

Ainsi, l'entreprise Saint-Gobain a développé en 2019 un guide pour un meilleur recyclage du calcin, à destination de ses nombreux partenaires actuels et futurs. L'objectif est de parvenir, par ce guide des bonnes pratiques, à intégrer près de 50 % de calcin dans ses procédés d'ici à 2025. Le document présente toutes les diminutions des impacts environnementaux associés à l'utilisation du calcin, ainsi que les différentes caractéristiques à prendre en compte pour son éligibilité en tant que matière première secondaire (Saint Gobain France, 2019).

1.2.3 Verre creux de bouteille

Un essai présenté en 2018 à l'université de Sherbrooke a pour objectif de déterminer si le Québec a la capacité de développer une gestion durable du verre creux post-consommation. Plusieurs aspects de la gestion du verre sont revus et analysés. Certains impacts environnementaux des procédés de recyclage sont mis en lumière. Notamment, les procédés de recyclage du verre de bouteille sont explicités (Chevalier, 2018).

Le verre creux est mélangé et fondu de la même manière que le verre plat, en ayant en plus une étape de coloration. Là où le verre plat se doit de rester majoritairement transparent, le

⁸ Le calcin correspond à des débris de verre de grandeur similaires, exempt de pollution.

verre creux peut se proposer en de nombreuses teintes différentes. Ce verre coloré est produit par l'ajout d'ions métalliques dans sa composition pour le teinter, afin de lui donner un aspect ou une utilisation particulière, par exemple pour protéger un liquide des rayons ultraviolets (Chevalier, 2018).

Une fois le mélange effectué, il est chauffé dans les mêmes conditions que le verre plat, puis est apposé dans des machines de formage pour lui donner une première silhouette. Il est ensuite moulé par soufflage ou compression. Le produit est ensuite recuit pour les mêmes raisons que le verre plat afin de fixer ses contraintes internes pour lui donner la résistance voulue. Owens-Illinois est une entreprise québécoise de production de contenant en verre creux qui détaille de nombreuses informations sur ces procédés de fabrication et de recyclage sur son site web (Owens-Illinois, 2020).

Le calcin de verre plat peut aussi être incorporé dans les processus de fabrication du verre creux. L'objectif est aussi de remplacer la matière première vierge par de la matière première secondaire pour obtenir les mêmes bénéfices thermochimiques lors de l'étape de fusion.

1.3 Impact environnemental du verre

La méthode d'évaluation par Analyse de Cycle de vie est utilisée pour comparer des produits ou des filières entre elles sur le plan des impacts environnementaux. Elle permet notamment de prendre en compte les impacts de chaque processus composant le cycle de vie du produit, sur de nombreuses catégories environnementales.

L'impact de chaque gaz sur les changements climatiques varie en fonction de leur durée de vie dans l'atmosphère et de leur capacité de rétention de la chaleur. Afin de permettre une meilleure comparaison des résultats de ce type d'analyses, ces impacts s'expriment en kg éq-CO₂. Cette quantité est exprimée à partir du Potentiel de Réchauffement Planétaire (PRP), défini par le 4^e rapport du GIEC, qui permet d'exprimer la capacité d'un gaz à conserver la chaleur dans l'atmosphère, par rapport à la capacité du CO₂. En connaissance des quantités des

différents gaz présents dans un système, il est alors assez simple d'exprimer leur quantité équivalente de CO₂ grâce au PRP (Canada, 2010).

1.3.1 Impact environnemental du verre plat

Une ACV du verre plat a été réalisée pour l'organisme Glass For Europe. Ce regroupement d'entreprises, qui totalise 25 sociétés productrices de verre plat au moment de l'étude, souhaitait connaître les impacts de leur production.

L'analyse fut partielle dans le sens où elle a seulement pris en compte les phases d'extraction de la matière première jusqu'à la sortie de l'usine. L'unité fonctionnelle choisie vaut

1 kilogramme de verre plat avant transformation en vitrage et ayant pour fonction d'assurer le clos d'une surface de 0,1 m² de verre plat de 4 mm d'épaisseur. La durée de vie typique du produit est de 30 ans (Gentil et al., 2011).

Le système prend en compte les processus de consommation des matières premières, de consommation d'énergie électrique, de consommation des combustibles, les émissions dans l'eau et l'air des usines, la production de déchets des usines. Certains processus ne sont pas pris en compte, comme les transports des fournisseurs de matière première, ou encore les infrastructures de l'usine⁹, la livraison au client, l'utilisation du produit et sa fin de vie (Gentil et al., 2011).

L'ACV du verre plat suggère que, de la phase d'extraction de la matière première jusqu'à la sortie de l'usine, la production de verre plat contribue à l'émission de près 1270 g éq- CO₂ / kg de verre produit. Le Tableau 1.7 détaille ces résultats pour chaque procédé défini dans le scénario d'étude.

⁹ Les bâtiments, machineries et outils

Tableau 1.7 Résultats de l'ACV verre plat pour la catégorie d'impact "changement climatique" (adapté de : Gentil et al., 2011)

Procédé	Impact (en g éq-CO ₂)	Participation (en %)
Autre	76	6
Gaz naturel	66	5
Électricité	131	10
Carbonate de sodium	233	18
Procédé verre plat	759	60
Total	1265	100

Le procédé de fabrication de verre plat génère la plus grande partie des émissions avec 60 % de participation, suivie des carbonates de sodium avec 18 %. Dans l'étude, il est aussi précisé que dans ce décompte, 96 % des émissions sont composées de CO₂, 6 % sont composées de méthane (CH₄) et 1 % d'oxyde nitreux (N₂O). Parmi ces émissions, l'utilisation de carbonate de sodium représente à elle seule près de 20 % des émissions totales du verre.

Il est intéressant de rappeler que l'incorporation de calcin au sein des procédés permet de réduire directement la part de carbonate de sodium nécessaire à la confection du verre. Il faut cependant nuancer en expliquant que l'utilisation de calcin dans cette étude est mentionnée sans toutefois en préciser la part. L'analyse datant de plus de 11 ans, il est réaliste d'imaginer que les proportions de calcin dans les mélanges étaient au moins plus faibles à cette époque. Sachant que l'intégration de calcin dans les processus industriels de verre plat peut atteindre plus de 30 % aujourd'hui, il est possible d'espérer des améliorations significatives sur les émissions associées au carbonate de sodium (Saint Gobain France, 2019).

De même, il convient de rappeler que l'utilisation de calcin permet d'abaisser le point de fusion du mélange. Cela réduit largement la consommation d'énergie des fours qui participent aux émissions du procédé de fabrication du verre plat, qui s'élève à près de 60 % en contribution ici. Une légère diminution des émissions pourrait être à prévoir sur ce point-là également.

1.3.2 Impact environnemental des produits commercialisés en verre recyclés

La seconde ACV porte sur les produits recyclés réalisés à partir de verre creux. Elle a été réalisée par Quantis Canada, une firme spécialisée et mandatée par RECYC-QUEBEC, afin d'évaluer les impacts environnementaux de produits réalisés à base du verre mixte récupéré dans les centres de tri au Québec.

L'étude porte sur différents produits finis tels que la bouteille de verre, la poudre de verre en tant qu'ajout cimentaire, la laine de verre, ou encore les agrégats de verre en tant qu'ajout pour béton. Les limites des systèmes sont fixées à partir du départ du verre du centre de tri, jusqu'à sa sortie des usines de production en tant que produit fini, ou bien de son élimination en tant que déchet ultime. Chaque produit fini est comparé à différents scénarios de base, notamment l'enfouissement du verre en LET. L'unité fonctionnelle, notée « UF », concerne

la gestion postconsommation de 1 kilogramme de verre mixte
récupéré via les centres de tri au Québec en 2013 (Quantis,
2015).

Les descriptions de processus associés à ces produits étant toutes différentes, elles ne répondent pas à la problématique de manière équivalente. Pour les comparer sur une base commune, une fonction primaire « Gérer du verre mixte récupéré en fin de vie via les centres de tri québécois » a été définie lors de l'étude (Quantis, 2015). Contrairement à l'ACV précédente, où le système de processus est le même tout au long de l'étude, ici chaque produit présente un système qui aura été plus ou moins étendu afin de répondre à cette fonction primaire de manière équivalente. Cela permet de les comparer sur la fonction qui est rendue, au même titre que le principe d'unité fonctionnelle pour un produit (Quantis, 2015).

Le Tableau 1.8 présente les résultats de cette étude, pour la bouteille en verre recyclé avec un taux de MPS de 45 %. Ces résultats sont exprimés au regard des processus de la chaîne de valeur de la bouteille, une caractérisation différente de la première évaluation.

Tableau 1.8 Résultats de l'ACV bouteille en verre recyclé, pour la catégorie d'impact "changement climatique" (adapté de : Quantis, 2015)

Procédé	Impact (en g éq-CO ₂ /UF)	Participation
Transport vers conditionneur	34,5	1,97 %
Conditionnement du verre	77,7	4,44 %
Transport vers recycleur	3,52	0,20 %
Fabrication	1630	93,14 %
Total	1750	100,0 %

Dans le scénario de production d'une bouteille en verre recyclé, il reste intéressant de voir que c'est le processus de fabrication qui génère encore la plus grande part d'émissions de CO₂ avec 93 %. En second vient l'étape de conditionnement du verre avec seulement 4,4 % de la participation aux émissions. Les autres procédés sont moins significatifs. Au total, de la sortie du centre de tri jusqu'à la sortie d'usine, ce type de bouteille génère donc 1750 g éq- CO₂ par kilogramme de bouteille produite au Québec.

Pour l'analyse de la poudre de verre, seules les étapes de « transport vers micronisation », de « micronisation » et de « transport vers lieu d'utilisation » étaient considérées. Tels quels, les résultats du verre en tant qu'ajout cimentaire surpassaient largement les deux autres produits, avec des émissions très faibles de GES lors de ces étapes, d'une valeur de 27,7 g éq- CO₂ par kg de matière produite. Cependant, en l'état, la poudre de verre micronisée ne représente qu'un produit semi-fini¹⁰. Alors que les bouteilles n'avaient plus qu'à

¹⁰ Terme non officiel. Les produits semi-finis nécessitent de passer par plus d'un processus de transformation supplémentaire pour délivrer leur utilisation finale. Dans le cadre de l'exemple, la poudre de verre doit être ajoutée au ciment, lui-même ajouté au béton avant d'être consommé sur les chantiers. Par opposition, il est possible de

être remplies, le verre plat assemblé en vitre, la poudre de verre devait encore être transformée en ciment qui devait ensuite être ajouté aux bétons pour être consommé sur chantier. Afin de placer les produits à des stades d'utilisation similaires, les émissions associées au processus de transformation en ciment ont donc été prises en compte. Le Tableau 1.9 présente les impacts de ces deux procédés et leur participation dans les émissions totales du cycle de vie de l'ajout cimentaire.

Tableau 1.9 Résultats de l'ACV poudre de verre en ajout cimentaire, pour la catégorie d'impact "changement climatique" (adapté de : Quantis, 2015)

Procédé	Impact (en g $\text{éq-CO}_2/\text{UF}$)	Participation
Transport vers micronisation	5,92	0,57 %
Micronisation du verre	20,3	1,96 %
Transport vers lieu d'utilisation	1,46	0,14 %
Transformation en ciment	1010	97,33 %
Total	1040	100,00 %

Il est intéressant de voir qu'ainsi, de la sortie du verre en centre de tri, jusqu'à la sortie du ciment en usine, la production d'ajout cimentaire émet non plus 27,7 g éq-CO_2 par kg de matière produite, mais 1040 g éq-CO_2 par kilogramme de matière produite. Pour ce produit, c'est la transformation en ciment qui génère la majorité des émissions. En dehors de cette étape, l'ensemble des procédés sont peu générateurs d'émissions comparativement aux deux produits précédents, avec seulement 20 g éq-CO_2 par kilogramme de matière produite. À titre indicatif, le transport vers micronisation, la micronisation, et le transport en lieu d'utilisation de l'ajout cimentaire représentent seulement 1,2 % à 2,7 % des émissions totales de la bouteille et du verre plat. La Figure 1.7 présente la contribution de chaque procédé aux émissions de GES de l'ajout cimentaire.

considérer les bouteilles de verre recyclées comme des produits finis, car elles ne nécessiteront qu'une étape de remplissage pour être consommables.

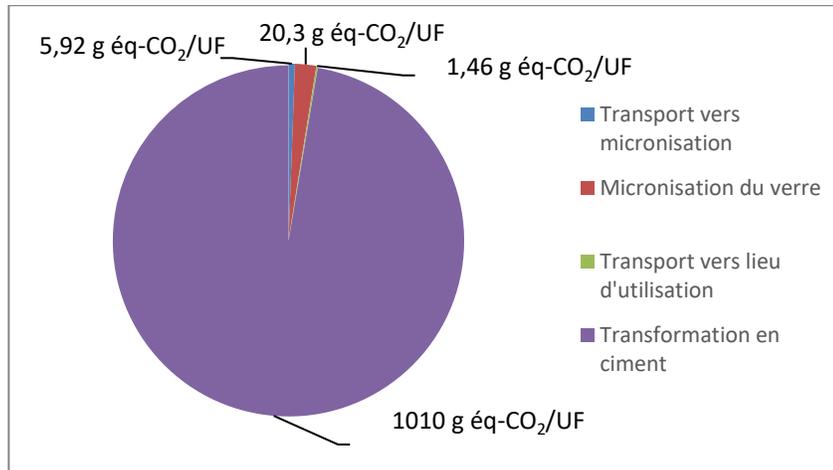


Figure 1.7 Contribution des procédés d'ajout cimentaire pour la catégorie d'impact "changement climatique" (adapté de : Quantis, 2015)

Dans cette étude, il est longuement question de l'impact du transport sur les résultats générés. La firme a donc cherché à représenter quelles seraient les limites à partir desquelles le transport du produit pourrait transformer les impacts sur l'environnement au point d'inverser les résultats de l'étude. Elle a donc mis en place un indicateur de distance limite, présenté dans la Figure 1.8.



4

Figure 1.8 Distance de transport limite à considérer pour les produits de verre recyclé (tiré de : Recyc-Québec & Quantis, 2015)

Particulièrement, au Québec, la production de bouteilles en verre creux pourrait être commercialisée jusqu'à 2000 km autour de la région, avant que les résultats de l'étude ne soient inversés. Pour la poudre de verre en tant qu'ajout cimentaire, cette distance s'élève à près de 9000 km et permettrait donc de couvrir aussi l'Amérique du Nord, du Sud, ainsi que l'Europe.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

L'objectif de ce projet est de proposer un cadre de réflexion pour la mise en place d'un centre de démantèlement des portes et fenêtres issues du secteur de la construction au Québec. Plusieurs thématiques seront abordées, notamment en considérant l'ensemble de la chaîne de valeur autour d'une plateforme de démantèlement. L'amont est ainsi représenté par les différents processus et flux qui caractérisent le gisement de portes et fenêtres, l'aval est représenté par les filières de recyclage à travers leurs procédés.

2.1 Schématisation des processus de fonctionnement

Parmi les étapes intervenant en amont et en aval de la plateforme, les processus de déconstruction seront représentés par un schéma générique afin d'appréhender les enjeux, les freins et les leviers associés à la mise en place de processus de démantèlement et de redistribution aux filières. À partir de ces informations, une proposition du fonctionnement théorique et des processus décisionnels d'une plateforme de démantèlement sera élaborée.

