



HAL
open science

Développement d'indicateurs d'approvisionnement en matériaux minéraux et métalliques issus de l'économie circulaire dans une approche d'évaluation absolue de la soutenabilité dans le secteur du bâtiment

Nada Bendahmane

► To cite this version:

Nada Bendahmane. Développement d'indicateurs d'approvisionnement en matériaux minéraux et métalliques issus de l'économie circulaire dans une approche d'évaluation absolue de la soutenabilité dans le secteur du bâtiment. Ingénierie de l'environnement. Mines Saint-Etienne, 2023. Français. NNT : 2023EMSEM015 . tel-04818166

HAL Id: tel-04818166

<https://hal.science/tel-04818166v1>

Submitted on 4 Dec 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

NNT : 2023EMSEM015

THÈSE DE DOCTORAT

de Mines Saint-Etienne - Une école de l'IMT

**Ecole Doctorale N°488
(Sciences, Ingénierie, Santé)**

Spécialité de doctorat : Sciences et génie de l'environnement
Soutenue publiquement le 12 juin 2023 par :

Nada Bendahmane

**Développement d'indicateurs d'approvisionnement
en matériaux minéraux et métalliques issus de
l'économie circulaire dans une approche d'évaluation
absolue de la soutenabilité dans le secteur du
bâtiment**

Devant un jury composé de :

VENTURA Anne	Directrice de recherche, Université Gustave Eiffel	Rapportrice
FERRAILLE Adélaïde	IDTPE HDR, Ecole des Ponts ParisTech	Rapportrice
BULLE Cécile	Professeure, UQAM	Examinatrice
PERRY Nicolas	Professeur, ENSAM	Président du jury
TANGUY Audrey	Maître-assistante, EMSE	Examinatrice
LEBERT Alexandra	Directrice du domaine d'Action Stratégique Changement Climatique & Économie Circulaire, CSTB	Invitée jury
CHEVALIER Jacques	Docteur ingénieur, Alliance HQE-GBC	Co-encadrant de thèse
GONDRAN Natacha	Professeure, EMSE	Directrice de thèse

Affidavit

Je soussigné, Nada Bendahmane, déclare par la présente que le travail présenté dans ce manuscrit est mon propre travail, réalisé sous la direction scientifique de Natacha Gondran et Jacques Chevalier, dans le respect des principes d'intégrité et de responsabilité inhérents à la mission de recherche. Les travaux de recherche et la rédaction de ce manuscrit ont été réalisés dans le respect de la charte nationale de déontologie des métiers de la recherche.

Ce travail n'a pas été précédemment soumis dans sa globalité en France ou à l'étranger dans une version identique ou similaire à un organisme examinateur.

Fait à Grenoble, le 7 avril 2023

Ce travail de thèse est une œuvre de l'esprit, protégée par le droit d'auteur, tel que prévu aux articles L111-1 du CPI et suivants disposant que « *L'auteur d'une œuvre de l'esprit jouit sur cette œuvre, du seul fait de sa création, d'un droit de propriété incorporelle exclusif et opposable à tous. [...]* »

Il est rappelé que par exception au droit d'auteur, la loi française autorise l'utilisation d'une œuvre divulguée, sans autorisateur de son auteur, suivant les conditions définies dans l'article L122-5 du CPI disposant que « *Lorsque l'œuvre a été divulguée, l'auteur ne peut interdire [...] la représentation ou la reproduction d'extraits d'œuvres, [...] sous réserve que soient indiqués clairement le nom de l'auteur et la source [...] les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, polémique, pédagogique, scientifique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées [...]* »

*À Layla,
Enti Omri*

Remerciements

Si j'ai pu réaliser cette thèse et la soutenir avec un ventre tout rond, c'est que je n'y suis pas arrivée toute seule, c'est que tout le long de cette aventure, j'ai eu l'immense chance de vous avoir autour de moi. Vous qui m'avez tant soutenue, entourée, épaulée et écoutée. C'est donc à vous que je dédie ces remerciements. J'espère sincèrement trouver les mots pour vous exprimer toute la gratitude que je ressens.

Tout d'abord, je souhaite remercier les membres du jury, Anne Ventura, Adélaïde Ferraille, Cécile Bulle, Nicolas Perry, Audrey Tanguy et Alexandra Lebert d'avoir accepté d'examiner mon travail. Merci pour vos retours et pour nos échanges lors de la soutenance, ça ouvre tant de perspectives enthousiasmantes et je serais ravie de continuer avec vous ces échanges durant mon post-doctorat. Un grand merci à Cécile Bulle de m'avoir invité aux réunions mensuelles avec les doctorant·e·s qu'elle dirige au CIRAIG, c'est une réelle opportunité de pouvoir échanger sur tant de sujets et de partager nos réflexions et nos questionnements.

Ensuite, je tiens à remercier mes encadrant·e·s de thèse. Natacha, Jacques, j'ai adoré travailler avec vous ces trois ans. Vous m'avez tant appris, vous m'avez fait découvrir le monde de la recherche et vous avez été pour moi des repères infailibles. Une thèse, c'est une succession de vagues, avec des hauts et des bas, et tout l'enjeu est de savoir rebondir pendant les moments « bas ». Pendant ces moments, vous avez toujours répondu présent·e·s, vous avez toujours su être là, à l'écoute, en soutien avec les mots justes. Je ne vous remercierai jamais assez pour ça !

Un énorme merci à Alexandra, sans qui cette thèse n'aurait pu voir le jour, merci d'avoir cru en moi pour ce sujet si passionnant ! Un immense merci à Marine et à Mathilde, votre soutien a été une réelle ressource pour moi, vos portes ont toujours été ouvertes, c'est un réel privilège que de vous avoir. Un grand merci à Julien, à toutes nos discussions motivantes et enthousiasmantes, merci de tant croire au collectif !

Je remercie également Charlotte qui m'a permis de découvrir le CSTB, qui a cru en ma motivation malgré un cursus éloigné de l'évaluation environnemental et du monde de la recherche. Merci à tou·e·s mes collègues que je n'ai pas encore cité·e·s, de l'équipe Env et ECAF, du site de Grenoble : Emilie, Denise, Lucile, Marin, Rafaela, Martin, Solene, Ingrid, Aline, Manu, Valentine, Adélaïde, Simon, Félix, Cécile, Nicoleta, Florence, Pascal,

Jean-Marc... Merci pour les échanges qu'on a pu avoir, votre aide et partage d'expérience, mais aussi tous les bons moments passés ensemble.

Un immense merci à mes camarades, ils et elles se reconnaîtront, qui m'ont permis de garder les pieds sur terre pendant cette thèse, merci de me donner quelque chose de précieux en quoi croire, un monde sans oppressions, autogéré et démocratique.

Mes copaines d'amour, ma famille choisie, Mathou, Cyp, Lulu, Zouyey, Lohan, Flo et Juliette, votre présence dans ma vie la change radicalement, votre amitié est une des choses les plus précieuses que j'ai. Et n'oubliez pas, on ne perd pas le nord car... ce n'est pas un objet _ paroles sages d'une philosophe de renommée

Merci à Lamia, *khalti lhbiba*, qui a traversé la Méditerranée, les valises remplies de délices pour fêter avec moi ce jour si spécial pour moi. Merci à Catherine, P'tit Bonhomme et Ana d'être là et pour toute l'aide que vous m'apportez ! Un grand merci à Jean-Pierre qui, au lieu de profiter paisiblement de sa retraite en sirotant du limoncello à Turin, a dû tout relire mon manuscrit !

Mama, Baba, Maha et Noha, vous n'avez pas pu être parmi nous aujourd'hui, (merci les frontières), mais jamais vous ne quittez mes pensées. Maha, Noha, *Lkhaybat dyali*, je vous aime si fort, nos rires défient les mers et les terres pour éclater ensemble dans un feu d'artifice extravagant ! Baba, je n'oublierai jamais ce moment fort en émotion la veille de mon départ pour la France, *Allaykhalik lina ! Mamati habibati*, tu es une des femmes les plus fortes que je n'ai jamais vu ! tu as toujours été et tu seras toujours un modèle pour moi, ta force est irréductible ! *Kan hebek ya setti lhabayb !*

Leo, *Habibi*, il me faudrait au moins un autre manuscrit pour exprimer tout ce que je ressens pour toi, avec toi, tout semble si facile, si léger, même soutenir une thèse à 9 mois de grossesse ! Je crois tellement en l'avenir à tes côtés... Hâte de vivre cette fabuleuse aventure qui nous attend.

Enfin, merci à toi petite boule d'amour, j'ai si hâte de te serrer fort dans mes bras, je t'aime déjà si fort.. *Enti omri..*

Résumé

Les ressources minérales et métalliques représentent d'importants enjeux environnementaux et socio-économiques. Dans le secteur du bâtiment, ce sont les ressources les plus consommées avec, par exemple, un pourcentage de 96% de la masse totale de matière consommée par ce secteur en France. Par conséquent, l'identification, puis, l'optimisation de l'utilisation des ressources minérales et métalliques dans le secteur du bâtiment est une réelle nécessité.

Actuellement, plusieurs auteur-e-s développent des méthodes d'évaluation de la durabilité environnementale absolue (AESA), combinées à l'Analyse de Cycle de Vie (ACV), afin d'évaluer la soutenabilité absolue des systèmes étudiés. Cependant, la plupart des approches AESA n'incluent pas les ressources non renouvelables, et en particulier les ressources minérales et métalliques. En outre, les méthodes de caractérisation des impacts des ressources minérales et métalliques, utilisées dans l'ACV, présentent plusieurs limites lorsqu'elles sont appliquées à des projets dans le secteur du bâtiment.

Ce projet de thèse a pour objectif de développer une méthode qui permet d'évaluer la soutenabilité d'un projet de construction donné vis-à-vis de sa consommation en ressources minérales et métalliques.

Afin de répondre à cet objectif, la méthode MiMOSA (Mineral and Metal absolute Sustainability Assessment), s'inspire de l'approche développée par Ryberg et al. (2018) et définit un budget matériau soutenable équivalent à une limite planétaire relative aux ressources minérales et métalliques.

Ce budget intègre les flux anthropiques issus du recyclage et du réemploi et considère une échelle spatiale appropriée pour chaque matériau. Dans ce sens, la pression des ressources minérales et métalliques est abordée comme un problème socio-économique plutôt qu'environnementale.

La méthodologie suit quatre étapes principales :

1. Identification des besoins du projet de construction étudié.
2. Estimation des flux issus du réemploi et du recyclage.
3. Calcul des budgets matériaux assignés au projet.
4. Calcul des indicateurs de soutenabilité après la comparaison des besoins du projet étudié avec les budgets matériaux qui lui sont assignés.

Cette méthode est testée et opérationnalisée à travers une étude de cas relative à la construction d'une maison individuelle en Seine-Saint-Denis.

Mots clés : secteur du bâtiment, ressources minérales et métalliques, ACV, AESA, économie circulaire, bâtiment soutenable.

Abstract

Mineral and metal resources represent major environmental and socio-economic challenges. In the building sector, these resources are the most consumed. For example, 96% of the total mass of material consumed by this sector in France is relative to mineral and metal resources. Therefore, the identification and optimization of the use of mineral and metallic resources in the building sector is a real necessity.

Currently, several authors are developing absolute environmental sustainability assessment (AESAs) methods, combined with Life Cycle Assessment (LCA), in order to evaluate the absolute sustainability of the systems studied.

However, most AESA approaches do not include non-renewable resources, and in particular mineral and metal resources. Moreover, the methods used in LCA to characterize the impacts of mineral and metal resources have several limitations when applied to projects in the building sector.

The objective of this thesis project is to develop a method to assess the sustainability of a given construction project with respect to its consumption of mineral and metal resources.

In order to meet this objective, the MiMOSA (Mineral and Metal absolute Sustainability Assessment) method is inspired by the approach developed by Ryberg et al. (2018) by defining a sustainable material budget equivalent to a planetary limit for mineral and metal resources.

This budget integrates anthropogenic flows from recycling and reuse and considers an appropriate spatial scale for each material.

The methodology follows four main steps:

1. Identify the needs of the construction project under study
2. Estimate the flows from reuse and recycling.
3. Calculate the material budgets assigned to the project.
4. Calculate the sustainability indicators after comparing the needs of the project studied with the material budgets assigned to it.

This method is tested and operationalized through a case study related to the construction of an individual house in the Seine-Saint-Denis department.

Keywords: building sector, mineral and metal resources, LCA, AESA, circular economy, sustainable building

Note

Ce manuscrit a été rédigé en écriture inclusive en se basant sur « le guide pratique pour une communication publique sans stéréotype de sexe » édité par le Haut Conseil à l'Égalité entre les femmes et les hommes (Mots-clés, 2017).

Table des acronymes

ACV	Analyse de Cycle de Vie
ADEME	Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AESA	Absolute Environmental Sustainability Assessment (Evaluation absolue de la soutenabilité environnementale)
AGEC	Anti-Gaspillage et pour une Economie Circulaire
ASPLPG	Association de Sauvegarde et de Protection du Littoral de la Presqu'île de Gavres
B _{bio}	Besoin bioclimatique
BTP	Bâtiments et Travaux Publics
CCNUCC	Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
C _{ep}	Consommation conventionnelle d'Energie Primaire
CEREMA	Centre d'Etude et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement
CGDD	Commissariat Général du Développement Durable
CIFRE	Convention Industrielle de Formation pour la REcherche
CRM	Critical Raw Materials (Matières premières critiques)
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
CVC	Chauffage Ventilation Climatisation
DI	Déchet Inerte
DNDNI	Déchet Non Dangereux Non Inerte
EC	Economie Circulaire
EcoSD	Eco-conception de Systèmes Durables
EICV	Evaluation d'Impacts de Cycle de Vie
FC	Facteur de caractérisation
FDES	Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire
GES	Gaz à Effet de Serre
HQE	Haute Qualité Environnementale

IASE	Indicateur Absolu de la Soutenabilité Environnementale
Id	Identifiant
ILCD	International Life Cycle Data (Données internationales sur le cycle de vie)
INEC	Institut National de l'Economie Circulaire
INSEE	Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
IRSE	Indicateur Relatif de la Soutenabilité Environnementale
ISO	International Organization for Standardization (Organisation internationale de normalisation)
LCA	Life Cycle Impact Assessment (Analyse de cycle de vie)
MiMOSA	Mineral and Metal absolute Sustainability Assessment (Evaluation de la soutenabilité absolue des ressources minérales et métalliques)
ND	Non défini
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Economiques
ONU	Organisation des Nations Unies
PB	Planetary Boundary (Limite planétaire)
PCE	Produits de Construction et Equipements
PDC	Produits De Construction
PEP	Profil Environnemental Produit
QTT	Quantité
RE	Réglementation Environnementale
REP	Responsabilité Elargie du Producteur
RT	Règlementation Thermique
SitraM	Système d'Information sur les TRANsports de Marchandises
TEPCV	Transition Energétique Pour la Croissance Verte
T _{ic}	Température Intérieure Conventionnelle
UE	Union Européenne
UF	Unité Fonctionnelle
UICN	Union Internationale pour la Conservation de la Nature
VRD	Voire Réseaux Divers

Table des matières

Affidavit.....	2
Remerciements	4
Résumé.....	6
Abstract	7
Note.....	8
Table des acronymes.....	9
Table des matières	11
Table des figures	19
Table des tableaux	25
Introduction Générale.....	29
Chapitre 1. Les enjeux de l'extraction des ressources minérales et métalliques 36	
1. L'humain, la Nature et les ressources.....	37
2. Les métaux, quels enjeux, quels impacts ?	39
2.1 Disponibilité des ressources minérales et métalliques	39
2.2 Les impacts environnementaux de l'industrie minière.....	42
2.3 La criticité des ressources métalliques	46
2.4 Inégalités sociales associées à la répartition inégale des territoires d'extraction et de consommation des ressources minérales et métalliques.....	50
3. Les ressources minérales, plus que de simples cailloux, l'exemple du sable.....	52
4. Conclusion du chapitre.....	56
Chapitre 2. Etat de l'art – Comment les ressources minérales et métalliques sont adressées dans les méthodes d'analyse de cycle de vie et d'évaluation absolue de la soutenabilité environnementale ?	57

1. Objectifs du chapitre	58
2. L'analyse de cycle de vie : cadre général	58
2.1 Définition des objectifs et champ d'étude	59
2.2 Analyse de l'inventaire de cycle de vie	59
2.3 Evaluation des impacts du cycle de vie (EICV)	60
2.4 Interprétation	60
3. L'analyse de cycle de vie appliquée au secteur du bâtiment	60
4. Les méthodes d'Evaluation Absolue de la Soutenabilité	
 Environnementale (AESA).....	63
4.1 L'approche AESA basée sur l'ACV (AESA-ACV).....	64
4.2 L'ACV basée sur les limites planétaires (PB-ACV)	66
4.3 Les différences entre les approches AESA-ACV et PB-ACV.....	68
5. Prise en compte des pressions sur les ressources minérales et	
 métalliques en ACV et en AESA : Revue systématique de la littérature .69	
5.1 Formulation de la question de recherche.....	69
5.2 Identification des études.....	69
5.3 Sélection et évaluation des études.....	70
5.4 Analyse et synthèse.....	71
6. L'économie circulaire.....	74
7. Analyse de la littérature	77
7.1 La valeur d'une ressource minérale et métallique en ACV	77
7.2 Comment les ressources minérales et métalliques sont prises en compte	
par les méthodes AESA ?	78
7.3 L'application des méthodes AESA dans le secteur du bâtiment	81
8. Conclusion du chapitre.....	84
 Chapitre 3. Quelle méthode d'EICV pour une approche d'AESA basée sur	
l'ACV pour les ressources minérales et métalliques dans le secteur du	
bâtiment ? 86	
1. Objectifs du chapitre	87

2. Comment évaluer la soutenabilité vis-à-vis de la consommation des ressources minérales et métalliques ?	87
3. Les exigences auxquelles les méthodes d'EICV doivent répondre dans une approche AESA basée sur l'ACV dans le contexte du secteur du bâtiment	88
4. Les méthodes d'EICV relatives aux ressources minérales et métalliques identifiées dans la littérature	89
5. Analyse des méthodes de caractérisation des ressources minérales et métalliques vis-à-vis de l'exhaustivité de leurs facteurs de caractérisation	90
5.1 La méthode d'analyse d'exhaustivité des facteurs de caractérisation proposée.....	90
5.2 Les critères de sélection	91
5.3 Présentation des méthodes sélectionnées.....	94
6. Etude de cas	96
7. Résultats et analyse	97
7.1 L'analyse de l'inventaire de cycle de vie.....	97
7.2 Complétude de l'ensemble des facteurs de caractérisation des méthodes d'EICV 98	
7.3 Comparaison des impacts estimés par les différentes méthodes d'EICV ..	99
7.4 Les matériaux pondéreux.....	102
8. Les limites de l'utilisation des méthodes d'EICV relatives aux ressources minérales et métalliques existantes dans une approche d'AESA basée sur l'ACV	103
8.1 Le manque de facteurs de caractérisation : l'assimilation, une solution acceptable pour l'AESA basée sur l'ACV ?.....	103
8.2 La régionalisation : un enjeu principal pour les ressources minérales et métalliques.....	107
9. Conclusion du chapitre	108

Chapitre 4. <i>Quelle méthode de représentation des pressions sur l'approvisionnement en ressources minérales et métalliques pour une approche d'AESA dans le secteur du bâtiment ?</i>	111
1. Objectifs du chapitre	112
2. Quelle limite planétaire pour les ressources minérales et métalliques ? 112	
3. Les exigences de la méthode	113
4. Présentation globale de la méthode MiMOSA	114
5. Définition des nomenclatures PCE et Matériaux	116
6. L'unité temporelle	118
7. Développements méthodologiques	119
7.1 Description des besoins du projet étudié.....	119
7.2 Définition du budget matériau global	121
7.3 Calcul des budgets matériaux assignés au bâtiment étudié.....	127
7.4 Calcul des indicateurs de réemploi potentiel	129
7.5 Calcul des besoins en matières secondaires minérales et métalliques.....	131
7.6 Calcul des indicateurs de recyclage potentiel	132
7.7 Soutenabilité de la consommation matière minérale et métallique du projet étudié.....	133
8. Conclusion du chapitre	133
Chapitre 5. <i>Estimation des taux de réemploi et de réutilisation des produits de constructions issus du secteur du bâtiment et des flux issus du recyclage dans une approche prospective</i>	135
1. Objectifs du chapitre	136
2. Freins au réemploi et à la réutilisation	137
3. Hypothèses de travail	138
4. Quels produits de construction et équipements étudier ?	139
4.1 Flux issus de la déconstruction : présentation de l'outil BTP-flux.....	139
4.1.1 Objectif et méthodologie de l'outil BTP-flux	139

4.1.2	Description des bâtiments en macro-composants	141
4.2	Expression des flux issus de la déconstruction et de la rénovation	142
5.	Méthode de quantification des taux de réemploi et de détermination de l'échelle géographique la plus adaptée.....	145
5.1	Comment définir les taux de réemploi ?	145
5.2	Les usages à l'issue du réemploi	146
5.3	Spatialisation et quantification des flux de réemploi	149
5.3.1	Recherche bibliographique.....	149
5.3.2	Enquêtes auprès des acteur·rice·s de valorisation.....	151
5.3.3	Méthode quantitative d'estimation des taux à travers la bibliographie et l'enquête	152
5.3.4	L'échelle géographique la plus adaptée pour le réemploi.....	153
5.3.5	Exemple des briques en terre cuite	154
5.4	Estimation quantitative des taux de réemploi.....	156
6.	Quantification des flux issus du recyclage	158
6.1	Quels flux ?	159
6.2	Quelles échelles géographiques ?	159
6.3	Estimation quantitative des flux du recyclage.....	162
7.	Conclusion du chapitre.....	164
Chapitre 6. De MiMOSA à un outil opérationnel – Application à une étude de cas 166		
1.	Objectifs du chapitre	167
2.	Présentation de l'étude de cas	170
2.1	Le projet de construction considéré.....	170
2.2	Les scénarios et hypothèses de l'étude de cas	172
2.2.1	Scénario global : hypothèses et scénarios sur le développement de l'économie circulaire	172
2.2.2	Les scénarios développés par l'ADEME dans l'étude Transitions 2050	172
3.	Estimation des besoins du bâtiment étudié	174
4.	Estimation des flux pouvant être issus de l'économie circulaire....	175
4.1	Les flux issus du réemploi.....	175
4.1.1	Estimation des flux de déconstruction grâce à l'outil BTP-flux	175

4.1.2	Estimation des flux pouvant être issus du réemploi.....	178
4.2	Les flux issus du recyclage.....	180
5.	Calcul des budgets matériaux	181
5.1	Les facteurs d'assignation.....	181
5.2	Estimation des budgets matériaux pouvant être issus du réemploi assignés au projet étudié.....	182
5.2.1	Assignation au niveau du secteur résidentiel	183
5.2.2	Assignation au niveau de la construction neuve résidentielle.....	185
5.2.3	Assignation au m ²	185
5.2.4	Assignation des flux pouvant être issus du réemploi au projet étudié	186
5.3	Budgets matériaux issu du recyclage	187
5.3.1	Assignation au secteur du bâtiment	188
5.3.2	Assignation à la construction neuve dans le résidentiel	190
5.3.3	Assignation par lot.....	190
5.3.4	Assignation des flux pouvant être issus du recyclage au projet étudié 191	
5.4	Les approches d'assignation choisies.....	192
6.	Les indicateurs de soutenabilité en termes de consommation de matériaux minéraux et métalliques	192
6.1	Les indicateurs de réemploi potentiel.....	192
6.1.1	Comment les interpréter ?	192
6.1.2	Analyse et interprétation des résultats obtenus par produits de construction	193
6.1.3	La soutenabilité en termes de potentiel d'approvisionnement des produits de construction issus du réemploi du projet.....	196
6.2	La traduction des besoins ne pouvant pas être satisfaits par le réemploi en besoins de matières secondaires.....	196
6.2.1	Matrice de conversion	198
6.2.2	Calcul des besoins en matières secondaires après prise en compte des actions de réemploi.	199
6.3	Les indicateurs de recyclage potentiel.....	201
6.3.1	Comment les interpréter ?	201
6.3.2	Présentation et analyse des résultats obtenus	201
7.	Conclusion du chapitre.....	203

Chapitre 7. Analyse de sensibilité	206
1. Objectifs du chapitre	207
2. Les scénarios ADEME	207
2.1 Présentation des scénarios.....	207
2.2 Les résultats obtenus pour chaque scénario	209
2.2.1 Les facteurs d'assignation	209
2.2.2 Indicateurs de réemploi potentiel.....	213
2.2.3 Les indicateurs de recyclage potentiel	217
3. Les taux de réemploi	218
4. Conclusion du chapitre.....	220
Conclusion	221
1. Bilan des travaux effectués durant la thèse	221
2. Les limites du travail.....	224
3. Les perspectives	225
3.1 Mise en place d'un système d'information	225
3.2 Méthode d'agrégation des résultats au niveau du projet étudié	225
3.3 Que faire du budget assigné non utilisé par le projet étudié ?	227
3.4 Meilleure prise en compte des besoins de l'étude de cas.....	228
3.5 L'échelle temporelle considérée.....	228
3.6 Améliorer les résultats des indicateurs	229
Bibliographie	232
Annexe 2.1 les équations de mots-clés ayant servies à la revue systématique de la bibliographie.....	250
Annexe 5.1 La nomenclature Produits De Construction de la méthode MiMOSA	252
Annexe 5.2 Questionnaire de l'enquête menée auprès des acteur-ric-e-s du réemploi et du recyclage	255
Annexe 5.3 Rapport des entretiens auprès des acteur-ric-e-s du réemploi et du recyclage	261

<i>Annexe 5.4 Valeurs des taux de réemploi retenues pour chaque produit de construction.....</i>	<i>283</i>
<i>Annexe 6.1 Besoins en produits de construction de la maison individuelle en terre cuite</i>	<i>289</i>
<i>Annexe 6.2 Flux pouvant être issus du réemploi en Seine-Saint-Denis en 2050 selon le scénario « Génération frugale »</i>	<i>292</i>
<i>Annexe 6.3 La matrice de conversion</i>	<i>296</i>

Table des figures

Figure 1-1 Evolution des teneurs en métaux des minerais du cuivre, fer, plomb et zinc pour différentes régions du monde (Mudd, 2013)	40
Figure 1-2 La production annuelle du cuivre (Cu), zinc (Zn), aluminium (Al), des terres rares (REE), vanadium (Vn), sélénium (Se), niobium (Nb), platine (Pt) et lithium (Li) (Vidal et al., 2017).....	41
Figure 1-3 Ordres de grandeurs du nombre d'années de réserves des métaux rares et précieux restantes si la consommation et l'élimination se poursuivent au rythme actuel (Dodson et al., 2012)	41
Figure 1-4 La roue de la complémentarité des métaux. Les principaux métaux produits dans les mines forment le cercle intérieur. Les métaux co-produits apparaissent dans le cercle extérieur à des distances proportionnelles au pourcentage de leur production (Nassar et al., 2015).....	43
Figure 1-5 Les étapes de traitement des minerais (SystExt, 2021)	44
Figure 1-6 Pollution de la rivière Daldykan en septembre 2016 à la suite du débordement d'un parc à résidus miniers Kokcharov, 2016	45
Figure 1-7 Carte représentant la part de production mondiale des métaux par pays, les pays producteurs sont représentés en vert (Kempinski et al., 2023)	46
Figure 1-8 Les paramètres définissant la criticité (EcoSD & ADEME, 2019).....	47
Figure 1-9 Liste des matériaux critiques établie par la Commission Européenne en 2020 (European Commission, 2020).....	49
Figure 1-10 Les ressources utilisées dans les technologies clés telles que définies par la Commission Européenne. LREE : Light Rare Earth Elements (Terres rares légères) HREE : High Rare Earth Elements (Terres rares lourdes) (European Commission, 2020)	50
Figure 1-11 Carte des luttes contre les projets d'extraction minières, chaque point orange représente une lutte source: Environmental Justice Atlas, 2022.....	52
Figure 1-12 Photographie d'astronaute des projets "Palm Jumeirah" et "The World" à Dubai, Nasa earth observatory	55
Figure 2-1 Les quatre grandes phases d'une analyse de cycle de vie.....	59

Figure 2-2 Historique de l'entrée de l'ACV dans le secteur du bâtiment (Lebert & Chevalier, 2018).....	61
Figure 2-3 Grandes étapes de cycle de vie d'un bâtiment (Lebert & Chevalier, 2018)	62
Figure 2-4 Les étapes de cycle de vie d'un bâtiment selon la norme NF EN 15 804....	63
Figure 2-5 (a) évaluation relative (b) évaluation absolue (Bjørn et al., 2016)	64
Figure 2-6 Le cadre méthodologique des méthodes AESA basées sur l'ACV Bjorn et al., 2020.....	65
Figure 2-7 Concept de limite et frontière planétaire (Boutaud & Gondran, 2020)	67
Figure 2-8 Les limites planétaires, traduit de (Persson et al., 2022).....	68
Figure 2-9 Le nombre de publications sélectionnées (en orange) par rapport au nombre de publications non sélectionnées (en bleu).....	72
Figure 2-10 Les thématiques de recherche identifiées à l'issue de la revue systématique de la littérature, le nombre d'articles traitant d'une seule thématique est indiqué dans les cercles de la thématique correspondante. Le nombre d'articles traitant deux thèmes de recherche apparait dans les lignes reliant les deux thèmes de recherche en question.	73
Figure 2-11 Le nombre de publications par source de subventions (Scopus).....	74
Figure 2-12 D'une économie linéaire à une économie circulaire source (eco-conception.fr).....	75
Figure 2-13 Hiérarchisation des actions de l'EC.....	76
Figure 2-14 Méthode d'évaluation absolue de la soutenabilité des bâtiments selon Brejnrod et al., 2017.....	82
Figure 2-15 Le concept de limites planétaires et le cadre de capacité de charge pour les processus du système terrestre global. La zone verte marque l'espace de fonctionnement sûr, la zone jaune l'incertitude et la zone rouge un risque élevé de changement critique. Les lignes marquent la limite planétaire située à la limite inférieure de la zone d'incertitude et la capacité de charge située comme une moyenne dans la zone d'incertitude (Andersen et al., 2020).	84
Figure 3-1 Catégorisation des méthodes en fonction de leurs mécanismes d'impact, Sonderegger et al., 2020.....	89