2.1.1 Processus génériques de déconstruction

Parmi les différents retours d'expériences présents dans la littérature scientifique, six études ont été sélectionnées sur la base de leur pertinence, de la qualité des informations présentes, et la complémentarité des sujets traités. Chaque système était défini à partir des étapes préliminaires du chantier (si disponibles), jusqu'aux étapes de distribution aux filières de récupération. Le Tableau 2.1 présente pour chaque étude l'organisme en charge, le lieu du chantier ainsi que la référence associée.

Tableau 2.1 Organisme en charge, lieux et référence des études de déconstruction sélectionnées

Étude	Organisme en charge	Lieux	Référence et couleur
Our Town Hall Project	City Council of Manchester	Manchester, Royaume-Uni	(FCRBE, 2021b)
L'autre Soie	GIE La Ville Autrement, CCO	Lyon, France	(FCRBE, 2021a)
Saint-Jean-sur-Richelieu	Recyc-Québec	Saint-Jean-sur-Richelieu, Canada	(Fortin, 2003)
Saint-Vincent-de-Paul	Paris & Métropole Aménagement	Paris, France	(Métropole Aménagement, 2022)
Deconstruction Grant Program	Bureau of Planning and Sustainability	Portland, Etats-Unis	(Christiana, 2021)
Riley Park	Ville de Vancouver	Vancouver, Canada	(Unbuilders, 2022)

Le fonctionnement de chacun d'eux a été synthétisé en un graphique afin de comprendre quels étaient les processus et les flux en jeu, et quelle était l'organisation de ces processus. Pour cette étape, les schémas ont été réalisés à partir de quatre éléments :

- les processus, qui correspondent aux grandes étapes du chantier;
- les acteurs, qui regroupent les organisations, personnes, regroupements, qui sont les principaux responsables des processus;
- la gestion des matières résiduelles, qui correspond au type de gestion défini par les 3RVE;
- les éléments, qui regroupent des notions fictives (comme les références) ou réelles (comme la serrurerie).

Ces différents schémas permettent d'identifier des tendances au sein des processus de ces six différents retours d'expériences, et contribuent à l'élaboration d'un modèle d'organisation plus générique. Seuls les freins ont été considérés dans cette étude, du fait de leur pertinence. Afin de les différencier les uns des autres, une typologie a été mise en place :

XxY

Les freins peuvent être regroupés en différentes catégories, selon leur domaine d'application, Xx correspond donc aux initiales de la catégorie du frein, parmi¹¹ :

- Lo pour logistique;
- Re pour récupération externe;
- P pour parties prenantes.

Y correspond au numéro du frein dans la catégorie Xx.

2.1.2 Schéma de fonctionnement et processus décisionnels

Sur la base des fonctionnements identifiés au sein des cinq études de démantèlement sélectionnés précédemment il a été possible d'établir un schéma théorique du fonctionnement d'une plateforme de démantèlement. Le Tableau 2.2 présente le type d'organisme en charge de chacune des études ainsi que la référence disponible.

Tableau 2.2 Type d'organisme en charge et référence des études de démantèlement sélectionnées

Étude	Type d'organisme en charge	Référence et couleur
Démarche REVALO	Étude de cas grande échelle	(ADEME, 2014)
MENREC	Entreprise	(Technic'Baie, 2020)
UFME	Syndicat professionnel	(UFME, 2020)
HTROGW	Article de blog	(Rogers, 2022)
Eco-Retour	Entreprise	(Groupe Millet, 2020)

Un graphique définissant les processus décisionnels vient compléter le fonctionnement de la plateforme. Il prend en compte l'arrivée d'un gisement à la plateforme, jusqu'à sa sortie du système, et permet de concrétiser une partie des questionnements à adopter face à un produit.

¹¹¹¹ La totalité des freins et leviers sont disponibles dans l'ANNEXE 1.

Ce schéma reprend une partie des éléments précédents :

- les processus internes;
- les processus décisionnels;
- les objectifs de gestion des matières résiduelles, qui correspondent à ceux définis par les 3RVE. Ils sont colorés par préférence, où vert correspond à « très préférentiel », jaune à « préférentiel », et orange à « dernier recours ».

2.2 Étapes de démantèlement

Une première phase de test de démantèlement a été réalisée afin d'identifier des conditions favorables et freins à un processus de démantèlement. Par ailleurs, la structure préliminaire d'un catalogue de portes et fenêtre a aussi été mise en place en parallèle pour permettre de hiérarchiser l'information.

2.2.1 Conditions des tests de démantèlement

Les tests se sont déroulés le 1^{er} juin 2022, sur une demi-journée, à la Recyclerie des Matériaux de Sainte-Agathe-des-Monts, un établissement de réinsertion sociale qui, en partenariat avec l'écocentre de la ville, récupère les déchets des habitants qui sont encore en bon état et leur redonne une seconde vie pour les revendre. Le démantèlement s'est effectué sur deux portes vitrées, de provenance et de composition différentes. Il a été réalisé à partir des produits complets, jusqu'à ce que chaque élément soit à l'état de mono-composant. Les tests ont été documentés par prise de notes, pesées, mesures, photos et vidéos.

La première porte présentait un aspect métallique sur l'extérieur du cadre, avec une vitre double vitrage au centre. Elle semblait récente et était faite pour une utilisation extérieure. La seconde paraissait plus ancienne. Elle était constituée d'un panneau de bois comprenant deux plaques de simple vitrage, et paraissait faite pour un usage extérieur également. La Figure 2.1 présente une image de ces deux produits durant les phases de test de démantèlement.



Figure 2.1 Photographies des produits lors des tests de démantèlement

Le démantèlement a été réalisé sur une table horizontale de 80 centimètres de hauteur solidement ancrée au sol. De nombreux outils ont été utilisés, notamment, tournevis, visseuse, couteau de précision, oscilleuse, pied-de-biche, marteau, bêche, ciseau à bois, tenaille, coupe-verre et pistolet à chaleur.

2.2.2 Structuration préliminaire d'un catalogue de portes et fenêtres

La structure préliminaire d'un catalogue de portes et fenêtres a été développée. Afin de pouvoir colliger efficacement l'information concernant les éléments constituant la fenêtre, une structure d'information en arborescence a été privilégiée afin de correspondre à la diversité des niveaux de précisions auxquels il peut être possible d'observer les différents composants d'une fenêtre. Ainsi, à chaque niveau d'un composant, il pourrait être possible depuis le catalogue de percevoir les informations relatives à ce composant, même s'il est constitué lui-même de différents composants, définis par des matériaux ou des informations qui leur sont spécifiques. Pour cette structure préliminaire, les attributs suivants sont considérés :

- le numéro d'identification de l'élément;
- la liste des numéros d'identification de ses éléments fils, soit, la liste des composants qui constituent l'élément, si l'attribut est vide, l'élément est mono-composant;
- le type de l'élément, s'il est un produit, un composant ou une option;
- le label de l'élément;

- les précisions d'option, dans le cas où l'élément est du type option;
- la liste des matériaux composants l'élément¹², intervient seulement lorsque l'élément est mono-composant.

Afin de structurer ce catalogue avec de l'information, un modèle générique de fenêtre à battant a été considéré. Ce modèle ne constitue pas un produit particulier, mais est élaboré sur la base de plusieurs ressources disponibles en ligne. En effet, peu de fiches techniques précises sont publiées sur le contenu de produits commercialisés. Néanmoins, plusieurs constructeurs ou fournisseurs de menuiseries mettent en place des ressources pour comprendre la composition générale des fenêtres, la diversité des matériaux possibles (Vitrage et Fenêtre, 2022). Ce type de ressource a donc été utilisé pour constituer la base d'informations sur laquelle tester les premiers essais de structuration.

Lorsque les différents attributs sont renseignés, il est possible de transformer cette base de données en un diagramme, notamment un organigramme horizontal. Chaque élément y est repéré par son numéro d'identification, les composants fils sont reliés à leurs composants pères par la liste des numéros d'identification des éléments fils. Le type d'élément permet de différencier les produits des composants et des options qui peuvent bénéficier chacun d'un format différent sur le graphique (forme, couleur, taille). Si l'élément est une option, des précisions peuvent être nécessaires concernant les autres options disponibles. L'attribut « précisions d'option » permet de renseigner ces précisions qui peuvent être affichées pour donner plus de spécifications. Le label permet d'afficher la nature de l'élément, et la liste des matériaux doit pouvoir être consultable en « bout de ligne » du composant, lorsque l'élément est donc mono-composant. Lorsqu'un élément mono-composant est constitué de différents matériaux, la liste présente ces différents matériaux. Dans certains cas, la mention « hybride » permet de renseigner que le composant peut être constitué de plusieurs de ces matériaux en même temps. Pour déployer cette méthode, le logiciel VISIO de Microsoft a été utilisé à partir

¹² Un élément peut être mono-composant et quand même présenter différents matériaux dans sa composition. Le caractère mono-composant est intimement lié à la possibilité de démanteler un élément. Pour parler de composition, il est recommandé d'utiliser plutôt les termes mono-matériaux ou multimatériaux.

d'un tableur, permettant d'automatiser la génération de l'ensemble de la structure, dont les liens, les formes, les informations ainsi que le positionnement des éléments (Microsoft 365, 2017).

2.3 Bilans de GES des procédés de recyclage

Pour chacune des filières de recyclage sélectionnées, les réductions d'impacts environnementaux réalisées par l'utilisation de matières premières secondaires au sein des procédés de recyclage sont évaluées sur la base des émissions de GES, exprimées en kilogramme d'équivalent CO₂ émis par kilogramme de matière produite (kg éq-CO₂/kg). Les équations font appel au taux de Matière Première Secondaire (MPS), exprimé en %, qui définit la proportion de matières recyclées à introduire au sein des processus de recyclage de la filière.

2.3.1 Filière d'ajout cimentaire

La réduction en poudre d'une tonne de cendres volantes génère environ 201 kg éq-CO₂. Le même processus réalisé pour une tonne de calcin de verre générerait environ 18 kg éq-CO₂. L'utilisation de calcin permettrait donc d'économiser, durant ce procédé, environ 183 kg éq- CO₂ par tonne d'ajout produite (Fondation Ellen Macarthur, 2016). En posant l'hypothèse que la quantité d'ajout cimentaire versée dans le ciment est la même pour les cendres volantes que pour le calcin, soit d'environ 25 %, il est alors possible d'estimer les émissions évitées dans une tonne de ciment produite, grâce à l'ajout de matières premières secondaires (VERROX, 2022)¹³.

$$E_{CO_2,ciment} = 183 \times M_{ps} \quad (2.1)$$

Où M_{ps} représente la fraction de matières premières secondaires dans le ciment, ici du calcin.

Où $E_{CO_2,ciment}$ est en kg éq-CO₂ par tonne de ciment produite avec le calcin.

¹³ L'entreprise annonce des taux d'incorporation compris entre 20 % et 30 %.

En prenant $M_{ps} = 0,25$:

$$E_{CO_2,ciment} = 45,8 \text{ kg } \acute{e}\text{q-CO}_2/\text{t} \quad (2.2)$$

La majorité des ajouts de verre sont toutefois peu efficaces en termes de circularité des matériaux. Ils sont généralement inclus dans des bétons, des adhésifs, des caoutchoucs ou encore des peintures qui sont des produits souvent non recyclables ou non recyclés. Une fois le verre incorporé dans ces matières, il est alors impossible de le récupérer, car aucune filière n'existe pour ces déchets. Ainsi, au sein d'un ciment, lui-même incorporé dans un béton, le verre n'est plus récupérable. Cela en fait un produit recyclé, mais non recyclable, avec un cycle d'usage court et un nombre d'utilisations totales qui dépendra uniquement des utilisations précédentes du matériau.

2.3.2 Filières de production du verre

Lors de la production d'une tonne de verre, près de 510 kg $\acute{e}\text{q-CO}_2$ sont émis dans l'atmosphère. Dans l'ensemble du cycle de vie des produits en verre, c'est au cours du processus de fabrication que la majorité des GES sont émis. L'utilisation de calcin dans le mélange permet néanmoins de réduire ces émissions. Dans certains cas, l'utilisation de calcin dans les processus permet d'abaisser cette valeur en dessous des 360 kg $\acute{e}\text{q-CO}_2$ (Collen, 2020).

Lors de la production de verre par fusion des matières premières, la décarbonatation des matières carbonatées contenues dans la réaction est responsable de l'émission de GES, à raison de 86 kg $\acute{e}\text{q-CO}_2$ par tonne de matière première consommée. Le calcin ayant déjà relargué du CO_2 au cours de sa production initiale en verre, sa refonte dans les procédés ne dégage pas de GES issus de la nature chimique de la réaction. Plus la fraction de calcin est grande, moins la fraction de matière première est élevée, ce qui permet d'abaisser les émissions directes du procédé (Chevalier, 2018).

En posant l'hypothèse de la linéarité des processus stœchiométriques en jeu, il est alors possible d'estimer la quantité de CO₂ économisée pour une tonne de verre produite, en fonction de la fraction de calcin inclut dans le mélange. :

$$E_{carb} = 86 \times M_{ps} \quad (2.3)$$

Où M_{ps} représente la fraction de MPS, en %.

Et E_{carb} est en kg éq-CO₂ par tonne de matière consommée.

D'après certains manufacturiers de verre, l'utilisation d'une tonne de calcin dans un four verrier permettrait au total d'éviter les émissions de 300 kg éq-CO₂, grâce à la baisse de température de fusion, ainsi que la diminution des émissions d'origine chimiques (Saint Gobain France, 2019). Il est alors possible d'estimer les émissions totales évitées lors du procédé de fusion du verre, avec ajout de calcin :

$$E_{CO2} = 300 \times M_{ps} \quad (2.4)$$

Où M_{ps} représente la fraction de matières premières secondaires.

Et E_{CO2} est en kg éq-CO₂ par tonne de matière consommée.

2.3.2.1 Production du verre plat

Lorsque le verre de fenêtre est réduit en calcin, il peut être réintroduit dans des procédés de production de verre plat. Les retours d'expériences font état d'une réutilisation de près de 30 % de calcin en moyenne pour la fabrication (Saint Gobain France, 2019). Conformément à la section 2.3.2, il est alors possible d'estimer les économies en termes d'émissions GES, pour le processus de fonte du calcin recyclé en verre plat :

Avec $M_{ps,plat} = 0,3$

$$E_{carb,plat} = 86 \times 0,3 \quad (2.5)$$

$$E_{carbplat} = 25,8 \text{ kg éq-CO}_2/\text{t} \quad (2.6)$$

Et enfin

$$E_{CO_2,plat} = 300 \times 0,3 \quad (2.7)$$

$$E_{CO_2,plat} = 90 \text{ kg \acute{e}q-CO}_2/t \quad (2.8)$$

2.3.2.2 Production du verre creux

Lorsque le calcin de verre plat est transformé en verre creux, il change de secteur industriel. La matière n'est alors plus destinée à former du verre de fenêtre, mais un contenant en verre. Pour l'industrie de la production de verre creux, le rachat de calcin vaut généralement le même prix que l'achat de matières premières, à savoir 100 \$/t. Il est ensuite inclus en tant que MPS à hauteur de 45 % en moyenne dans les différents scénarios d'analyse d'impact (Chevalier, 2018) et (Recyc-Québec & Quantis, 2015). Certaines entreprises mentionnent un taux de MPS de 38% en moyenne (Owens-Illinois, 2020), mais en fonction des procédés et de la qualité de verre souhaitée, cette valeur peut monter jusqu'à 65% (Boulin & ADEME, 2021).