Figure 3-2 Méthode d'analyse des méthodes d'EICV sélectionnées (Bendahmane et al., 2022)	91
Figure 3-3 Répartition des impacts estimés pour les dix valeurs les plus élevées pour chaque méthode d'EICV.....	101
Figure 4-1 Schéma global représentant les étapes principales de la méthode MiMOSA	114
Figure 4-2 Interprétation des indicateurs en fonction de leur valeur	116
Figure 4-3 Extrait de la nomenclature Matériaux	118
Figure 4-4 Extrait de la nomenclature PCE.....	118
Figure 4-5 Les consommations directes et indirectes de ressources dans un bâtiment	120
Figure 4-6 Extrait du vecteur matriciel $P_{reuse}(m,1)$	121
Figure 4-7 Les flux de recyclage et réemploi	123
Figure 4-8 Localisation des vecteurs matriciels contenant les budgets globaux de réemploi et recyclage par rapport au schéma global de la méthode MiMOSA.....	125
Figure 4-9 Encadrée en rouge la fraction de matières secondaires intégrées dans le processus de production des matériaux.....	125
Figure 4-10 Positionnement des mécanismes d'impact des méthodes EICV existantes en fonction des flux caractérisés. La méthode MiMOSA, représentée avec une flèche rouge, caractérise les flux de réemploi et de recyclage, des flux présents dans la technosphère. Cette figure a été reprise de (Sonderegger et al., 2020)	126
Figure 4-11 Où se situe MiMOSA par rapport aux flux de matières entrants et sortants d'un bâtiment.....	126
Figure 4-12 Schéma récapitulatif de la méthode MiMOSA et des matrices utilisées	134
Figure 5-1 Freins liés au réemploi mentionnés par les acteur·rice·s, entre parenthèse le nombre de mentions du frein.....	137
Figure 5-2 La structure de BTP-flux (Tirado, 2022).....	140
Figure 5-3 a. Nomenclature arborescente de TyPy pour la description du bâtiment, b. Type de macro-composant, exemple d'un mur extérieur, c. les macro-composants considérés(Tirado et al., 2021)	141

Figure 5-4 L'étape détaillée dans cette section est encadrée dans la figure, le schéma est repris du chapitre 4 et explique les différentes étapes résultant du calcul des budgets matériaux assignés au projet étudié	145
Figure 5-5 Les paramètres pris en compte pour la détermination des taux de réemploi des laines minérales.....	146
Figure 5-6 Les différentes étapes et matrices afin d'obtenir le budget des composants du bâtiment assignés au projet étudié, encadrées en rouge les matrices à calculer dans ce chapitre 5, encadrées en bleu, les matrices à calculer lors du chapitre 6	149
Figure 5-7 Exemple des briques, le schéma montre les différentes étapes pour définir le taux de réemploi des briques en terre cuite. Ces étapes dépendent des spécificités du produit. La première branche, qui considère que 100% des briques pleines en terre cuite n'ont pas été en contact avec de l'eau ou des polluants est du fait que dans l'outil BTP-flux, les murs de sous-sols, de fondations, de fosses d'aisance, de citerne et de cheminées ne sont pas modélisés.....	155
Figure 5-8 Exemple de correspondance entre les résultats obtenus dans ce travail d'estimation des taux de réemploi et des composants de la nomenclature PDC de la méthode MiMOSA	156
Figure 5-9 Schéma représentant les flux en entrée pour produire un matériau donné en intégrant les matières secondaires issues du recyclage.....	159
Figure 5-10 L'échelle géographique est le périmètre de circulation des ressources issues du recyclage tout au long du processus, depuis la collecte jusqu'à la fabrication, en passant par le tri	160
Figure 5-11 Localisation de la matrice <i>Are recycling</i> par rapport aux étapes de la méthode MiMOSA.....	164
Figure 6-1 Schéma global résumant les étapes principales de la méthode MiMOSA pour une année de vie du bâtiment avec les matrices calculées à chaque étape. Les matrices encadrées en rouge sont calculées dans ce chapitre 6	169
Figure 6-2 Plans 2D de la maison individuelle considérée.....	170
Figure 6-3 Table de correspondance permettant d'exprimer les besoins de la maison individuelle dans la nomenclature PDC de la méthode MiMOSA	174

Figure 6-4 Quantité en m ² de fenêtres pouvant être issue du réemploi en Seine-Saint-Denis en 2050 selon "Génération frugale"	180
Figure 6-5 Les vecteurs matriciels estimés dans ce paragraphe	182
Figure 6-6 Etapes d'assignation des flux issus du réemploi	183
Figure 6-7 Processus et facteurs d'assignation des flux pouvant être issus du réemploi	187
Figure 6-8 Etapes d'assignation des flux issus du recyclage	188
Figure 6-9 Facteurs d'assignation des matières secondaires pouvant être issues du recyclage au projet étudié, ces facteurs sont sans unité.....	191
Figure 6-10 Processus et facteurs d'assignation des flux pouvant être issus du recyclage	191
Figure 6-11 Les résultats des indicateurs de réemploi potentiel: zoom sur la partie comprise entre 0 et 200%	195
Figure 6-12 Les matrices calculées dans cette section	197
Figure 6-13 Les besoins en matières secondaires du projet étudié.....	200
Figure 6-14 Traduction des besoins non satisfaits par le réemploi en besoins en matières secondaires à l'aide de la matrice de conversion.....	200
Figure 6-15 Résultats des indicateurs de recyclage potentiel pour chaque matériau de l'étude de cas	202
Figure 7-1 Comparaison des paramètres considérés dans chaque scénario de l'ADEME. Au vu des différences des ordres de grandeur, le nombre de logements et les m ² de tertiaire ont été représentés dans deux graphiques distincts.....	210
Figure 7-2 Comparaison des facteurs d'assignation pour chaque matériau en fonction des scénarios de l'ADEME. La représentation a été réalisée à l'aide d'un histogramme groupé afin de comparer les facteurs en fonction des scénarios mais aussi en fonction des matériaux.....	211
Figure 7-3 Comparaison des facteurs d'assignation des produits en fonction des scénarios de l'ADEME. La représentation a été réalisée à l'aide d'un graphique de barres empilées à 100% pour faciliter la comparaison au vu des ordres de grandeurs des différents facteurs.....	213

Figure 7-4 Carte de chaleur représentant les indicateurs de réemploi potentiel pour chaque produit dans chaque scénario ADEME. La valeur seuil a été fixée à 100216

Figure 7-5 Carte de chaleur représentant les indicateurs de recyclage potentiel pour chaque matériau dans chaque scénario ADEME. La valeur seuil a été fixée à 100217

Figure 7-6 Comparaison des indicateurs de réemploi potentiel des produits en fonction des deux estimations des taux de réemploi calculées dans le chapitre 5219

Table des tableaux

Tableau 2-1 Les axes de recherche et les mots-clés associés définis dans le cadre de la revue systématique de la littérature.....	70
Tableau 2-2 Le nombre de publications obtenues à la suite de la recherche bibliographique par équations de mots clés.....	71
Tableau 3-1 Les méthodes d'EICV relatives aux ressources minérales et métalliques identifiées dans la littérature. En gras les méthodes sélectionnées pour l'analyse de l'exhaustivité des facteurs de caractérisation.	92
Tableau 3-2 Ressources minérales et métalliques consommées pour la construction des logements neufs en France en 2015.....	97
Tableau 3-3 Résultats des indexes P_n et P_m pour chaque méthode d'EICV analysée, en rouge les valeurs inférieures à 30%, en jaune les valeurs entre 30% et 70% et en vert les valeurs supérieures à 70%	98
Tableau 3-4 Les flux d'inventaire relatifs au cuivre et à l'or et leurs impacts estimés dans la méthode CML-IA et Impact World+	104
Tableau 3-5 Les assimilations proposées dans le cadre du complément national français à la norme NF EN 15804	106
Tableau 4-1 Les approches d'assignation et les principes d'"équité" identifiés dans la littérature	127
Tableau 4-2 Extrait de la matrice de conversion $M(n,m)$	132
Tableau 5-1 Famille de déchet et leur type	142
Tableau 5-2 Extrait du fichier avec les sorties BTP-flux pour deux bâtiments et pour deux composants, baie vitrée et plafond. Les données présentées dans le tableau sont celles en sortie de BTP-flux sans traitement au préalable. On remarque que certains champs sont en anglais alors que d'autres en français. L'unité fonctionnelle area est exprimée en m^2	143
Tableau 5-3 Extrait de la nomenclature PDC avec les unités fonctionnelles correspondantes à chaque produit.....	145
Tableau 5-4 Table de correspondance donnant l'exemple d'usages possibles après le réemploi des baies vitrées.....	148

Tableau 5-5 Les ressources bibliographiques exploitées et les matériaux qui y sont traités	150
Tableau 5-6 Les acteurs et actrices questionné-e-s	151
Tableau 5-7 Proposition de table de correspondance mots-taux.....	152
Tableau 5-8 Les taux de réemploi pour une sélection de produits de construction..	158
Tableau 5-9 Exploitation des données Sitram : Le pourcentage des masses de marchandises qui circulent dans une échelle géographique régionale, nationale ou internationale en moyenne pour toutes les régions administratives françaises. Par exemple, la masse des produits minéraux non métalliques qui circulent en moyenne à 76% dans une même région administrative française, à 21% dans toute la France et à 3% dans d'autres pays	161
Tableau 5-10 Résumé de l'enquête menée auprès des acteurs et actrices du réemploi concernant l'échelle géographique la plus adaptée pour les flux issus du recyclage	162
Tableau 5-11 Tableau résumant les échelles géographiques les plus adaptées pour chaque ressource de la nomenclature Ressource de MiMOSA, les échelles géographiques auxquelles les données ont pu être estimées, les données obtenues ainsi que les sources mobilisées pour estimer la masse et le pourcentage maximale de matière secondaire possible d'intégrer en entrée du processus de fabrication. ND les données qui n'ont pas pu être estimées. (ND : Non Défini). Etant l'importance de la laine de verre, et comme première approximation, une valeur indicative de 100 000 t produites par an a été définie. Parmi les sources mobilisées, on retrouve des industriels et des syndicats de produits du bâtiment mais aussi des FDES présentes dans la base Inies qui ont permis de définir le pourcentage maximal de matière secondaire possible à intégrer en entrée du processus de fabrication des matériaux étudiés. C'est-à-dire, que dans la base Inies, pour une famille de produit données, la valeur de la FDES avec le taux de recyclage le plus élevée a été considérée.....	163
Tableau 6-1 Les paramètres extraits du scénario « Génération frugale » de l'étude Transitions 2050 ADEME et utilisés dans l'étude de cas, les valeurs sont données à l'échelle de la France métropolitaine	173
Tableau 6-2 Extrait de la matrice Preuse.....	175
Tableau 6-3 Les taux minimal et maximal de démolition considérés dans BTP-flux par typologie de bâtiment (Tirado et al., 2021).....	176

Tableau 6-4 Les flux issus de la déconstruction dans le département Seine-Saint-Denis tels qu'estimés par BTP-flux	176
Tableau 6-5 Flux de déconstruction issus du département Seine-Saint-Denis avec le taux de démolition considéré dans le scénario "Génération frugale"	178
Tableau 6-6 Flux pouvant être issus du réemploi dans le département Seine-Saint-Denis en 2050 selon les hypothèses du scénario "Génération frugale"	179
Tableau 6-7 Paramètres du scénario « Génération frugale » de l'ADEME à l'échelle de la France.....	184
Tableau 6-8 Le facteur d'assignation au secteur du bâtiment pour les ressources considérées (Ab), nous mettons en valeur les données utilisées issues des scénarios de l'ADEME.....	189
Tableau 6-9 Résultats des indicateurs de réemploi potentiel non nuls. En orange, les indicateurs supérieurs à 100%, en vert les indicateurs inférieurs à 100% et en gris les indicateurs égaux à l'infini.....	193
Tableau 6-10 Besoins ne pouvant pas être satisfaits par le réemploi N_reuse en UF 197	
Tableau 6-11 Produits constitutifs d'une fenêtre en double vitrage en aluminium présente dans Inies	198
Tableau 6-12 Pourcentage maximal de matière secondaire possible d'intégrer en entrée du processus de fabrication des matériaux. ND: Non défini.....	199
Tableau 7-1 Les paramètres extraits des scénarios développés dans l'étude Transitions 2050 de l'ADEME et utilisés pour l'étude de sensibilité, les valeurs sont données à l'échelle de la France métropolitaine	209
Tableau 7-2 Facteurs d'assignation au m ² de surface habitable pour chaque matériau ou pour chaque scénario.....	210
Tableau 7-3 Facteurs d'assignation au secteur du bâtiment en fonction de chaque scénario. Ces facteurs ont été calculés à l'aide de la modélisation des scénarios ADEME (ADEME, 2021c).....	212
Tableau 7-4 Les facteurs d'assignation au m ² de surface habitable pour les produits de construction pour chaque scénario	212
Tableau 7-5 Les deux estimations des taux de réemploi pour une sélection de produits de construction	218

Introduction Générale

Le secteur du bâtiment est une composante essentielle de nos économies et sociétés, il concerne la construction et la rénovation de nos écoles, nos logements, nos bureaux, nos hôpitaux, nos usines, nos salles de spectacles, etc. Et c'est donc grâce à ce secteur que nous pouvons répondre à un large panel de nos besoins.

En 2021, le parc des bâtiments français était constitué de 37.2 millions de logements en France métropolitaine, principalement des maisons individuelles (55%) (INSEE, 2021).

La France est par ailleurs le pays européen qui construit le plus de logements par habitant·e en Europe, avec, en 2021, 228 700 logements collectifs qui ont été mis en chantier (INSEE, 2022). Concernant le parc tertiaire, il représente 964 millions de m² de surfaces chauffées, avec 232 millions de m² pour les bureaux, 215 millions de m² pour le commerce et 190 millions de m² pour l'enseignement et la recherche (ADEME, 2021c).

Cependant, le secteur du bâtiment pèse son poids aussi en termes d'impacts environnementaux et en termes de consommation de ressources et de génération de déchets. En France, les bâtiments sont responsables de 45% des consommations finales d'énergie, contribuent à plus de 70% de l'artificialisation des sols et émettent 22% de gaz à effet de serre (GES) (CEREMA, 2020; Leonardon et al., 2018).

Afin d'améliorer les performances énergétiques et environnementales des bâtiments en France, plusieurs réglementations ont vu le jour.

Suite au premier choc pétrolier en 1973, une prise de conscience de la nécessité d'économiser l'énergie a été déclenchée. Ainsi, en 1974, la première Réglementation Thermique (RT) fut mise en place par le premier ministre Pierre Messmer. La RT 1974 ne s'appliquait qu'aux bâtiments neufs d'habitation et avait pour objectif de baisser de 25% la facture énergétique des bâtiments en imposant l'installation d'une fine couche d'isolation et d'un système de régulation automatique des systèmes de chauffage.

Après la RT 1974, la RT 1982 a vu le jour lors du deuxième choc pétrolier, puis la RT 1988, avec une extension aux bâtiments tertiaires, la RT 2000, en ajoutant une exigence sur le confort d'été, la RT 2005, en prenant en compte le bio climatisme et les énergies renouvelables et puis la RT 2012.

La RT 2012 est entrée en vigueur depuis le 1er janvier 2013 et elle a été élaborée à partir de l'été 2008 par de nombreux experts des professions de la construction. Le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) a eu comme rôle de développer le cœur de calcul RT 2012 qui estime les consommations des bâtiments.

La RT 2012 a introduit trois différents indicateurs : le B_{bio} (Besoin bioclimatique) qui évalue la performance de l'isolation du bâtiment, le C_{ep} (Consommation conventionnelle d'Énergie Primaire) qui évalue la consommation globale maximale d'énergie primaire et le T_{ic} (Température Intérieure Conventionnelle) qui évalue le confort d'été en imposant une température intérieure maximale dans le bâtiment.

Cependant, malgré l'évolution de leurs exigences sur les performances énergétiques, ces réglementations ne prennent pas en compte les performances environnementales des bâtiments.

En 2022, la RT 2012 fut donc remplacée par la Réglementation Environnementale 2020 (RE 2020), qui, en plus des performances énergétiques, contrôle les performances environnementales des bâtiments neufs. La figure 1 présente les indicateurs évalués dans le cadre de la RE 2020, les indicateurs sont classés selon trois catégories : énergie, carbone et confort d'été.

Energie	Bbio [points]	Besoins bioclimatiques	Evaluation des besoins de chaud , de froid (que le bâtiment soit climatisé ou pas) et d'éclairage .	EVOLUTION
	Cep [kWh _{ep} /(m ² .an)]	Consommations d'énergie primaire totale	Evaluation des consommations d'énergie renouvelable et non renouvelable des 5 usages RT 2012 : chauffage, refroidissement, eau chaude sanitaire, éclairage, ventilation et auxiliaires +	EVOLUTION
	Cep,nr [kWh _{ep} /(m ² .an)]	Consommations d'énergie primaire non renouvelable	1. éclairage et/ou de ventilation des parkings 2. éclairage des circulations en collectif 3. électricité ascenseurs et/ou escalators	NOUVEAU
Carbone	Ic_{énergie} [kg eq. CO ₂ /m ²]	Impact sur le changement climatique associé aux consommations d'énergie primaire	Introduction de la méthode d'analyse du cycle de vie pour l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre des énergies consommées pendant le fonctionnement du bâtiment, soit 50 ans .	NOUVEAU
	Ic_{construction} [kg eq. CO ₂ /m ²]	Impact sur le changement climatique associé aux « composants » + « chantier »	Généralisation de la méthode d'analyse du cycle de vie pour l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre des produits de construction et équipements et leur mise en œuvre : l'impact des contributions « Composants » et « Chantier ».	NOUVEAU
Confort d'été	DH [°C.h]	Degré-heure d'inconfort : niveau d'inconfort perçu par les occupants sur l'ensemble de la saison chaude	Évaluation des écarts entre température du bâtiment et température de confort (température adaptée en fonction des températures des jours précédents, elle varie entre 26 et 28°C).	NOUVEAU

Résumé des six indicateurs évalués dans le cadre de la Réglementation Environnementale 2020 des bâtiments en France métropolitaine (Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, 2020)

Les performances environnementales des bâtiments sont prises en compte dans la RE 2020 en se basant sur le principe d'Analyse de Cycle de Vie (ACV). Les impacts des bâtiments sont donc estimés à l'aide d'un ensemble d'indicateurs environnementaux calculés tout au long de leur cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la destruction ou la déconstruction en fin de vie du bâtiment comme l'illustre la figure 2 (Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, 2020).

On différencie ici les indicateurs environnementaux, comme l'indicateur sur le réchauffement climatique, sur l'eutrophisation, la pollution des eaux, la pollution des sols, etc. et les indicateurs RE 2020 tels que présentés dans la figure ci-dessus.

Si le cadre de la RE 2020 implique le calcul des impacts environnementaux pour toute une série de 27 d'indicateurs environnementaux, seules les évaluations des impacts sur le changement climatique sont prises en compte dans le calcul des indicateurs RE 2020 relatifs au carbone et donc seuls les impacts sur le changement climatique sont soumis à des exigences réglementaires.



Le cycle de vie d'un bâtiment (Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, 2020)

L'impact sur le réchauffement climatique est ramené à la surface réglementaire du bâtiment et correspond à la somme des impacts de quatre contributions : « Composants », « Energie », « Eau » et « Chantier », comme le montre la figure 3.



Les impacts sur le réchauffement climatique au niveau du bâtiment sont égaux à la somme des impacts des quatre contributions qui composent le bâtiment (Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, 2020)

Cependant, étant donné que les contributions « Composants » et « Energie » représentent à elles deux environ 90% des impacts totaux à l'échelle d'un projet, la RE

2020 réglemente spécifiquement deux indicateurs RE 2020, $I_{\text{Cénergie}}$ et $I_{\text{Cconstruction}}$, exprimés en kg éq CO₂/m². Le premier représente les impacts liés à la contribution « Energie » ramené à la surface, le deuxième les impacts liés aux contributions « Composants » et « Chantier » (Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, 2020). Ainsi, seuls les impacts sur le réchauffement climatique liés à aux contributions « Energie », « Composants » et « Chantier » sont soumis à des exigences dans le cadre de la RE 2020.

Cette nouvelle réglementation française représente une réelle innovation par rapport aux précédentes en imposant la prise en compte des émissions du bâtiment sur son cycle de vie, à travers l'introduction de l'ACV. Or, le bâtiment, en plus d'être un gros consommateur d'énergie, un gros producteur d'émissions de gaz à effet de serre, est aussi un important consommateur de ressources minérales et métalliques. Le CSTB souhaite donc promouvoir des approches d'Economie Circulaire (EC).

En effet, en France, plusieurs textes réglementaires font référence à l'EC, qui a fait son apparition pour la première fois dans la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (TEPCV) en 2015 (Légifrance, 2015b). Cette loi fixe comme objectif d'atteindre une valorisation matière de 70% des déchets du secteur du bâtiment à l'horizon de 2020.

Afin de renforcer le cadre législatif national relatif à l'EC, la loi Anti-Gaspillage et pour une Economie Circulaire (AGEC) a été promulguée en 2020 et introduit des axes principaux pour le secteur du bâtiment (Légifrance, 2020) :

- Favoriser le réemploi et la réutilisation ainsi que l'économie de la fonctionnalité
- Mettre en place la filière de Responsabilité Elargie du Producteur (REP)
- Lutter contre les dépôts sauvages

Concernant la consommation de ressources dans le bâtiment, à titre d'exemple, la construction d'une maison individuelle nécessite en moyenne 1.2 tonne de matériaux par m² de surface habitable et celle d'un logement collectif 1.6 tonnes par m² de surface habitable. 96% de ces matières, sont des minéraux et des métaux (Leonardon et al., 2018), le tableau 1 montre la consommation pour la construction de logements neufs en 2015 en France en fonction des différents matériaux (Leonardon et al., 2018).

Consommation des matériaux mobilisés dans la construction des logements neufs en France en 2015 (Leonardon et al., 2018).

Matériau	En milliers de tonnes	En pourcentage
Acier	679	2%
Aluminium	18	0%
Ardoise	68	0%
Autre	238	1%
Autres isolants biosourcés	8	0%
Autres métaux	5	0%
Autres plastiques	230	1%
Bois autre	399	1%
Bois d'œuvre feuillus	115	0%
Bois d'œuvre résineux	406	1%
Bois pour isolants	17	0%
Ciment	4402	10%
Cuivre	21	0%
Granulats	18045	42%
Laines minérales	97	0%
Plastiques alvéolaires	88	0%
Plâtre	1341	3%
Sable	13931	32%
Terre cuite	2825	7%
Verre	95	0%
Zinc	1	0%
TOTAL	43030	100%

Face à cette boulimie de ressources, le secteur du bâtiment génère environ 14% des déchets en France. 81% correspondent à des déchets inertes, 16% à des déchets non dangereux et 3% des déchets dangereux (Tirado, 2022).

Face à l'importance de ce secteur pour subvenir à nos besoins, et face à son empreinte environnementale importante, de nombreux acteur·rice·s convergent sur la nécessité d'opérer une transition au sein de ce secteur pour améliorer sa gestion de ressources minérales et métalliques et diminuer son impact sur ces dernières.

C'est dans ce contexte que cette thèse CIFRE, financée par le CSTB et l'ANRT et menée au sein de la Direction Energie et Environnement au CSTB Grenoble a vu le jour. Nous considérons que cette thèse contribue à l'objectif 11 de développement durable qui vise à « *Faire en sorte que les villes et les établissements humains soient résilients et durables* ».

L'objectif initial de cette thèse était de développer un indicateur qui évalue la pression sur les ressources minérales et métalliques dans une approche performancielle de l'économie circulaire.

Les questions de recherche établies à la suite de cet objectif sont :

- Quels sont les enjeux liés à l'exploitation des ressources minérales et métalliques ? (Chapitre 1)
- Comment les pressions sur les ressources minérales et métalliques sont abordées par l'Analyse de Cycle de Vie et les méthodes d'évaluation absolue de la soutenabilité environnementale dans le cadre du secteur du bâtiment ? (Chapitre 2)
- Comment sont actuellement évaluées les pressions sur les ressources minérales et métalliques dans le cadre de l'ACV ? Quelle méthode de caractérisation ACV relative aux ressources minérales et métalliques parmi celles identifiées est la plus adaptée pour une approche d'évaluation absolue ? (Chapitre 3)
- Quel indicateur proposer pour représenter la pression sur les ressources minérales et métalliques d'un projet dans le secteur du bâtiment, dans une approche absolue et non relative ? (Chapitre 4)

Pour répondre à cette question, nous proposerons un indicateur qui vise à évaluer la capacité d'un projet de construction à ne pas mobiliser les ressources minérales et métalliques issues de l'« *envirosphère* ». A cette fin, plusieurs sous-questions seront abordées :

- Comment estimer les gisements de produits de construction et de matériaux minéraux issus du réemploi, réutilisation et recyclage et qui peuvent être disponibles pour un projet de construction ? (Chapitre 5)
- Comment assigner les gisements pour définir des budgets soutenables au niveau du projet étudié ? Comment définir les besoins en produits et ressources d'un projet pour les comparer aux budgets assignés ? (Chapitre 6)
- Quelle est la robustesse de la méthode proposée ? (Chapitre 7)

Cette étude vise à présenter les développements méthodologiques et une preuve de concept d'une méthode d'évaluation absolue de la soutenabilité de la consommation des ressources minérales et métalliques dans le secteur du bâtiment et est organisé selon huit chapitres :

- Le premier chapitre présente les enjeux liés à l'exploitation des ressources minérales et métalliques.
- Le deuxième chapitre a pour objectif d'exposer un état de l'art sur la manière dont les ressources minérales et métalliques sont adressées dans les différentes méthodes d'évaluation identifiées.
- Le troisième chapitre vise à investiguer les méthodes d'Evaluation d'Impacts de Cycle de Vie (EICV) pour une approche d'évaluation absolue de soutenabilité.
- Le quatrième chapitre détaille les développements méthodologiques de la méthode Mineral and Metal absolute Sustainability Assessment (MiMOSA).
- Le cinquième chapitre propose une méthode d'estimation des taux de réemploi et de réutilisation des produits de construction issus du secteur du bâtiment et estime les flux issus du recyclage en France dans une approche prospective.
- Le sixième chapitre détaille l'opérationnalisation de la méthode MiMOSA à travers une application à une étude de cas.
- Le septième chapitre présente les résultats d'une étude de sensibilité menée sur deux paramètres de la méthode.
- Le huitième chapitre concerne la conclusion et les perspectives de ce travail de recherche.

Chapitre 1. Les enjeux de l'extraction des ressources minérales et métalliques



Exploitation des mines d'argent : population autochtone travaillant comme esclaves pour les Espagnols dans les mines d'argent de Potosi (16ème siècle). Gravure tirée du livre de Theodor de Bry (1527 - 1598).

1. L'humain, la Nature et les ressources

Depuis la préhistoire, l'humain évolue dans la nature et consomme les ressources naturelles pour subvenir à ses besoins et se développer. Mais, petit à petit, l'humain est devenu un agent écologique interférant, perturbant et transformant radicalement les écosystèmes. Ces changements, dont certains sont irréversibles et concernent l'ensemble du "Système terre", sont représentés par le cadre des limites planétaires développé depuis 2009, à l'initiative de Johan Rockström, Will Steffen et plusieurs dizaines de chercheurs et chercheuses (Boutaud & Gondran, 2020; Rockström, 2009; Steffen, Richardson, et al., 2015). En 2022, cinq frontières planétaires sont désormais franchies (changement climatique, érosion de la biodiversité, modifications des usages des sols, perturbation des cycles biochimiques de l'azote et du phosphore, pollution chimique) comparé à trois frontières en 2009 (changement climatique, érosion de la biodiversité, perturbation du cycle de l'azote) (Persson et al., 2022; Steffen, Broadgate, et al., 2015). En plus d'être un agent écologique de taille, la notion "d'anthropocène" formalise le fait que l'humain est devenu aussi un agent *géologique* influant sur les grands cycles géodynamiques de la Terre en dissipant certains éléments chimiques en érodant les sols, les roches, les littoraux et les berges et en modifiant le climat (Steffen, Broadgate, et al., 2015).

Plusieurs définitions de l'anthropocène co-existent actuellement, chacune proposant différentes dates pour le début de cette période et différents rôles des humains au sein des équilibres naturels planétaires. D'après les anthropologues Philippe Descola et Alessandro Pignocchi (Descola & Pignocchi, 2022), on peut considérer que ces bouleversements puisent leurs origines à la Renaissance, au moment où les sociétés occidentales ont opposé ce qui est humain, donc la Culture, à ce qui ne l'est pas, la Nature. Cette séparation entre Culture et Nature a imposé une manière dominante d'appréhender le monde dans les pays occidentaux, marquée par une vision anthropocentrée qui objective, asservit et exploite la nature pour subvenir à nos besoins. Pourtant, dans d'autres civilisations humaines, le concept de « Nature » n'existe pas, l'humain faisant intégralement partie du vivant.

Ce changement de paradigme a contribué à la naissance de l'ère industrielle et a justifié toute forme de destruction, sociale et écologique, faisant ainsi émerger un système basé sur les inégalités et l'asservissement de la Nature (Descola & Pignocchi, 2022).

Cette rupture entre l'humain et le monde vivant auquel il appartient a ainsi mené à la fin de l'Holocène (époque géologique qui dure depuis les 10 000 dernières années,

caractérisée par des températures et des conditions météorologiques particulièrement stables du "système Terre") et marque le début d'une nouvelle époque géologique appelée l'Anthropocène (époque géologique qui a débuté quand l'influence de l'humain sur la géologie et les écosystèmes est devenue significative à l'échelle de l'histoire de la Terre) (Ruddiman, 2013).

Depuis quelques années, le changement climatique est un sujet d'intérêt dans la sphère scientifique mais aussi dans les discours politiques. Au sommet de la Terre à Rio de Janeiro en 1992, la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) a été instituée. Depuis, nombre de Conférences des Parties (COP) ont été organisées, mais les différents enjeux de développement et de protection de l'environnement des différents pays restent souvent antagonistes. Pour faire face à ces dilemmes, certains acteur·rice·s proposent la notion de « croissance verte ».

D'après l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE), la croissance verte a pour but de « promouvoir la croissance économique et le développement tout en veillant à ce que les actifs naturels continuent de fournir les ressources et services environnementaux dont dépend notre bien-être » (OCDE, 2013). Cette notion a été introduite dans le droit français, en 2015, via la loi du 17/08/2015 relative à la transition écologique pour la croissance verte qui vise à définir des objectifs communs pour réussir la transition énergétique et renforcer l'indépendance énergétique et la compétition économique.

Cette loi, ainsi que le concept d'économie verte, proposent de « nouvelles » solutions qui ressemblent à ce qu'a su envisager l'humain jusqu'à présent et qui a mené à la crise environnementale qu'on observe aujourd'hui, et à laquelle ces techniques sont justement censées répondre. Ces solutions n'envisagent la nature que comme un objet à protéger et des ressources à exploiter sans remettre en cause le caractère anthropocentré du développement économique (Lacarrière, 2011).

Cependant, le concept de croissance verte, n'intègre pas dans l'équation les gisements finis des ressources non-renouvelables contenus dans la croûte terrestre, telles que les ressources minérales et métalliques desquelles la transition énergétique est fortement dépendante (Hache, 2021). Or, notre économie et tous nos besoins sont fortement dépendants de ces ressources, que ce soit pour le logement, le transport, l'industrie ou encore l'alimentation.

2. Les métaux, quels enjeux, quels impacts ?

Quand on se penche sur la question des ressources métalliques et l'industrie minière, différents enjeux et problématiques s'imposent à nous ; pour n'en citer que quelques-uns : la disponibilité, les impacts environnementaux, la criticité et les injustices et inégalités sociales associées à la répartition inégale de leurs extractions géographiques et consommations.

2.1 Disponibilité des ressources minérales et métalliques

Tout comme les ressources fossiles, la forte croissance de la consommation des ressources minérales et métalliques conduit à une diminution de leur disponibilité (Mudd, 2013; Prior et al., 2011).

Une idée reçue parfois évoquée est que les réserves exploitées jusqu'à présent ne représentent qu'une toute petite fraction de toutes les réserves que l'humain pourrait exploiter dans le futur, car les ressources seraient présentes en large quantité dans la croûte terrestre, en dessous des glaciers, dans les fonds marins, ou même dans l'espace, sur d'autres planètes ou météorites (Coffey, 2009; Ricky J., 2009). Cette idée néglige les coûts énergétiques, environnementaux ou économiques qui seraient nécessaires pour accéder à des gisements de plus en plus profonds et de moins en moins bonne qualité, c'est-à-dire des gisements avec des teneurs en métaux très faibles, de l'ordre du pourcent ou du dixième de pourcent, et avec plusieurs métaux en mélange (Mudd, 2013; SystExt, 2021).

Une large littérature sur le sujet est produite depuis quelques années. Elle met en évidence des teneurs en métaux dans les sols de plus en plus faibles depuis plusieurs décennies. Les figures ci-dessous, réalisées par Mudd montrent l'évolution de la teneur en métaux des minerais du fer, du cuivre, du plomb et du zinc (Mudd, 2013). Moins le minerai est concentré en métaux, plus il faut d'énergie pour l'exploiter, à 0,1% il faut consommer 5 fois plus d'énergie et à 0,01% 50 fois plus d'énergie que pour un minerai à 1% (Mudd, 2013).

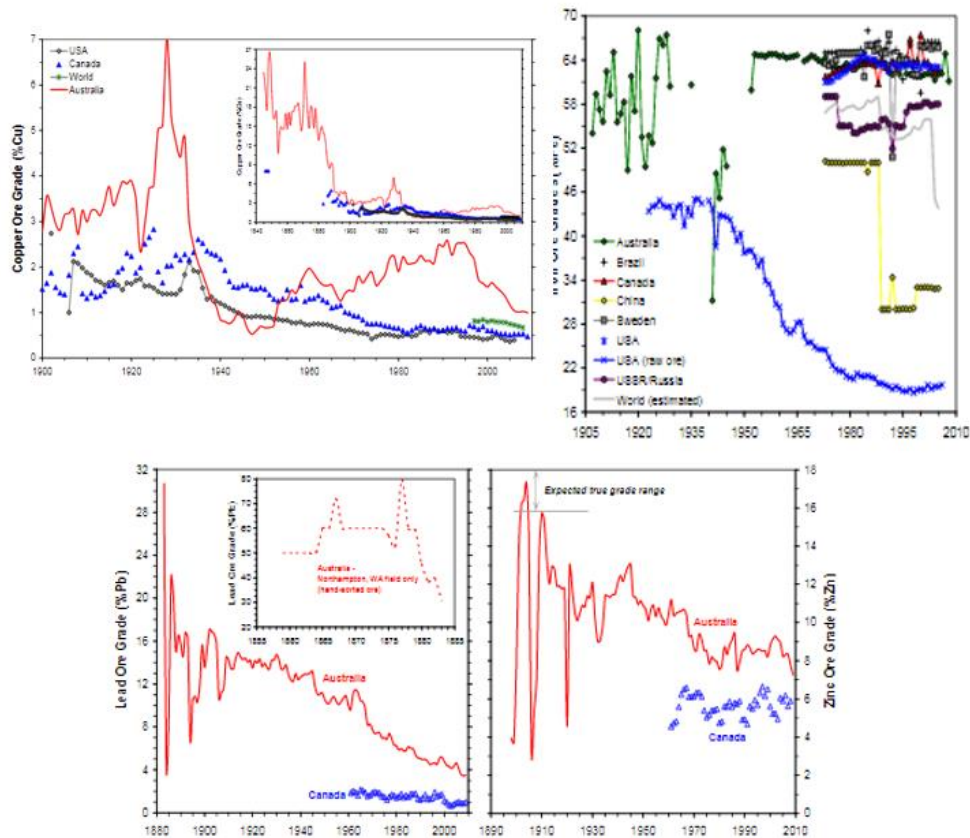


Figure 1-1 Evolution des teneurs en métaux des minerais du cuivre, fer, plomb et zinc pour différentes régions du monde (Mudd, 2013)

Face à cette baisse de concentration, l'industrie minière est allée puiser de plus en plus profond dans la croûte terrestre passant de gisements de surface, à des gisements atteignant des milliers de mètres de profondeur. Par exemple, la mine souterraine d'or de Tau Tona en Afrique du Sud est la mine la plus profonde du monde avec 3900 m de profondeur. Pour illustrer, il faut une heure pour descendre en ascenseur jusqu'au front de taille (Drezet, 2014). Actuellement, au niveau mondial, l'industrie minière consomme à elle seule, pour l'extraction et le traitement des minerais, 400 TWh d'électricité par an, soit environ la consommation totale de l'électricité en France en 2013 (Fleurence, 2018). Et ce coût énergétique ne va qu'en augmentant en creusant de plus en plus loin et profond.

Quant à l'exploitation minière extraterrestre, elle n'apparaît actuellement pas réaliste sur un plan technique, énergétique, environnemental ni économique. Dans une étude, des chercheurs et chercheuses ont estimé qu'un vol spatial entre la Terre et la station spatiale internationale émet 1 150 tonnes d'éqCO₂. La station spatiale internationale se trouve à 400 km de la Terre, Mars à 78 339 000 000 km (Lehoucq et al., 2020). Ces chiffres mettent en évidence les forts impacts environnementaux et les coûts

énergétiques associés à l'exploitation spatiale, rendant illusoire techniquement et énergétiquement l'exploitation des ressources minières extra-terrestres. Nous devons donc nous contenter des ressources présentes sur la croûte terrestre, et plus précisément aux ressources facilement exploitables.

Quand on observe les tendances de production annuelle des ressources (Vidal et al., 2017) et la diminution des réserves facilement exploitables qui en découle, on se rend vite compte que la raréfaction des ressources n'est pas un problème qu'on peut reléguer à un futur lointain, il s'agit plutôt d'une affaire de seulement quelques centaines voire dizaines d'années comme le montre la figure ci-dessous réalisée dans l'étude de Dodson et al., 2012.

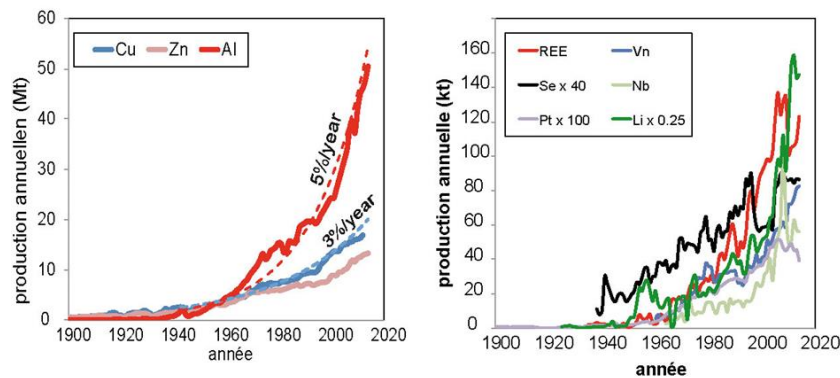


Figure 1-2 La production annuelle du cuivre (Cu), zinc (Zn), aluminium (Al), des terres rares (REE), vanadium (Vn), sélénium (Se), niobium (Nb), platine (Pt) et lithium (Li) (Vidal et al., 2017)

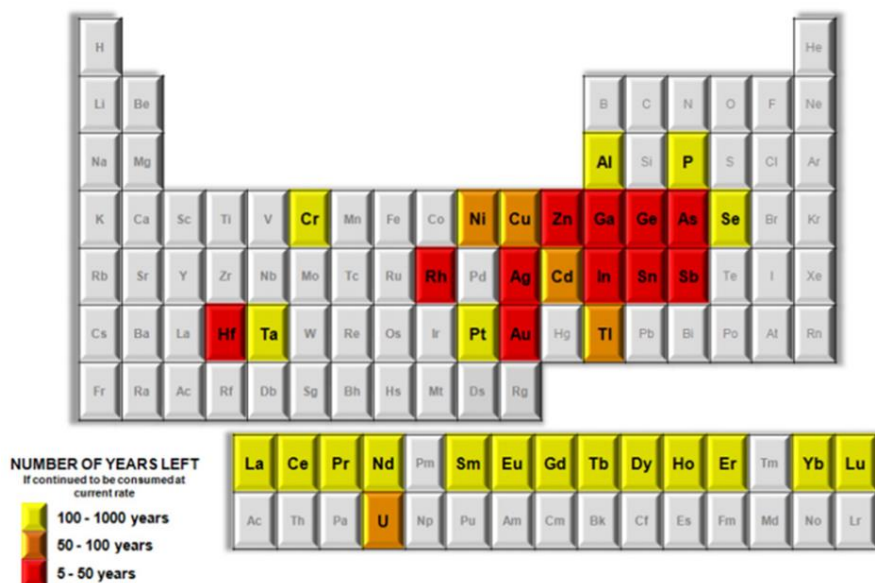


Figure 1-3 Ordres de grandeurs du nombre d'années de réserves des métaux rares et précieux restantes si la consommation et l'élimination se poursuivent au rythme actuel (Dodson et al., 2012)

2.2 Les impacts environnementaux de l'industrie minière

Lors du congrès mondial de la nature qui a eu lieu à Marseille le 10 septembre 2021, il a été établi que l'exploitation minière est considérée comme l'une des industries ayant le plus fort impact sur la nature en raison des dommages importants qu'elle cause aux écosystèmes (IUCN, 2022). Depuis les années 70, les scientifiques alertent sur les impacts environnementaux et la dévastation des écosystèmes causés par l'industrie minière (Down & Stocks, 1977).

Parmi ces impacts, on peut citer la perte de biodiversité, la déforestation, l'érosion, la production d'une large quantité de déchets dangereux et la contamination des eaux, des sols et de l'air. Une large littérature existe déjà sur le sujet et analyse ces impacts environnementaux d'une façon complète (Down & Stocks, 1977; Rybicka, 1996; Sengupta, 2021; SystExt, 2021). Ce paragraphe a pour but d'en illustrer, d'une manière succincte, uniquement quelques-uns.

Parmi les impacts les plus notables de l'industrie minière se trouve son impact sur l'eau. L'Agence de Protection Environnementale des États-Unis affirme que la contamination des eaux par l'activité minière est l'une des trois plus conséquentes menaces pour la sécurité écologique au monde (SystExt, 2021).

En effet, l'industrie minière est caractérisée par une grande consommation d'eau, particulièrement pour le traitement du minerai. Par exemple, une mine d'or moyenne consomme annuellement autant que 80 000 personnes en France, soit 4 400 000 m^3/an (SystExt, 2021).

Pour faire face à cette forte demande, toutes les sources d'eau, qu'elles soient souterraines ou de surface, sont mobilisées et dans certaines régions, comme au Chili, on a recours à la désalinisation de l'eau de mer (SystExt, 2021). D'un autre côté, la qualité de l'eau subit une dégradation considérable à cause de la grande quantité de résidus générés. Ils contiennent des concentrations élevées de substances dangereuses polluant ainsi les nappes phréatiques et les sols (Mustansar & Nuzhat, 2022). À titre d'exemple, 40 mines génèrent à elles seules environ 80 milliards de litres d'eau contaminée par an (Maharajh et al., 2018). Ces impacts sur la qualité de l'eau des exploitations minières s'inscrivent dans une problématique plus large de cette industrie, la gestion des déchets, et plus particulièrement des déchets dangereux.

Si l'industrie minière consomme des quantités importantes d'eau et de minerais, elle produit aussi inexorablement des quantités tout aussi gigantesques de déchets. En

effet, l'industrie minière génère une très grande quantité de déchets tout au long du processus d'exploitation et de traitement et pose donc de réels enjeux de gestion de déchets faisant d'elle l'industrie qui génère le plus de déchets solides, liquides et gazeux (Down & Stocks, 1977; Rybicka, 1996; Sengupta, 2021; SystExt, 2021).

D'après Briffa et al., 2020, l'industrie minière est la première source d'émissions de métaux lourds dans l'environnement, ceux-ci représentent une part importante des déchets dangereux générés et sont dus à des procédés spécifiques à l'industrie minière. Parmi les métaux lourds relâchés dans l'environnement, on retrouve les co-produits présents dans un même minerai et le processus de traitement du minerai.

- Les co-produits dans les minerais :

Les métaux ne sont pas présents sous une forme pure dans les gisements. Ils sont très souvent présents à de très faibles concentrations et accompagnés d'un large panel de métaux plus ou moins récupérables et qu'on appelle « co-produits ». Les minerais présents dans les gisements, sont des roches qui contiennent le métal utile avec une concentration suffisamment intéressante pour qu'il soit exploité ainsi que ses co-produits.

La figure 1-4 développée par (Nassar et al., 2015) montre pour un métal donné, les co-produits probablement présents dans le même minerai. Par exemple, un co-produit très fréquent de l'aluminium (Al) est le galium (Ga). Le molybdène (Mo), en revanche, n'a pas de mine en tant que telle mais il est produit à hauteur de 50% comme co-produit du cuivre (Cu).

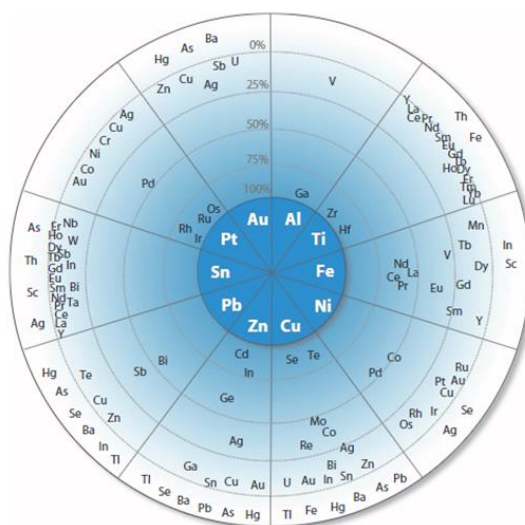


Figure 1-4 La roue de la complémentarité des métaux. Les principaux métaux produits dans les mines forment le cercle intérieur. Les métaux co-produits apparaissent dans le cercle extérieur à des distances proportionnelles au pourcentage de leur production (Nassar et al., 2015)

Plus on se rapproche du centre du cercle, plus il y a de chance que le co-produit soit récupéré et plus on s'en éloigne moins il est récupéré et est rejeté dans les déchets miniers. Si on regarde de plus près les substances susceptibles d'être rejetées on retrouve : le plomb (Pb), le cadmium (Cd), l'antimoine (Sb), l'arsenic (As), le mercure (Hg) et le chrome (Cr) ; des substances toxiques et néfastes pour les milieux naturels et la santé humaine. Ces métaux, à cause des techniques de stockage des déchets miniers inefficaces (SystExt, 2021), se retrouvent dans les sols et les eaux pour plusieurs milliers d'années, ou a minima pour de nombreuses générations d'humains (Briffa et al., 2020).

- Le processus de traitement du minerai :

La deuxième source importante de production de déchets dangereux dans l'industrie minière est le processus de traitement du minerai. En effet, étant donné que les métaux sont présents en faible concentration dans les minéraux et sont accompagnés de plusieurs autres métaux, le processus de traitement du minerai pour accéder à ces métaux est très complexe. Il comprend plusieurs étapes qui utilisent de larges quantités et variétés de réactifs chimiques comme les acides et les bases, et produisent des déchets dangereux comme le montre la figure ci-dessous (SystExt, 2021).

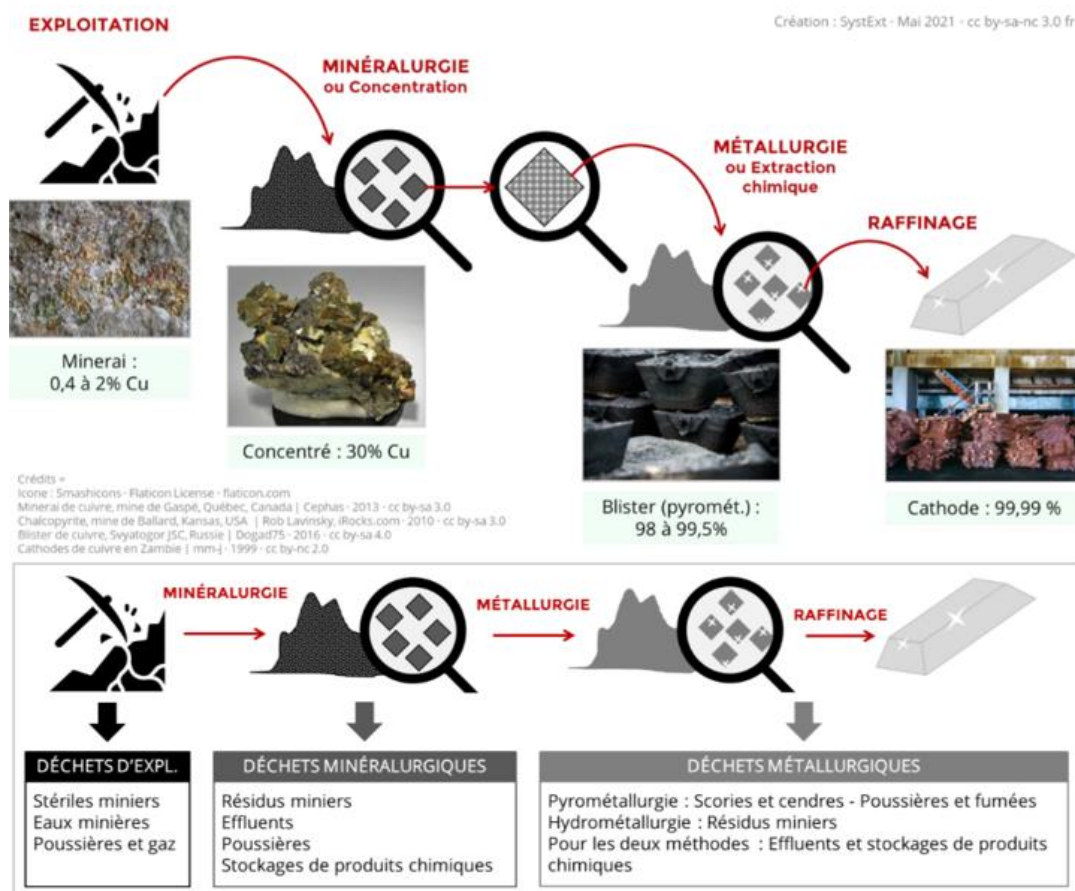


Figure 1-5 Les étapes de traitement des minerais (SystExt, 2021)

Les résidus miniers sont caractérisés par une granulométrie très fine et sont produits en large quantité durant la phase de minéralurgie. Une tonne de résidus est produite pour chaque tonne de minerai traitée et avec un volume très conséquent dû à la quantité d'eau utilisée durant le traitement. Mélangés à l'eau, ces résidus se présentent sous une forme semblable à de la boue et sont communément stockés dans des parcs à résidus (SystExt, 2021).

Ces parcs à résidus posent de sérieux problèmes de gestion, que ce soit à cause des phénomènes d'infiltrations conduisant à la pollution des sols et des eaux souterraines, ou des accidents causés par les ruptures des digues ou les débordements de ces parcs. Ces accidents fréquents se produisent en moyenne entre 3 à 7 fois par an. Depuis les années 2000, 50 ruptures majeures de bassins ont eu lieu, entraînant des dégâts à long terme pour l'environnement et la santé humaine (IUCN, 2022). Pour illustrer, l'image de la figure 1-6 représente la pollution de la rivière Daldykan en Russie, en septembre 2016 à la suite du débordement d'un parc à résidus miniers.

Face à ces impacts conséquents de l'industrie minière, le congrès mondial de l'IUCN, lors de sa session à Marseille, a établi une série de huit résolutions. La troisième résolution recommande une consommation réduite des ressources primaires. La quatrième demande aux gouvernements et aux industries de prioriser et d'adopter des alternatives pour la prospection et l'extraction de matériaux bruts vierges, et de donner la priorité à la récupération des ressources, à la réutilisation et au recyclage des minéraux comme sources d'approvisionnement, ainsi qu'à leur remplacement par des matériaux renouvelables, et d'améliorer l'efficacité des techniques associées à ces méthodes (IUCN, 2022).



*Figure 1-6 Pollution de la rivière Daldykan en septembre 2016 à la suite du débordement d'un parc à résidus miniers
Kokcharov, 2016*

2.3 La criticité des ressources métalliques

Depuis quelques années, une réalité dérangeante et inquiétante s'impose aux pays occidentaux : la Chine est le premier producteur de 28 ressources minérales desquelles leurs économies sont fortement dépendantes et avec des parts de production mondiale dépassant souvent les 50%. La carte de la figure 1-7 montre la part relative de la Chine dans la production minière et métallurgique mondiale, elle représente par exemple 74% d'antimoine, 69% du tungstène et 86% des terres rares de la production mondiale (Kempinski et al., 2023).

Ces monopoles de production induisent que l'approvisionnement de certaines matières premières, surtout des métaux, risque de ne pas être assuré de façon régulière et peut dépendre de conflits socio-politiques (Lèbre et al., 2020). Afin d'évaluer ce risque pour les états occidentaux, la notion de criticité a été développée et définie par la sphère scientifique afin d'accompagner les politiques et les éclairer sur les ressources pour lesquelles leurs économies sont vulnérables.

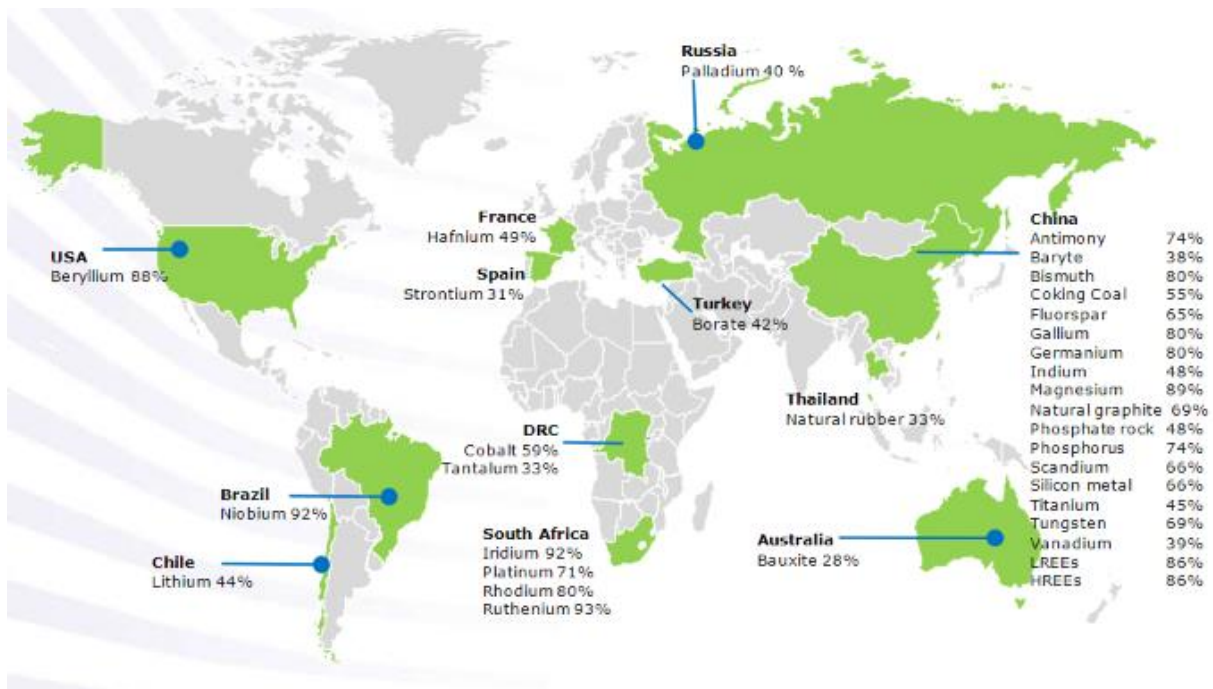


Figure 1-7 Carte représentant la part de production mondiale des métaux par pays, les pays producteurs sont représentés en vert (Kempinski et al., 2023)

Le point de vue des chercheurs et chercheuses relatif à la notion de criticité varie, et ce manque de consensus empêche l'élaboration d'une définition standardisée de la criticité (Eheliyagoda et al., 2020), mais elle peut toutefois être définie comme la

vulnérabilité des économies des pays face au risque que l’approvisionnement d’un matériau donné soit perturbé ou interrompu (Mancini, 2018; Nassar et al., 2015).

La Commission Européenne définit la criticité comme étant la probabilité d’une rupture d’approvisionnement d’une matière et la vulnérabilité d’un système, par exemple une technologie, une entreprise ou un pays, à cette rupture (Schrijvers et al., 2020).

Ainsi, deux aspects rentrent en compte dans l’évaluation de la criticité des ressources ; la vulnérabilité de nos économies et le risque d’approvisionnement (Schrijvers et al., 2020). La vulnérabilité dépend de l’importance économique de la ressource et de notre capacité à lui trouver des substituts pour les fonctions auxquelles elle répond. Ainsi, plus une ressource a de l’importance économique et moins elle a de substituts possibles, plus les économies y sont vulnérables. Quant au risque d’approvisionnement, il dépend de facteurs géologiques, typiquement la distribution uniforme ou non des gisements dans la croûte terrestre et leur qualité et quantité, et de facteurs géopolitiques. La dimension géopolitique dépend de l’offre des pays producteurs et fournisseurs de la ressource mais aussi de la stabilité de leur situation politique. Ainsi, si un pays ou seulement quelques pays monopolisent la production mondiale d’une ressource et connaissent de plus des instabilités politiques, comme des conflits ou des guerres civiles, la ressource connaît un risque d’approvisionnement élevé (Habib & Wenzel, 2016). La figure 1-8 définit les ressources critiques en fonction de la vulnérabilité de nos économies et de leur risque d’approvisionnement (EcoSD & ADEME, 2019).

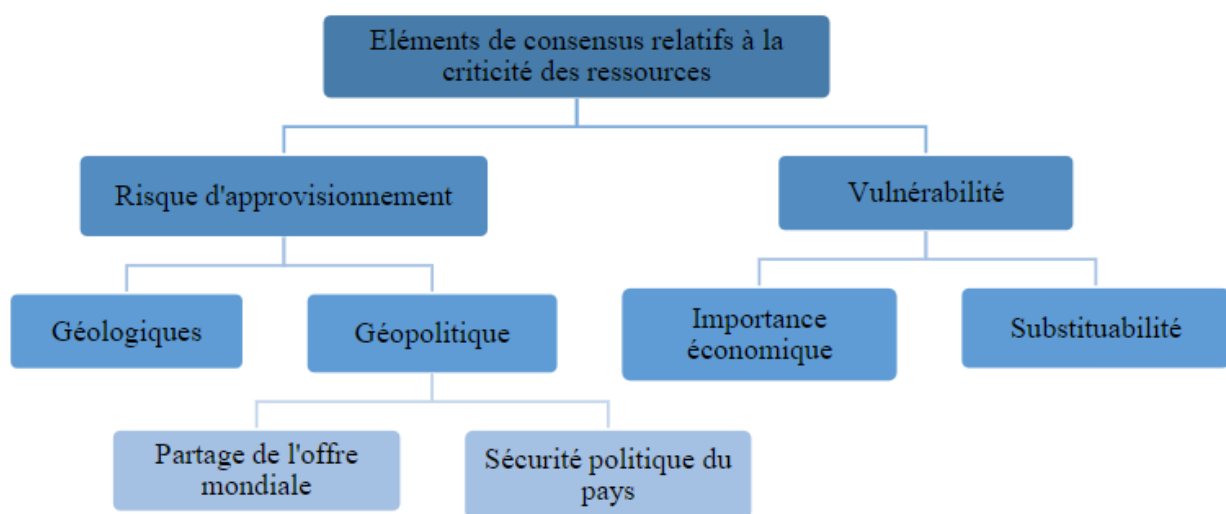


Figure 1-8 Les paramètres définissant la criticité (EcoSD & ADEME, 2019)

Tous les trois ans, la Commission Européenne effectue une évaluation de la criticité au niveau de l'UE pour un large éventail de matières premières et définit ainsi une liste de matières premières critiques (CRM, Critical Raw Materials) ainsi que les technologies clés pour la transition énergétique qui pourraient être affectées. Le dernier rapport en date produit par la Commission Européenne a été réalisé en 2020 et les figures 1-9 et 1-10 montrent respectivement la liste des CRM identifiées ainsi que les matières premières utilisées dans les technologies clés pour les transitions numérique et écologique, et leur risque relatif d'approvisionnement (European Commission, 2020).