Avec $M_{ps,plat} = 0,45$

$$E_{Carb,creux} = 86 \times 0,45 \quad (2.9)$$

$$E_{Carb,creux} = 38,7 \text{ kg \acute{e}q-CO}_2/t \quad (2.10)$$

Ainsi que

$$E_{CO_2,creux} = 300 \times 0,45 \quad (2.11)$$

$$E_{CO_2,creux} = 135 \text{ kg \acute{e}q-CO}_2/t \quad (2.12)$$

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

L'application de la méthodologie vue précédemment donne lieu à des apprentissages au sujet des différentes phases de la chaîne de valeur des activités de démantèlement. La première partie permet d'illustrer le fonctionnement des différents processus mis en jeu en amont et au sein de la plateforme. Les tests de démantèlement réalisés sont ensuite décrits, et un prototype de catalogue des portes et fenêtres est proposé. Enfin, une analyse sommaire de la qualité environnementale de plusieurs filières potentielles est réalisée.

3.1 Processus et fonctionnement

Chaque activité de la chaîne de valeur peut être décrite par des processus simples. L'exercice a été mené sur les activités de déconstruction sous la forme d'un fonctionnement générique. Le même travail a ensuite été réalisé sur le fonctionnement théorique d'un centre de démantèlement, puis sur les processus décisionnels qui permettraient de coordonner ces activités.

3.1.1 Processus générique de déconstruction

Le fonctionnement générique des activités de déconstruction, Les différents retours d'expériences de déconstruction sélectionnés ont chacun été décrits par un schéma de fonctionnement. À cette étape, ces schémas servent uniquement à comprendre la dynamique des projets et à décrire leur fonctionnement spécifique. Une fois schématisées, de grandes tendances sont identifiées parmi ces différents schémas, sur la base des similitudes de fonctionnement qui sont repérables entre certains des projets. La Figure 3.1 présente un exemple de ces schémas synthétiques, notamment pour le projet de Saint-Vincent-de-Paul.

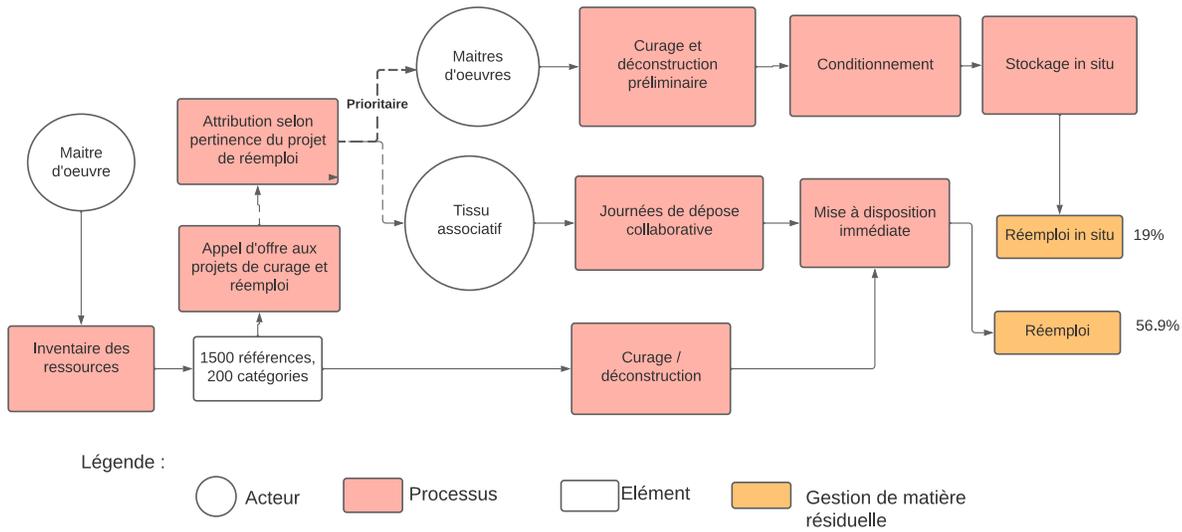


Figure 3.1 Schéma synthétique du fonctionnement du projet Saint-Vincent-de-Paul

Après la schématisation de ces différents retours d'expérience, des enjeux de compréhension des similitudes sont apparus. En effet, chaque retour d'expérience présente de nombreuses distinctions sur le plan organisationnel, mais aussi au niveau de la communication, que ce soit sur les termes employés, les thématiques couvertes ou le niveau de détail. Des termes de processus génériques ont été désignés afin de fournir un langage commun à ces retours d'expérience et ainsi faire correspondre les points de similitudes de ces différentes organisations. La Figure 3.2 présente ces différents processus, ainsi que l'information retenue pour chacun des retours d'expérience.

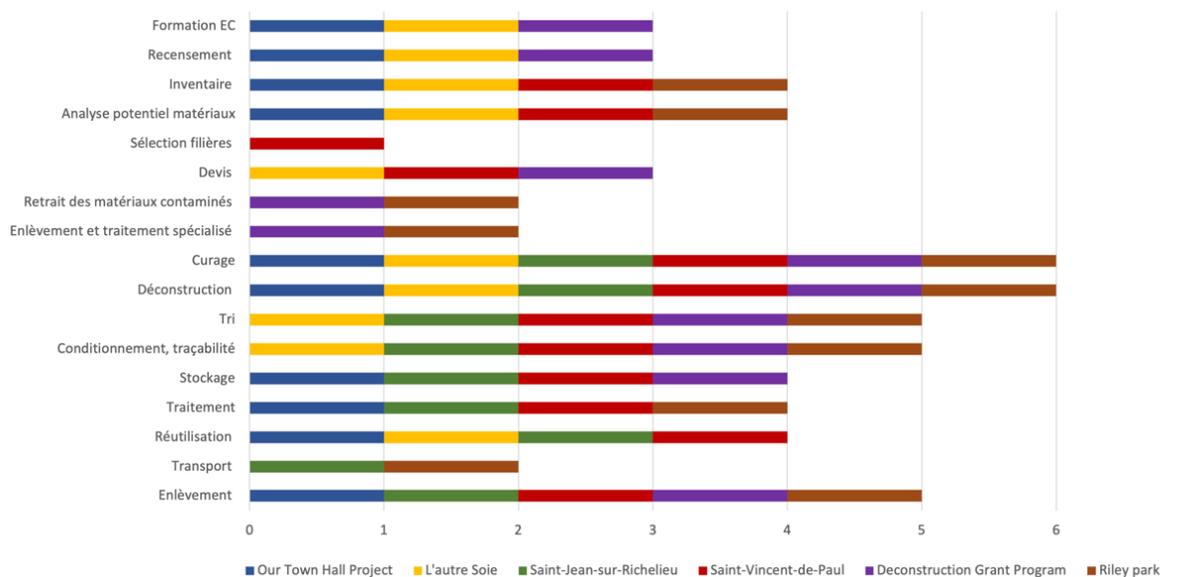


Figure 3.2 Processus couverts par les retours d'expérience sélectionnés

En moyenne, chaque processus est couvert par près de quatre des six retours d'expériences, avec des processus généralement plus documentés comme les étapes de déconstruction et de curage, qui apparaissent dans tous les cas. D'autres étapes comme la sélection de filières de recyclage sont couvertes par un seul retour d'expérience. C'est à partir des étapes de curage et de déconstruction que les retours d'expérience sont les plus documentés. De manière générale cependant, les retours d'expériences couvrent un nombre presque équivalent de processus, pour une moyenne de 10 processus documentés par retour.

En parallèle, différents freins et leviers sont identifiés pour chaque retour d'expérience, sur la base de la documentation disponible et des communications des organisations, apparaissant souvent sous la forme d'apprentissage, de défi, ou de conclusion. Ces informations sont inscrites dans le coin supérieur gauche de chaque processus sous la forme de pentagone, en vert pour les leviers, en rouge pour les freins. Au centre de ces pentagones, le label de l'information est indiqué¹⁴. Chaque processus générique est aussi constitué en prenant en

¹⁴ Pour plus d'informations, le label et la définition de l'ensemble des freins et leviers identifiés au sein des activités de déconstruction sont disponibles en ANNEXE I.

compte la contribution de chaque retour d'expérience, dont la couleur, définie dans le Tableau 2.1, est identifiable dans le coin supérieur droit du processus. La Figure 3.3 présente un exemple de processus, pour lequel les retours d'expérience de Riley Park, Our Town Hall Project, Saint-Vincent-de-Paul et l'Autre Soie ont contribué.

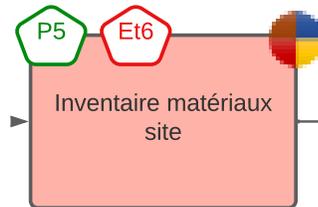


Figure 3.3 Exemple de processus et pastille du retour d'expérience associé

Une fois assemblés selon les grandes tendances identifiées dans les retours d'expérience, les processus génériques permettent de schématiser le fonctionnement générique des activités de déconstruction. La Figure 3.4 présente ce graphique en apportant des informations sur les processus en jeux, les freins et leviers, ainsi que la contribution de chacun des retours d'expériences à ces processus.

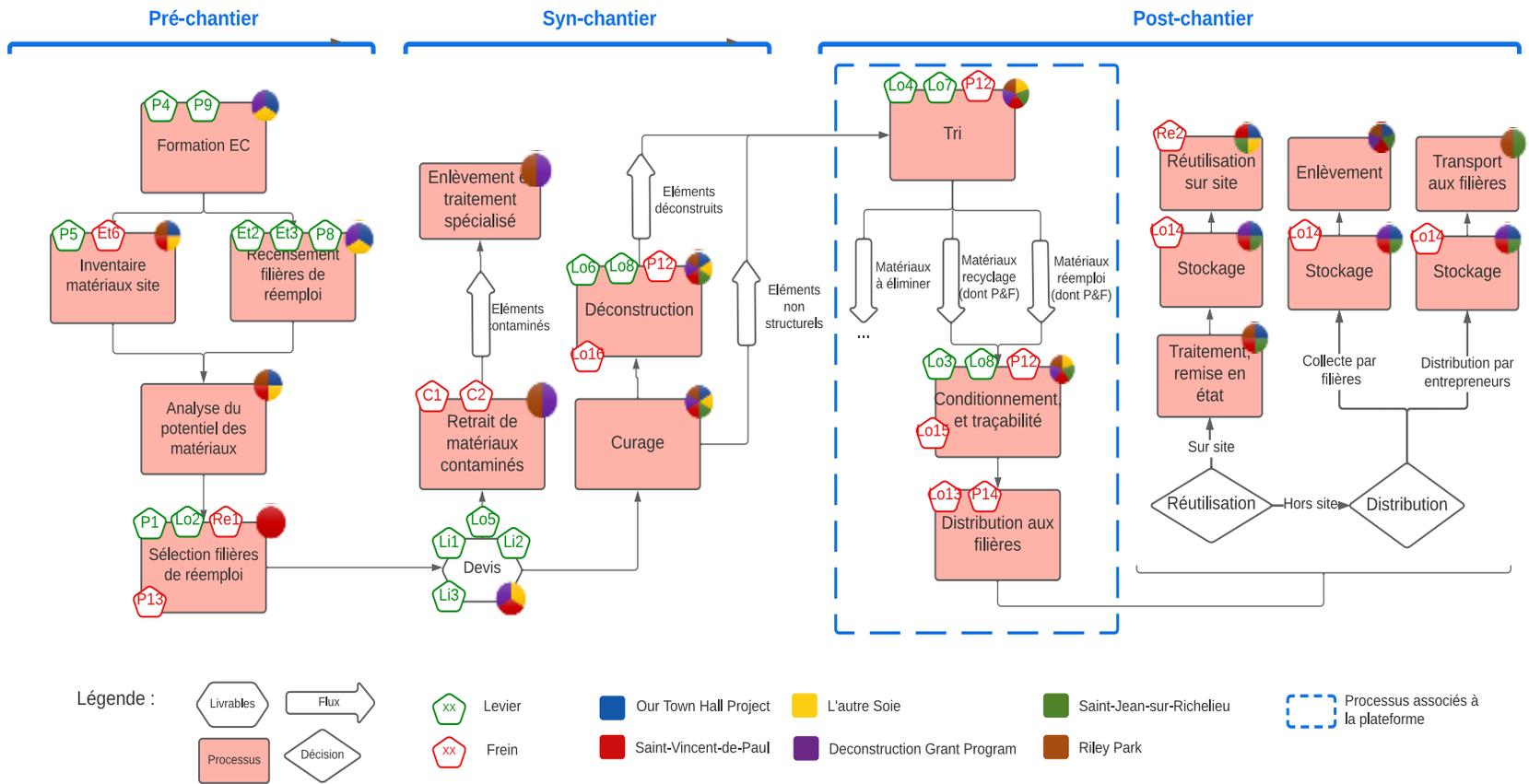


Figure 3.4 Fonctionnement générique des processus de déconstruction

La Figure 3.4 permet d'appréhender deux des grandes étapes de la chaîne de valeur des portes et fenêtre : l'amont, qui est représenté ici par les parties pré-chantier et syn-chantier, ainsi que les étapes de démantèlement, qui correspondent à la partie post-chantier sur la figure. Cette dernière partie peut être en partie associée aux activités d'une plateforme de démantèlement. Lorsque des matériaux sont retirés du bâtiment, elle permet d'en effectuer le tri, mais aussi le conditionnement et la traçabilité en vue d'une distribution aux filières ou d'une réutilisation sur site potentielle. Dans les deux cas, une étape de stockage est nécessaire. Pour une réutilisation sur site, il faut alors rajouter une étape de traitement et de remise en état. Cette partie post-chantier revêt une importance cruciale pour connecter le gisement (l'amont), aux filières de recyclage (l'aval) et tient lieu de point central pour la circularisation des matériaux.

La première partie correspond à l'étape pré-chantier, où un inventaire des matériaux peut être réalisé en parallèle d'un recensement des filières locales de réemploi. Après une première identification de ces dernières et de leurs conditions globales de reprise, une analyse plus poussée du potentiel des matériaux est réalisée, afin de pouvoir sélectionner ensuite les filières de réemploi qui correspondent effectivement aux conditions du chantier. La seconde partie correspond aux activités syn-chantier, où les matériaux contaminés sont retirés, les éléments non structurels sont enlevés¹⁵, et la déconstruction du bâtiment est initiée.

Les différents freins et leviers identifiés se répartissent équitablement sur ces trois parties du schéma. Malgré le fait qu'une plateforme de démantèlement n'a qu'une action limitée sur la partie pré-chantier, sa mise en place pourrait permettre d'agir efficacement sur plusieurs freins et leviers des parties syn-chantier et post-chantier, pour lesquels les processus sont plus mêlés aux activités de démantèlement. Le Tableau 3.1 présente plus précisément les freins relevés pour les étapes syn-chantier et post-chantier.

¹⁵ Certains entrepreneurs de la construction nomment cette étape le curage.

Frein	Description
Re2	La réutilisation sur site engendre des délais supplémentaires à prendre en compte dans la planification (enlèvement, nettoyage, réinstallation).
Lo14	Un manque de place empêche le stockage temporaire nécessaire en déconstruction.
Lo13	La disponibilité des matériaux issus du chantier (échancier, capacités de stockage) peut ne pas concorder avec les projets de réemploi.
P14	Les capacités d'accueil limitées des centres de tri et de certaines filières peuvent entraîner la perte de matériaux.
Lo15	[AVI] Le manque de traçabilité des matériaux récupérés fait perdre jusqu'à 90% de leur valeur.
P12	Une équipe de déconstruction mal/non formée entraîne une perte d'efficacité.