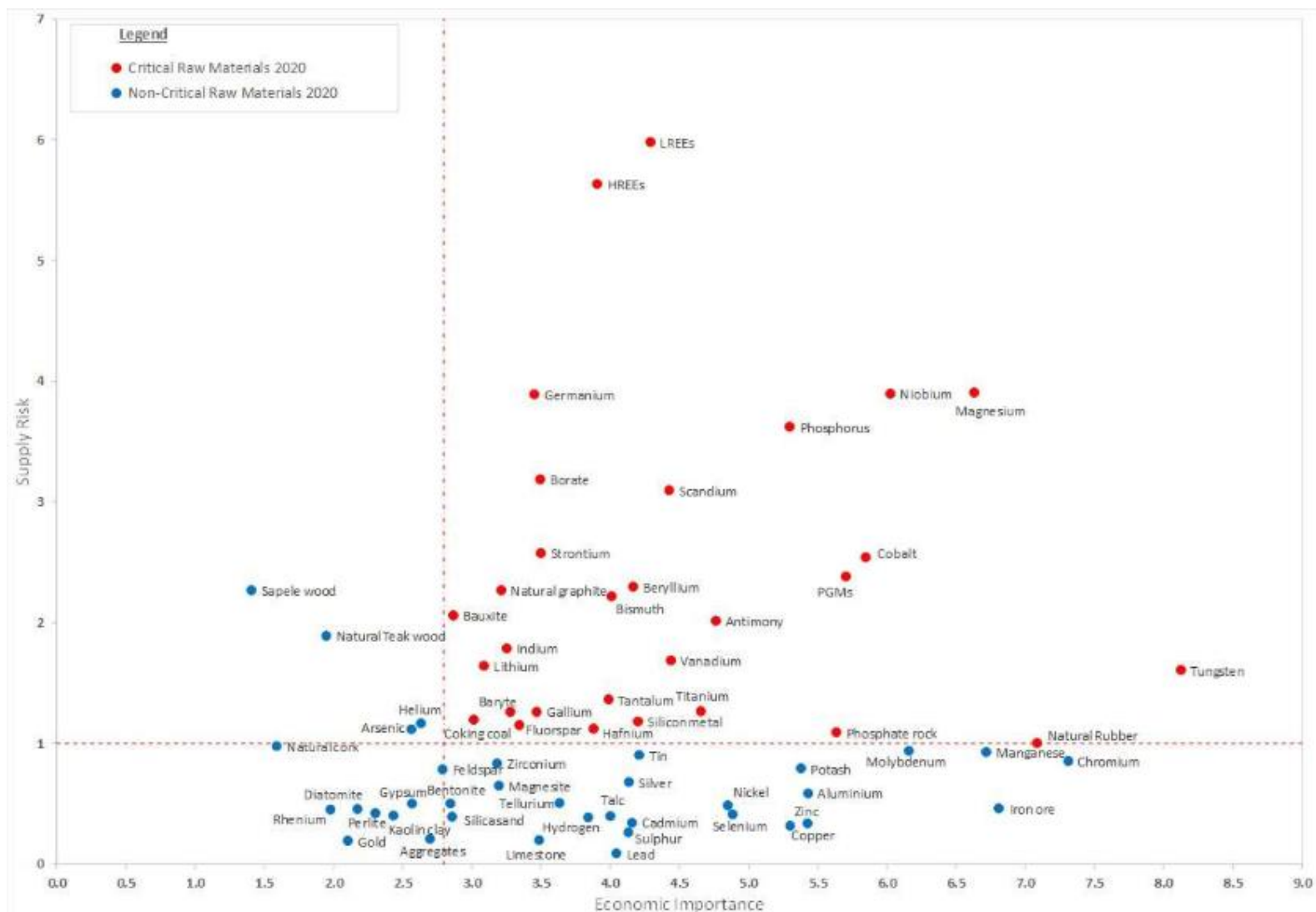


Figure 1-9 Liste des matériaux critiques établie par la Commission Européenne en 2020 (European Commission, 2020)

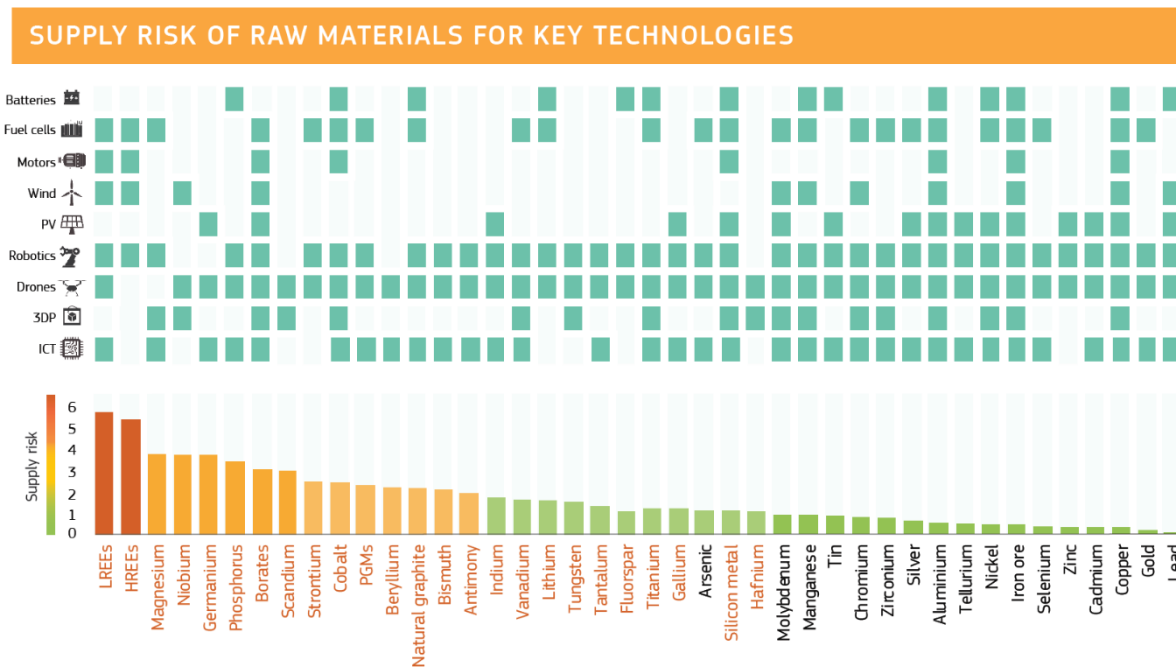


Figure 1-10 Les ressources utilisées dans les technologies clés telles que définies par la Commission Européenne. LREE : Light Rare Earth Elements (Terres rares légères) HREE : High Rare Earth Elements (Terres rares lourdes) (European Commission, 2020)

La Commission Européenne effectue ce travail afin, entre autres, de sensibiliser les pays de l'UE aux risques de perturbation ou de rupture d'approvisionnement en matières premières, de renforcer les nouvelles activités de recyclage dans l'UE et d'encourager l'utilisation des matières recyclées.

2.4 Inégalités sociales associées à la répartition inégale des territoires d'extraction et de consommation des ressources minérales et métalliques

En 1981, Eduardo Galeano écrit dans son ouvrage « *Les veines ouvertes de l'Amérique Latine* », « On prétend qu'à l'époque de l'apogée de la ville de Potosi même les fers des chevaux étaient argent. [...] À Potosi, c'est l'argent qui permet d'élever des temples et des palais, des monastères et des tripots ; il engendra la fête et la tragédie, fit couler le vin et le sang, enflamma la cupidité et multiplia le gaspillage et l'aventure. L'épée et la croix s'avançaient côte à côte dans la conquête et le pillage colonial. Pour arracher l'argent à l'Amérique, capitaines et ascètes, cavaliers en armes et apôtres, soldats et moines se donnèrent rendez-vous à Potosi. Fondus en blocs et en lingots, les viscères de la riche colline alimentèrent de façon substantielle le développement de l'Europe. » (Galeano, 1981).

Le pillage des terres et sous-sols de l'Amérique Latine, mais aussi l'exploitation de la force de travail et de l'esclavagisation des peuples autochtones, depuis la « découverte » jusqu'à nos jours, est un des exemples les plus frappants des injustices sociales engendrées par l'exploitation des ressources minérales et métalliques. Ces injustices sociales puisent leur origine dans le colonialisme puis l'extractivisme.

Le colonialisme désigne une idéologie par laquelle un état ou un peuple assujettit un autre. C'est une pratique justifiée par les dominants à partir d'arguments différentialistes qui prônent la supériorité d'une race, d'une religion, d'une ethnie, etc., par rapport à une autre (Standford Encyclopedia of Philosophy, 2006; Van den Avenne, 2021).

Les pays colonisateurs, en étendant leur territoire sur des espaces occupés par d'autres peuples, vont à la fois asservir ce peuple et exploiter à outrance les ressources des territoires colonisés. En effet, les colons, forts de leur supériorité technique, étaient convaincus qu'ils « étaient appelés à venir tirer du [sous-]sol les richesses immenses dont les indigènes étaient incapables de profiter » (Samson, 2010).

Le terme extractivisme est apparu au début du 21^{ème} siècle pour décrire l'exploitation intensive dont étaient témoins les chercheur·se·s et militant·e·s d'Amérique Latine. L'extractivisme désigne un mode d'accumulation des richesses capitalistes qui s'est structuré avec le colonialisme et qui repose sur un processus d'accaparement des ressources fossiles, minérales, hydriques, forestières, etc., en ignorant aussi bien l'épuisement des ressources engendrées que les impacts sociaux et environnementaux qui s'en suivent.

L'extractivisme, qui représente en soi un renouvellement du colonialisme, met l'accent sur le fait que les communautés présentes sur les sols riches en ressources se font déposséder de ces dernières, plusieurs chercheur·se·s parlent de la « malédiction des ressources ». En effet, ces ressources sont destinées à alimenter l'économie des pays occidentaux qui les exploitent. Les gains financiers qu'en tirent les populations autochtones sont très minimes, voire négatifs. Ce système perpétue un large panel de dominations en déplaçant ainsi les richesses du Sud global (groupement de pays hétérogène avec des PIB et Indice de Développement Humain par habitant·e faible) vers le Nord Global (Duc, 2017; Monange & Flipo, 2019).

Ces deux pratiques de domination, par leurs mécanismes, sont encouragées par l'aspiration d'accumuler les richesses, qui passe par l'exploitation des ressources, notamment minérales et métalliques.

Et ces injustices persistent jusqu'à nos jours. La carte ci-dessous montre les luttes actuelles qui sont menées contre des projets miniers dans le monde, on observe bien une forte concentration dans les pays du Sud global, notamment en Amérique du Sud.

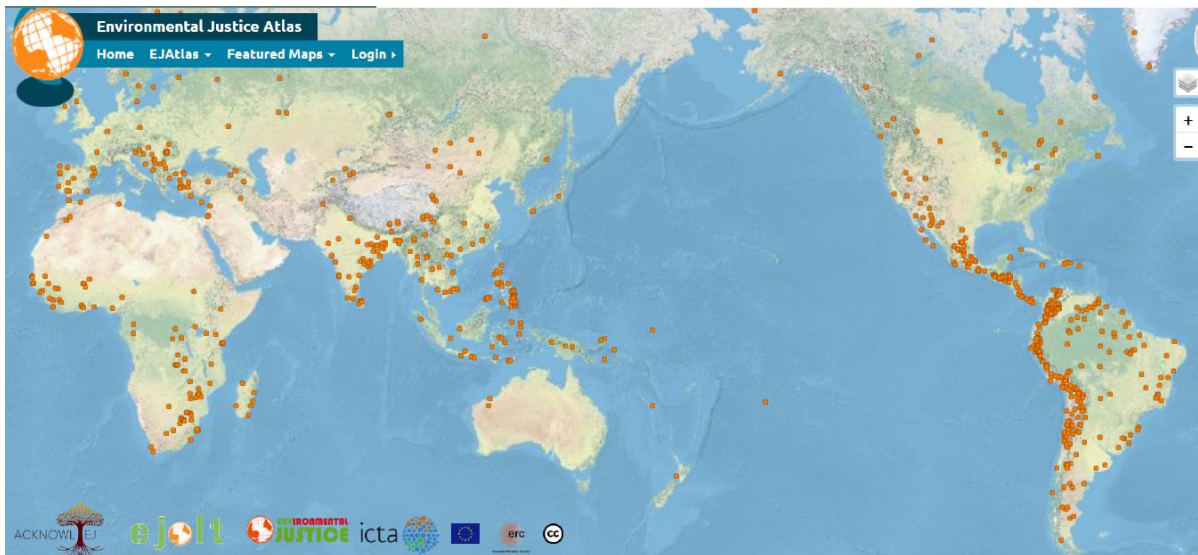


Figure 1-11 Carte des luttes contre les projets d'extraction minières, chaque point orange représente une lutte source: Environmental Justice Atlas, 2022

Les dominations sociales issues de l'exploitation minière ne peuvent être ignorées et doivent être prises en compte dans la façon d'adresser le problème des ressources en particulier, et de la crise environnementale en général. La France doit particulièrement prendre en compte ces dominations sociales au vu de son histoire coloniale et de l'implantation de plusieurs entreprises à l'étranger, en Afrique notamment.

3. Les ressources minérales, plus que de simples cailloux, l'exemple du sable

Il y a presque autant de grains de sable dans la Terre que d'étoiles dans l'univers. D'après les experts, il y aurait 120 millions de milliards de tonnes de sable sur Terre (ADEME, 2020) !

Une quantité si vertigineuse qu'on pourrait penser que le sable, qui se trouve dans le désert, dans les plages ou encore au fond des océans, des rivières et des lacs, est une ressource infinie et ne pourra jamais manquer.

Pourtant le sable devient une des ressources les plus critiques. D'un côté, la grande majorité de ce sable est impropre à l'utilisation à cause des caractéristiques physiques de ses grains, comme le sable du désert par exemple, ou est difficilement extractible. D'un autre côté, le cycle de régénération naturel du sable est perturbé par les barrages qui empêchent les sédiments de se diriger vers la mer et les plages via les rivières (Toniolo & Schultz, 2005; Vörösmarty et al., 2003).

La criticité du sable est aussi due à l'importante demande de cette ressource, le sable est la 2^{ème} ressource la plus utilisée après l'eau (ADEME, 2020; Mette et al., 2019), on le retrouve dans le béton, le verre, les ordinateurs et les téléphones (silicium), les routes, les peintures, les produits ménagers ou encore les produits cosmétiques (ONU, 2022). Notre économie est donc fortement dépendante de cette ressource.

Pourtant, et malgré les impacts environnementaux et sociaux de son extraction, les enjeux liés au sable sont très peu voire pas du tout pris en compte, ni par les décideur-se-s, ni les pouvoirs publics ni les entreprises (ONU, 2019). Les citoyen-ne-s sont très peu sensibilisé-e-s à ces enjeux et aux conséquences de l'épuisement du sable.

Le sable est donc souvent extrait et utilisé sans étude sérieuse qui évalue les conséquences sur l'environnement et les populations des pays producteurs. Chaque année, on estime qu'entre 27 et 40 milliards de tonnes de sable sont extraites (ADEME, 2020), mais ces chiffres sont d'une grande incertitude. On ne trouve des données fiables sur la production du sable que dans certains pays et une bonne partie du sable est extraite d'une manière illégale (ONU, 2019).

Au Maroc par exemple, la moitié du sable utilisé provient de l'extraction illégale sur les côtes¹. Mais, en utilisant l'évolution de la production du ciment pour avoir une idée sur l'évolution de l'extraction du sable, on observe que l'extraction du sable a au moins triplé au cours de ces deux dernières décennies, et vu les dynamiques d'urbanisation de plusieurs régions, cette tendance ne va qu'en s'accéléralant (ADEME, 2020; ONU, 2019).

Face à la demande croissante en sable, une activité d'extraction de sable marin a été développée et augmente au fur et à mesure que les réserves de sable terrestre s'épuisent et que la demande flambe.

¹ Documentaire : Le sable : enquête sur une disparition, [Le sable : enquête sur une disparition - ARTE Boutique](#)

Cependant, cette activité extractive pose de nombreux problèmes environnementaux. Afin d'extraire le sable marin, des bateaux aspirent le sable des dunes sous-marines ce qui crée des trous dans le fond des océans et des mers. Avec le mouvement de l'eau ces trous sont comblés en aspirant le sable provenant des plages, cela contribue à l'érosion du littoral.

L'érosion du littoral provoque plusieurs conséquences désastreuses, on peut citer (Dan Gavriletea, 2017; Farahani & Bayazidi, 2018; Sreebha & Padmalal, 2011) :

- Les impacts sur la faune et la flore présentes sur les plages qui conduit à leur disparition.
- La salinisation des terres agricoles vu qu'avec l'érosion des côtes l'eau de mer s'infiltrer plus facilement à travers les estuaires.
- Les impacts sur le tourisme et la pêche, diminuant ainsi les revenus d'une population déjà très pauvre étant donné que cette extraction abusive se fait souvent dans des pays à faibles revenus comme le Cambodge, augmentant encore plus les inégalités sociales²
- La destruction d'une protection naturelle contre les tempêtes et les intempéries maritimes.

En plus de ce phénomène d'érosion du littoral et de ces conséquences, la faune et la flore présentes dans les fonds marins sont aspirées en même temps que le sable. Ceci contribue à l'érosion de la biodiversité maritime étant donné que ces espèces constituent la base de la chaîne alimentaire marine.

L'extraction illégale du sable, en plus des conséquences environnementales qu'elle présente, induit des conséquences sociales dans de nombreux pays : en Inde, au Cambodge, au Maroc, au Sénégal, ou à Zanzibar. Majoritairement des pays d'Afrique ou d'Asie.

Des organisations criminelles n'hésitent pas à recourir au travail de mineur·e·s et trafiquent du sable en l'extrayant d'une manière illégale dans ces pays. Les populations voient ainsi leurs plages disparaître les unes après les autres alors qu'il leur avait fallu des milliers d'années pour se constituer et leurs rivières se détruire (Mouterde & Depardon, 2022; Salopek, 2019). Ces activités détruisent des écosystèmes entiers mais ont aussi des impacts sociaux négatifs non négligeables.

² Documentaire : Lost world, [Lost World by Mam Kalyanee - YouTube](#)

Depuis une dizaine d'années, plusieurs titres de presse, des enquêtes et des reportages alertent sur les conditions de travail désastreuses des mineur-e-s de sable, et aussi sur des affaires de meurtres liées à cette activité illégale. Le projet Green Blood Project (Forbidden stories, 2019), réalisé par le collectif de journalistes Forbidden stories, a mis en lumière plusieurs affaires de meurtre de journalistes qui enquêtaient sur l'extraction illégale du sable. Par exemple, en 2015, le journaliste Jagendra Singh fut roué de coups et brûlé à vif après avoir dénoncé les forts liens du ministre des Affaires sociales, Rammurti Verma, avec la mafia du sable, en Inde. Jagendra Singh succomba à ses blessures quelques jours après, les autorités avaient alors conclu à un suicide. Des années plus tard, l'enquête menée dans le cadre du Green Blood Project a mis en lumière des preuves incontestables qui montrent l'implication des autorités et de la police dans le meurtre de Jagendra Singh sous l'ordre du ministre Verma.

Ces impacts, sociaux et environnementaux, touchent en particulier et directement les régions dont le sol est pillé, et les populations habitant ces terres, mais profitent à d'autres régions et d'autres populations plus riches et qui sont loin de ces impacts directs. La grande majorité du sable extrait au Cambodge ou en Malaisie ou en Indonésie profite à Singapour pour agrandir la superficie de son île, ou encore aux projets démesurés de Dubaï Palm Islands et The World, voir l'image ci-dessous.

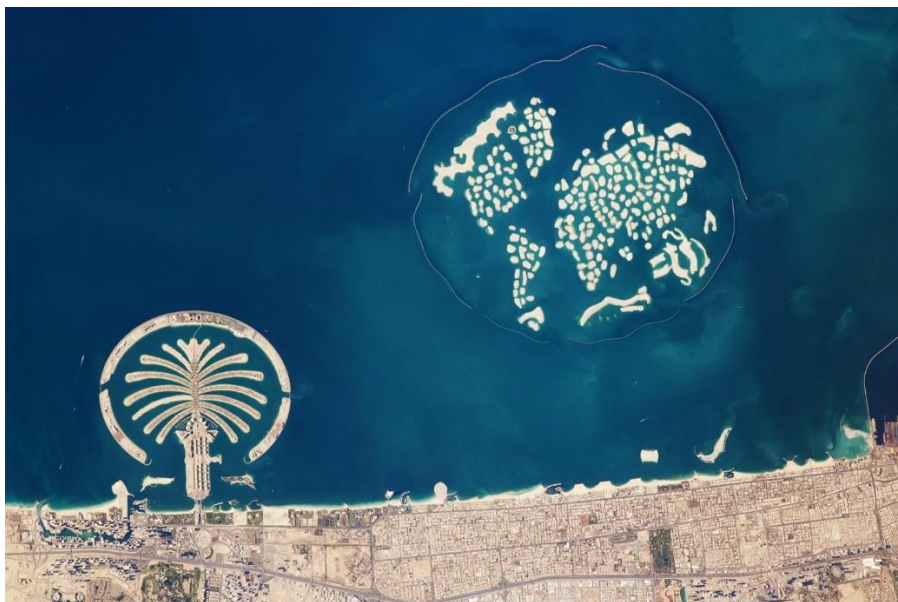


Figure 1-12 Photographie d'astronaute des projets "Palm Jumeirah" et "The World" à Dubaï, Nasa earth observatory

Des pays, comme le Maroc, sont confrontés à un dilemme difficile ; pour répondre à la demande en logement du secteur du tourisme, des rangées d'hôtels et de résidences balnéaires sont construites le long des côtes, ce qui consomme une grande quantité

de sable provenant illégalement des plages qui représentent elles-mêmes un grand atout pour l'attractivité du pays et donc le développement du tourisme.

En France et plus exactement en Bretagne, le ministère de l'Économie et des Finances a accordé, en 2005, un permis d'exploration de recherche de sables marins à des filiales des entreprises Lafarge Granulats et Italcementi. En réaction à ce projet, l'Association de Sauvegarde et de Protection du Littoral de la Presqu'île de Gavres (ASPLPG) dépose un recours auprès du tribunal de Paris en juillet. L'association dénonce les forts impacts environnementaux de ce projet sur les fonds marins ce qui perturberait l'écosystème local et qui mènerait, à terme, à la mise en péril des emplois des pêcheur·e·s locaux·les. L'ASPLPG, ne se faisant pas entendre à la suite de ce recours, crée le collectif le « Peuple des Dunes » qui mobilise l'opinion publique et réussit à rassembler 12 000 personnes sur la plage d'Erdeven pour protester contre le projet d'extraction³.

Cet événement montre un exemple des impacts sociaux de l'extraction du sable en France et sa faible acceptabilité sociale.

4. Conclusion du chapitre

Ce chapitre a mis en lumière les différents enjeux environnementaux et socio-économiques de l'exploitation des ressources minérales et métalliques.

Dans ce travail de recherche, les impacts environnementaux et sociétaux de l'extraction des ressources ne seront pas pris en compte dans la méthodologie proposée. Mais il a été jugé nécessaire de les aborder afin de souligner l'importance de diminuer l'extraction des ressources minérales et métalliques en optimisant leur utilisation, en améliorant leur gestion et en diminuant leur consommation. Nous montrons également que les impacts environnementaux liés à l'extraction et pressions sur les ressources ne sont pas l'apanage des ressources métalliques, mais qu'elles concernent également des ressources minérales en apparence plus abondantes telles que le sable.

Dans ce contexte, les acteur·rice·s du bâtiment ont besoin d'indicateurs représentant la pression exercée par des projets de construction sur ces différentes ressources, et c'est dans ce cadre que s'inscrit ce projet de recherche.

³ Controverses, Mines de Paris :

https://controverses.minesparis.psl.eu/public/promo15/promo15_G5/www.controverses-minesparistech-1.fr/_groupe5/une-dune-au-fond-de-la-baie/l'exploitation-du-sable-en-bretagne/index.html

Chapitre 2. Etat de l'art – Comment les ressources minérales et métalliques sont adressées dans les méthodes d'analyse de cycle de vie et d'évaluation absolue de la soutenabilité environnementale ?

1. Objectifs du chapitre

Dans l'introduction générale, nous avons établi la nécessité d'optimiser l'utilisation et la gestion des ressources minérales et métalliques dans le secteur du bâtiment au vu des enjeux de l'utilisation de ces ressources et du poids de ce secteur dans leur consommation et leur potentielle « régénération ».

Pour ce faire, nous avons fait le choix de nous pencher sur une première piste qui consisterait à intégrer un indicateur sur la pression exercée sur les ressources minérales et métalliques au sein d'une approche d'Evaluation Absolue de la Soutenabilité Environnementale (AESA) en utilisant les méthodes d'Evaluation d'Impact du Cycle de Vie (EICV) existantes.

Ce chapitre a donc pour objectif de, premièrement, définir le concept d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) en se focalisant sur le secteur du bâtiment, ainsi que l'approche AESA, et de présenter les étapes et les résultats d'une revue systématique de la littérature qui a pour but de localiser les publications relatives à nos thématiques de recherche.

2. L'analyse de cycle de vie : cadre général

L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est une méthode qui estime les impacts environnementaux d'un système, produit ou service, sur l'environnement tout au long de son cycle de vie. Il s'agit donc d'une méthode générique, à visée globale et multicritère (ISO 14040, 2006).

L'ACV est un outil recommandé pour l'aide à la décision car il permet de comparer plusieurs systèmes ayant la même fonction en considérant leurs impacts environnementaux potentiels respectifs. Afin de s'assurer que les résultats d'ACV ont été obtenus en suivant la même démarche pour tous les systèmes étudiés, différentes normes et notes méthodologiques cadrent sa méthodologie (ISO 14040, 2006) et son application à différents secteurs d'activité. Dans le secteur du bâtiment, en France, l'ACV est par exemple utilisée pour établir les fiches de déclaration environnementale et sanitaire (FDES) des produits de construction en appliquant la norme européenne NF EN 15 804+A2 (2019) et son complément national NF EN 15 804+A2/CN (2022).

Les normes ISO 14040 définissent les grands principes de l'ACV qui consistent en quatre phases (représentées sur la figure 2-1 (ISO 14040, 2006) : définition des objectifs

et champ de l'étude, analyse de l'inventaire, évaluation de l'impact et interprétation, présentées ci-dessous.

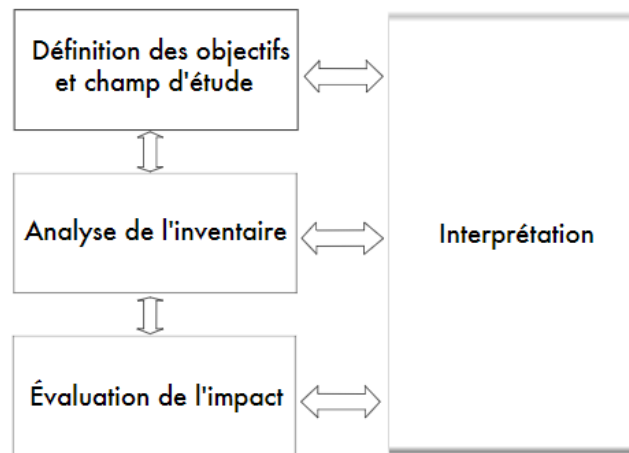


Figure 2-1 Les quatre grandes phases d'une analyse de cycle de vie

2.1 Définition des objectifs et champ d'étude

Cette première phase de l'ACV représente une étape essentielle pour permettre la comparaison de différents systèmes entre eux pour étayer notamment, des prises de décision. Elle consiste à définir l'unité fonctionnelle (UF) du système étudié en quantifiant la fonction à laquelle il permet de répondre en précisant, quand cela est nécessaire, les caractéristiques du système. Par exemple, pour un isolant en laine de verre, l'UF peut être définie comme : 1 m² d'isolant en laine de verre permettant d'assurer la fonction d'isolation thermique sur 1 m² de paroi en assurant une résistance thermique de $R = 5 \text{ K.m}^2/\text{W}$.

2.2 Analyse de l'inventaire de cycle de vie

Cette phase de l'ACV a pour objectif de quantifier les intrants et les extrants du système étudié sur l'ensemble de son cycle de vie (ISO 14040, 2006). Il s'agit donc de quantifier les émissions dans l'air, l'eau et le sol, les extractions des matières premières renouvelables, non renouvelables, énergétiques et non énergétiques nécessaires à la réalisation de la fonction du système telle que définie dans la phase de définition des objectifs et du champ de l'étude.

Au vu de la complexité et du caractère chronophage de la phase de récolte des données, du manque de leur disponibilité et de leur qualité, des bases de données spécifiques contenant des informations sur un très grand nombre de processus sont mises à disposition pour les données « d'arrière-plan » qui ne sont pas spécifiques, ou disponibles, pour le système étudié.

Etant donné que plusieurs processus industriels aboutissent à différents produits et utilisent comme matières premières des produits intermédiaires ou des déchets, il est nécessaire d'affecter uniquement la part des flux et des émissions qui contribuent à la fonction étudiée (ISO 14040, 2006).

2.3 Evaluation des impacts du cycle de vie (EICV)

L'évaluation des impacts de cycle de vie consiste à estimer les impacts potentiels du système étudié en appliquant des facteurs de caractérisation au flux d'inventaire identifié dans l'étape précédente. Il existe, dans la littérature, plusieurs méthodes d'EICV qui décrivent les impacts environnementaux en se basant sur des chaînes de causes à effets qui illustrent les mécanismes d'impact.

Ce projet de recherche s'inscrit spécifiquement dans cette étape de l'ACV et s'intéresse à la catégorie d'impact relative aux ressources minérales et métalliques. Une description et analyse des méthodes d'EICV relatives aux impacts sur les ressources minérales et métalliques est effectuée dans le chapitre 3 de cette étude.

2.4 Interprétation

La dernière phase de l'ACV consiste à interpréter et analyser les résultats obtenus en prenant en compte les différentes hypothèses effectuées dans chacune des autres phases de l'ACV. En effet, les résultats obtenus dans cette phase sont éminemment dépendants des choix pris dans les 3 premières phases de l'ACV, c'est pour cela qu'elle est en parallèle tout le long du calcul ACV et qu'elle doit être conduite d'une manière itérative.

3. L'analyse de cycle de vie appliquée au secteur du bâtiment

Au vu des enjeux et du poids environnemental du secteur du bâtiment, il a été indispensable de proposer un cadre méthodologique d'application de l'ACV dans ce secteur spécifiquement afin d'y démocratiser l'application de l'ACV.

L'émergence de ce sujet en France date des années 90 avec la thèse de (Bernd Polster, 1995) et se consolide dans les années qui suivent grâce à la progression de la préoccupation environnementale dans le secteur du bâtiment. La figure 2-2 montre une frise temporelle qui permet d'illustrer l'entrée de l'ACV dans le secteur du bâtiment (Lebert & Chevalier, 2018).

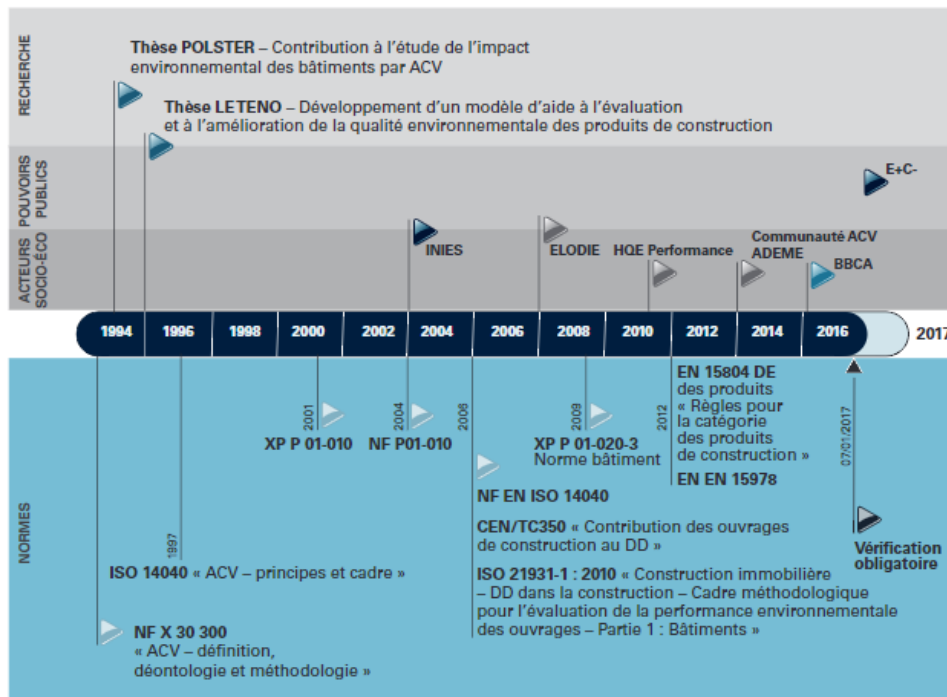


Figure 2-2 Historique de l'entrée de l'ACV dans le secteur du bâtiment (Lebert & Chevalier, 2018)

L'ACV, dans le secteur du bâtiment, est utilisée comme un outil d'évaluation environnementale, elle s'intègre dans le cadre de plusieurs certifications (BREEAM, HQE, etc.) et réglementations (Notamment en France).

Ainsi, la nouvelle réglementation environnementale des bâtiments, la (RE 2020), utilise l'ACV pour estimer les émissions de gaz à effet de serre des bâtiments tout au long de leur cycle de vie pour ensuite calculer un indicateur carbone qui est ultérieurement comparé à des seuils réglementaires.

Afin d'harmoniser les pratiques, des normes spécifiques à l'application de l'ACV dans le secteur du bâtiment existent, à différentes échelles :

- Echelle produit : la norme NF EN 15 804 « Contribution des ouvrages de construction au développement durable – Déclarations environnementales sur les produits – Règles régissant les catégories de produits de construction »
- Echelle bâtiment : la norme NF EN 15 978 « Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Évaluation de la performance environnementale des bâtiments - Méthode de calcul »

L'ACV appliquée aux bâtiments estime les impacts tout au long des étapes de cycle de vie du bâtiment, comme le montre la figure 2-3 tirée de (Lebert & Chevalier, 2018).

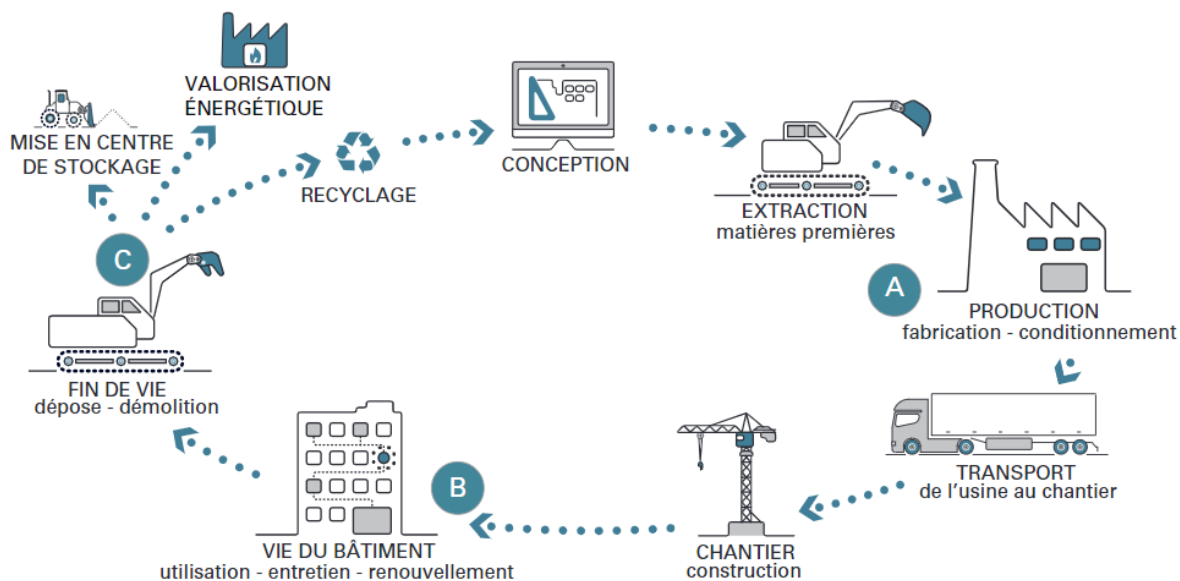


Figure 2-3 Grandes étapes de cycle de vie d'un bâtiment (Lebert & Chevalier, 2018)

Ces étapes, représentées dans la figure 2-4, sont regroupées comme suit dans les normes citées précédemment :

- Etape de production (A1 – A3), de l'extraction des ressources à la sortie de l'usine
- Etape de construction (A4 – A5), de la sortie de l'usine à la construction des bâtiments
- Etape de vie en œuvre (B1 – B2), de la vie en œuvre du bâtiment jusqu'à sa fin de vie
- Etape de fin de vie (C1 – C4), de la démolition ou déconstruction au traitement des déchets
- Module D, il s'agit d'un module en dehors du cycle de vie du bâtiment mais qui comptabilise les bénéfices et charges liés à la valorisation matière et énergétique des flux de matières et de déchets issus du bâtiment, que ce soit durant sa démolition ou déconstruction ou durant des opérations de rénovation ou réhabilitation durant sa vie en œuvre.

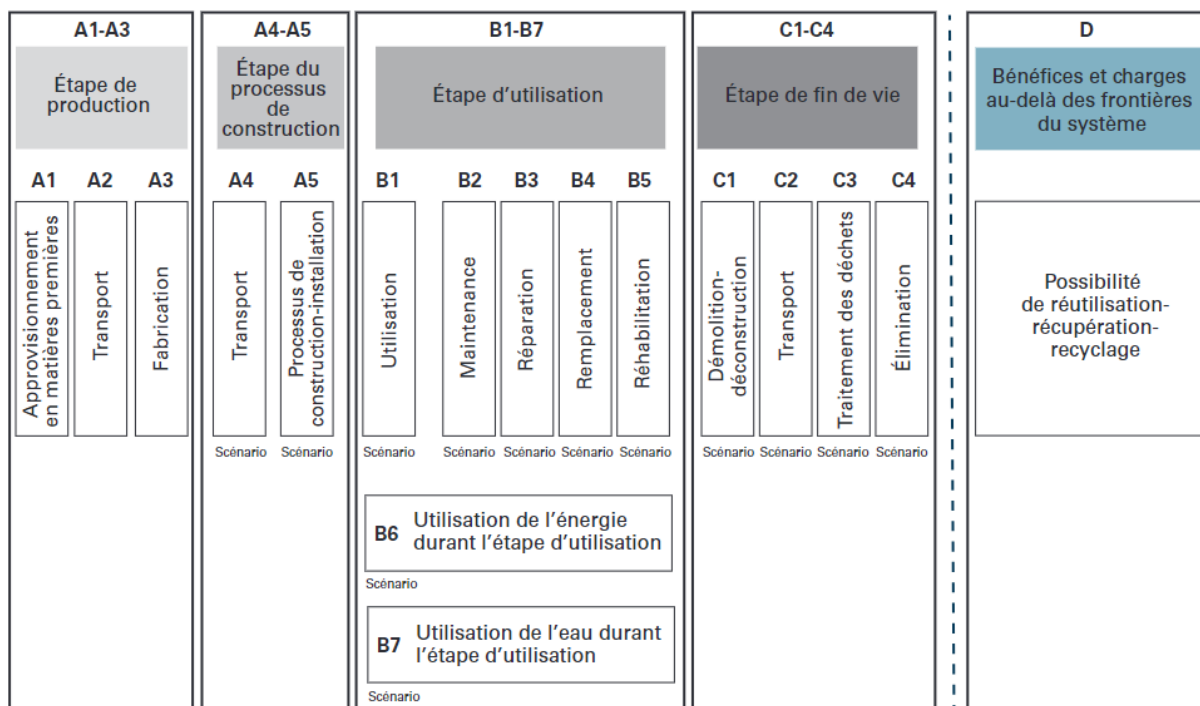


Figure 2-4 Les étapes de cycle de vie d'un bâtiment selon la norme NF EN 15 804

L'ACV est un outil largement utilisé, que ce soit dans la sphère scientifique ou dans le cadre réglementaire. Cependant, l'ACV consiste en une évaluation relative qui permet de comparer un produit ou un système A à un produit ou système B, mais, ne permet pas de réaliser une évaluation absolue des systèmes.

4. Les méthodes d'Évaluation Absolue de la Soutenabilité Environnementale (AESA)

L'approche AESA vise à évaluer si un système donné est soutenable sur le plan environnemental d'une manière "absolue" (Bjørn et al., 2019a).

L'approche AESA propose des indicateurs "absolus" de la soutenabilité environnementale (IASSE) en opposition aux indicateurs relatifs de la soutenabilité environnementale (IRSE) communément utilisés pour la prise de décision, dans des méthodes comme l'ACV.

Les IRSE permettent de comparer un système A à un système B en fonction de leur score environnemental, mais ne permettent pas d'évaluer la soutenabilité des systèmes d'une manière absolue, donc en prenant en compte comme référence la stabilité des écosystèmes et non un système anthropique donné ou une valeur de référence arbitraire ou politique.

La figure 2-5 compare le concept d'évaluation relative et d'évaluation absolue (Bjørn et al., 2016).

Dans l'approche AESA, on peut distinguer deux types de méthodes : les méthodes AESA basées sur l'ACV (AESA-ACV) et les ACV basées sur les limites planétaires (PB-ACV).

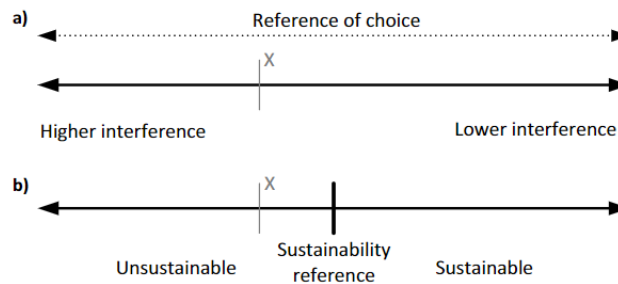


Figure 2-5 (a) évaluation relative (b) évaluation absolue (Bjørn et al., 2016)

4.1 L'approche AESA basée sur l'ACV (AESA-ACV)

L'approche AESA-ACV consiste à comparer les pressions environnementales du système à la capacité de charge de l'environnement pouvant être assignée à ce même système (Bjørn et al., 2019a).

La capacité de charge peut être définie comme "l'impact environnemental maximal qu'un système naturel peut supporter sans subir de changements négatifs dans sa structure ou son fonctionnement qui sont difficilement ou pas du tout réversibles" (Bjørn, Chandrakumar, et al., 2020) où une interférence environnementale fait référence aux changements anthropiques comme les émissions ou l'utilisation des ressources (Bjørn & Hauschild, 2015).

L'impact environnemental représente tout changement qu'un écosystème peut subir, comme une émission de gaz à effet de serre ou une extraction de ressource.

Au vu du nombre croissant des méthodes AESA, (Bjørn, Sim, et al., 2020) ont proposé un cadre méthodologique et un vocabulaire commun pour homogénéiser les pratiques, la figure 2-6, tirée de cette même source, résume cette proposition.

Le cadre global des méthodes AESA basées sur l'ACV consiste en quatre étapes essentielles, comme indiqué dans la figure 2-6.

- L'estimation des impacts environnementaux, consiste à traduire les flux élémentaires du système étudié en impacts environnementaux à l'aide des facteurs de caractérisation des méthodes d'EICV. Il est indispensable que les

impacts estimés soient exprimés avec la même unité que la capacité de charge correspondante.

- L'estimation de la capacité de charge vise à définir l'impact environnemental maximal qu'un système naturel peut supporter sans subir de changements négatifs dans sa structure ou son fonctionnement, qui sont difficilement ou pas du tout réversibles pour chaque impact environnemental et aux niveaux les plus adaptés (régional ou mondial).
- L'assignation de la capacité de charge a pour but de définir la part de la capacité de charge qui peut être assignée au système étudié. La méthode d'assignation choisie dépend de plusieurs principes éthiques. Le choix de la méthode d'assignation peut exercer une grande influence sur les résultats obtenus et il est nécessaire de le prendre en compte lors de l'analyse et l'interprétation des résultats.
- La comparaison des impacts estimés et de la capacité de charge assignée au système étudié. Il s'agit de la dernière étape d'une méthode d'AESA basée sur l'ACV, Si les impacts estimés sont égaux ou inférieurs à la capacité de charge, le système est alors considéré soutenable pour cette catégorie d'impact (Bjørn et al., 2019b).

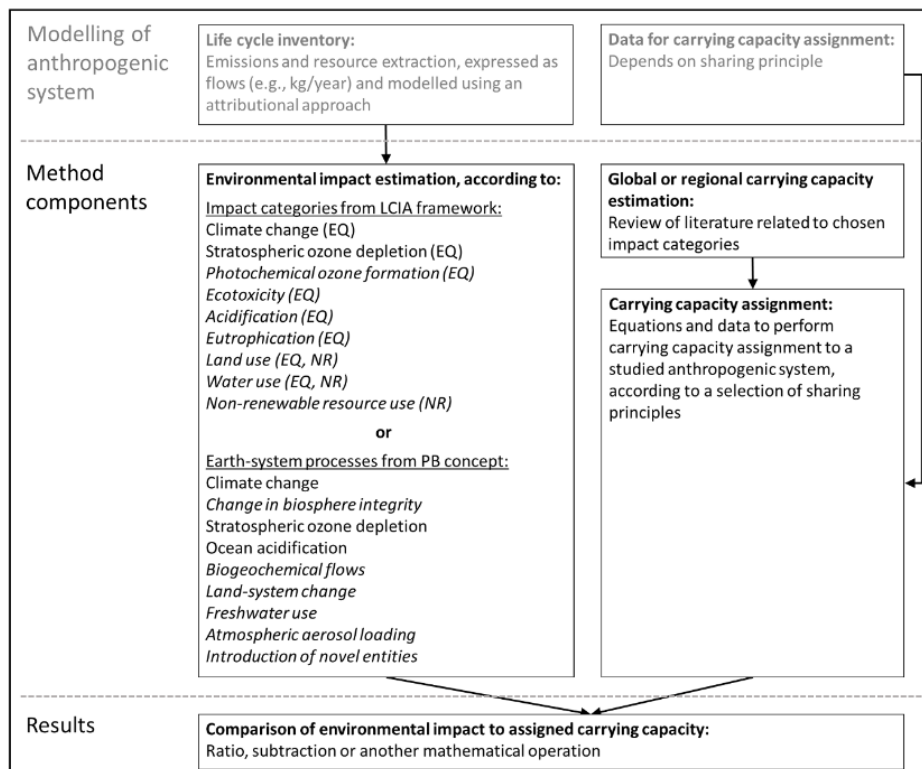


Figure 2-6 Le cadre méthodologique des méthodes AESA basées sur l'ACV Bjorn et al., 2020

4.2 L'ACV basée sur les limites planétaires (PB-ACV)

L'objectif de cette approche est de proposer des méthodes d'EICV directement exprimées dans les métriques des limites planétaires, c'est-à-dire qui calcule des facteurs de caractérisation basés sur les paramètres et les variables de contrôle des limites planétaires (Ryberg et al., 2018a).

Contrairement à l'ACV conventionnelle, les flux élémentaires doivent être exprimés annuellement afin de permettre l'expression des impacts dans les métriques des limites planétaires. Ainsi, l'unité fonctionnelle doit être définie comme la fourniture annuelle d'une fonction et l'inventaire de cycle de vie doit être modélisé pour exprimer les flux élémentaires moyens annuels associés à la réalisation annuelle continue de l'unité fonctionnelle (Andersen et al., 2020).

- Le cadre des limites planétaires :

Le cadre des limites planétaire a initialement été développé sous l'initiative de Johan Rockström en 2009 afin de déterminer « l'espace de fonctionnement sécurisé pour l'Humanité » (Rockström, 2009).

Afin de définir l'espace de fonctionnement sûr, Johan Rockström et 29 chercheurs et chercheuses ont défini et quantifié un ensemble de variables, appelées variables de contrôle. Cette notion est inspirée de l'ingénierie de modélisation de système qui considère un système comme une boîte noire qui réagirait en fonction d'une stimulation d'entrée, entraîné par le changement de la variable de contrôle. Ce système, en réagissant à la stimulation d'entrée change d'état, ce changement est mesuré à l'aide de la variable de réponse (Boutaud & Gondran, 2020). En définissant ces deux variables, la limite planétaire est définie en estimant, à partir de modélisation les points de bascule. Ces points de bascule sont ainsi situés dans une zone d'incertitude. Pour cette raison, les scientifiques ont défini une frontière planétaire égale à la valeur basse de cette zone d'incertitude. La zone sûre est représentée par la zone blanche dans la figure ci-dessous tirée de l'ouvrage de (Boutaud & Gondran, 2020).

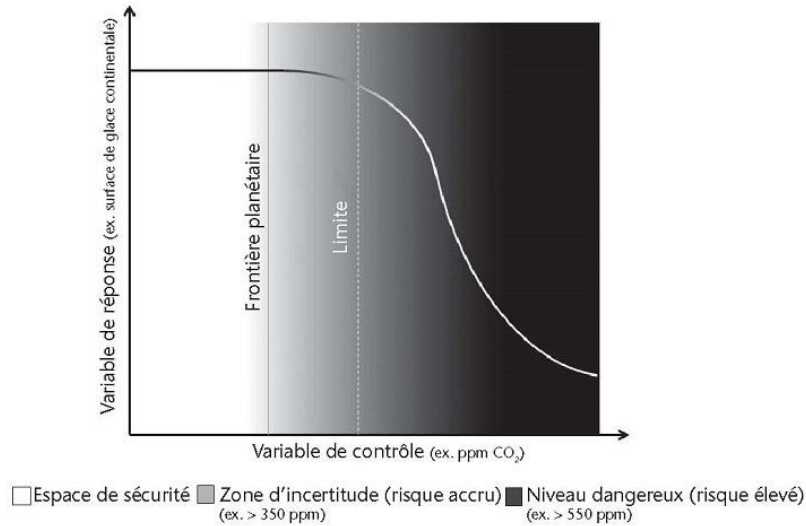


Figure 2-7 Concept de limite et frontière planétaire (Boutaud & Gondran, 2020)

De cette manière, neuf limites planétaires ont été définies par (Steffen, Richardson, et al., 2015) :

- Changement climatique : frontière dépassée selon (Steffen, Richardson, et al., 2015)
- Intégrité de la biosphère : frontière dépassée en fonction de la variable de contrôle relative au taux d'extinction d'espèces par an et par million d'espèces (Steffen, Richardson, et al., 2015). La valeur constatée de la variable de contrôle relative abondance d'espèces en pourcentage de la population constatée sans intervention humaine n'a pas été quantifiée au niveau mondial en 2015.
- Changement d'affectation des sols : frontière dépassée selon (Steffen, Richardson, et al., 2015)
- Entités nouvelles : frontière dépassée selon (Persson et al., 2022).
- Cycle de l'azote et du phosphore : frontières dépassées selon (Steffen, Richardson, et al., 2015)
- Acidification des océans : frontière pas encore dépassée en 2015 selon (Steffen, Richardson, et al., 2015)
- Charge atmosphérique en aérosol : il ne se dégage pas encore de variable de contrôle consensuelle scientifiquement
- Couche d'ozone : frontière non dépassée selon (Steffen, Richardson, et al., 2015)

- Cycle de l'eau douce : frontière dépassée pour l'eau « verte » (eau stockée dans le sol et la biomasse) selon (Wang-Erlandsson et al., 2022) et pas encore dépassée pour l'eau « bleue » (eau rapidement transférée dans les rivières, les lacs et les eaux souterraines) selon (Steffen, Richardson, et al., 2015).

La figure ci-dessous montre les limites planétaires synthétisées en 2022 par (Persson et al., 2022).

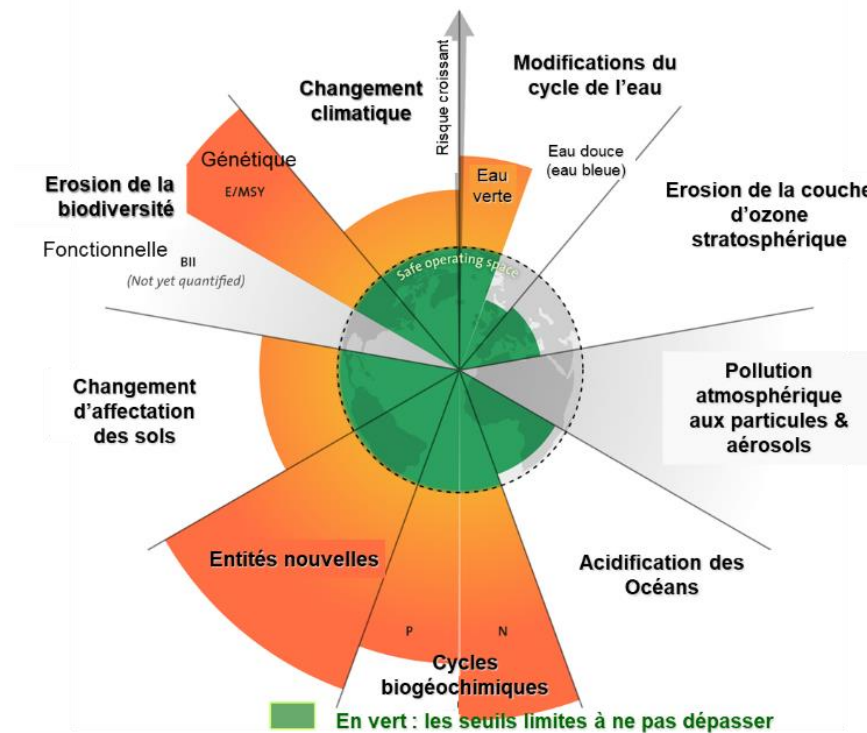


Figure 2-8 Les limites planétaires, traduit de (Persson et al., 2022)

4.3 Les différences entre les approches AESA-ACV et PB-ACV

La différence principale entre les méthodes PB-ACV et les méthodes AESA basées sur l'ACV est que les méthodes PB-ACV estime des facteurs de caractérisation basés sur les variables de contrôle des limites planétaires et les applique au niveau des flux d'inventaire de cycle de vie. Alors que les méthodes AESA basées sur l'ACV estiment d'une part les impacts environnementaux à l'aide des méthodes EICV existantes et d'autre part la capacité de charge, estimée à partir de la littérature sur les limites planétaires, puis assignée au système étudié, puis compare les deux valeurs, qui doivent posséder les mêmes unités.

En d'autres termes, dans la méthode AESA-ACV, les capacités de charge sont adaptées comme facteurs de normalisation pour se conformer aux catégories d'impact des méthodes d'EICV existantes et reconnues (ILCD, par exemple), alors que dans les

méthodes PB-ACV, les facteurs de caractérisation sont adaptés pour correspondre aux variables de contrôle des limites planétaires (Andersen et al., 2020).

5. Prise en compte des pressions sur les ressources minérales et métalliques en ACV et en AESA : Revue systématique de la littérature

Maintenant que le concept d'ACV et d'AESA a été défini, il a fallu identifier les études et méthodes qui traitent de la problématique des pressions exercées sur les ressources minérales et métalliques dans le secteur du bâtiment à l'aide d'une revue systématique de la littérature.

L'objectif principal de cette méthode de recherche bibliographique est de recenser toute la littérature sur un sujet donné, d'une manière impartiale et systématique, en passant par 4 étapes comme définies par (Denyer & Tranfield, 2009) :

- Formulation de la question de recherche
- Identification des études
- Sélection et évaluation des études
- Analyse et synthèse

5.1 Formulation de la question de recherche

Le but de cette première étape est d'identifier l'objet de la recherche en définissant une ou plusieurs questions pour encadrer l'étude. Denyer & Tranfield, 2009 propose la méthode CIMO (Context, Intervention, Methodology, Outcomes) afin de formuler la question de recherche.

Dans le cadre de la problématique des pressions exercées sur les ressources minérales et métalliques dans le secteur du bâtiment et en focalisant sur les méthodes d'ACV et d'AESA, la question peut être formulée ainsi : Comment les pressions sur les ressources minérales et métalliques sont abordées par l'ACV et l'AESA (C) dans le cadre du secteur du bâtiment ? (I) Quelles sont les méthodes (M) existantes qui évaluent l'impact de l'utilisation des ressources minérales et métalliques ? (O).

5.2 Identification des études

Cette étape vise à identifier toutes les publications présentes dans la littérature et liées à la question de recherche en définissant, dans un premier temps, des mots-clés liés à la recherche, puis des équations booléennes reliant ces mots-clés.

Les mots-clés ont été identifiés pour quatre axes de recherche en se basant sur la question précédemment définie :

- i. Ressources minérales et métalliques (C)
- ii. Secteur du bâtiment (I)
- iii. Analyse de Cycle de Vie (ACV) (M – O)
- iv. Evaluation Absolue de la Soutenabilité Environnementale (AESA) (M – O)

Le tableau 2-1 présente la liste des mots-clés pour chaque axe de recherche et l'annexe 2.1 la liste des équations de mots-clés établies en combinant les mots-clés des différents axes de recherche.

Tableau 2-1 Les axes de recherche et les mots-clés associés définis dans le cadre de la revue systématique de la littérature

Research axis	Keywords
Mineral and metallic resources	Mineral and metallic resources; Critical resources; Abiotic resources; Reserves; Depletion; Raw materials; Resource use; Minerals; Metals.
LCA	Impact Assessment; Criticality; Indicator; Life cycle assessment; Life cycle assessment-based indicator; Life cycle impact assessment.
Absolute Environmental Sustainability Assessment (AESA)	AESA; Absolute evaluation; Threshold; Absolute assessment; Target; Absolute sustainability; Carrying capacity; Consumption patterns; Sustainable development goals; Sustainable development; Acceptable environmental burden; Science-based targets; Planetary boundaries
Building sector	Construction; Building; Building performance; Building standards; Building certifications; Building stakeholders.

Les équations de mots-clés ont été définies en croisant les différents axes de recherche définis dans le tableau 2-1.

5.3 Sélection et évaluation des études

Une fois les équations de mots clés définis, une recherche avancée a été effectuée dans la base de données Scopus, cette dernière étant largement utilisée dans le domaine de la recherche car considérée comme l'une des bases de données les plus utilisées et les plus complètes (Moreno-Camacho et al., 2019). Il apparaît qu'une large littérature a été produite sur le sujet. Des critères de sélection basés sur la date (entre 2010 et 2020) et

la langue (français et anglais) ont été ajoutés. Le tableau 2-2 résume les résultats obtenus par équation de mots clés.

Tableau 2-2 Le nombre de publications obtenues à la suite de la recherche bibliographique par équations de mots clés

Number of obtained publications	Research axis combination
5161	Mineral and metal resources AND LCA
466	Mineral and metal resources AND Building sector
1529	Mineral and metal resources AND AESA
163	Mineral and metal resources AND LCA AND Building sector
319	Mineral and metal resources AND LCA AND AESA
19	Mineral and metal resources AND Building sector AND AESA

5.4 Analyse et synthèse

Une première sélection a été réalisée en lisant les titres des publications. Deux articles de revue très complets ont été réalisés par un groupe de travail composé d'expert-e-s de la Life Cycle Initiative (Berger et al., 2020; Sonderegger et al., 2020), nous nous sommes donc appuyés sur ces deux articles pour synthétiser l'axe de recherche relatif aux ressources minérales et métalliques et celui sur l'analyse de cycle de vie, nous n'avons donc pas sélectionné dans nos recherches spécifiques les articles combinant seulement les mots-clés "mineral resources" AND "LCA".

Le nombre et la part des publications sélectionnées après cette première étape peuvent être visualisés à l'aide de la figure 2-9.

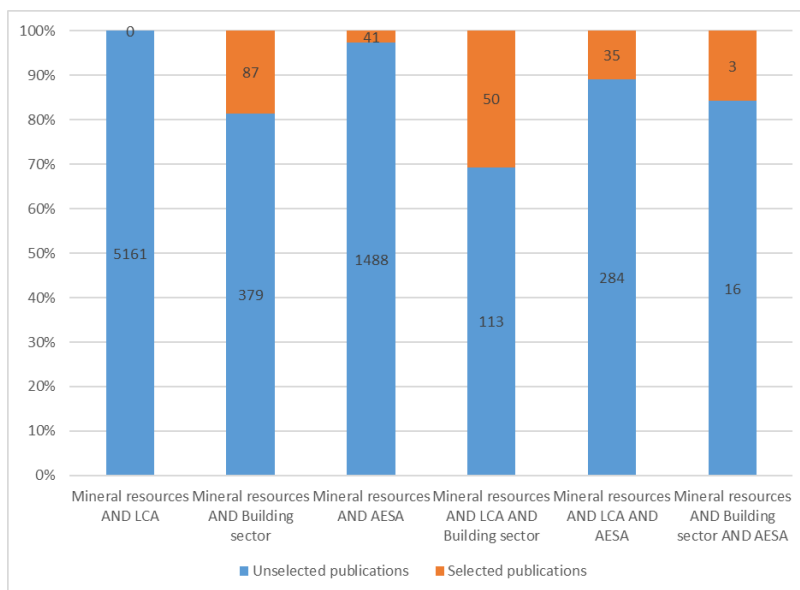


Figure 2-9 Le nombre de publications sélectionnées (en orange) par rapport au nombre de publications non sélectionnées (en bleu)

Une deuxième sélection a été réalisée en lisant les résumés des publications et en identifiant les principaux sujets qu'elles abordent. A la suite de cette deuxième sélection, il s'est avéré que les publications obtenues à l'aide d'une équation de mots clés ne s'inscrivent pas forcément dans les axes de recherche correspondant. Par exemple, à l'issue d'une recherche avec les mots clés relatifs à « Mineral resources AND AESA », nous pouvons obtenir une publication qui traite plutôt de « Mineral resources AND LCA ». Ainsi, il s'est avéré nécessaire de reclassifier les publications obtenues en fonction des thèmes abordés et non des axes de recherche des mots-clés qui ont permis de les obtenir. En supprimant les publications obtenues à l'aide des différentes recherches par mots clés, nous avons sélectionné un total de 134 publications et la figure 2-10 montre les thèmes abordés par les publications.

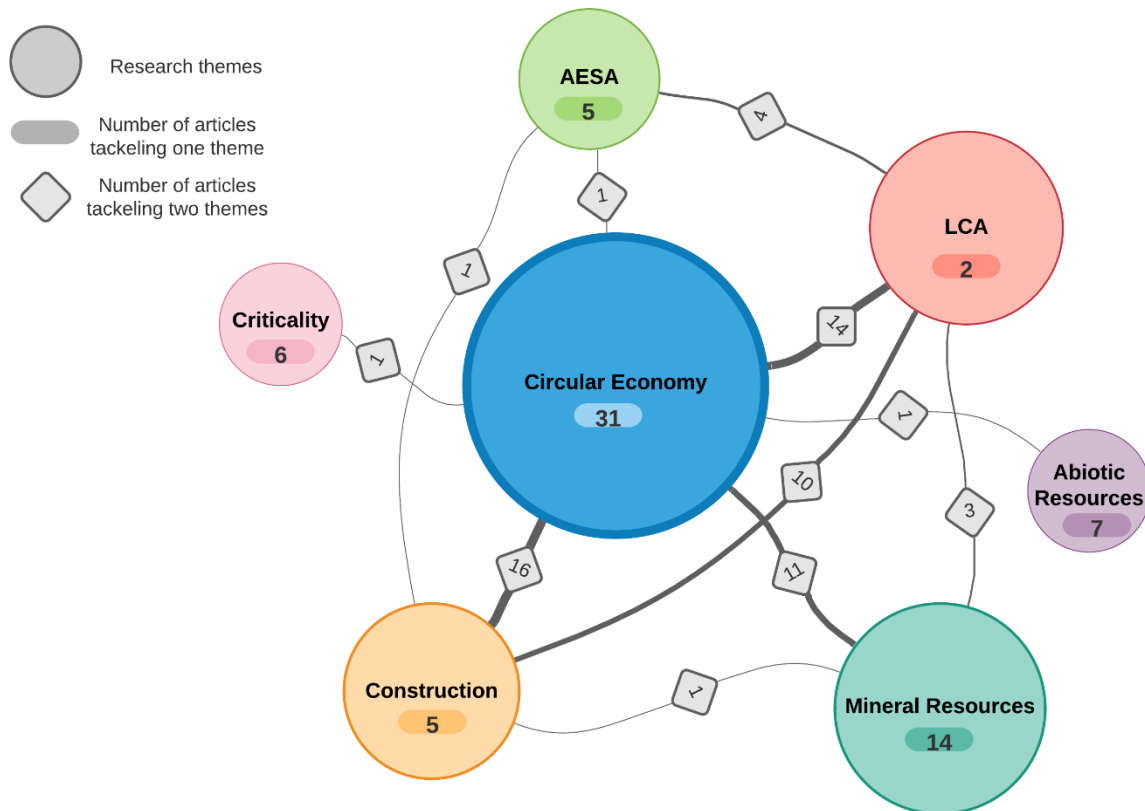


Figure 2-10 Les thématiques de recherche identifiées à l'issue de la revue systématique de la littérature, le nombre d'articles traitant d'une seule thématique est indiqué dans les cercles de la thématique correspondante. Le nombre d'articles traitant deux thèmes de recherche apparaît dans les lignes reliant les deux thèmes de recherche en question.