Tableau 3.1 Freins identifiés pour les étapes syn-chantier et post-chantier

Frein	Description
Lo16	L'augmentation de manœuvres lors d'une déconstruction diminue la sécurité des travailleurs
Re2	La réutilisation sur site engendre des délais supplémentaires à prendre en compte dans la planification (enlèvement, nettoyage, réinstallation)
Lo14	Un manque de place empêche le stockage temporaire nécessaire en déconstruction
Lo13	La disponibilité des matériaux issus du chantier (échancier, capacités de stockage) peut ne pas concorder avec les projets de réemploi
P14	Les capacités d'accueil limitées des centres de tri et de certaines filières peuvent entraîner la perte de matériaux
Lo15	Le manque de traçabilité des matériaux récupérés fait perdre jusqu'à 90 % de leur valeur
P12	Une équipe de déconstruction mal/non formée entraîne une perte d'efficacité

Il convient de remarquer que la majorité de ces freins pourraient être levés assez simplement s'ils sont pris en compte dans la conception de la plateforme. Notamment, développer une capacité d'accueil et de stockage des matériaux suffisante permettrait de régler en partie les freins Lo13, Lo14 et P14 marqués en rouge.

3.1.2 Fonctionnement théorique d'une plateforme de démantèlement

La mise en place d'une plateforme de démantèlement peut être représentée par l'ensemble des processus mis en jeu aux cours des activités internes, externes, des limites du système, et des activités présentes à l'interface de celui-ci. La Figure 3.5 permet d'identifier les activités internes et à l'interface de la plateforme, sans toutefois préciser les processus externes. Plusieurs éléments ont été considérés pour l'élaboration de cette représentation graphique :

- les processus à l'interface du système correspondent aux activités de transition qui vont faire entrer ou sortir la matière du système plateforme;
- les processus décisionnels définissent des interrogations qui mèneront à des actions spécifiques en fonction de la réponse;
- les processus à l'intérieur du système correspondent aux processus internes, qui permettent de faire transiter la matière au sein de la plateforme;
- les processus externes représentent toutes les autres activités hors du système.

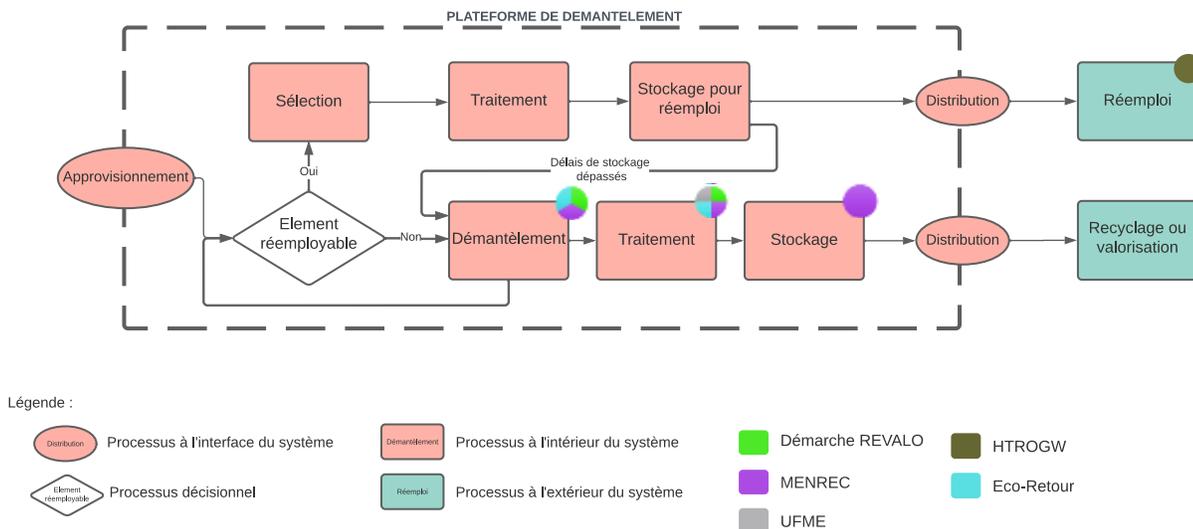


Figure 3.5 Schéma du fonctionnement théorique d'une plateforme de démantèlement

L'approvisionnement est suivi d'un processus décisionnel, définissant le caractère réemployable ou non de l'élément. Dans le cas d'une réemployabilité, l'élément passe par un processus de sélection, puis de traitement¹⁶ pour enfin arriver au stockage. Puis l'élément passe à la distribution en vue des filières de réemploi. Ce schéma sous-entend de nombreuses hypothèses, comme le fait que le réemploi se fait en dehors de la plateforme de démantèlement, ce qui n'est pas forcément le cas a priori, comme le montre l'exemple de la Recyclerie des matériaux. De même, dans le cas où les délais de stockage au sein de la plateforme¹⁷ sont dépassés, l'élément peut alors être envoyé en démantèlement.

Dans le cas où l'élément n'est pas réemployable tel quel, il part en démantèlement. Ses divers composants repassent par ce même processus décisionnel afin de valider leur caractère réemployable. Dans le cas négatif, les éléments sont de nouveau démantelés et ainsi de suite. Lorsque les éléments ne sont plus démantelables, ceux-ci subissent une étape de traitement, puis ils sont stockés en vue d'être distribués par la suite aux filières de recyclage ou de valorisation. Certaines hypothèses ont été retenues pour la réalisation de cette figure, comme le fait que plus un élément est démantelé, plus il perd en valeur. Il est aussi sous-entendu ici qu'un élément réemployé aura toujours plus de valeur¹⁸ qu'un élément recyclé ou valorisé. Ces hypothèses dépendent fortement des filières de recyclage qui sont disponibles sur le territoire.

3.1.3 Processus décisionnels d'une plateforme de démantèlement

L'intérêt de la plateforme de démantèlement réside dans la connexion qu'elle permet de créer, en ouvrant les portes à de nouvelles filières de réemploi et de recyclage pour des produits et matériaux jusque-là non valorisables. Elle permet de connecter des flux de matières résiduelles à des processus circulaires. Certaines conditions sont à prendre en compte pour les opérations à effectuer face à un matériau, notamment à propos de la rentabilité de l'opération et la capacité

¹⁶ Par exemple, un traitement de remise en état.

¹⁷ Si l'élément en question n'est pas assez demandé sur le marché, il peut ne pas y avoir de demande de la part des filières de réemploi.

¹⁸ Il est ici question autant de valeur économique que de valeur environnementale, à savoir des gains financiers à l'issue de la transaction, ou d'abaissement des émissions de GES au sein du cycle de vie.

à atteindre les conditions de reprise des filières de recyclage. La Figure 3.6 permet d'établir un premier cadre théorique concernant les processus décisionnels qui seront en œuvre dans un centre de démantèlement.

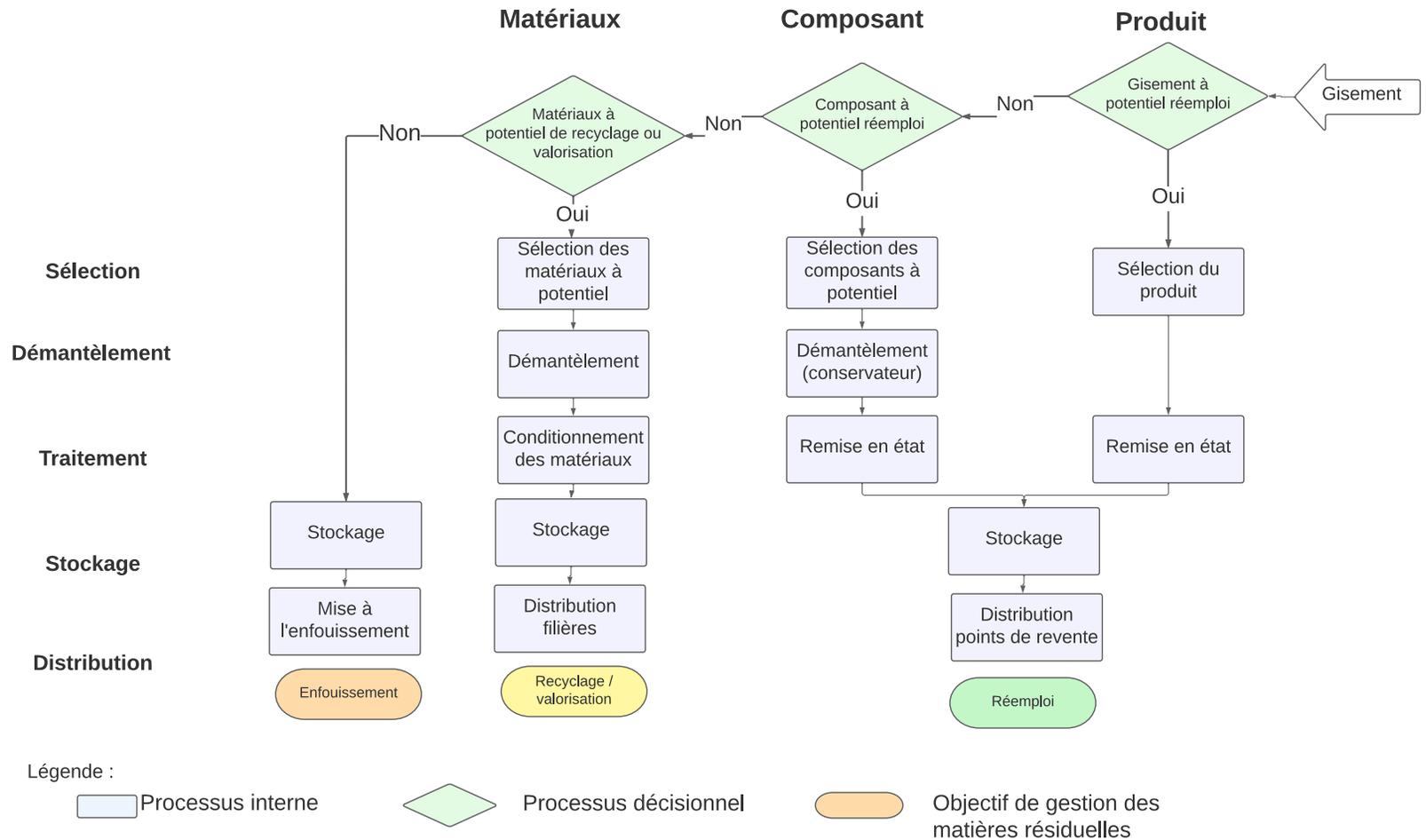


Figure 3.6 Schéma des processus décisionnels au sein d'une plateforme de démantèlement

Lorsqu'il est sous forme de produit, si le gisement présente un potentiel de réemploi, il est sélectionné pour être remis en état, puis stocké en vue d'une distribution aux centres de réemploi. Dans le cas contraire, si seulement certains de ses composants présentent un potentiel de réemploi, ils sont sélectionnés afin de subir un démantèlement conservateur¹⁹ pour ensuite être remis en état, stockés et distribués de la même manière que les produits. Dans tous les cas, ces deux processus mènent à un réemploi des éléments, c'est la solution à privilégier dans le cadre des 3RVE.

Dans le cas où les composants ne présentent pas de potentiel de réemploi, si certains de leurs matériaux présentent un potentiel de recyclage ou de valorisation, ils sont alors sélectionnés et démantelés, puis éventuellement conditionnés en vue d'un stockage pour une distribution aux filières de recyclage ou de valorisation, une solution qui est à privilégier seulement si le réemploi n'est pas disponible. Enfin, dans le cas où l'élément n'a pas été remis en circulation par tous les processus précédents, il est stocké et mis à l'enfouissement, et constitue la dernière solution à concevoir d'un point de vue environnemental.

Ces quelques processus supposent aussi différentes hypothèses, comme le fait que le réemploi est forcément une meilleure solution que le recyclage. En pratique, cela dépend de nombreuses conditions territoriales comme l'éloignement, le cycle de vie du produit, les procédés de gestion des matières résiduels, etc. Il existe donc une grande dépendance entre les processus décisionnels et la connaissance des filières en bout de la chaîne de valeur.

3.2 Apprentissages des tests de démantèlement

Les tests sur le terrain ont permis de réaliser différents apprentissages pratiques concernant les techniques de démantèlement et ont donné des indications quant à la pertinence de l'utilisation d'un catalogue de portes et fenêtres en vue d'une gestion plus autonome des stocks.

¹⁹ Un démantèlement conservateur sous-entend de conserver l'intégrité physique de l'élément en question.

3.2.1 Apprentissages pratiques

La diversité dans la composition des portes et fenêtres ne permet pas pour l'instant de définir de processus de démantèlement standard. Par exemple, les vitres récentes peuvent généralement être retirées par simple déparclosage (démontage classique du produit dans l'ordre inverse de son assemblage), car aucun scellant n'est apposé directement sur le verre, les joints étant intégrés dans les parcloles. La Figure 3.7 montre un exemple de ces composants, identifié lors des phases de démantèlement.



Figure 3.7 Exemple de parclose avec joint intégré, issu des tests effectués

Pour les vitres plus anciennes, seul un scellant est généralement appliqué sur toute l'encadrure de la parclose, à l'interface avec la vitre, ce qui maintient la vitre avec le cadre. Une méthode efficace pour enlever ce scellant serait de réaliser un déparclosage par oscilleuse pour enlever à la fois la parclose et le scellant. Cette technique fonctionne assez bien pour les vitres double vitrage²⁰, mais les vitres simple vitrage ne sont généralement pas suffisamment résistantes pour pouvoir résister aux contraintes de cette opération. Le problème vient alors du fait que la majorité des vitres à scellant sont issues de portes et fenêtres anciennes, donc souvent réalisées en simple vitrage. Il en résulte que souvent, lorsque du scellant est apposé, l'oscilleuse est à

²⁰ Les vitres double vitrage présentent l'avantage d'être entourées d'un cadre, souvent en aluminium, qui sert à maintenir les deux plaques de verre isolant le gaz, dont l'étanchéité est faite avec des joints. Cette structure apporte ainsi plus de rigidité au composant.

proscrire si l'objectif est de conserver le verre intact. La Figure 3.8 présente l'étape de retrait du scellant à l'horizontale, à l'aide de l'oscilleuse.



Figure 3.8 Retrait du scellant à l'aide d'une oscilleuse

Si l'objectif n'est pas de conserver l'intégrité de la vitre, alors elles peuvent être séparées du cadre par casse et retrait du verre, un procédé rapide et efficace, mais qui laisse un cadre contaminé par le verre, impliquant une étape supplémentaire afin de le décontaminer²¹. La Figure 3.9 présente un exemple du procédé de casse du verre et des résidus de verre recouvrant le cadre.



Figure 3.9 Procédé de casse du verre et résidus de verre encore fixés au cadre

²¹ Le cadre n'a cependant pas besoin forcément d'être décontaminé, dépendamment des conditions de reprises de la filière en question. Encore une fois, la complexité provient vraiment de la multitude des conditions autour des procédés et des filières.

Ces quelques apprentissages, ne serait-ce que sur la vitre de verre, rendent bien compte de la complexité derrière la prise de décisions lors du démantèlement. C'est en réalisant des tests supplémentaires que des apprentissages similaires pourront être effectués. Ils permettront d'identifier les problématiques récurrentes, de définir progressivement des procédés plus efficaces, tout en comprenant toutes les implications sur les composants, et les enjeux associés.