La figure 2-10 montre la prédominance des publications traitant de l'économie circulaire et le fort lien qu'il y a entre les travaux portant sur l'économie circulaire et le domaine de l'analyse de cycle de vie, le secteur du bâtiment ainsi que les ressources minérales et métalliques. Il est intéressant d'observer que l'économie circulaire ne faisait pas partie des thèmes de recherche abordés au début de la revue systématique de la littérature et donc aucun mot-clé, et par conséquent équation de mots-clés, relatif à l'économie circulaire n'avait été a priori utilisé pour notre recherche bibliographique.

En se basant sur ces premiers résultats, et sans aller plus loin, nous pouvons établir que le concept d'économie circulaire est lié aux enjeux de pression sur les ressources. En effet, compte tenu de l'aspect non renouvelable des ressources minérales et métalliques, leur extraction et leur utilisation sont donc par définition non soutenables et l'économie circulaire apparaît comme l'une des pistes de solutions pour économiser la pression sur les ressources minérales en les substituant par des ressources

secondaires. Le paragraphe suivant a donc pour objectif d'aborder et de définir le concept d'économie circulaire.

6. L'économie circulaire

Le concept d'économie circulaire est apparu dans la littérature scientifique dans le début des années 90 (Pearce & Turner, 1989). Le nombre de publications sur le sujet ne cesse de croître.

Cet engouement pour l'économie circulaire peut être expliqué par une certaine prise de conscience de l'intérêt imminent de sortir d'une économie linéaire et la logique du tout jetable, que ce soit pour diminuer les impacts sur le changement climatique ou pour préserver les ressources. Un autre facteur expliquant cette explosion de publications est l'intérêt que porte la sphère politique à ce sujet. Ceci peut se déduire en observant le graphe ci-dessus, issu de Scopus, qui montre le nombre de publications scientifiques produites en fonction de l'origine des subventions. Nous observons qu'en tête, se trouve la Commission Européenne.

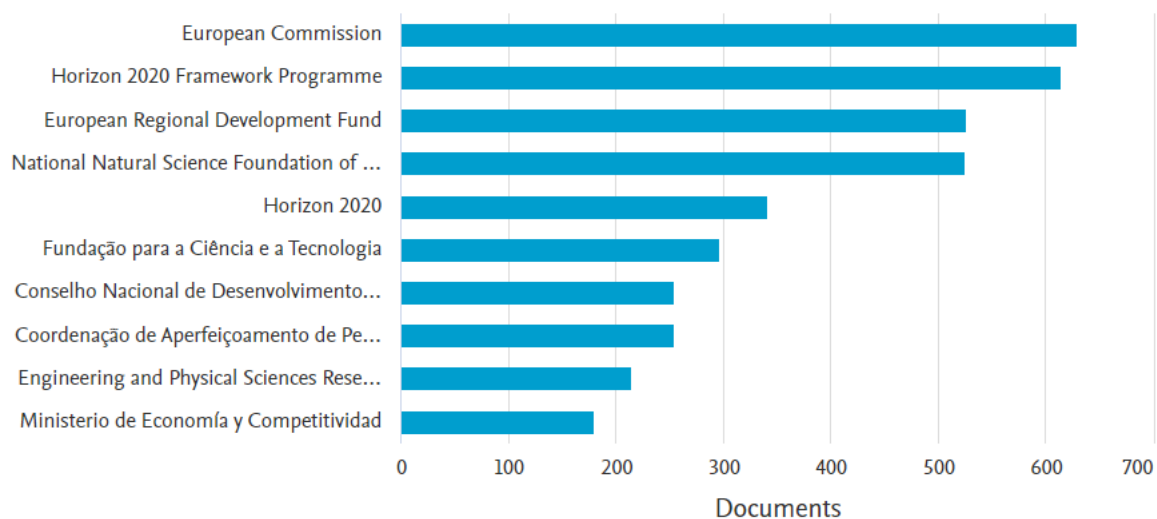


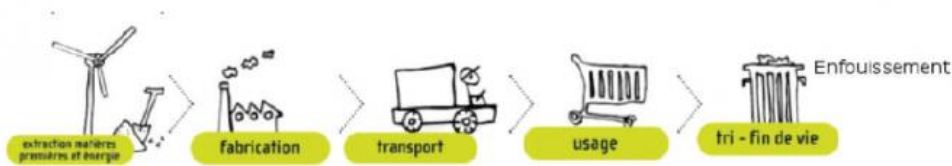
Figure 2-11 Le nombre de publications par source de subventions (Scopus)

Ce large éventail de publications a aussi donné lieu à un large éventail de définitions du concept de l'économie circulaire, (Kirchherr et al., 2017) a analysé 114 définitions existantes de l'économie circulaire afin de mieux la conceptualiser. Suite à cette analyse, (Kirchherr et al., 2017) propose la définition suivante : «Une économie circulaire décrit un système économique basé sur des modèles commerciaux qui remplacent le concept de "fin de vie" par la réduction, la réutilisation alternative, le recyclage et la récupération des matériaux dans les processus de production/distribution et de consommation, opérant ainsi au niveau micro

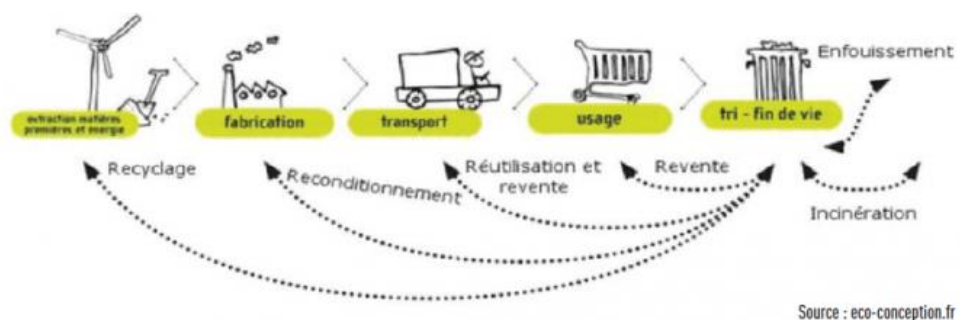
(produits, entreprises, consommateurs), au niveau méso (parcs éco-industriels) et au niveau macro (ville, région, nation et au-delà), dans le but d'accomplir un développement durable, ce qui implique de créer une qualité environnementale, une prospérité économique et une équité sociale, au profit des générations actuelles et futures.» (Lachat, 2022).

Dans la sphère politique, et au niveau français, l'article L110-1-1 de la loi de la transition énergétique pour la croissance verte du 17 août 2015 du Code de l'environnement, définit l'économie circulaire comme « La transition vers une économie (circulaire) qui vise à dépasser le modèle économique linéaire consistant à extraire, fabriquer, consommer et jeter en appelant à une consommation sobre et responsable des ressources naturelles et des matières premières primaires ainsi que, par ordre de priorité, à la prévention de la production de déchets, notamment par le réemploi des produits, et, suivant la hiérarchie des modes de traitement des déchets, à une réutilisation, à un recyclage ou, à défaut, à une valorisation des déchets.» (Légifrance, 2015a).

Économie linéaire



Économie circulaire



Source : eco-conception.fr

Figure 2-12 D'une économie linéaire à une économie circulaire source (eco-conception.fr)

Ces deux définitions mettent en avant différentes actions afin d'opérationnaliser l'économie circulaire en les hiérarchisant suivant un ordre de priorisation, comme le montre la figure 2-13 : en premier, le réemploi, ensuite, la réutilisation, puis le recyclage

(Légifrance, 2015a). Il paraît donc essentiel, avant d'estimer les flux de matières issues de l'économie circulaire, de bien définir ces concepts.

- Le réemploi désigne toute opération par laquelle un produit est utilisé de nouveau pour usage identique à celui pour lequel il avait été initialement conçu. L'article L541-4-4 de la loi anti-gaspillage vient compléter cette définition en établissant que «dans le cadre d'un chantier de réhabilitation ou de démolition de bâtiment, si un tri des matériaux, équipements ou produits de construction est effectué par un opérateur qui a la faculté de contrôler les produits et équipements pouvant être réemployés, les produits et équipements destinés au réemploi ne prennent pas le statut de déchet». Ainsi, d'après la législation, les éléments destinés au réemploi ne sont à aucun moment considérés comme des déchets.
- La réutilisation se distingue du réemploi par le fait que les produits sont utilisés de nouveau mais pour un usage différent de l'initial. D'après l'article L541-4-4 de la loi anti-gaspillage, ces éléments obtiennent un statut de déchet.
- Le recyclage concerne toute opération de valorisation par laquelle les déchets sont retraités en substances, matières ou ressources afin d'être réintroduits dans le processus de fabrication de nouveaux produits.

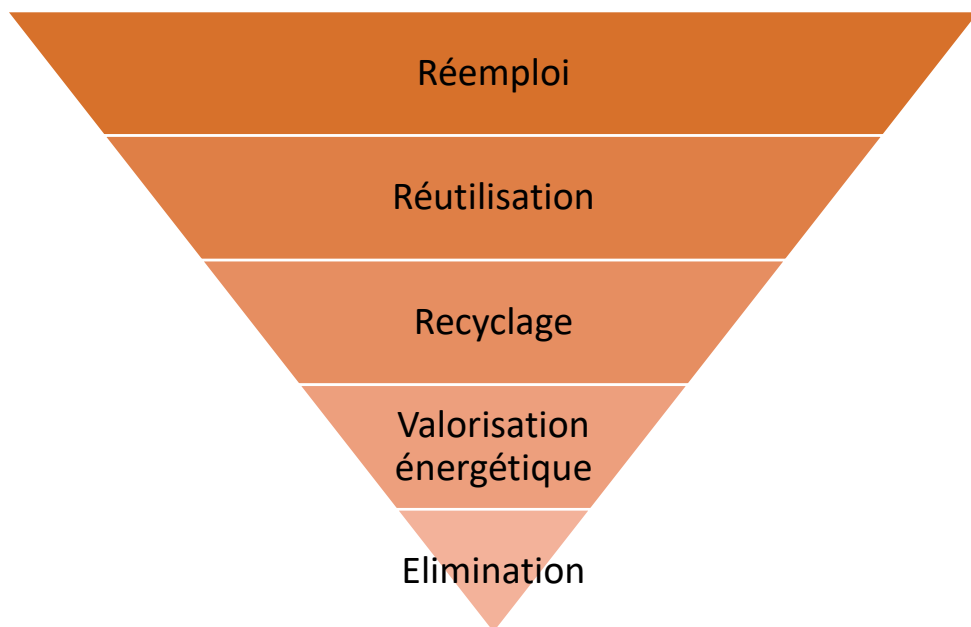


Figure 2-13 Hiérarchisation des actions de l'EC

7. Analyse de la littérature

La revue systématique de la littérature a permis :

- i. D'identifier les méthodes d'EICV existantes dans la littérature et qui traitent des impacts liés aux ressources minérales et métalliques.
- ii. D'identifier des méthodes d'AESA qui intègrent la question des ressources minérales et métalliques.
- iii. D'identifier des méthodes d'AESA appliquées au secteur du bâtiment.
- iv. De mettre en lumière la thématique de l'économie circulaire et son fort lien avec la question des ressources minérales et métalliques.

Les publications sur lesquelles s'est basé ce travail de recherche ne se limitent pas à celles identifiées à travers la revue systématique de la littérature, une veille de bibliographie a été réalisée tout au long de la thèse au vu de l'évolution incessante de la littérature sur ce sujet.

7.1 La valeur d'une ressource minérale et métallique en ACV

Dans la communauté d'ACV, pour définir la valeur d'une ressource, deux écoles s'opposent : celle qui considère la valeur intrinsèque de la ressource et celle qui considère sa valeur fonctionnelle (Berger et al., 2020; EcoSD & ADEME, 2019; Sonderegger et al., 2020).

- La valeur intrinsèque de la ressource repose sur sa nature même et est basée sur des propriétés qui lui sont inhérentes. Ces propriétés peuvent être physiques mais aussi esthétiques ou géométriques par exemple (De Bruille, 2014). Dans le cadre de l'ACV, les méthodes d'EICV qui évaluent la valeur intrinsèque des ressources pour estimer les facteurs de caractérisation ont été classées dans la catégorie de « comptabilité thermodynamique » par Sonderegger et al., 2020. Ces méthodes sont principalement basées sur l'exergie. L'exergie vient du deuxième principe de la thermodynamique qui stipule que lorsqu'un système subit des transformations, son entropie croît (Bösch et al., 2007). Ainsi, le seul fait d'extraire les ressources de l'environnement détruit cette valeur intrinsèque (EcoSD & ADEME, 2019). Considérer seule la valeur intrinsèque des ressources, via ces propriétés thermodynamiques, ne permet donc pas de prendre complètement en compte les actions de l'économie circulaire.

- La valeur fonctionnelle de la ressource est définie par rapport aux fonctions anthropiques auxquelles elle permet de répondre (EcoSD & ADEME, 2019). Ainsi, si une ressource est extraite, utilisée mais que sa qualité n'a pas été détériorée, sa valeur fonctionnelle est préservée (De Bruille, 2014). La considération de cette valeur fonctionnelle dans l'ACV a été réalisée pour la première fois par Stewart & Weidema, 2005.

Etant donné que l'épuisement des ressources minérales et métalliques est une problématique socio-économique plutôt qu'environnementale (Bjørn, Chandrakumar, et al., 2020), considérer la valeur fonctionnelle des ressources paraît a priori plus judicieux. La littérature qui intègre la question des ressources minérales et métalliques dans une approche AESA, et qui sera analysée dans le paragraphe 7.2 de ce chapitre, considère la valeur fonctionnelle et non intrinsèque des ressources (Baabou et al., 2022; Sala et al., 2020; Vargas-Gonzalez et al., 2019; Yossapol et al., 2002). Nous privilégierons donc également cette approche-là.

7.2 Comment les ressources minérales et métalliques sont prises en compte par les méthodes AESA ?

Dans le chapitre 1, la nécessité d'optimiser l'utilisation des ressources minérales et métalliques et d'améliorer leur gestion dans le secteur du bâtiment a été établie. Au début de ce chapitre, nous avons vu qu'une manière de faire serait d'intégrer un indicateur sur la pression exercée sur les ressources minérales et métalliques au sein d'une approche d'AESA. Nous avons donc analysé les publications qui traitent spécifiquement ce point.

Les méthodes AESA se positionnent dans une approche de soutenabilité absolue. Par conséquent, les méthodes AESA existantes reposent sur des méthodes d'EICV relatives aux dommages causés sur les écosystèmes et excluent les indicateurs relatifs aux ressources non renouvelables. En effet, l'épuisement des ressources non renouvelables, telles que les ressources minérales et métalliques relèvent plus d'un problème socio-économique plutôt qu'environnemental (Bjørn et al., 2019a; Bjørn & Hauschild, 2015; Ryberg et al., 2018a).

Cependant, dans les quelques publications identifiées dans la littérature, certaines ont proposé des approches afin d'intégrer les indicateurs d'EICV relatifs aux ressources dans une méthode AESA :

- Yossapol et al., 2002 définit une capacité de charge comme étant la quantité totale des réserves géologiques accessibles existantes divisée par un horizon temporel qui est considéré comme le temps nécessaire pour que tous les utilisateur·rice·s s'adaptent à l'épuisement des ressources.

Cet horizon temporel a été arbitrairement fixé à 200 ans pour toutes les ressources. Cette approche, qui s'intègre dans la catégorie des méthodes AESA-ACV présente des limites.

Premièrement, l'adaptabilité dépend de plusieurs facteurs qui font qu'elle est différente en fonction des utilisateur·rice·s et des ressources (De Bruille, 2014), considérer donc un même horizon temporel pour toutes les ressources est une grande approximation.

Deuxièmement, cette approche ne considère pas les flux issus de l'économie circulaire.

L'approche a toutefois proposé des capacités de charge pour chaque ressource au niveau mondial mais aussi au niveau des Etats-Unis, ce qui peut être considéré comme une première tentative de régionalisation.

- L'approche proposée par Sala et al., 2020, qui s'intègre dans l'approche AESA-ACV, consiste à adapter les facteurs de caractérisation d'ADPelements ultimate reserves (van Oers et al., 2002) en appliquant le concept de facteur 2.

En effet, selon (Bringezu, 2015; Buczko et al., 2016), une réduction de la consommation de matières par un facteur 2 au niveau mondial est nécessaire pour atteindre la soutenabilité au niveau mondial.

Sala et al., 2020 applique donc cette approche à la production et la consommation européenne et conclut que la limite planétaire relative aux ressources est dépassée.

La proposition de (Sala et al., 2020) peut être un point de départ pour intégrer les ressources minérales et métalliques dans le cadre des limites planétaires, mais présente des limites :

- a. La limite planétaire proposée est la même pour toutes les ressources.
- b. Les spécificités géographiques de chaque ressource ne sont pas considérées vu que la limite est fixée à l'échelle mondiale.
- c. Les flux issus de l'économie circulaire ne sont pas intégrés.

- Vargas-Gonzalez et al., 2019 propose une approche qui s'inscrit dans la catégorie de méthodes AESA-ACV et qui détermine des limites pour chaque type de ressources en utilisant l'adaptabilité des utilisateur-riche-s telle que définit par (De Bruille, 2014).

Par exemple, si un nombre X d'années est nécessaire pour que tou-te-s les utilisateur-riche-s s'adaptent au manque d'une ressource donnée, alors les stocks disponibles ne devraient pas être épuisés avant X années.

Suivant cette approche, (Vargas-Gonzalez et al., 2019) définit des taux d'extraction optimaux en divisant le stock disponible par le nombre d'années nécessaires aux utilisateur-riche-s pour s'adapter. Ensuite, il définit des facteurs de réduction en divisant le taux d'extraction actuel par le taux d'extraction optimal. Ces facteurs de réduction ont été évalués pour 25 ressources que l'auteur a estimé clés. Une fois les facteurs de réduction estimés pour les 25 ressources, un facteur de réduction moyen a été calculé comme suit :

Facteur de réduction moyen

$$= \frac{\sum \text{facteur de caractérisation ADP pour ressource } i * \text{Taux d'extraction actuel ressource } i}{\sum \text{facteur de caractérisation ADP pour ressource } i * \text{Taux d'extraction optimal ressource } i} = 4.08$$

Le facteur de réduction moyen obtenu, de la valeur de 4.08, a été utilisé comme facteur de pondération pour les résultats d'EICV recueillis avec l'indicateur ADPelements. Ceci revient à définir une capacité de charge unique pour toutes les ressources.

Or, comme avancé par l'auteur lui-même, la définition d'une valeur unique pour la capacité de charge des ressources est intrinsèquement incompatible avec le concept de frontière planétaire : si une ressource est fonctionnellement unique, son épuisement complet ne peut pas être soutenable.

D'un autre côté, cette approche n'intègre pas non plus les flux issus de l'économie circulaire et est à une échelle mondiale ce qui néglige les spécificités géographiques de chaque ressource.

- Baabou et al., 2022 propose une approche qui fait partie de la catégorie de méthodes AESA-ACV et qui permet de pallier certaines limites identifiées dans les approches présentées ci-dessus.

En effet, sa méthode s'inspire aussi du travail de de Bruille, 2014 et consiste à définir une capacité de charge comme le taux de dissipation annuel maximal

nécessaire pour maintenir les fonctions d'un matériau jusqu'au moment où tou-te-s les utilisateur-ric-e-s se sont adapté-e-s à son épuisement. C'est-à-dire, conserver la réserve d'une ressource donnée de telle sorte à ce que le temps d'adaptation des utilisateur-ric-e-s soit égal au temps d'épuisement.

Ainsi, Baabou et al., 2022, en utilisant le taux de dissipation plutôt que le taux d'extraction prend en compte d'une certaine manière le recyclage des ressources.

De plus, les capacités de charges sont calculées et les résultats sont donnés pour chaque ressource, ce qui fait de cette méthode une première grande contribution à l'intégration des ressources minérales et métalliques dans le cadre d'une approche AESA.

Cependant, elle présente certaines limites. En effet, l'approche proposée par de Bruille, 2014 et sur laquelle se base le travail de Baabou et al., 2022, ne prend pas en compte les répercussions de l'adaptabilité des utilisateur-ric-e-s. C'est-à-dire, quand un-e utilisateur-ric-e, qui consomme initialement une ressource A, consomme une ressource B pour s'adapter à l'épuisement de la ressource A, la méthode ne permet pas de quantifier l'impact sur la consommation de la ressource B additionnelle à la suite de l'adaptation de cet utilisateur-ric-e. La méthode ne permet donc pas de prendre en compte les effets potentiels de transfert des impacts sur la ressource de substitution. D'autre part, l'estimation des temps d'adaptation des utilisateur-ric-e-s des ressources repose sur des hypothèses fortes.

7.3 L'application des méthodes AESA dans le secteur du bâtiment

Dans la littérature identifiée, seules quelques publications évaluent la soutenabilité environnementale d'une manière absolue dans le secteur du bâtiment (Andersen et al., 2020; Baabou et al., 2022; Brejnrod et al., 2017; Ohms et al., 2019), ces publications ne découlent pas toutes de la revue systématique de la littérature.

- (Brejnrod et al., 2017) ont évalué la soutenabilité de deux bâtiments situés au Danemark, une maison standard et une maison construite principalement avec des matériaux issus du recyclage et du réemploi.

L'évaluation de la soutenabilité a été effectuée selon l'approche AESA basée sur l'ACV, c'est-à-dire en estimant les impacts à l'aide des méthodes EICV et en les

comparant avec les capacités de charge assignés. La figure suivante, tirée de la publication en question résume ces étapes.

Selon cette approche, un bâtiment est considéré soutenable si et seulement si son impact environnemental annuel est inférieur à la part de la capacité de charge qui lui a été assigné.

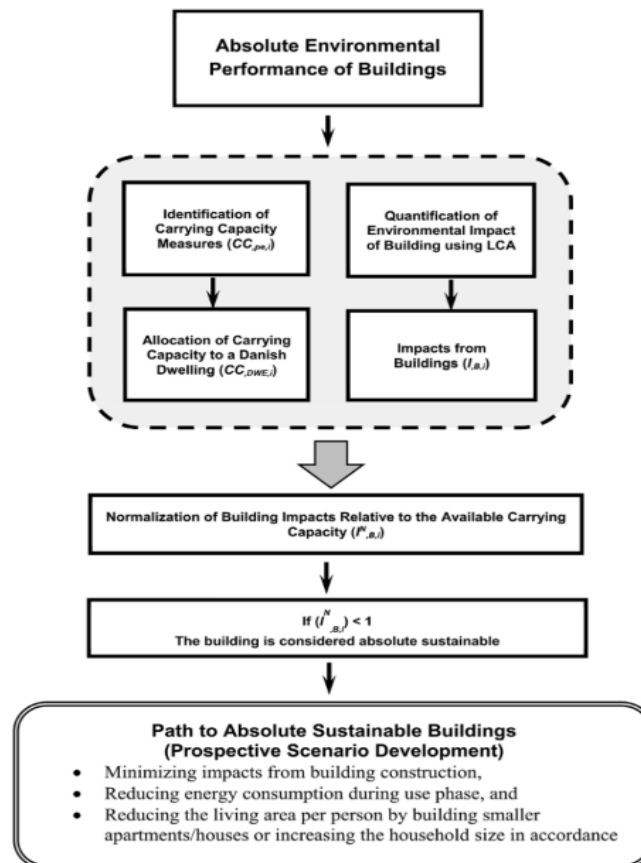


Figure 2-14 Méthode d'évaluation absolue de la soutenabilité des bâtiments selon Brejnrod et al., 2017

Les impacts considérés par cette étude sont : Acidification terrestre ; Épuisement de l'eau ; Érosion des sols et des terres ; Biodiversité de l'utilisation des sols ; Changement climatique ; Appauvrissement de la couche d'ozone ; Eutrophisation de l'eau douce ; Eutrophisation marine ; Eutrophisation terrestre ; Formation d'oxydants photochimiques ; Écotoxicité en eau douce. La pression sur les ressources minérales et métalliques n'est pas prise en compte.

- (Ohms et al., 2019) ont quantifié les impacts associés à cinq maisons individuelles au Danemark, les MiniCO2, en utilisant les méthodes d'évaluation de l'impact de cycle de vie basées sur les limites planétaires, dont l'approche PB-ACV. Dans cette étude, seul l'indicateur sur le réchauffement climatique a été évalué.

- (Andersen et al., 2020) ont cherché à évaluer l'importance du choix de l'approche AESA considérée (AESA-ACV ou PB-ACV). Le but étant de tester la robustesse des conclusions de l'AESA en fonction du choix de la méthode et non de comparer les résultats obtenus à partir des deux méthodes.

En effet, d'après (Andersen et al., 2020), ces deux méthodes sont incomparables par nature vu qu'elles ne considèrent pas forcément les mêmes catégories d'impact, et lorsque c'est le cas, elles considèrent des modèles différents avec des unités différentes.

Cette étude a également utilisé les maisons individuelles MiniCO2 comme étude de cas, et a testé différents principes pour assigner les limites planétaires au système étudié afin de tester la robustesse à ce niveau-là aussi.

Dans cette étude, les ressources minérales et métalliques n'ont pas été considérées étant donné qu'aucune méthode (AESA-ACV et PB-ACV) ne considère une catégorie d'impact relative à ces derniers.

Les résultats de l'étude ont montré que le choix de la méthode d'assignation exerce une réelle influence sur les résultats obtenus (un facteur 12 entre la méthode qui assigne la plus grande part et celle qui assigne la plus faible part). Cette étude a aussi montré que les deux méthodes d'AESA considérées mènent à des conclusions différentes quant à la soutenabilité absolue de chaque maison individuelle considérée. Avec la méthode AESA-ACV, plus de logements sont soutenables qu'avec la méthode PB-ACV.

La capacité de charge plus élevée que la limite planétaire telle qu'indiqué dans la figure 2-15 ci-dessous explique ce résultat. Une autre explication possible est que les deux méthodes, par leur construction sont intrinsèquement différentes.

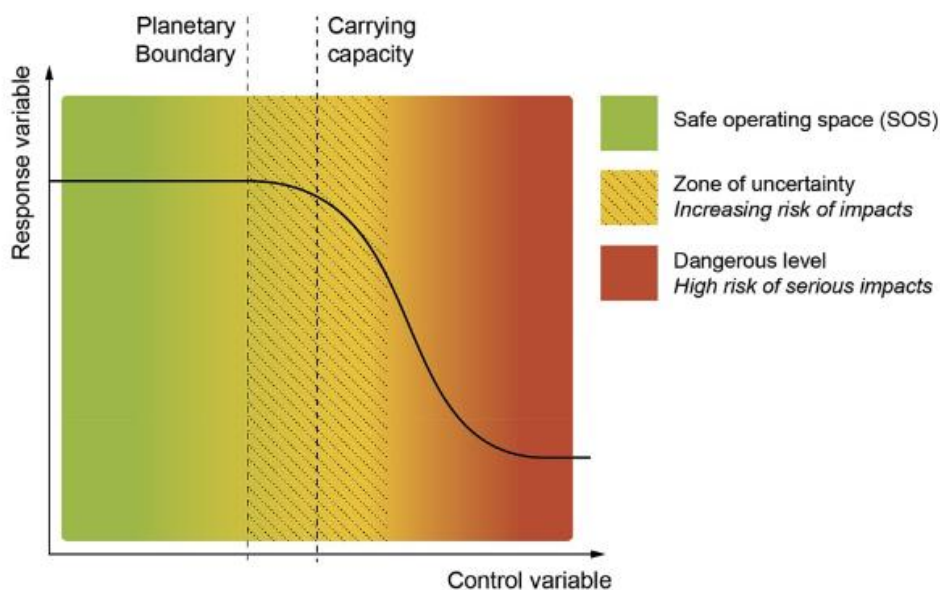


Figure 2-15 Le concept de limites planétaires et le cadre de capacité de charge pour les processus du système terrestre global. La zone verte marque l'espace de fonctionnement sûr, la zone jaune l'incertitude et la zone rouge un risque élevé de changement critique. Les lignes marquent la limite planétaire située à la limite inférieure de la zone d'incertitude et la capacité de charge située comme une moyenne dans la zone d'incertitude (Andersen et al., 2020).

8. Conclusion du chapitre

À la suite de cette analyse de la littérature, nous avons identifié des approches proposant des contributions et des points de départ pour l'intégration des ressources minérales et métalliques dans l'AESA, cependant, elles présentent des limites.

La majorité de ces méthodes (Baabou et al., 2022; Vargas-Gonzalez et al., 2019; Yossapol et al., 2002), se basent sur l'approche proposée par (Bjørn, Chandrakumar, et al., 2020) qui établit que le cadre général de l'AESA basée sur l'ACV et qui est constitué des quatre étapes, définies plus haut : estimer l'impact environnemental à l'aide des méthodes d'EICV ; quantifier la capacité de charge ou la limite planétaire ou l'espace de fonctionnement sûr ; les assigner au système étudié ; évaluer la soutenabilité en comparant l'impact estimé et la capacité de charge assignée.

Ainsi, comme première hypothèse de travail, nous allons nous baser, dans un premier temps dans ce travail de recherche, sur les méthodes AESA-ACV mais en essayant de pallier les limites identifiées plus haut. Pour ce faire, nous posons les questions suivantes : Comment sont actuellement évaluées les pressions sur les ressources minérales et métalliques dans le cadre de l'ACV ? Quelle méthode de caractérisation ACV relative aux ressources minérales et métalliques parmi celles identifiées est la plus adaptée pour une approche d'évaluation absolue ?