Le démantèlement d'un produit n'est pas un processus à réaliser spontanément. Chaque opération de démantèlement a un coût. D'après les premiers tests effectués sur place, les opérateurs estiment pour l'instant à 30 minutes le démantèlement complet d'une porte-fenêtre. Ce temps n'est qu'indicatif à ce stade, car les procédés vont se raffiner avec le temps. En dehors du temps humain, le démantèlement a aussi un coup non négligeable sur les outils utilisés. À titre expérimental, ces derniers n'étaient pas forcément optimisés pour les procédés auxquels ils étaient soumis. Par exemple, le retrait des parcloles en bois s'effectue assez facilement avec une oscilleuse, mais pour fonctionner efficacement et rapidement, celle-ci nécessite une lame neuve. La perte de vitesse occasionnée par une lame en moins bon état se répercute sur l'ensemble de la parclose et peut facilement ralentir la totalité du processus, ce qui implique de constamment renouveler la lame. Dans l'expérimentation effectuée, des clous étaient aussi présents dans la parclose, ils peuvent être source de dégradations d'autant plus importantes pour la lame, et engendrant des frais d'exploitation supplémentaires. Il convient donc de bien définir les procédés disponibles, au regard de la composition d'un produit, avant d'opter pour un procédé.

Les opérations ont aussi un coût d'immobilisation de l'espace. Une table d'atelier classique ne suffit pas à maintenir correctement un produit le temps des opérations. Pendant les tests effectués, le maintien de la porte-fenêtre en place était le premier enjeu auquel se sont confrontés les opérateurs. Plusieurs personnes étaient alors nécessaires pour réaliser des opérations pourtant simples qui auraient pu s'effectuer en autonomie. En cours de test, des planches ont donc été vissées sur une table pour former un coin. Néanmoins la mise en place d'une table de démantèlement avec un véritable système de serrage adaptable serait pertinent.

En dehors des externalités imposées par les différentes filières de recyclage et leurs conditions de reprises, faire le choix de démanteler un produit peut s'avérer être un procédé complexe, dont la difficulté réside dans les nombreux facteurs internes à prendre en compte. Au regard de l'élément à démanteler, et des processus disponibles, l'état de l'élément après démantèlement, les traces éventuelles de matériaux restantes, la rapidité d'exécution et la génération de matières résiduelles sont autant d'éléments de questionnement qui peuvent influencer le choix d'un procédé de démantèlement.

3.2.2 Structure préliminaire de catalogue des portes et fenêtres

L'élaboration d'une structure préliminaire de catalogue a été réalisée à partir des informations disponibles pour le modèle de fenêtre à battants, et prend la forme d'un tableau. Le Tableau 3.2 présente cette structure et les informations compilées pour chaque niveau de composant qui constitue le produit (ligne) ainsi que les composants qui les constituent (colonne ID fils).

Tableau 3.2 Aperçu du catalogue, pour un modèle de fenêtre à battants

ID	Label	ID fils	Shape type	Options	Liste des matériaux
1	Fenêtre à battants	1.1,1.2	Produit		
1.1	Cadre	1.1.1,1.1.2	Composant		
1.1.1	Dormant	1.1.1.1, 1.1.1.2, 1.1.1.3	Composant		
1.1.2	Ouvrant	1.1.2.1, 1.1.2.2, 1.1.2.3, 1.1.2.4, 1.1.2.5	Composant		
1.2	Paumelle		Composant		Métal
1.1.2.1	Meneau/Traverse		Composant		
1.1.2.2	Vitrage	1.1.2.2.1, 1.1.2.2.2, 1.1.2.2.3, 1.1.2.2.4	Choix	Simple, double, triple	
1.1.2.3	Crémone		Choix	Opérateur, crémor	Métal
1.1.2.4	Verrou		Choix	Opérateur, crémor	Métal
1.1.2.5	Poignée		Composant		Métal, PVC, bois, hybride
1.1.2.6	Cadre		Composant		Aluminium, PVC, bois, hybride
1.1.2.2.1	Carrelage/Barrotin		Composant		Aluminium, PVC, bois, hybride
1.1.2.2.2	Moustiquaire (optique)	1.1.2.2.2.1, 1.1.2.2.2.2	Composant		
1.1.2.2.3	Verre		Composant		Verre
1.1.2.2.4	Gaz (optionnel)		Composant		Argon, Krypton
1.1.1.1	Joint d'étanchéité		Composant		Mastic
1.1.1.2	Opérateur		Choix	Opérateur, crémor	Métal
1.1.1.3	Cadre		Composant		Aluminium, PVC, bois, hybride
1.1.2.2.2.1	Film		Composant		Polyester
1.1.2.2.2.2	Cadre		Composant		PVC, Aluminium

Au plus haut du niveau de précision, certains éléments ont un ID qui prend la forme d'un nombre à six chiffres. Au total, six niveaux de précision différents ont ainsi été identifiés parmi les éléments constituant la fenêtre à battants. Le produit (niveau 1) peut ainsi être constitué d'au moins cinq niveaux de composants. Parmi les 20 éléments identifiés au total, 14 sont des éléments mono-composants. La Figure 3.10 présente la répartition de ces différents éléments par niveau de précision.

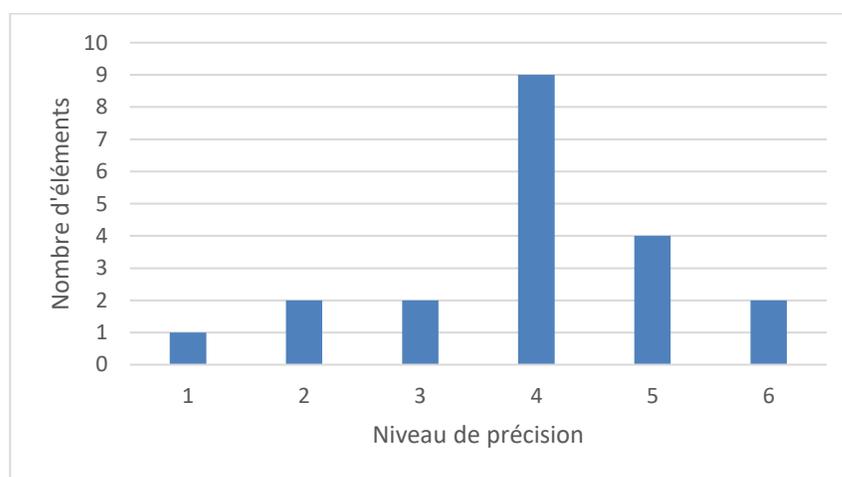


Figure 3.10 Répartition des niveaux de précision

Dans la fenêtre à battant, seulement 25 % des éléments sont de niveau inférieur à trois. Une grande majorité des éléments de la fenêtre se situent au niveau 4 ou plus. Ce dernier représente près de 45 % du nombre d'éléments, puis les niveaux 5 et 6 constituent respectivement 20 % et 10 % de la fenêtre. En termes de démantèlement, cela signifie que pour accéder à la majorité des éléments d'une fenêtre à battants, il faut prévoir des opérations de démantèlement qui permettent au minimum d'accéder au niveau 4 de précision.

D'après le Tableau 3.2, seulement cinq éléments proposent une composition hybride. En réalité, ils représentent 40 % des composants mono-matériaux. La répartition des composants mono-matériaux est observable sur la Figure 3.11, qui présente le nombre de matériaux disponibles par rapport au niveau de précision de chaque élément mono-composant.

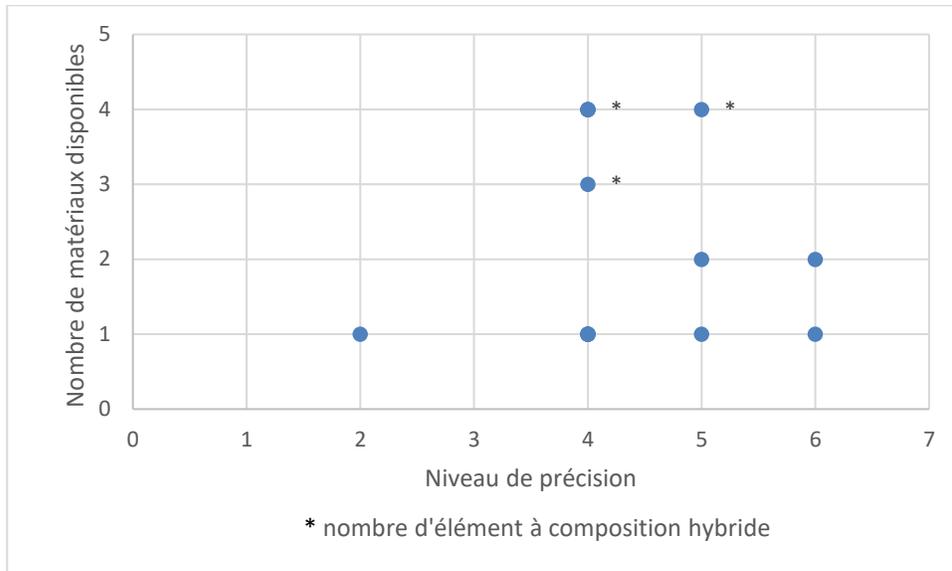


Figure 3.11 Nombre de matériaux disponibles pour chaque niveau d'élément mono-composant

La majorité des éléments mono-composants de la fenêtre sont de niveau 4 ou plus. À tous les niveaux de précision cependant, il existe des éléments dont le matériau est toujours le même. Dans des niveaux plus précis (niveaux 4 et 5), les possibilités de matériaux disponibles sont plus grandes avec une répartition entre un et quatre matériaux. Il convient d'observer que les matériaux à composition hybride se situent uniquement dans la tranche des niveaux 4 et 5 pour un nombre de matériaux disponibles déjà supérieur à deux.

Le catalogue peut aussi prendre la forme d'un schéma, réalisé à partir des informations disponibles dans le Tableau 3.2. La Figure 3.12 présente les différents liens des composants entre eux à travers un organigramme horizontal qui expose les différents matériaux et options disponibles pour chaque composant.

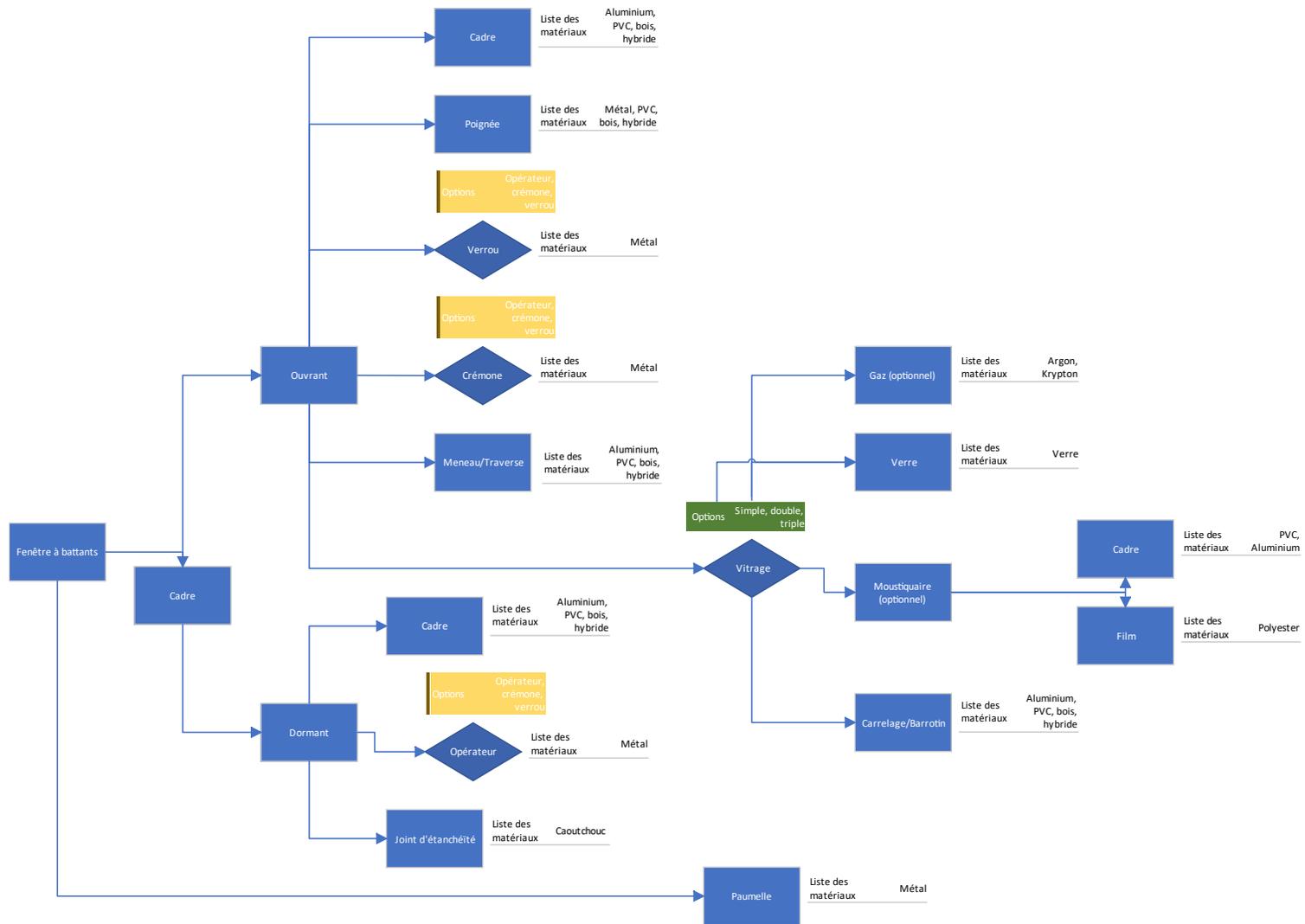


Figure 3.12 Aperçu graphique du catalogue d'une fenêtre à battants

Les 6 niveaux de précision différents sont identifiables en « empruntant le chemin » d'un composant. En bout de chemin, un élément mono-composant est accompagné d'une « Liste des matériaux » qui regroupe la possibilité des matériaux sous lesquels le composant peut être présenté. Au total, ce sont sept matériaux différents qui entrent dans la composition des éléments mono-composants, notamment : métal, aluminium, PVC, bois, gaz, mastic, polyester.

Ces compositions sont fortement influencées par les choix des constructeurs en termes de matériaux, mais aussi au niveau des choix d'options dans les composants. Par exemple, une vitre en simple vitrage ne contient que du verre, mais si elle est choisie en double vitrage, les deux plaques de verre s'accompagnent d'un cadre en aluminium et scellant. Cela fait apparaître de nouveaux composants de niveau plus précis, et nécessite de mettre en place des opérations de démantèlement supplémentaire pour y accéder.

Ces travaux de démantèlement et de recherche catalogue ont permis de confirmer des tendances pré-identifiées sur la lecture scientifique concernant les composants et matériaux des portes et fenêtres :

- le cadre extérieur de la fenêtre est généralement en bois, en PVC, ou en aluminium. Il arrive qu'il soit multimatériau, avec notamment des inclusions de mousse isolante en polyuréthane;
- des parcloles sont généralement présentes, elles maintiennent la vitre et reprennent les matériaux du cadre, avec quelques fois un joint de caoutchouc;
- dans le cas d'un simple vitrage, il y a uniquement une plaque de verre, qui est alors maintenue par les parcloles, du scellant, ou une combinaison des deux;
- dans le cas d'un double vitrage, les plaques de verre forment un seul et même élément, encadré d'un cadre en aluminium dont l'étanchéité est faite avec un scellant. Ces vitrages sont aussi maintenus par des parcloles et un joint²²;

²² Sur ce type de vitrage, plus récent, les parcloles peuvent être simplement vissées au cadre, et les joints de caoutchouc sont alors maintenus par compression entre la parclole et le verre, et pas collés. Leur démantèlement s'en retrouve facilité.