Le chapitre suivant aura pour but d'investiguer les méthodes d'EICV dans le cadre d'une approche d'AESA-ACV adaptée au secteur du bâtiment.

Chapitre 3. Quelle méthode d'EICV pour une approche d'AESA basée sur l'ACV pour les ressources minérales et métalliques dans le secteur du bâtiment ?

1. Objectifs du chapitre

Lors du chapitre précédent, après une revue de la littérature existante et après avoir identifié les limites des méthodes AESA qui intègrent les ressources minérales et métalliques, nous avons décidé d'intégrer ces ressources dans une approche ACV-AESA mais en essayant de pallier les différentes limites identifiées.

Pour ce faire, une première étape serait d'identifier la meilleure méthode d'EICV relative aux ressources minérales et métalliques candidate pour une approche d'ACV-AESA en répondant aux questions de recherche suivante : Comment sont actuellement évaluées les pressions sur les ressources minérales et métalliques dans le cadre de l'ACV ? Quelle méthode de caractérisation ACV relative aux ressources minérales et métalliques, parmi celles identifiées, est la plus adaptée pour une approche d'évaluation absolue ?

L'objectif de ce chapitre est donc de présenter les méthodes d'EICV identifiées à l'aide de la recherche bibliographique menée lors du chapitre précédent, et de les analyser en fonction de l'objectif auquel elles doivent répondre : intégrer la pression sur les ressources minérales et métalliques dans une approche AESA.

2. Comment évaluer la soutenabilité vis-à-vis de la consommation des ressources minérales et métalliques ?

Les enjeux et le contexte de l'utilisation des ressources minérales et métalliques dépeints dans les premiers chapitres de ce manuscrit démontrent la non-soutenabilité de l'utilisation des ressources minérales et métalliques. Cependant, tous nos besoins, allant de l'alimentation au logement, en passant par le transport et la santé, sont dépendants de ces ressources. Notre système sociotechnique ne peut envisager d'arrêter complètement et brutalement leur utilisation. L'utilisation des ressources minérales et métalliques est considérée non soutenable (Bjørn et al., 2020; Vargas-Gonzalez et al., 2019), car elle se base principalement sur l'utilisation des ressources vierges non renouvelables, qui, à terme, risquent de venir à manquer ou générer des impacts environnementaux croissants pour être extraits de la lithosphère.

Les méthodes d'évaluation absolue de la durabilité, telle que celle proposée par (Ryberg et al., 2016) (PB-LCA) traduisent les flux élémentaires annuels générés par le système étudié en variations de la valeur des « variables de contrôle » qui sont alors adoptées comme indicateurs d'impact (Bjørn et al., 2020). Dans le cadre de la pression sur les ressources minérales et métalliques, il n'existe pas de frontière définie dans le

cadre de (Steffen, Richardson, et al., 2015), nous ne pouvons donc pas reprendre la variable de contrôle proposée comme indicateur d'impact.

D'autre part, les variables de contrôle sont basées sur le fonctionnement du "Système terre" à l'état "pré-anthropocène", afin d'estimer un fonctionnement du Système Terre qui ne soit pas affecté globalement par les activités humaines. En ce qui concerne les pressions sur les ressources minérales, nous mobilisons le terme d'*envirosphère*, défini par (Ventura, 2014) comme "l'ensemble des objets et des interactions non décidés ni organisés par l'Homme et existants indépendamment de lui". L'*envirosphère* est donc plus large que l'écosphère, qui se réfère seulement au monde vivant car elle inclut également la matière.

L'hypothèse sur laquelle repose ce travail de thèse est qu'une approche de soutenabilité absolue implique de ne pas extraire de nouvelles ressources minérales et métalliques de l'*envirosphère*. Il s'agira alors de mobiliser pour les projets de construction les flux déjà présents dans la technosphère (à travers le recyclage, réemploi et réutilisation) des matériaux issus de l'économie circulaire (Stahel, 2016). Ceci implique de traiter les pressions sur les ressources minérales et métalliques comme étant un problème socio-économique plutôt qu'environnemental.

3. Les exigences auxquelles les méthodes d'EICV doivent répondre dans une approche AESA basée sur l'ACV dans le contexte du secteur du bâtiment

Afin de sélectionner la ou les méthodes d'EICV relatives aux ressources minérales et métalliques candidates à une approche ACV-AESA, dans le secteur du bâtiment, une première étape nécessaire est de définir les exigences auxquelles elle doit répondre afin d'être en cohérence avec la soutenabilité absolue relative aux ressources minérales et métalliques définie dans la section précédente :

- Être potentiellement reconnues et mobilisables par les professionnel-le-s du bâtiment et recommandées par l'ILCD (European Commission, 2012; ILCD, 2011).
- Prendre en compte la valeur fonctionnelle et non intrinsèque des ressources, étant donné que, comme expliqué dans le chapitre précédent, l'épuisement des ressources minérales et métalliques est une problématique socio-économique plutôt qu'environnementale (Bjørn et al., 2020), et que la littérature qui intègre

la question des ressources minérales et métalliques dans une approche AESA, considère la valeur fonctionnelle et non intrinsèque des ressources.

- Permettre la caractérisation des flux issus de l'économie circulaire (de réemploi, réutilisation et recyclage).
- D'autre part, afin de permettre l'opérationnalisation de la méthode pour les acteur·rice·s français·e·s du bâtiment, il faudra que la méthode proposée dispose d'un jeu de facteurs de caractérisation suffisamment exhaustifs pour permettre une évaluation du plus grand nombre possible de ressources minérales et métalliques présentes dans l'inventaire de cycle de vie d'une étude de cas dans le secteur du bâtiment.

4. Les méthodes d'EICV relatives aux ressources minérales et métalliques identifiées dans la littérature

Dans la communauté de l'ACV, aucun consensus n'a été trouvé quant à la manière d'évaluer et d'exprimer les pressions sur les ressources minérales et métalliques à privilégier. Ainsi, plusieurs méthodes de caractérisation relatives aux ressources minérales et métalliques ont été développées, chacune utilisant un mécanisme d'impact différent.

Les méthodes identifiées par (Berger et al., 2020; Sonderegger et al., 2020) seront le point de départ de notre étude et la méthode Impact World +, identifiée dans la littérature, sera ajoutée à la sélection. Sonderegger et al., 2020 ont classé les méthodes identifiées en quatre catégories, en fonction des mécanismes d'impact utilisés : méthodes d'épuisement, méthodes d'efforts futurs, méthodes de comptabilité thermodynamique et méthodes de risque d'approvisionnement.

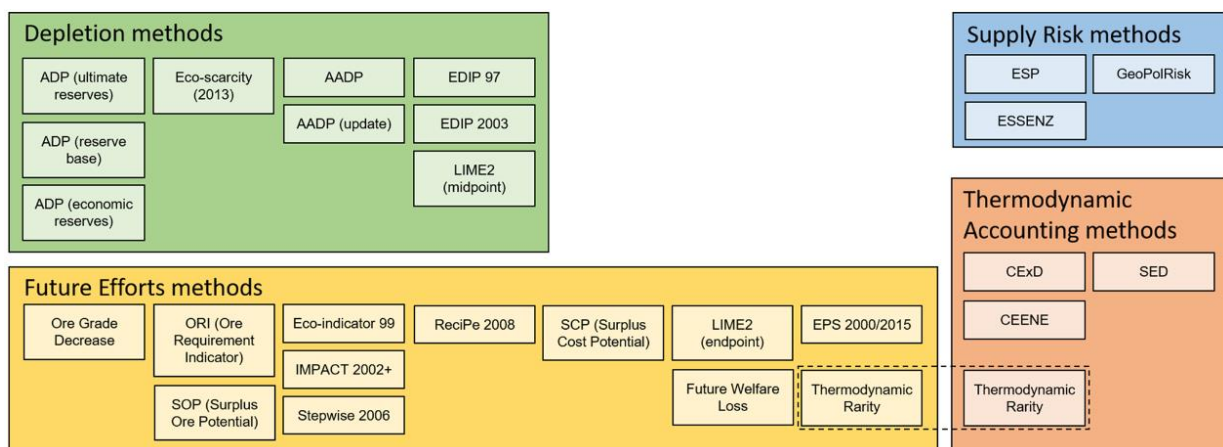


Figure 3-1 Catégorisation des méthodes en fonction de leurs mécanismes d'impact, Sonderegger et al., 2020

5. Analyse des méthodes de caractérisation des ressources minérales et métalliques vis-à-vis de l'exhaustivité de leurs facteurs de caractérisation

5.1 La méthode d'analyse d'exhaustivité des facteurs de caractérisation proposée

Afin d'analyser l'exhaustivité des facteurs de caractérisation des méthodes d'EICV, une méthode en deux étapes a été développée.

Premièrement, une analyse d'inventaire a été menée sur une étude de cas liée au secteur du bâtiment.

Deuxièmement, les flux d'inventaire de minéraux et de métaux de l'étude de cas ont été comparés aux flux de minéraux et de métaux pour lesquels les méthodes proposent des facteurs de caractérisation (FC), en utilisant deux indices : Pn_i et Pm_i , voir figure 3-2.

L'indice Pn_i estime le pourcentage de substances minérales et métalliques des flux d'inventaire qui sont prises en compte par chaque indicateur i selon l'équation suivante.

$$Pn_i = n_i/n_t \%$$

Avec :

- Pn_i : Pourcentage de substances minérales et métalliques des flux d'inventaire de l'étude de cas pour lesquelles l'indicateur i propose un FC.
- n_i : Nombre de flux d'inventaire de l'étude de cas pour lesquels l'indicateur i propose des facteurs de caractérisation.
- n_t : Nombre total de substances minérales et métalliques des flux d'inventaire de l'étude de cas.

L'indice Pm_i estime le pourcentage de la masse des substances minérales et métalliques qui sont considérées par les indicateurs sur la masse totale des flux d'inventaire minéraux et métalliques comme décrit dans l'équation suivante.

$$Pm_i = \sum_{k=1}^{n_i} m_k / m_t \%$$

Avec :

- Pm_i : Pourcentage de la masse des substances minérales et métalliques des flux d'inventaire de l'étude de cas pour laquelle l'indicateur i propose un FC.

- m_k : Masse du flux d'inventaire k pour lequel l'indicateur i propose un facteur de caractérisation.
- m_t : Masse totale des flux d'inventaire minéraux et métalliques de l'étude de cas.

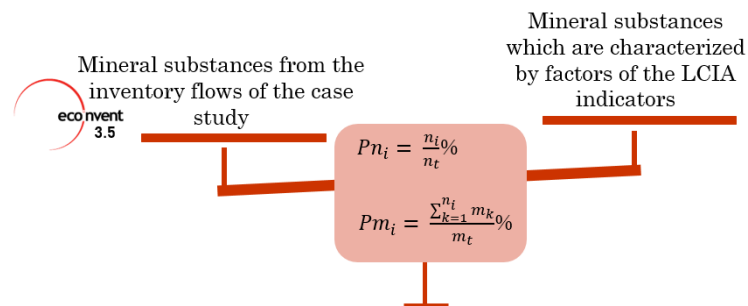


Figure 3-2 Méthode d'analyse des méthodes d'EICV sélectionnées (Bendahmane et al., 2022)

5.2 Les critères de sélection

En se basant sur les exigences définies dans la section 3 de ce chapitre, nous avons défini une liste de critères afin de sélectionner les méthodes d'EICV sur lesquelles l'analyse d'exhaustivité des facteurs de caractérisation sera menée.

Le premier critère de sélection est relatif à l'exigence de reconnaissance de la méthode par l'ILCD et est lié à la catégorie des méthodes telle que présentée dans la figure 3-1 tirée de Sonderegger et al. (Sonderegger et al., 2020).

Les méthodes de la catégorie de comptabilité thermodynamique ont été exclues car l'ILCD a jugé cette catégorie de méthodes insuffisante en termes de pertinence environnementale et d'acceptation par les parties prenantes (European Commission, 2012; ILCD, 2011). En effet, ces méthodes évaluent une propriété intrinsèque des ressources, par exemple l'exergie, qui ne tient pas compte de la rareté et de la valeur sociale de ces ressources (Berger et al., 2020; European Commission, 2012). Par conséquent, elles ont été considérées comme non pertinentes pour exprimer les pressions exercées sur les ressources minérales et métalliques dans un contexte d'aide à la décision pour les acteur·rice·s du secteur du bâtiment.

Les méthodes évaluant le risque d'approvisionnement quantifient les risques potentiels de disponibilité des ressources minérales et métalliques pour un produit ou un système étudié en considérant les aspects géopolitiques et socio-économiques. Ces méthodes ont été exclues étant donné que l'objectif de cette recherche est d'identifier des méthodes qui évaluent la pression d'un projet de construction donné sur les ressources minérales et métalliques.

Concernant la méthode CML-IA (van Oers et al., 2002), qui utilise les éléments ADP, les facteurs de caractérisation sont donnés pour les réserves économiques, la base de réserves et les réserves ultimes. Dans cette étude, seul l'indicateur ADPelements (réserves ultimes) a été pris en compte car il s'agit de meilleure approximation pour évaluer les stocks naturels dans une perspective future (van Oers et al., 2002).

Le deuxième critère de sélection est un critère d'opérationnalité et est relatif à la disponibilité des facteurs de caractérisation et la possibilité de les implémenter dans un logiciel ACV.

Si les facteurs de caractérisation sont disponibles mais obsolètes, les méthodes ne sont pas considérées car elles ne sont pas recommandées et leurs facteurs de caractérisation sont incompatibles avec la base de données d'inventaire utilisée, Ecoinvent 3.5 (Moreno Ruiz et al., 2018).

Tableau 3-1 Les méthodes d'EICV relatives aux ressources minérales et métalliques identifiées dans la littérature. En gras les méthodes sélectionnées pour l'analyse de l'exhaustivité des facteurs de caractérisation.

Category	Methods	Indicators	Units	References	LCIA methods in Ecoinvent v3.5
Depletion methods	CML-IA baseline	ADPelements (ultimate reserves)	éq. Kg Sb	(Guinée & Heijungs, 1995; van Oers et al., 2002)	Yes
	CML-IA non-baseline	ADPelements (reserve base)	éq. Kg Sb	(Guinée & Heijungs, 1995; van Oers et al., 2002)	Yes
	CML-IA non-baseline	ADPelements (economic reserves)	éq. Kg Sb	(Guinée & Heijungs, 1995; van Oers et al., 2002)	Yes

	Swiss Ecological Scarcity	Mineral resources	UBP	(Frischknecht & Büsser Knöpfel, 2013)	No
	-	AADP	éq. Kg Sb	(Schneider et al., 2011)	No
	-	AADP (update)	Éq. Kg Sb	(Schneider et al., 2015)	No
	EDIP 97	Resources (all)	PR	(Wenzel et al., 1997)	Superseded
	EDIP 2003	Resources (all)	PR2004	(Hauschild & Potting, 2005)	Yes
	LIME2 (midpoint)	Mineral resources (metals)	%	(Itsubo & Inaba, 2014)	No
Future Efforts methods	LIME2 (endpoint)	User Cost	\$	(Itsubo & Inaba, 2014)	No
	-	Ore Grade Decrease	Kg	(Vieira et al., 2012)	No
	-	ORI (Ore Requirement Indicator)	Kg ore / Kg metal x year	(Swart & Dewulf, 2013)	No
	-	SOP (Surplus Ore Potential)	Kg	(Vieira et al., 2017)	No
	Eco-indicator 99	Minerals	MJ surplus	(Goedkoop & Spiensma, 2001)	Superseded
	IMPACT 2002+	Mineral extraction	Kg Fe eq	(Jolliet et al., 2003)	Yes
	Stepwise 2006	Mineral extraction	EUR	(Weidema et al., 2008)	No
	ReCiPe	Mineral resource scarcity	Kg Cu eq	(Goedkoop & Huijbregts, 2012)	Yes

	-	Surplus Cost Potential	\$/kg	(Vieira et al., 2016; Vieira & Huijbregts, 2018)	No
	Future Welfare Loss	Externality cost of exhaustion	\$	(Huppertz et al., 2019)	No
	EPS 2000/2015	Depletion of reserves	ELU	(Steen, 2014)	Superseded
	IMPACT World +	MACSI	Kg deprived/Kg dissipated	(Bulle et al., 2019; De Bruille, 2014)	Yes
Thermodynamic Accounting methods	-	Thermodynamic Rarity	MJ	(Valero & Valero, 2015)	No
	CExD	Non-renewable, metals, minerals	MJ	(Valero & Valero, 2015)	Yes
	-	SED	MJ	(Valero & Valero, 2015)	No
	CEENE	Metal ores, Minerals	MJ	(Dewulf et al., 2007)	Yes
Supply Risk methods	-	GeoPolRisk		(Cimprich et al., 2018)	No
	-	ESP		(Schneider et al., 2014)	No
	-	ESSENZ		(Bach et al., 2016, 2019)	No

5.3 Présentation des méthodes sélectionnées

Sur la base des critères mentionnés ci-dessus, cinq méthodes ont été sélectionnées pour réaliser l'analyse d'exhaustivité des facteurs de caractérisation :

- Méthode CML-IA

La méthode CML-IA (réserves ultimes) utilise l'indicateur ADPelements (réserves ultimes) qui est exprimé en kg d'équivalent antimoine. Cette dernière évalue l'épuisement d'une ressource en calculant le rapport entre le taux d'extraction et le carré de la réserve ultime estimée (Guinée & Heijungs, 1995; van Oers et al., 2002).

Le facteur de caractérisation de l'ADPelements d'une ressource i se définit de la manière suivante :

$$ADP_i = \frac{DR_i / R_i^2}{DR_{Sb} / R_{Sb}^2}$$

Avec :

- ADP_i : Abiotic Depletion Potential d'une ressource i (en kg Sb eq)
- DR_i : Taux d'extraction de la ressource i (en kg/an)
- R_i : Réserve ultime de la ressource i (en kg)
- Sb : Antimoine

- Méthode EDIP

Les facteurs de caractérisation de la méthode EDIP décrivent la fraction de la réserve de ressources disponibles par personne en considérant les réserves économiques évaluées en 2004, ils sont exprimés en réserve par personne (Hauschild & Potting, 2005).

- Méthode IMPACT 2002+

La méthode IMPACT 2002+ utilise les facteurs de caractérisation de la méthode EcoIndicator99 (Goedkoop & Spriensma, 2001) rapportés à une substance de référence, le fer, et est exprimée en Kg fer équivalent (Jolliet et al., 2003).

Le facteur de caractérisation de la méthode Impact 2002+ est calculé selon les équations suivantes :

$$CF_i^{2002+} = \frac{CF_i^{EI99}}{CF_{fer}^{EI99}}$$

Avec :

- CF_i^{2002+} : Le facteur de caractérisation de la méthode Impact 2002+ pour la ressource i (en kg Fe eq/kg)
- CF_i^{EI99} : Le facteur de caractérisation de la méthode EI99 pour la ressource i (en MJ/kg) et il désigne le surplus d'énergie nécessaire à l'extraction de la ressource dans le futur par rapport à l'énergie nécessaire actuellement

- Méthode ReCiPE

La méthode ReCiPe exprime la quantité supplémentaire moyenne de minerai produit dans le futur en raison de l'extraction de 1 kg d'une ressource donnée, en considérant

toute sa production future rapportée au cuivre comme substance de référence, les facteurs de caractérisation sont exprimés en Kg Cu_{eq} (Goedkoop & Huijbregts, 2012).

- Méthode IMPACT WORLD+

La méthode IMPACT WORLD+ utilise le MACSI (Material Competition Scarcity Indexes). Ce facteur évalue la fraction des ressources répondant aux besoins des futurs utilisateur-riche-s qui pourraient ne pas être en mesure de s'adapter à une dissipation complète des stocks facilement disponibles. C'est-à-dire être capable de trouver des substituts aux ressources épuisées. Il est exprimé en kg de ressource dont l'utilisateur-riche est privé par kg de ressource dissipée (Bulle et al., 2019; De Bruille, 2014). Une ressource dissipée étant une ressource qui ne peut plus être récupérée pour répondre à des fonctions.

6. Etude de cas

Le périmètre de cette étude est la construction de logements neufs en France en 2015 telle que décrite par Léonardon et al (Leonardon et al., 2018).

Afin d'estimer le nombre de bâtiments construits, la base de données Sit@del2 a été utilisée (CGDD, 2011). Cette base de données fournit le système statistique public relatif à la construction neuve du résidentiel et du tertiaire.

Le scénario AME (Avec Mesures Existantes) de la SNBC (Stratégie Nationale Bas Carbone) en vigueur en 2018 a également été utilisé (CGDD, 2011).

Ce scénario AME décrit l'effet des politiques publiques françaises actuelles sur la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre.

Quatre types de logements ont été considérés : le logement individuel isolé, le logement individuel groupé, le logement collectif et les maisons de retraite.

La consommation totale de matériaux minéraux et métalliques pour les logements neufs en 2015 en France est d'environ 41 523 kt et se répartit comme décrit dans le tableau suivant.

Tableau 3-2 Ressources minérales et métalliques consommées pour la construction des logements neufs en France en 2015

Matériau	Masse (E+03 <i>tons</i>)
TOTAL	4,15E+04
Granulats	1,80E+04
Sable	1,39E+04
Ciment	4,40E+03
Terre cuite	2,83E+03
Plâtre	1,34E+03
Acier	6,79E+02
Verre	9,50E+01
Laines minérales	9,70E+01
Ardoise	6,80E+01
Aluminium	1,80E+01
Cuivre	2,10E+01
Zinc	1,00E+00

7. Résultats et analyse

7.1 L'analyse de l'inventaire de cycle de vie

L'analyse de l'inventaire de cycle de vie a été effectuée sur l'étude de cas en utilisant la base de données Ecoinvent 3.5 (Moreno Ruiz et al., 2018). A l'issue de l'analyse d'inventaire, 501 flux ont été obtenus dont 133 flux minéraux et métalliques avec une masse totale de 4.57E+07 t. Les cinq flux avec les masses les plus importantes sont : "gravel" (3.39E+07 t); "calcite" (5.15E+06 t); "clay, unspecified" (4.68E+06 t); "Gypsum"(1.47E+06t); "Shale" (1.37E+05 t).

7.2 Complétude de l'ensemble des facteurs de caractérisation des méthodes d'EICV

Le tableau suivant résume les valeurs des indices P_n et P_m obtenues pour chaque méthode avec un code couleur : vert quand le pourcentage est supérieur à 70%, jaune quand le pourcentage est entre 30% et 70% et rouge quand il est inférieur à 30%.

Tableau 3-3 Résultats des indexes P_n et P_m pour chaque méthode d'EICV analysée, en rouge les valeurs inférieures à 30%, en jaune les valeurs entre 30% et 70% et en vert les valeurs supérieures à 70%

Methods	Indicators	Unit	References	Resources considered	
				P_n Percentage of substances that are considered	P_m Percentage of mass that are considered
CML-IA baseline	ADPelements (ultimate reserves)	éq. Kg Sb	(Guinée & Heijungs, 1995; van Oers et al., 2002)	57,03%	0,17%
Impact 2002 +	Mineral Extraction	Kg Fe eq	(Jolliet et al., 2003)	27,13%	0,16%
EDIP 2003	Resource consumption	PR2004	(Hauschild & Potting, 2005)	55,04%	0,16%
ReCiPe	Mineral resource scarcity	Kg Cu eq	(Goedkoop & Huijbregts, 2012)	73,64%	13,69%
Impact World +	Material Competition Scarcity Index	kg deprived/kg dissipated	(Bulle et al., 2019; De Bruille, 2014)	15,50%	10,44%

Les résultats présentés ci-dessus montrent que les indices P_n , relatifs au nombre de substances prises en compte, sont inférieurs à 70% pour la majorité des méthodes et que les indices P_m , relatifs à la masse des matériaux pris en compte dans l'estimation des impacts sont tous inférieurs à 30%.

Par exemple, pour la méthode CML et son indicateur ADP_{elements} , qui est l'un des indicateurs recommandés par l'ILCD (ILCD, 2011) et celui utilisé dans le complément national français à la norme européenne NF EN 15804 + A1 concernant les déclarations environnementales des produits de construction (NF EN 15804/CN, 2016), l'indicateur P_n est seulement de 57%.

Cela signifie que les pressions exercées sur 43% des substances minérales et métalliques des flux de l'inventaire de l'étude de cas ne sont pas estimées et sont alors complètement négligées.

Par ailleurs, en considérant l'indice P_m , plus de 99% de la masse des matériaux impliqués dans cette étude de cas (représentant la construction de nouveaux logements en France en 2015) ne seraient pas pris en compte par l'indicateur ADP_{elements} et n'apparaîtraient donc pas dans les résultats des impacts sur les ressources minérales et métalliques.

Ceci représente une limite importante de ces méthodes pourtant largement utilisées dans les études d'évaluation des impacts dans le secteur du bâtiment.

7.3 Comparaison des impacts estimés par les différentes méthodes d'EICV

La figure suivante montre la répartition des impacts estimés pour les différentes substances, pour chaque indicateur étudié. Etant donné le nombre important des flux, seules les 10 substances ayant l'impact le plus élevé ont été présentées.

On peut remarquer que les résultats et les ressources mises en évidence diffèrent significativement selon les méthodes. Cela peut s'expliquer par les différents mécanismes d'impact représentés par chaque méthode.

En effet, chaque méthode, en fonction de son mécanisme d'impact, va adresser un enjeu spécifique parmi tous les enjeux possibles liés aux ressources minérales et métalliques. Les méthodes CML-IA et EDIP caractérisent le potentiel d'épuisement des ressources alors que les méthodes Impact 2002+, ReCiPe et Impact World+ expriment les efforts futurs engendrés par une extraction actuelle.

Cependant, comme il n'existe pas encore de méthode EICV consensuelle (De Bruille, 2014), il est difficile, voire impossible, pour un-e décideur-euse du secteur du bâtiment de se prononcer sur la hiérarchie des impacts liés aux différentes ressources minérales et métalliques utilisées pour un projet de construction donné, et donc d'envisager les actions à mettre en œuvre en priorité pour limiter ces impacts.

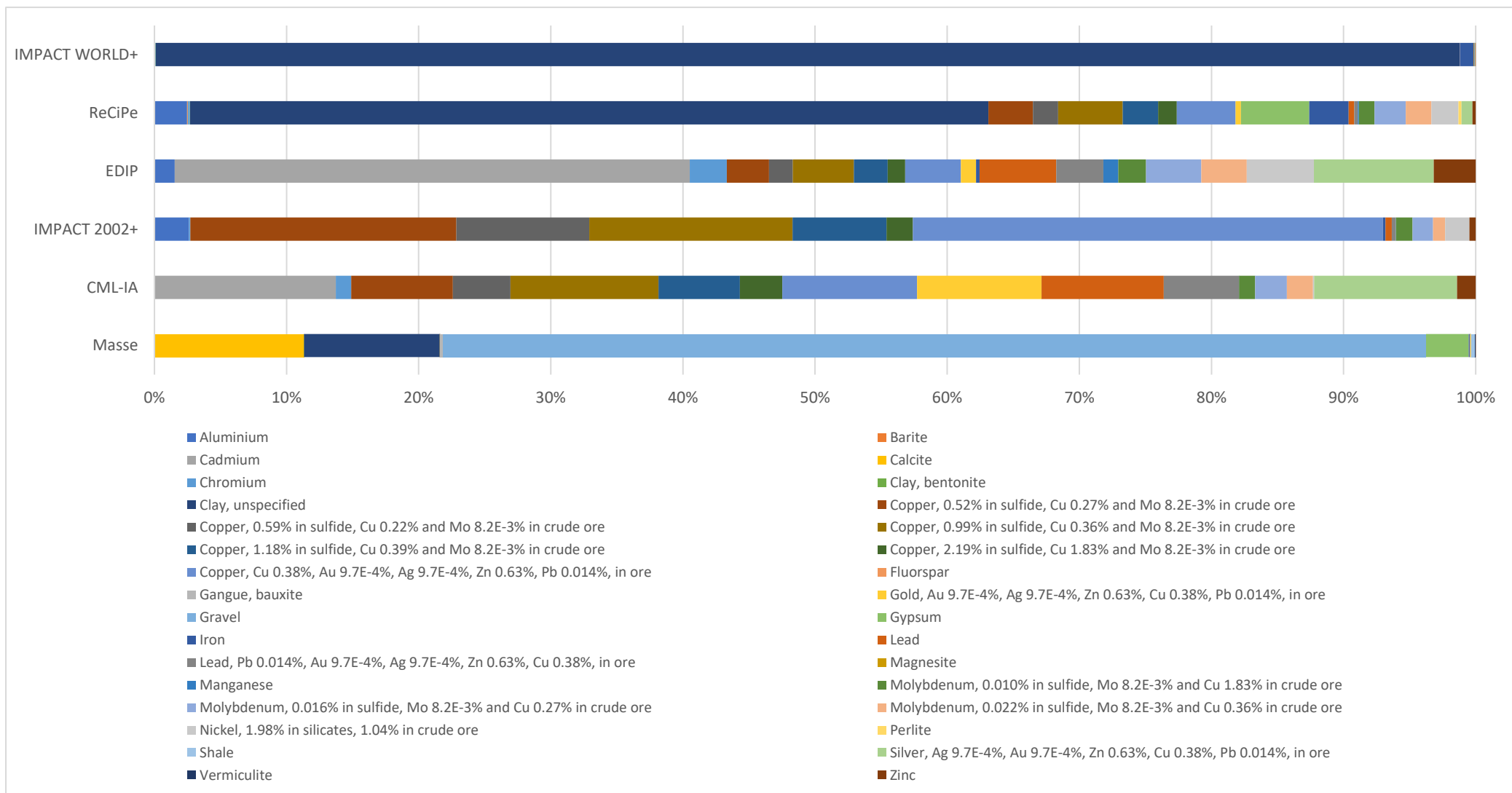


Figure 3-3 Répartition des impacts estimés pour les dix valeurs les plus élevées pour chaque méthode d'EICV

En se basant sur les résultats de la figure 3-3, nous observons que deux méthodes mettent en évidence l'impact de la substance "Clay, not specified" (ReCiPe (Kg Cu eq) et IMPACT WORLD+ (Kg privé/Kg dissipé)).

Le "Cadmium" apparaît comme le plus préoccupant concernant l'impact sur les ressources minérales et métalliques pour deux indicateurs (CML-IA baseline (Kg Sb eq) et EDIP (PR2004)).

Enfin, pour une méthode, le cuivre apparaît comme le plus impactant des ressources minérales et métalliques (IMPACT 2002+ (Kg Sb eq)).

Afin de compléter l'analyse, nous avons recherché les substances minérales et métalliques qui sont communes à ces six méthodes d'évaluation d'impact. Malheureusement, aucune n'a été identifiée, sur l'ensemble des 133 flux minéraux et métalliques issus de l'analyse de l'inventaire de cycle de vie, aucune substance n'est prise en compte par toutes les méthodes EICV considérées dans cette étude.

7.4 Les matériaux pondéreux

La figure 3-3 montre que les substances ayant l'impact estimé par les méthodes de caractérisation le plus élevé ont une masse très faible et, à l'inverse, les substances avec la masse la plus élevée ont un impact faible.