- d'autres joints d'étanchéité en caoutchouc sont quelquefois inclus à l'interface entre le cadre et l'encadrement du bâti;
- les systèmes de serrurerie sont généralement en métaux ferreux, les poignées peuvent quelques fois être réalisées à partir d'éléments similaires au cadre, pour garder un design uni;
- les gonds sont majoritairement en métaux;
- dans la majorité des cas, des vis ou clous en acier sont présents à toutes les étapes de démantèlement.

3.3 Performance des filières de recyclage du verre

Les trois filières mises en jeu présentent différentes quantités d'émissions de GES, mais aussi des taux de MPS. Ces éléments seront comparés ici en tant qu'indicateurs de « performance » des filières de recyclage. Le Tableau 3.3 présente les résultats de performance des filières, pour lesquelles ont été estimées les économies d'émissions qu'il serait possible de réaliser par l'incorporation de MPS.

Tableau 3.3 Synthèse des résultats de performance des procédés de recyclage

Filière	Économies (g éq-CO ₂ /kg)	Taux de MPS
Verre plat	45,8	30%
Verre creux	135	45%
Ajout cimentaire	90	25%

Pour ces trois filières, les économies d'émissions liées aux procédés de recyclage varient fortement, allant de 45,8 g éq-CO₂/kg à près de 135 g éq-CO₂/kg, soit un facteur de division de près de trois. Pour le taux de MPS, les valeurs varient entre 25 % et 45 %. Au sein des industries consultées pour ces travaux, ces valeurs de taux de MPS sont assez similaires entre différentes compagnies. En effet, elles sont souvent retenues par le contexte concurrentiel et le risque de délivrer un produit moins rentable. La Figure 3.13 présente ces valeurs sur un graphique, à des fins de comparaison.

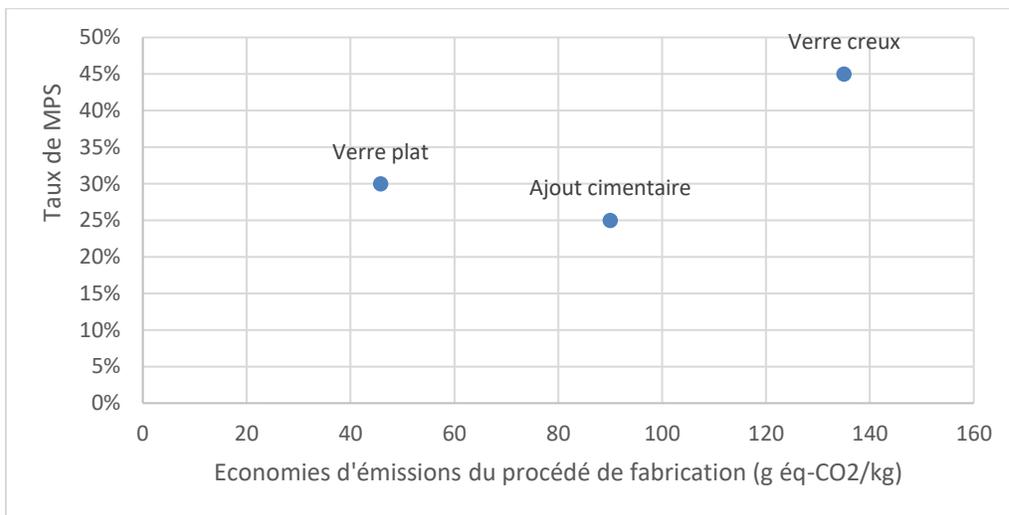


Figure 3.13 Comparaison des filières de recyclage du verre par leur procédé de fabrication

La filière du verre creux permet de réaliser les plus grandes économies d'émissions avec 135 g éq-CO₂/kg, contre 90 g éq-CO₂/kg pour la filière d'ajout cimentaire et 45,8 g éq-CO₂/kg pour la filière du verre plat. Pour le taux de MPS, c'est encore la filière du verre creux qui permet d'inclure le plus de matériaux, avec un taux de 45 %, contre 30 % pour la filière du verre plat, et 25 % pour la filière d'ajout cimentaire. Le Tableau 4.2 présente une comparaison de ces différents résultats sous forme de classement.

Tableau 3.4 Classement des résultats de performance des filières de recyclage

Légende :
 Meilleur classement ++
 Classement moyen +
 Pire classement



Filière	Économies	Taux de MPS
Verre plat		+
Verre creux	++	++
Ajout cimentaire	+	

Après avoir reporté les résultats de chaque filière au sein d'un classement, c'est la filière de verre creux qui se démarque le plus, par des économies d'émissions lors du procédé plus importantes ainsi qu'un taux d'incorporation des MPS plus élevé. Les filières du verre plat et

de l'ajout cimentaire, révèlent une performance générale similaire, ce qui les place ex aequo au classement. La filière du verre plat présente le dernier résultat du classement en termes d'économies d'émissions, ainsi qu'un résultat moyen pour le taux de MPS. À l'inverse, la filière d'ajout cimentaire présente un classement moyen pour les économies d'émissions, mais présente le pire résultat en termes de taux de MPS.

CHAPITRE 4

DISCUSSION

Ce quatrième chapitre vise à revenir sur certains aspects des travaux. Il permet notamment d'apporter un regard critique sur ce qui a été présenté, ainsi que de proposer quelques pistes de réflexions pour la continuité du projet.

4.1 Impact environnemental du cycle de vie des produits de verre recyclés

Malgré le fait qu'ils permettent d'établir un premier cadre de réflexion concernant le choix d'une filière, ces premiers résultats sont limités à des valeurs relatives, mais ne permettent pas d'évaluer la quantité d'émissions de GES qui est réellement générée.

Les ACV proposent une solution plus précise qui permet d'évaluer les impacts environnementaux de manière quantitative. Les résultats des ACV sont fortement dépendants des scénarios d'évaluation choisis. Dans le cas des études présentées ici, même si les unités fonctionnelles sont similaires, les systèmes choisis sont différents par leurs délimitations, et ne décrivent pas exactement les mêmes processus du cycle de vie du produit. Ainsi, toute analogie faite entre ces deux évaluations reste purement indicative étant donné qu'elles ne sont pas rigoureusement comparables. Le Tableau 4.1 rapporte les résultats des émissions établis par les deux ACV citées en section 1.3.

Tableau 4.1 Synthèse des résultats généraux de performance des filières de recyclage

Filière	Émissions (g éq-CO ₂)	Économies (g éq-CO ₂ /kg)	Taux de MPS
Verre plat	1265	45,8	30%
Verre creux	1750	135	45%
Ajout cimentaire	1040	90	25%

Les résultats de ces analyses, associés aux cycles de vie des produits, permettent de comparer les filières sur la base des émissions de leurs procédés, mais aussi sur la base des émissions

associées aux produits qu'elles mettent sur le marché. Ces deux valeurs sont analysées au regard du taux de MPS²³ dans la Figure 4.1.

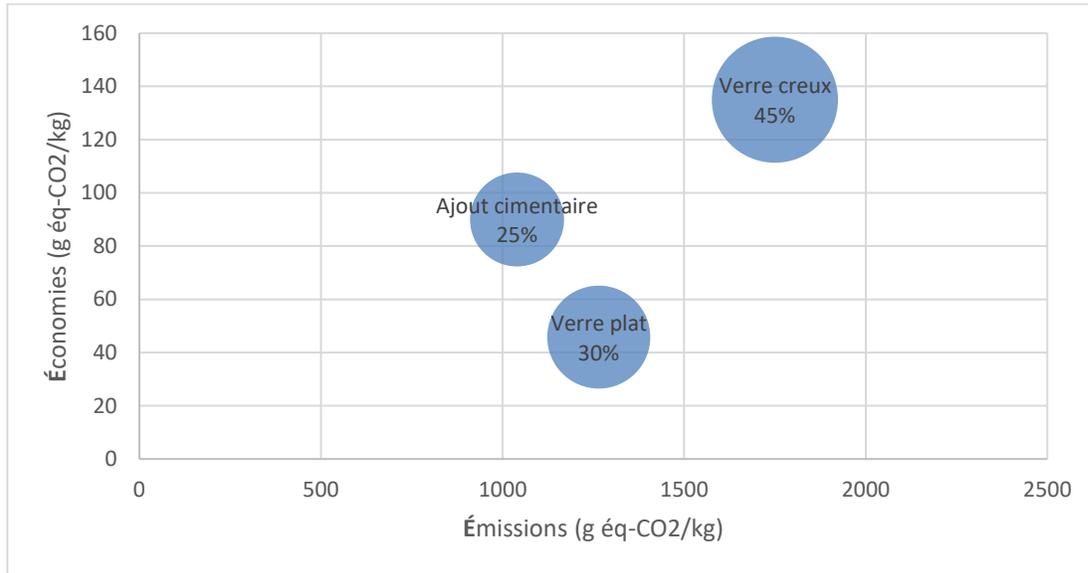


Figure 4.1 Comparaison de la performance générale des filières de recyclage

La filière du verre creux est celle dont le produit génère le plus d'émissions au cours de son cycle de vie, avec 1750 g éq-CO₂. Les produits de verre plat génèrent 1265 g éq-CO₂ durant leur cycle de vie. Enfin, les produits issus de la filière d'ajout cimentaire génèrent le moins d'émissions, avec 1040 g éq-CO₂ au cours de leur cycle de vie. Le Tableau 4.2 présente un classement des valeurs issues de la section. 3.3, enrichies par les résultats des différentes ACV réalisées.

²³ Le taux de MPS est lisible sur les étiquettes du graphique, à la suite du nom de la filière.

Tableau 4.2 Classement des filières de recyclage

Légende :		Filière	Émissions	Économies	Taux de MPS
Meilleur classement	++	Verre plat	+		+
Classement moyen	+	Verre creux		++	++
Pire classement		Ajout cimentaire	++	+	

En reportant la performance de chaque filière au sein d'un classement, la filière de verre creux se démarque encore par une prédominance générale sur les indicateurs, malgré le fait qu'elle présente les pires résultats d'émissions au cours du cycle de vie du produit. La filière d'ajout cimentaire passe alors en seconde position en termes de classement, car elle présente maintenant la meilleure performance sur le plan des émissions générées par le produit. Enfin, la filière du verre plat finit dernière du classement, en réalisant une performance moyenne sur l'ensemble des indicateurs, ainsi que le pire résultat en termes d'économies d'émissions. Il faut rappeler à ce stade que les données dont ont été issues ces évaluations d'émissions n'étaient pas strictement similaires, réaliser une ACV spécifiquement orientée sur la comparaison de ces trois filières sur le territoire québécois serait pertinente afin de confirmer ces résultats.

Enfin, il convient d'aborder l'aspect de la recyclabilité des produits finis. Par exemple, le verre de fenêtre est recyclable à l'infini, alors que l'ajout cimentaire ne l'est pas. Là encore, il convient de nuancer certaines notions. Le verre est « infiniment recyclable » en théorie. Dans la pratique, la recyclabilité dépend plus des processus de gestion des matières résiduelles, et de l'envoi de ces matières dans des filières qui les transformeront en matériaux recyclables, eux-mêmes dépendants des processus de gestion des matières résiduelles, et ainsi de suite. Dans ces conditions, les meilleurs processus de gestion des matières résiduelles reviennent à la filière du verre creux, qui a déjà mis en place de nombreuses solutions comme le tri en bac bleu ou la consigne volontaire. La filière du verre plat n'est pas force de proposition, sur cet aspect-là, car aucune législation gouvernementale n'est encore mise en place, et donc peu de projets de grandes envergures sont déjà opérationnels. Néanmoins, certaines entreprises comme Bellemare mettent en place des initiatives de gestion de ces matières, comme la Route

du Verre, un projet de massification et de récupération de verre de différentes catégories (Trudel, 2022).

4.2 Gestion post-consommation et critères de reprise

Lorsque du calcin de verre est utilisé, non pas pour reformer du verre de fenêtre, mais pour être fondu en contenant en verre creux, il dispose alors d'une durée de vie beaucoup plus faible. Malgré le fait qu'au Québec des systèmes de consignes publiques soient mis en place pour permettre de les récupérer et les recycler, leur durée de vie reste d'une utilisation, contre 30 ans pour un verre de fenêtre (Boulin & ADEME, 2021). Face à cette courte durée d'utilisation, certains brasseurs ont développé leurs propres systèmes de dépôt pour récupérer les bouteilles post-consommation afin de les nettoyer et les réemployer. Ces composants à remplissage multiple (CRM), qui constituaient déjà près de la moitié des contenants de bière disponibles sur le marché québécois en 2013, bénéficient alors d'une durée de vie de 15 utilisations en moyenne (CIRAIG, 2015). Cette différence dans la gestion des déchets post-consommation modifie en profondeur le cycle d'usage du produit, mais aussi l'ensemble des processus par lesquels les déchets passent pour retrouver un statut de produit.

Dans un rapport d'ACV des contenants de bières au Québec, il est indiqué que, pour la même unité fonctionnelle, les bouteilles en verre réutilisables génèrent entre 3 et 4 fois moins de quantité de GES que des bouteilles en verre à usage unique, pour une moyenne de 232 g eq-CO_2 par unité fonctionnelle (CIRAIG, 2015). La modification du cycle de vie d'un produit peut paraître à première vue un simple geste écocitoyen de plus, mais cet indicateur d'impact général démontre bien ici de la portée environnementale de ce genre d'initiatives.

Celles-ci n'ont pas seulement de conséquences sur le niveau d'émission général du produit, mais aussi sur la façon dont ces impacts se distribuent au sein des différents processus tout au long du cycle de vie du produit. La Figure 4.2 présente la contribution de ces processus dans les émissions du cycle de vie des contenants en verre.

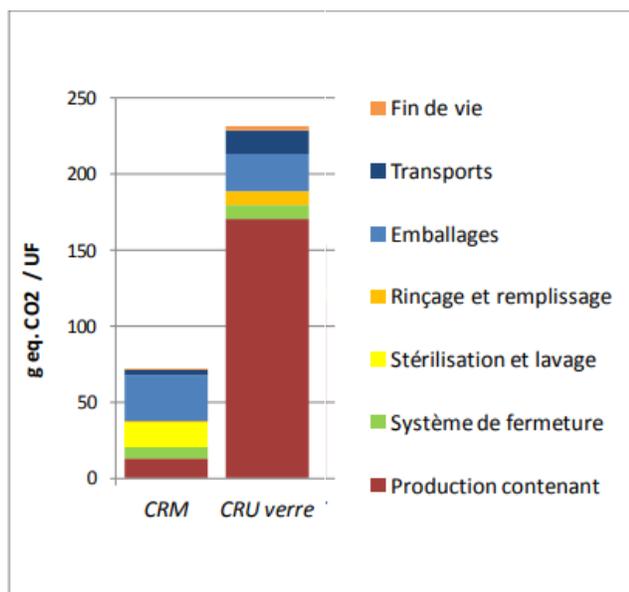


Figure 4.2 Analyse de contribution des processus du cycle de vie des produits en verre (tiré de : CIRAIG, 2015)

Dans le cas des CRM, la plus grande différence réside dans la réduction importante des émissions associées au processus de production, qui se distribuent alors durant les 15 réutilisations du produit puisque le produit n'est jamais refondu. D'autres processus, comme l'emballage, qui sont opérés à chaque réutilisation du produit, génèrent les mêmes émissions pour un CRM que pour un CRU, car peu importe le nombre d'utilisations, ces étapes seront obligatoires et sensiblement similaires. De nouvelles émissions apparaissent aussi, pour le CRM qui, après récupération, est confronté à une nouvelle étape de stérilisation et lavage, elle aussi émettrice de GES.

Les résultats de cette ACV rendent bien compte de l'importance de penser la gestion post-consommation d'un produit mis sur le marché afin de diminuer ses impacts environnementaux, et d'en favoriser le réemploi pour augmenter la circularité des matériaux. Aujourd'hui cependant, certaines filières de recyclage du verre plat ne recyclent que leurs propres chutes

de production. L'objectif à terme est de pouvoir réutiliser du calcin « externe »²⁴, un gisement bienvenu pour les entreprises du secteur qui souhaitent intégrer de plus en plus de matériaux recyclés dans leurs procédés. Il reste néanmoins de nombreux freins à lever, notamment à propos de la qualité de ces matières premières, qui ne correspond pas aux exigences requises des procédés. Des impuretés pourraient contaminer le produit fini et créer des imperfections, générer des émissions supplémentaires, voire abîmer les fours. D'après les dirigeants de ces filières, les processus de valorisation des matériaux de déconstruction ne pas encore assez matures, ce qui entrave aussi la mise en place de projets concrets (ADEME, 2020).

4.3 Suivi du catalogue et indicateur de performance

Dans un objectif d'opérationnalisation de la plateforme de démantèlement, il pourrait être intéressant d'établir une base de données à partir du fonctionnement du catalogue, pour réaliser un suivi des flux de matières intrants et sortants. De telles quantités de données ne sont cependant pas disponibles tout de suite et ne trouveraient pas spécifiquement d'intérêt à ce stade du projet. Il pourrait cependant être intéressant de réaliser une campagne d'acquisition d'informations sur les fenêtres arrivant au centre de démantèlement afin d'identifier des tendances dans leur composition et pouvoir ainsi établir des procédés de démantèlement efficaces.

Ces informations, qui pourraient alors être complétées par la masse des matériaux démantelés, les techniques et outils utilisés ainsi que les temps d'opération requis, pourraient permettre de poser un premier cadre de réflexion à propos des indicateurs de performance de la plateforme. Ils pourraient aussi, à terme, constituer un système d'aide à la décision pour le gestionnaire. En partant du principe que chaque démantèlement est consommateur de temps, et que ce temps génère du désordre et consomme de l'énergie, il pourrait être introduit un nouvel indicateur de performance qui permettrait de définir la rentabilité d'une action de démantèlement.

²⁴ Calcin provenant de toutes autre source qui n'est pas issue directement de la ligne de production de l'entreprise, comme par exemple des menuiseries en fin de vie.

Pour un élément i , démantelé avec le procédé D :

$$Performance_{D,i} = \frac{Temps_{D,i}}{Masse_i \times Valeur_i} \quad (4.1)$$

Où

$Temps_{D,i}$ correspond au temps nécessaire pour démanteler l'élément i avec le procédé D ,

$Masse_i$ est égal à la masse de l'élément i une fois démantelé,

$Valeur_i$ correspond à la valeur massique de i au sein de la filière de récupération (recyclage ou réemploi).

D'autres indicateurs plus généraux pourraient permettre de définir la distance maximale qui conviendrait entre deux filières, basée sur la différence des émissions de GES de celles-ci, comme cela a pu être réalisé dans l'ACV des produits commercialisés en verre recyclé. Cela pourrait soutenir la prise de décisions concernant les choix de filières de reprise.

4.4 Base de données des entreprises québécoises

La mise en place de tout projet de recyclage dépend donc, fondamentalement, de la dynamique territoriale. Une filière de recyclage peut ainsi préexister dépendamment des processus disponibles à l'échelle locale. Il est donc pertinent de pouvoir identifier ces processus sur le territoire québécois au plus tôt du projet, et de rapidement déterminer les conditions de reprise de ces filières.

Une méthode de recherche de ces entreprises pourrait être établie en utilisant les bases de données privées ou publiques pour identifier de manière automatique de grandes quantités d'entreprises potentielles, dépendamment de leurs activités ou encore des produits fabriqués ou distribués. Les gouvernements du Mexique, des États-Unis et du Canada ont mis en place un Système de Classification des Industries d'Amérique du Nord (SCIAN), en parallèle des accords de libre-échange nord-américain, qui permet de classer les différentes entreprises en fonction de leurs activités économiques. Grandement utilisé par les travaux de statistiques, le

SCIAN est maintenant inclus dans de nombreuses ressources et bases de données. Conçu en arborescence, il permet de séparer une vingtaine de secteurs en plus d'une centaine de sous-secteurs, qui sont eux-mêmes découpés en groupes, puis en classe. Finalement, ce sont plus de 2000 classes qui sont définies afin d'identifier un secteur économique.

Le site ICRIQ.com est un moteur de recherche qui regroupe des informations concernant plus de 20 000 entreprises québécoises (ICRIQ, 2022). Cette base donnée répertorie de nombreux attributs, notamment :

- région;
- municipalité;
- catégorie d'entreprise (fabricant, distributeur, service);
- SCIAN;
- produits fabriqués ou distribués, services rendus;
- nombre d'employés;
- chiffre d'affaires;
- territoires d'exportation.

Cette banque d'informations pourrait permettre d'identifier en amont les différentes entreprises qui pourraient jouer différents rôles au sein du projet. Cela pourrait constituer une première base de travail pour des prises de contact futures afin de mettre en place un premier réseau de constructeur, d'installateurs, de filières de réemploi ou de recyclage.

4.5 Qualité de l'intrant

La qualité de l'intrant est une condition importante lorsque les filières veulent intégrer des matériaux recyclés à leurs procédés de production. Pour le calcin, trois grands types de traitement du verre peuvent avoir un impact sur ces procédés de recyclage, et peuvent donc réduire l'acceptation des filières de recyclage pour ces produits issus du démantèlement.

Les ions métalliques présents dans le verre coloré peuvent impacter la production d'un verre particulier et en modifier l'aspect. Il est donc important de séparer le verre par couleur avant réduction en calcin afin de pouvoir contrôler la teinte lors de la production. Le verre feuilleté est constitué de différentes plaques de verre assemblées entre elles, séparées par un film plastique. Cette configuration permet au verre de craquer sans éclater en cas de choc. Il est couramment employé dans l'architecture pour limiter les risques de chute, ou dans l'industrie automobile pour équiper les parebrises (Richelieu, 2022).

L'aspect multimatière de ce type de verre peut rendre son recyclage complexe pour certaines installations. Le verre trempé est réchauffé à haute température après cuisson afin d'emmagasiner des contraintes mécaniques supplémentaires, lui conférant une plus grande résistance au bris. Il casse alors en petits morceaux peu coupants. Ses différentes caractéristiques en font un matériau de choix pour des verres de sécurité au sein des logements, comme parois de douches, crédences, portes et fenêtres, etc. (Toutverre, 2022). Ses propriétés lui confèrent un point de fusion plus élevé, ce qui complique son recyclage avec d'autres types de verre.

Mettre en place des critères de reprise en amont de la plateforme concernant ces matériaux pourrait permettre d'éviter toute contamination des produits sortants, et donc de favoriser l'acceptabilité pour les filières. Ces critères de reprises pourraient aussi être étendus aux critères plus spécifiques de chacune des filières de reprise.

CONCLUSION

Le secteur des CRD génère chaque année de grandes quantités de matières résiduelles. Une partie d'entre elles sont envoyées en centres de tri et en écocentres, mais près de 29 % de ces matériaux sont encore envoyés en centre d'enfouissement. Les portes et fenêtres issues des CRD sont alors enfouies, alors que les matériaux les composant revêtent indépendamment un potentiel de recyclage.

Le principe du démantèlement revient à désassembler un produit, composant après composant, pour en tirer des éléments individuels dont la composition est recyclable. Ces procédés permettent de donner un intérêt de recyclage à des éléments qui, assemblés, ne seraient pas tolérés par les filières de reprise. Au Québec, la mise en place d'un centre de démantèlement pourrait être envisagée pour démanteler les portes et fenêtres issues des CRD, et ainsi réduire les quantités de matières résiduelles en centre d'enfouissement. Ce rapport a eu pour objectif de définir un premier cadre de réflexion concernant le fonctionnement d'un centre de démantèlement ainsi que les différents processus associés. L'étude fut aussi portée sur la comparaison des performances de recyclage, en termes de bilan de GES, de trois filières potentielles pour le recyclage du verre de fenêtre.

L'élaboration du fonctionnement générique des processus de déconstruction a permis d'identifier plusieurs phases dans ces chantiers, et de définir comment une plateforme de déconstruction s'inscrivait au sein de ces phases en tant que point central pour circulariser ces matériaux. Notamment, la mise en place d'une plateforme permettrait d'agir sur plusieurs freins à la déconstruction au sein des chantiers. Les principes de fonctionnement mis en place pour cette plateforme font appel à des hypothèses qui génèrent de nombreux questionnements sur les décisions pratiques qui pourraient se poser lors des activités. Une proposition de schéma des processus décisionnels a été mis en place, afin de donner un premier cadre de réflexion sur la façon dont le démantèlement pourrait être développé, en privilégiant toujours le matériau, les filières en bout de chaîne, et le principe de priorisation des 3RVE.

Les tests de démantèlement sur le terrain ont permis de comprendre qu'en pratique, les procédés de démantèlement dépendent fortement du produit. A titre d'exemple les fenêtres les plus récentes sont plus susceptibles d'être soumises au déparclosage, quand les plus anciennes sont souvent démantelées à la main par séparation des matériaux. Divers outils rudimentaires comme un marteau peuvent ainsi être utilisés pour séparer la vitre du cadre. Dans ce cas-là il convient de définir les niveaux de contamination acceptables en vue du recyclage des matériaux. Dans une volonté de conserver l'intégrité physique des composants pour une réutilisation, d'autres outils tels que l'oscilleuse peuvent s'avérer plus efficaces, malgré un coût d'exploitation plus élevé. Ces différents apprentissages permettent d'affirmer que le démantèlement ne doit pas être un procédé systématique, mais issu d'une réflexion en amont, au regard des matériaux, des techniques, mais aussi des filières et de leurs conditions de reprise.

La structuration d'une première version de catalogue des portes et fenêtres a démontré la complexité qu'offre la composition d'une menuiserie. De nombreux niveaux de précisions sont atteignables au sein de la multitude de composants présents, ce qui pousse à s'interroger sur les limites à définir en termes de démantèlement. Ces travaux ont néanmoins permis de se rendre compte qu'une fenêtre pouvait être composée de plus d'une vingtaine d'éléments différents, dont plus de la moitié n'est accessible qu'après au moins deux étapes de démantèlement. Cette étude a aussi permis de confirmer quelques généralisations parmi la grande diversité de matériaux présents dans la composition des menuiseries. Notamment, les cadres sont généralement constitués de bois, PVC ou aluminium de manière non exclusive.

L'analyse de la performance environnementale de trois filières de recyclage du verre de fenêtre a démontré que la filière verre creux était la plus performante, face aux filières verre plat et ajout cimentaire. En effet, l'incorporation de verre de fenêtre dans la matière entrant dans la composition du verre creux permettrait d'abaisser plus fortement les émissions de GES des procédés de production. L'industrie du verre creux est actuellement celle qui admet le plus de calcin de verre dans ces procédés, ce qui place la filière en première place. Les deux autres filières bénéficient d'une performance moyenne toutes les deux.

L'utilisation de résultats d'ACV a permis d'introduire les émissions de GES associées au cycle de vie de chacun des produits. La filière de verre creux est la moins performante sur cet aspect, suivie de la filière de verre plat. La filière d'ajout cimentaire est la plus performante avec le produit qui émet le moins de GES au cours de son cycle de vie.

Dans tous les cas, augmenter la durabilité et le cycle d'usage du produit paraît être la solution la plus efficace pour limiter ses impacts environnementaux. La mise en place d'un réemploi post-consommation par la consigne des contenants en verre creux illustre bien la portée d'un changement d'utilisation sur les impacts de changement climatique d'un produit. À l'échelle du centre de démantèlement, cela peut être transposé au réemploi des fenêtres, qui devrait toujours être privilégié lorsque possible. Le cas échéant, l'envoi vers une filière de verre creux, spécifiquement dans les CRM, permet d'atténuer au mieux les impacts sur le changement climatique.

ANNEXE I

SYNTHÈSE DES FREINS ET LEVIERS ISSUS DES RETOURS D'EXPÉRIENCE DE DÉCONSTRUCTION

Frein ou levier	Label	Name	Mesure/cause	Répercussions	# Faisabilité	# Effet	Σ Note globale	I
Levier	R1	Définir des réglementations avec des objectifs de récupération précis et importants	Réglementaire	Récupération externe Récupération interne	1	4	5	Dé
Levier	Li1	Rédiger un devis comprenant la disposition des matériaux permet au client de récupérer plus facilement des avantages fiscaux	Livable	Economique Parties prenantes	3	3	6	Dé
Levier	E11	Mener des analyses de rentabilité préliminaires permet de démontrer la viabilité des procédés de réemploi	Etudes préliminaires	Récupération externe	2	2	4	Dé
Levier	E12	Recueillir l'intérêt préliminaire des filières locales de récupération permet de rédiger un appel d'offre plus efficace.	Etudes préliminaires	Livable	2	3	5	Dé
Levier	P1	Prioriser les entrepreneurs dont les soumissions sont les plus complètes, et comportant des initiatives de réemploi dépassant les attentes de l'appel d'offre favorise l'implication des parties prenantes.	Parties prenantes	Parties prenantes	4	2	6	Dé
Levier	P2	Diffuser les bénéfices du projet à l'externe favorise l'implication des équipes et municipalités.	Parties prenantes	Parties prenantes	3	3	6	Dé
Levier	Li2	Formaliser une valeur cible concrète de récupération favorise la motivation des équipes de déconstruction.	Livable	Parties prenantes	3	4	7	Dé
Levier	Li3	Rédiger un PGMR rigoureux en amont permet une meilleure exploitation du chantier.	Livable	Logistique	3	4	7	Dé
Levier	P3	Sélectionner un maître d'œuvre sensibilisé, ouvert et proactif face au principe de déconstruction participe à l'effort de récupération interne.	Parties prenantes	Parties prenantes Récupération interne	3	4	7	Dé
Levier	Lo1	Permettre un échéancier de chantier ouvert et flexible aide à la coordination des filières de récupération.	Logistique	Logistique Récupération externe	2	3	5	Dé
Levier	E13	Intégrer les démarches de récupération dès les premières étapes de planification du chantier permet d'augmenter la quantité de matériel déconstruit.	Etudes préliminaires	Récupération interne	2	2	4	Dé
Levier	P4	Faire appel à un consultant spécialiste de la réutilisation et des filières locales permet d'augmenter la quantité de matériaux distribués aux filières.	Parties prenantes	Récupération externe	3	3	6	Dé

Frein ou levier	Label	Name	Mesure/cause	Répercussions	# Faisabilité	# Effet	Σ Note globale	
Levier	Lo2	Privilégier un réemploi au sein du portefeuille de chantiers du maître d'ouvrage permet de diminuer les coûts de réemploi.	Logistique	Economique	1	3	4	Dé
Levier	P5	Impliquer les filières de réemploi dans l'inventaire permet d'obtenir des informations sur les matériaux, leur potentiel de réutilisation, et la demande du marché local.	Parties prenantes	Etudes préliminaires Récupération externe Récupération interne	2	4	6	Dé
Levier	Lo3	Tenir à jour un inventaire de tous les matériaux sur le chantier évite les pertes.	Logistique	Récupération interne	3	3	6	Dé
Levier	Et4	Faire de l'écoconstruction simplifie la déconstruction.	Etudes préliminaires	Logistique	3	4	7	Dé
Levier	Et5	La déconstruction présente un avantage économique par rapport à la démolition.	Etudes préliminaires	Economique	2	4	6	Dé
Levier	Lo4	Les chantiers avec une grande superficie libre présentent un avantage pour le tri sur site.	Logistique	Récupération interne	0	3	3	Dé
Levier	Lo5	Suivre une liste de contrôle des pratiques de réduction aide à réduire les pertes.	Logistique	Récupération interne	3	2	5	Dé
Levier	Lo6	Mettre en place des techniques et outils adaptés à la déconstruction diminue le temps de chantier.	Logistique	Logistique	3	4	7	Dé
Levier	Lo7	Utiliser une machine pour trier les matériaux permet un gain de temps.	Logistique	Logistique	2	3	5	Dé
Levier	P6	Organiser une entraide entre les équipes de démolition et de déconstruction peut faire gagner du temps.	Parties prenantes	Logistique	1	1	2	Dé
Levier	Lo8	Prendre plus de temps sur certaines tâches afin de minimiser les pertes de matériaux.	Logistique	Récupération interne	2	2	4	Dé
Levier	P7	Détecter les forces et faiblesses des membres de l'équipe pour certaines tâches permet de limiter les pertes.	Parties prenantes	Récupération interne	4	3	7	Dé
Levier	P8	Avoir accès à un réseau local de récupérateurs/recycleurs/centres de tri diversifiés facilite la récupération de matériaux divers.	Parties prenantes	Récupération externe	0	4	4	Dé
Levier	Lo9	Traiter une plus grande quantité de matériaux en même temps a un plus grand intérêt économique.	Logistique	Economique	0	3	3	Dé

Frein ou levier	Label	Name	Mesure/cause	Répercutions	# Faisabilité	# Effet	Σ Note globale	
Levier	P9	Mener une consultation préliminaire avec un spécialiste du réemploi, ainsi que des test internes sur les matériaux permet de réduire l'aversion au risque des parties prenantes.	Parties prenantes	Parties prenantes	3	2	5	Dé
Frein	P10	La résistance des entrepreneurs ne permet pas la mise en place de bonnes pratiques de réemploi.	Parties prenantes	Logistique Récupération interne	1	2	3	Dé
Frein	P11	Le management des nombreux acteurs peut complexifier le déroulement du chantier.	Parties prenantes	Logistique	2	1	3	Dé
Frein	Lo10	Une planification du chantier trop rigide peut entraîner des pertes (gestion du stock, management des acteurs, mauvaise évaluation des matériaux, etc)	Logistique	Récupération interne	3	2	5	Dé
Frein	Et6	Une mauvaise appréhension du chantier ne permet pas de définir un objectif de réemploi précis.	Etudes préliminaires	Livable	4	2	6	Dé
Frein	C1	Les matériaux contaminés ou en contact avec des contaminants (amiants, plomb) ne sont pas valorisables.	Contamination	Récupération interne	0	1	1	Dé
Frein	Re1	Pour certains matériaux, les débouchés techniques ne sont pas toujours disponibles au moment du chantier.	Récupération externe	Récupération externe	1	3	4	Dé
Frein	Re2	La réutilisation sur site engendre des délais supplémentaires à prendre en compte dans la planification (enlèvement, nettoyage, réinstallation).	Récupération externe	Logistique	2	2	4	Dé
Frein	Lo11	Le manque de méthode de mesure rend le suivi du taux de récupération complexe.	Logistique	Récupération externe	2	1	3	Dé
Frein	Lo12	Une déconstruction peut prendre plus de temps qu'une démolition traditionnelle.	Logistique	Logistique	0	4	4	Dé
Frein	Lo13	La disponibilité des matériaux issus du chantier (échancier, capacités de stockage) peut ne pas concorder avec les projets de réemploi.	Logistique	Récupération externe	1	3	4	Dé
Frein	Lo14	Un manque de place empêche le stockage temporaire nécessaire en déconstruction.	Logistique	Récupération interne	0	3	3	Dé
Frein	P12	Une équipe de déconstruction mal/non formée entraîne une perte d'efficacité.	Parties prenantes	Récupération interne	3	2	5	Dé
Frein	P13	Certains matériaux n'ont pas de débouchés locaux disponibles.	Parties prenantes	Récupération externe	1	3	4	Dé

Frein ou levier	Label	Name	Mesure/cause	Répercutions	# Faisabilité	# Effet	Σ Note globale	l
Frein	P14	Les capacités d'accueil limitées des centres de tri et de certaines filières peuvent entraîner la perte de matériaux.	Parties prenantes	Récupération externe	1	4	5	Dé
Frein	P15	Le manque de demande au moment du chantier peut limiter les débouchés.	Parties prenantes	Récupération externe	1	3	4	Dé
Frein	R2	Des coûts d'enfouissement trop faibles dissuadent les maîtres d'œuvre de valoriser les matériaux.	Réglementaire	Récupération externe	1	4	5	Dé
Frein	C2	[VHU] Pour certaines pièces, la décontamination n'est pas toujours viable.	Contamination	Economique	0	2	2	Dé
Frein	P16	[VHU] Les consommateurs ne font pas confiance aux pièces remanufacturées.	Parties prenantes	Récupération externe	1	3	4	Dé
Frein	Lo15	[AVI] Le manque de traçabilité des matériaux récupérés fait perdre jusqu'à 90% de leur valeur.	Logistique	Récupération externe	4	2	6	Dé
Frein	Lo16	L'augmentation de manoeuvres lors d'une déconstruction diminue la sécurité des travailleurs.	Logistique	Parties prenantes	3	2	5	Dé
Levier	Lo17	La diminution du pourcentage de collecte permet de réduire les coûts logistiques.	Logistique	Economique	3	2	5	Dé
Levier	Lo18	L'augmentation du tonnage moyen collecté permet de réduire les coûts logistiques.	Logistique	Economique	3	3	6	Dé
Levier	Lo19	Mesurer l'impact de la localisation potentielle des filières permet d'identifier des zones stratégiques d'implantation.	Logistique	Parties prenantes	2	2	4	Dé
Frein	Lo20	Le tri du verre à la source sur chantier est complexe à mettre en place.	Logistique	Récupération interne	2	3	5	Dé
Frein	Re3	Le manque d'offre de collecte de verre plat implique des coûts logistiques importants.	Récupération externe	Economique	1	3	4	Dé
Frein	Re4	Une part trop restreinte de PVC issu des gisements CRD atteint les centres de tri, ce qui rend son recyclage compliqué.	Récupération externe	Récupération externe	3	3	6	Dé
Frein	R3	Les closes des contrats de sous-traitance chargent les entreprises d'évacuer elle-mêmes leurs propres déchets, il est alors difficile d'imposer des solutions.	Réglementaire	Récupération interne	2	3	5	Dé
Frein	Re5	Le grappinage du verre sur plateforme de tri ne permet pas une qualité de verre suffisante pour un recyclage en verre plat	Récupération externe	Récupération externe	1	4	5	Dé
		Sans titre					0	

ANNEXE II

GLOSSAIRE

Transformation	:	Étape qui a pour but de changer l'état d'un produit, en vue de l'adapter pour un procédé de production
Consommation	:	Utilisation du produit pour sa fonction
Production	:	Procédé qui transforme une matière première en produit fini, ou en composant
Produit semi-fini	:	Composant d'un produit auquel il reste une étape de production pour être considéré comme produit fini
Fin de vie	:	Période temporelle commençant dès la fin de l'utilisation d'un produit, prenant en compte les étapes de collecte, le transport, le traitement, le recyclage, et l'élimination de ses composants et matériaux
Réutilisation	:	Processus par lequel un déchet est utilisé de nouveau, pour une fonction différente de celle de sa vie de produit, s'accompagne généralement de transformations
Réemploi	:	Processus par lesquels un déchet est utilisé de nouveau pour la même utilité que durant sa vie de produit, il obtient un nouveau cycle de vie
Recyclage	:	Procédé qui permet de transformer un déchet en produit à valeur ajoutée
Unité fonctionnelle	:	Unité de mesure utilisée en ACV afin de comparer des produits sur la base de leur capacité à répondre à un besoin
Filière de récupération	:	Désigne tout type de filière, indépendamment du type de valorisation (recyclage, réemploi, etc.)

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADEME. (2014). Démarche REVALO – Fenêtre en fenêtre, 19.
- ADEME. (2020). 52 histoires de transition écologique. Repéré à <https://52histoires2020.ademe.fr/histoire/de-calcin-de-carbone-l-equation-gagnante-de-saint-gobain-glass>
- ADEME. (2022). Bilan national du recyclage 2010-2019.
- Boulin, A. & ADEME. (2021). Plans de Transition Sectoriels - Mémo d'analyse des enjeux de décarbonation du secteur verre (Rapport No. 011519). Repéré à <https://bibliothèque.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/4728-verre-memo-d-analyse-des-enjeux-de-decarbonation-du-secteur.html>
- Canada, E. et C. climatique. (2010). Potentiels de réchauffement planétaire. [recherche]. Repéré à <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/emissions-gaz-effet-serre/orientation-quantification/potentiels-rechauffement-planetaire.html>
- CERIEC. (2022). Document de cadrage - Projet d'expérimentation - Lab-construction - Solution 16.
- Chevalier, N. (2018). Vers des options de recyclage de résidus de verre plus performantes : le québec saura-t-il implanter une gestion plus durable du verre?
- Christiana, A. (2021). Portland, Oregon, provides a model for deconstructing houses that is better for people, the planet, and profit, 6.
- CIRAIG. (2015). Mise à jour d'une analyse du cycle de vie de contenants de bière au québec.
- Collen, V. (2020). Comment l'industrie du verre compte réduire ses émissions de CO2. Les Echos. Repéré à <https://www.lesechos.fr/industrie-services/energie-environnement/comment-lindustrie-du-verre-compte-reduire-ses-emissions-de-co2-1185554>
- Communication personnelle. (2022a). Communication avec Verglass.
- Communication personnelle. (2022b). Communication personnelle avec Martin Dubois.
- CSMO des industries des portes et fenêtres, du meuble et des armoires de cuisine. (2016). Recensement sur l'industrie des portes et fenêtres et du verre au Québec.
- Direction de la communication & Métropole Aménagement. (2020). Saint-Vincent-de-Paul Faire Paris Autrement.
- ÉTS. (2022). Centre d'études et de recherches intersectorielles en économie circulaire (CERIEC) | ÉTS Montréal. Repéré à <http://www.etsmtl.ca/recherche/laboratoires-et-chaire-ets/ceriec>
- FCRBE. (2021a). L'Autre Soie Aménager un petit morceau de ville en intégrant le réemploi.
- FCRBE. (2021b). Rapport mi-parcours.

- FCRBE. (2022). FCRBE - Facilitating the circulation of reclaimed building elements in Northwestern Europe. Repéré à <https://www.nweurope.eu/projects/project-search/fcrbe-facilitating-the-circulation-of-reclaimed-building-elements-in-northwestern-europe/>
- Fédération de l'Industrie du Verre. (2013). Un autre regard sur la durabilité du verre.
- Fondation Ellen Macarthur. (2016). The circular economy and the promise of glass in concrete.
- Fortin, A. J. (2003). Etude d'un projet de déconstruction au 245 rue Richeleu à Saint-Jean-sur-Richelieu - Recyc-Québec. yumpu.com. Repéré à <https://www.yumpu.com/fr/document/read/41207682/etude-dun-projet-de-daconstruction-au-recyc-quabec>
- Gentil, I., Guilloux, G., & Lacouture, C. (2011). Rapport Analyse de Cycle de Vie « cradle to gate » d'un verre plat type float, 31.
- Groupe Millet. (2020). Nos meubles design recyclés | Menuiserie Millet. Millet - Fabricant de portes et fenêtres sur mesure. Repéré à <https://groupe-millet.com/recyclage-fenetres-meubles-design-ru-edition/>
- ICRIQ. (2022). avancée - icriq.com. Repéré à <https://www.icriq.com/fr/avancee>
- Insee. (2018). La production des portes, fenêtres et fermetures en France, une spécialisation sur l'aluminium - Insee Focus. Repéré à <https://www.insee.fr/fr/statistiques/3587175#tableau-figure2>
- Métropole Aménagement. (2022). Economie circulaire | Paris & Métropole Aménagement. Repéré à <https://www.paris-metropole-amenagement.fr/fr/economie-circulaire-382>
- Microsoft 365. (2017). Visio Data Visualizer: How to automatically create process diagrams from Microsoft Excel data. Repéré à https://www.youtube.com/watch?v=Q6_vop2kHCg
- Owens-Illinois. (2020). Comment les bouteilles et pots en verre sont-ils fabriqués? OI. Repéré à <https://www.o-i.com/fr/our-story/comment-les-bouteilles-et-pots-en-verre-sont-ils-fabriques/>
- Quantis. (2015). Analyse environnementale du cycle de vie de projets de commercialisation du verre mixte récupéré via des centres de tri de matières recyclables au Québec.
- Recyc-Québec. (2018). Résidus de construction, de rénovation et de démolition (CRD), 12.
- Recyc-Québec. (2020). Bilan 2018 de la gestion des matières résiduelles au Québec.
- Recyc-Québec, & Quantis. (2015). Analyse environnementale du cycle de vie de projets de commercialisation du verre mixte récupéré, 4.
- Recyc-Québec. (2022a). Les 3RV sous la loupe. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/citoyens/mieux-consommer/zone-jeunesse/3rv>
- Recyc-Québec. (2022b) Le gouvernement agit pour réduire l'élimination des résidus du secteur de la construction, de la rénovation et de la démolition. Repéré à <https://www.recyc->

quebec.gouv.qc.ca/communiqués-de-presse/le-gouvernement-agit-pour-reduire-lelimination-des-residus-du-secteur-de-la-construction-de-la-renovation-et-de-la-demolition

Richelieu. (2022). Verre feuilleté vert. Quincaillerie Richelieu. Repéré à <https://www.richelieu.com/ca/fr/categorie/quincaillerie-pour-le-verre/feuille-de-verre-miroir-acrylique-et-polycarbonate/verre/verre-securitaire/verre-de-securite-feuillete/verre-feuillete-vert/1191072>

Rogers, E. (2022). How to Recycle Old Windows. Glass.com. Repéré à <https://info.glass.com/how-to-recycle-old-windows/>

Saint Gobain France. (2019). Guide pour un meilleur recyclage du calcin.

Technic’Baie. (2020). Menrec dit STOP à l’enfouissement des fenêtres ! Découvrez comment... Technic’Baie. Repéré à <https://www.technicbaie.fr/actualites/menrec-dit-stop-a-lenfouissement-des-fenetres/>

Toutverre. (2022). Qu’est-ce qu’un verre trempé ? Repéré à <https://www.toutverre.com/fr/services-et-conseils/nos-conseils/verre-trempe>

Trudel, M. (2022). « La route du verre » est lancée en Mauricie. Radio-Canada.ca. Repéré à <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1888214/recyclage-verre-environnement-bouteille-bellemare>

UFME. (2020). Le développement durable. UFME. Repéré à <https://www.ufme.fr/le-developpement-durable>

Unbuilders. (2022). Home - Unbuilders. Repéré à <https://unbuilders.com/>

VERROX. (2022). Verrox / pour un béton plus performant. Repéré à <https://verrox.ca/#!/avantages>

Vitrage et Fenêtre. (2022). La composition d'une fenêtre. Repéré à <https://vitrage-fenetre.com/une-fenetre/composition-fenetre/>

Vitrum Life. (2020). Verre plat: le processus de production. Repéré à <https://vitrumlife.it/fr/processus-de-production-de-verre-plat/>