Toutes les méthodes EICV considérées estiment un impact égal à zéro pour la substance " gravel ", alors que c'est la substance avec la masse la plus élevée.

Compte tenu du nombre croissant de nouveaux logements - 360.000 en moyenne chaque année en France (Leonardon et al., 2018) - la quantité de matériaux nécessaire, chaque année, pour le secteur du bâtiment est très grande et en croissance. Les granulats sont les ressources les plus utilisées dans ce secteur, dans notre cas d'étude, ils représentent 74% de la masse totale mise en œuvre, et donc évaluer leur impact est primordial et ne peut être négligé.

En effet, les granulats sont aujourd'hui confrontés à des pénuries dans le monde entier (de l'Europe à la Chine, par exemple) et leur extraction génère des impacts environnementaux et sociaux négatifs (Ioannidou et al., 2017; Ren et al., 2022; Veraart, 2019). Ainsi, une méthode d'EICV qui prend en compte cette ressource est nécessaire.

8. Les limites de l'utilisation des méthodes d'EICV relatives aux ressources minérales et métalliques existantes dans une approche d'AESA basée sur l'ACV

8.1 Le manque de facteurs de caractérisation : l'assimilation, une solution acceptable pour l'AESA basée sur l'ACV ?

Cette étude révèle un manque de facteurs de caractérisation des méthodes EICV analysées lorsqu'elles sont appliquées à une étude de cas du secteur du bâtiment, en l'occurrence, à la construction de logements neufs en France en 2015. Cela représente donc une limite considérable à l'application de ces méthodes pour ce secteur car ce manque de données signifie que lorsqu'une méthode d'EICV est utilisée pour estimer l'impact d'un projet de construction, un pourcentage important de la masse des flux associés au projet n'est pas caractérisé.

Cette question est d'autant plus problématique lorsque l'ACV est utilisée comme outil d'aide à la décision dans le secteur du bâtiment en raison de la forte dépendance et de l'impact de ce secteur en matière de consommation de ressources minérales et métalliques (Kedir & Hall, 2021). Si la réglementation ou l'écoconception s'appuie sur l'ACV dans le secteur du bâtiment (Ioannidou et al., 2017; Rodriguez et al., 2016), ce manque peut soulever plusieurs questions critiques.

En effet, un-e décideur-euse de construction ne pourrait pas identifier grâce à une étude ACV les forces et faiblesses de son projet concernant les ressources minérales et métalliques, ou iel peut être induit-e en erreur par une sous-représentation des impacts sur les ressources pondéreuses.

Cette absence de facteurs de caractérisation est due à deux aspects : le premier est que le niveau de détail des flux des bases de données d'inventaire de cycle de vie, comme Ecoinvent, évolue dans le temps et que les méthodes d'EICV ne proposent pas un ensemble de facteurs de caractérisation mis à jour pour chaque évolution de la base de données Ecoinvent.

La seconde est que le niveau de détail des flux nécessite une grande quantité de données pour caractériser tous les flux.

Le tableau suivant présente dans la première colonne la liste des flux de cuivre et d'or issus de l'analyse de l'inventaire de l'étude de cas et dans la deuxième et troisième

colonne leur impact correspondant selon les méthodes CML-IA et Impact World+. Ce tableau montre que :

- i. Tous les flux ne sont pas décrits avec le même niveau de détail, ce qui témoigne de l'évolution des flux d'inventaire dans Ecoinvent.
- ii. Certains flux n'ont pas de facteur de caractérisation correspondant, ce qui signifie que ces flux ont été intégrés dans la base Ecoinvent après la dernière mise à jour de la méthode LCIA.
- iii. Tous les flux, correspondant à une même ressource (par exemple le cuivre), ont les mêmes facteurs de caractérisation, ce qui signifie que les développeurs de méthodes d'EICV assimilent les flux entre eux pour améliorer la complétude de l'ensemble des FC. On peut alors interroger la pertinence de dissocier les flux à ce niveau de détail dans l'inventaire de cycle de vie.

Tableau 3-4 Les flux d'inventaire relatifs au cuivre et à l'or et leurs impacts estimés dans la méthode CML-IA et Impact World+

Mineral and metal substances	CML-IA (Kg Sb eq / Kg)	IMPACT WORLD+ (Kg deprived / Kg)
Copper	1,37E-03	1,20E-01
Copper ore	0,00E+00	1,20E-01
Copper, 0.52% in sulfide, Cu 0.27% and Mo 8.2E-3% in crude ore	1,37E-03	1,93E-03
Copper, 0.59% in sulfide, Cu 0.22% and Mo 8.2E-3% in crude ore	1,37E-03	1,20E-01
Copper, 0.97% in sulfide, Cu 0.36% and Mo 4.1E-2% in crude ore	1,37E-03	1,20E-01
Copper, 0.99% in sulfide, Cu 0.36% and Mo 8.2E-3% in crude ore	1,37E-03	1,20E-01
Copper, 1.13% in sulfide, Cu 0.76% and Ni 0.76% in crude ore	1,37E-03	1,20E-01
Copper, 1.18% in sulfide, Cu 0.39% and Mo 8.2E-3% in crude ore	1,37E-03	1,20E-01
Copper, 1.42% in sulfide, Cu 0.81% and Mo 8.2E-3% in crude ore	1,37E-03	1,20E-01
Copper, 2.19% in sulfide, Cu 1.83% and Mo 8.2E-3% in crude ore	1,37E-03	1,20E-01
Copper, Cu 0.2%, in mixed ore	1,37E-03	1,20E-01
Copper, Cu 0.38%, Au 9.7E-4%, Ag 9.7E-4%, Zn 0.63%, Pb 0.014%, in ore	1,37E-03	1,20E-01
Copper, Cu 3.2E+0%, Pt 2.5E-4%, Pd 7.3E-4%, Rh 2.0E-5%, Ni 2.3E+0% in ore	1,37E-03	1,20E-01

Copper, Cu 5.2E-2%, Pt 4.8E-4%, Pd 2.0E-4%, Rh 2.4E-5%, Ni 3.7E-2% in ore	1,37E-03	1,20E-01
Gold	5,20E+01	8,60E-01
Gold, Au 1.1E-4%, Ag 4.2E-3%, in ore	5,20E+01	8,60E-01
Gold, Au 1.3E-4%, Ag 4.6E-5%, in ore	5,20E+01	8,60E-01
Gold, Au 1.8E-4%, in mixed ore	5,20E+01	0,00E+00
Gold, Au 2.1E-4%, Ag 2.1E-4%, in ore	5,20E+01	8,60E-01
Gold, Au 4.3E-4%, in ore	5,20E+01	8,60E-01
Gold, Au 4.9E-5%, in ore	5,20E+01	8,60E-01
Gold, Au 5.4E-4%, Ag 1.5E-5%, in ore	5,20E+01	0,00E+00
Gold, Au 6.7E-4%, in ore	5,20E+01	8,60E-01
Gold, Au 6.8E-4%, Ag 1.5E-4%, in ore	5,20E+01	0,00E+00
Gold, Au 7.1E-4%, in ore	5,20E+01	8,60E-01
Gold, Au 9.7E-4%, Ag 9.7E-4%, Zn 0.63%, Cu 0.38%, Pb 0.014%, in ore	5,20E+01	8,60E-01
Gold, Au 9.7E-5%, Ag 7.6E-5%, in ore	5,20E+01	0,00E+00

L'assimilation est un processus de post-traitement qui vise à améliorer l'exhaustivité de l'ensemble des facteurs de caractérisation d'une méthode donnée pour estimer un impact.

L'idée de ce processus est d'assimiler le flux A au flux B et de considérer que le facteur de caractérisation du flux A et B est le même, comme c'est le cas pour les flux de cuivre et d'or comme le montre le tableau ci-dessus.

Outre l'assimilation faite pour les flux d'un même minéral ou métal mais provenant d'un contexte d'extraction différent, certaines méthodes assimilent ensemble des substances de différents minéraux ou métaux.

Par exemple, le complément national français à la norme européenne NF EN 15804 + A1 concernant les déclarations environnementales des produits de construction proposait d'utiliser comme indicateur d'épuisement des ressources minérales et métalliques l'indicateur ADP_{elements} dans le cadre des ACV qui sont réalisées dans le contexte d'un projet de construction.

Pour pallier le manque de facteurs de caractérisation de l'indicateur ADP_{elements}, ce document français proposait des règles d'assimilation entre les différentes substances minérales et métalliques. Le tableau suivant montre un exemple des substances assimilées comme proposé par la norme NF EN15804/CN (NF EN 15804/CN, 2016).

Tableau 3-5 Les assimilations proposées dans le cadre du complément national français à la norme NF EN 15804

Substances not considered in ADPelements	Proposed assimilation (EN 15804 + A1 / CN)
Basalt	Silicon
Clay	
Clay and soil, extracted for use	
Clay, bentonite	
Clay, unspecified	
Granite	
Gravel	
Metamorphous rock, graphite containing	
Natural aggregate	
Olivine	
Perlite	
Pumice	
Sand	
Sand and clay	
Sand and gravel	
Sand, gravel and stone, extracted for use	
Sand, quartz	
Sand, quartz, in ground	
Sand, river, in ground	
Shale	
Slate	

Il apparaît dans le tableau ci-dessus que, par manque de données disponibles, de nombreuses substances sont assimilées au silicium alors que leurs caractéristiques en termes d'utilisation, de disponibilité et de composition chimique peuvent être très différentes.

Cette assimilation permet de réduire le manque de facteurs de caractérisation des différentes substances en établissant des approximations acceptables pour fournir des ordres de grandeur.

Cependant, lorsqu'il s'agit d'outils d'aide à la décision, ces approximations peuvent ne pas être acceptables. Par exemple, "clay" est assimilée au "Silicon", ce qui peut se justifier par un état relativement similaire des ressources naturelles, mais l'argile et le silicium n'ont pas les mêmes fonctions dans un projet de construction et ne peuvent être substitués l'un à l'autre pour toutes les fonctions qu'elles remplissent. En effet, la problématique de l'épuisement des ressources est plus un problème socio-économique qu'environnemental (Bjørn et al., 2019a), il faut donc le traiter en se basant sur la fonctionnalité des ressources.

Il peut en être de même pour l'assimilation faite par les développeurs de la méthode concernant les flux de cuivre, par exemple, car les différents flux de cuivre n'ont pas les mêmes propriétés et donc les mêmes fonctions. Alors, assimiler l'un à l'autre ne semble pas être un choix rigoureux du point de vue d'un-e décideur-deuse de la construction, vu la dimension socio-économique du sujet.

Ce problème d'assimilation nous reconduit à notre objectif initial qui est de définir la meilleure méthode d'EICV candidate à une approche AESA basée sur l'ACV.

En effet, pour intégrer les ressources minérales et métalliques dans une approche AESA, il est nécessaire de définir une capacité de charge adaptée à la méthode d'EICV considérée.

Cette capacité de charge doit être définie à l'échelle de chaque substance étant donné que chaque substance est unique et répond à des fonctions différentes.

Ceci implique la nécessité de pouvoir caractériser l'impact spécifique de chaque substance minérale et métallique.

La méthode d'assimilation sera donc difficile voire impossible à mettre en œuvre dans ce cadre-là ou conduira à de fortes incertitudes.

8.2 La régionalisation : un enjeu principal pour les ressources minérales et métalliques

Certaines ressources, telles que les granulats naturels, sont considérées comme très abondantes sur la croûte terrestre. Cependant, leur production et leur circulation sont régionale ou départementale (Rodriguez et al., 2016) et du fait de leur surexploitation

dans le secteur de la construction, certaines régions densément urbanisées, comme la région Ile de France, font face à une grosse contrainte d'approvisionnement (Ioannidou et al., 2017). Il faut donc considérer l'impact des granulats naturels à l'échelle locale.

D'un autre côté, certaines initiatives d'économie circulaire sont mises en place pour réduire l'utilisation des granulats en les recyclant par exemple (Bonnet et al., 2017; Rodriguez et al., 2016), il paraît donc nécessaire de donner quelques indications aux décideur-euse-s sur les impacts, potentiellement positifs, de ces projets.

D'après les résultats obtenus précédemment, les méthodes ACV les plus utilisées ne permettent pas d'évaluer les pressions sur les ressources locales et les matériaux pondéreux comme le granulat car leur impact est invisibilisé par les métaux tels que l'or ou le cadmium qui influencent majoritairement l'impact total.

Il apparaît alors nécessaire de considérer des méthodes d'EICV relatives aux ressources minérales et métalliques qui mettent en valeur les impacts relatifs à ces ressources, et qui considèrent les différentes échelles spatiales les plus adaptées pour chaque ressource afin de mieux appuyer la prise de décision dans le secteur du bâtiment.

Ensuite, dans le cadre d'une démarche AESA basée sur l'ACV appliquée aux ressources minérales et métalliques, il s'agirait de définir une capacité de charge en fonction de l'échelle spatiale de chaque substance.

En effet, si le marché de la plupart des ressources métalliques a une dimension mondiale (Calvo & Valero, 2021), les ressources minérales pondéreuses qui sont particulièrement utilisées dans le secteur du bâtiment ont des marchés nationaux, voire régionaux ou départementaux (Veraart, 2019).

9. Conclusion du chapitre

Tout au long de ce chapitre, nous avons analysé les méthodes d'EICV relatives aux ressources minérales et métalliques et en particulier l'exhaustivité des facteurs de caractérisation qu'elles proposent pour les flux d'inventaire issus de la construction de nouveaux logements en France, en 2015.

Différentes limites ont été identifiées :

- i. Il y a un grand manque dans l'ensemble des facteurs de caractérisation permettant d'estimer les impacts liés aux ressources minérales et métalliques.
- ii. Les matériaux pondéreux, comme les granulats, sont évalués à l'échelle mondiale, ils ont donc un FC très faible, ce qui rend leur impact estimé invisible

dans l'impact total de l'étude de cas malgré leur importante masse et les problèmes reconnus de disponibilité régionale.

- iii. Les méthodes de l'EICV étudiées ne considèrent que les flux environnementaux et pas les flux anthropiques, issus de l'économie circulaire, pour adresser la problématique des ressources. Ce qui représente une limite pour notre approche car nous souhaitons adresser le problème des ressources dans une approche socio-économique plutôt qu'environnementale.
- iv. Pour plusieurs méthodes, les facteurs de caractérisation ne sont pas compatibles avec Ecoinvent 3.5, ce qui n'a pas permis de les analyser en détail et qui présente pour la suite de notre travail un problème d'opérationnalisation.

Sur la base de cette étude, nous avons conclu, qu'au regard des pressions exercées sur les ressources minérales et métalliques dans le secteur du bâtiment, les méthodes d'EICV analysées ne sont pas adaptées à une approche AESA basée sur l'ACV dans ce secteur.

Concernant les méthodes d'EICV qui n'ont pas été analysées à cause de la non-disponibilité de leurs facteurs de caractérisation et la non-possibilité de les implémenter dans un logiciel ACV. Elles ont aussi été estimées non-adaptées à une approche AESA basée sur l'ACV car elles ne répondent pas à l'exigence de la caractérisation des flux issus de l'économie circulaire à l'exception de AADP (Schneider et al., 2011, 2015).

Les facteurs de caractérisation proposés par AADP intègrent le stock anthropique des ressources. Cependant, les facteurs de caractérisation n'ont été développés que pour des métaux (Schneider et al., 2011, 2015) et ne permettent de prendre en compte que les actions de recyclage et non de réemploi. Ces deux limites font que l'utilisation de cette méthode n'est pas adaptée pour des études dans le secteur du bâtiment.

Nous concluons ce chapitre en définissant quelques principes qui devraient être respectés lors du développement d'une méthodologie AESA visant à évaluer les pressions sur les ressources minérales et métalliques, dans une approche de soutenabilité absolue.

L'hypothèse de soutenabilité absolue peut se traduire, pour le problème de l'épuisement des ressources minérales et métalliques, par l'utilisation exclusive des flux issus de l'économie circulaire sans aucune extraction naturelle.

Sur cette base, quelques principes peuvent être définis pour orienter le développement méthodologique :

- a. Les indicateurs proposés devront être appliqués comme des facteurs de caractérisation au niveau de l'inventaire du cycle de vie comme la méthode PB-ACV développée par (Ryberg et al., 2018a) et non comme un facteur de normalisation au niveau de l'impact estimé par une méthode d'EICV existante comme l'approche de la capacité de charge de la méthode ACV-AESA développée par (Bjørn & Hauschild, 2015).
- b. Les indicateurs proposés devront considérer l'échelle spatiale la plus appropriée pour chaque flux en cohérence avec son échelle de circulation la plus adaptée.
- c. Les indicateurs proposés devront prendre en compte les flux de ressources anthropiques, issus de l'économie circulaire.
- d. Le paragraphe suivant a pour but de présenter le cadre méthodologique de la méthode MiMOSA développée pour répondre à ce besoin et qui intègre ces exigences.

Chapitre 4. Quelle méthode de représentation des pressions sur l'approvisionnement en ressources minérales et métalliques pour une approche d'AESA dans le secteur du bâtiment ?

1. Objectifs du chapitre

Une analyse des méthodes existantes d'EICV traitant des ressources minérales et métalliques a été effectuée dans le chapitre 3 afin de déterminer la meilleure méthode candidate pour une démarche d'évaluation d'AESA basée sur l'ACV comme proposé par (Bjørn et al., 2016).

Cependant, à l'issue de cette analyse, il s'est avéré qu'aucune méthode d'EICV existante n'est adaptée pour une approche ACV-AESA dans le secteur du bâtiment à cause de plusieurs limites, rappelées dans la conclusion du chapitre précédent.

La principale limite identifiée et à laquelle ce travail de recherche veut pallier est que les méthodes d'EICV existantes ne considèrent que les flux environnementaux pour décrire les ressources minérales et métalliques.

Or, ceci exclut un large éventail de ressources anthropiques et ne permet pas de traiter la problématique des ressources sur le long terme qui doit prendre en compte les flux du réemploi, réutilisation et recyclage ainsi que leur aspect qualitatif et fonctionnel.

Ainsi, nous avons conclu le chapitre 3 en attestant que, pour traiter les pressions sur les ressources minérales et métalliques dans une approche absolue, nous proposons de développer une méthode en suivant la démarche PB-LCA proposée par (Ryberg et al., 2018a). Ce chapitre a donc pour objectif de présenter la méthode Mineral and Metal Sustainability Assessment (MiMOSA) que nous proposons afin de répondre à ce besoin.

Ce chapitre, dont les travaux ont été présentés dans la conférence « Sustainable Building Environnement 2022 » a fait l'objet d'une publication dans des actes à comité de lecture (Bendahmane et al., 2022). Cette proposition théorique pour la méthode MiMOSA est présentée ici comme un problème matriciel. Il vise à détailler les objectifs et les exigences de la méthode mais aussi les différentes étapes de calcul tout en définissant les matrices et paramètres utilisés.

2. Quelle limite planétaire pour les ressources minérales et métalliques ?

L'objectif de la méthode MiMOSA est de proposer des indicateurs qui évaluent les pressions exercées sur les ressources minérales et métalliques dans une approche absolue en s'inspirant de la démarche PB-LCA avancée par (Ryberg et al., 2018a).

Ryberg et al., 2018a a développé une méthode EICV qui exprime les impacts environnementaux des systèmes étudiés dans les métriques des limites planétaires, MiMOSA souhaite s'inscrire dans cette perspective. Cependant, un des premiers défis

pour adapter cette démarche, qui a été développée pour les impacts environnementaux liés à une des limites planétaires développées par (Steffen, Richardson, et al., 2015), est de trouver un équivalent aux limites planétaires pour les ressources minérales et métalliques, des ressources non renouvelables à l'échelle temporelle humaine.

Comme énoncé dans le chapitre 3, l'utilisation des ressources minérales et métalliques vierges est non soutenable et devra être substituée par la consommation des matériaux issus de l'économie circulaire.

Cette thèse repose sur l'hypothèse centrale qu'un équivalent possible des limites planétaires pour les ressources minérales et métalliques, pourrait être un budget matériau annuel limité aux ressources secondaires issues de l'économie circulaire. Ce budget matériau évolue en fonction des années et en fonction des produits arrivant en fin de vie ou des bâtiments démolis ou déconstruits mais aussi en fonction de l'évolution des processus de valorisation matières qui font que les taux de recyclage, réemploi et réutilisation évoluent aussi.

3. Les exigences de la méthode

Afin de développer au mieux la méthode MiMOSA et pour répondre pleinement à l'objectif fixé, une liste d'exigences a été définie. La méthode MiMOSA doit ainsi :

- Evaluer la soutenabilité d'une manière absolue et non relative en comparant d'un côté la consommation en ressources minérales et métalliques et de l'autre les budgets matériaux assignés au système étudié.
- Intégrer et considérer en priorité les matériaux issus de l'économie circulaire.
- Considérer l'échelle spatiale la plus appropriée pour l'origine de chaque matériau.
- Prendre en compte la qualité des matériaux secondaires pour évaluer l'employabilité pour chaque usage secondaire.
- Prendre en compte la cinétique des besoins annuels du bâtiment tout au long de son cycle de vie étant donné que dans une approche PB-LCA, l'inventaire de cycle de vie doit être modélisé pour exprimer les flux annuels de ressources consommées ou d'émissions produites (Ryberg et al., 2016, 2018a, 2018b)
- Prendre en compte les flux annuels et non les stocks de matériaux pour caractériser les produits et équipements issus du réemploi et les matériaux issus du recyclage, étant donné que dans une approche PB-LCA, les inventaires sont

annuels comme expliqué précédemment. Sachant aussi que les flux issus du réemploi, réutilisation et recyclage évoluent en fonction des années. De plus, l'annualisation est un procédé largement utilisé dans le secteur du bâtiment afin de réaliser une forme de lissage statistique étant donné le nombre important de bâtiments étudiés ou pour un intérêt d'homogénéisation des pratiques. L'annualisation est par exemple utilisée afin de calculer les taux de renouvellement des produits dans l'ACV (NF EN 15804+A2 (CN), 2022).

4. Présentation globale de la méthode MiMOSA

La figure 4-1 présente le schéma global de la méthode MiMOSA.

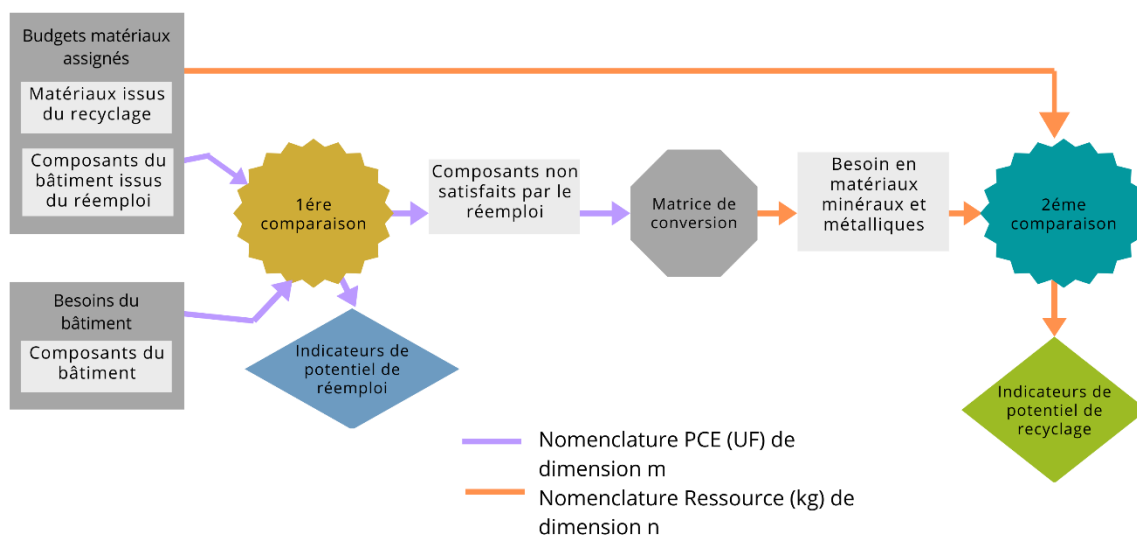


Figure 4-1 Schéma global représentant les étapes principales de la méthode MiMOSA

Les budgets matériaux sont constitués de produits de construction et équipements issus du réemploi et de matériaux issus de recyclage. Ainsi, le développement de la méthode MiMOSA tiendra compte de la hiérarchisation des différentes actions de l'économie circulaire, comme établies par l'article L110-1-1 de la loi de la transition énergétique pour la croissance verte.

La méthode MiMOSA se compose donc en une succession d'étapes. La première consiste à comparer les besoins du bâtiment en produits de construction et équipements d'une part, et, d'autre part, les budgets matériaux issus du réemploi assignés au projet.

A l'issue de cette étape initiale, un premier indicateur est calculé pour chaque produit de construction et équipement afin d'exprimer la part des besoins du projet non satisfaits par les produits de construction et équipements issus du réemploi. Cet

indicateur, calculé en pourcentage, exprime donc la consommation des budgets matériaux pouvant être issus du réemploi et assignés au projet. Si la valeur de cet indicateur est inférieure ou égale à 100% le besoin peut potentiellement être entièrement satisfait par le budget assigné, s'il est supérieur à 100%, c'est qu'il y a un dépassement du budget. Si la valeur est infinie, c'est qu'aucun budget n'a été assigné au projet du fait de l'inexistence de produits de construction et équipements issus du réemploi pour le produit considéré, la consommation de ce produit est donc non soutenable.

Dans la suite, et pour des intérêts de simplification, cet indicateur est nommé « indicateur de réemploi potentiel I_{reuse} ».

La deuxième étape consiste, quant à elle, à traduire les besoins du projet non satisfaits par le réemploi en besoins en matériaux à l'aide d'une matrice de conversion contenant les compositions matérielles des produits de construction et équipements du bâtiment. Dans cette matrice, les lignes correspondent aux produits de construction et équipement et les colonnes aux matériaux. Ainsi, une case correspondante à la ligne du produit ou équipement A et à la colonne du matériau X exprime la quantité du matériau X contenu dans l'unité fonctionnelle du produit ou équipement A.

À la suite de cette étape, un deuxième indicateur est calculé pour chaque matériau. Ces indicateurs sont estimés en comparant les besoins en matériaux non satisfaits par le réemploi et calculés lors de la deuxième étape avec les matières secondaires pouvant être issues du recyclage et assignées au projet étudié. Calculés en pourcentage, ces indicateurs expriment la consommation des budgets matériaux pouvant être issus du recyclage et assignés au projet. Ainsi, de la même manière que les indicateurs de réemploi potentiel, si la valeur de cet indicateur est inférieure ou égale à 100% le besoin peut potentiellement être entièrement satisfait par le budget assigné de matériaux issus du recyclage, s'il est supérieur à 100%, c'est qu'il y a un dépassement du budget. Si la valeur est infinie, c'est qu'aucun budget n'a été assigné au projet, la consommation est donc non soutenable car il n'existe pas de filière de recyclage pour le matériau considéré.

Dans la suite, cet indicateur est nommé « indicateur de recyclage potentiel $I_{recycling}$ ».

La figure 4-2 résume l'interprétation des indicateurs de réemploi potentiel et de recyclage potentiel pour chaque produit et équipement ou matériau minéral et métallique en fonction de leurs valeurs.

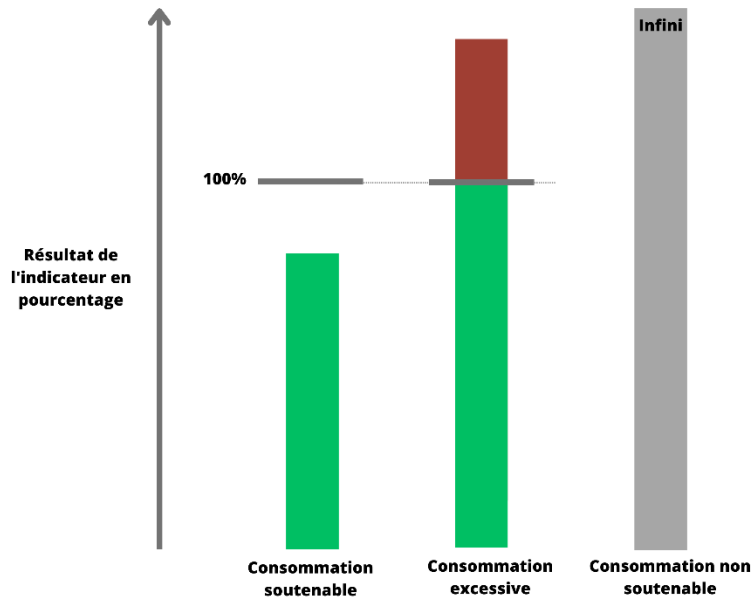


Figure 4-2 Interprétation des indicateurs en fonction de leur valeur

Les deux comparaisons au niveau des produits de construction et équipements du bâtiment et au niveau des matériaux, nécessitent d'adopter deux nomenclatures, une à chaque niveau. Ainsi, on définit une nomenclature PCE (Produits de Construction et Equipements) exprimée en unité fonctionnelle en fonction des produits et équipements, et une seconde nomenclature Matériaux en masse.

Lors de ce chapitre, seules les différentes étapes de calcul vont être détaillées. L'identification des flux issus du réemploi et du recyclage dans les échelles géographiques les plus adaptées pour chacun d'eux et l'application de la méthode à une étude de cas feront l'objet des chapitres suivants.

Le calcul des budgets assignés ne sera pas non plus présenté dans ce chapitre mais lors du chapitre 6 où l'étude de cas sera détaillée.

5. Définition des nomenclatures PCE et Matériaux

Afin de prendre en compte au mieux les différentes actions de l'économie circulaire (EC) dans le secteur du bâtiment, il est nécessaire d'exprimer les quantités des stocks de la techno-sphère et les flux de matériaux (par exemple, acier, aluminium, granulats) pouvant être issus du recyclage et de produits de construction et équipements (par exemple, fenêtres, radiateurs, portes) pouvant être issus du réemploi et correspondant à ces stocks (Tirado, 2022).

Dans ce sens, deux nomenclatures ont été proposées : une orientée produits de construction et équipements du bâtiment et l'autre orientée matériaux. Les matrices

développées dans cette méthode sont construites en se basant sur ces deux nomenclatures.

Actuellement, il n'existe pas de consensus sur les nomenclatures, ni au niveau des produits de construction ou des équipements, dans le secteur du bâtiment, ni au niveau des matériaux. Ainsi, les nomenclatures proposées sont basées sur des nomenclatures françaises existantes dans le secteur du bâtiment mais modifiées pour mieux répondre aux exigences de la méthode MiMOSA.

Etant donné que la méthode MiMOSA intègre seulement les flux issus de la technosphère, ces nomenclatures sont différentes de celles communément utilisées en ACV pour décrire les flux d'inventaire de cycle de vie comme dans la base de données Ecoinvent (Moreno Ruiz et al., 2018).

Par exemple, les flux d'inventaire du cycle de vie, s'expriment au niveau du sable, qui est la ressource primaire (et le flux environnemental) qui permet de fabriquer le verre. En revanche, dans la méthode MiMOSA, on considère le fait que le verre est l'intrant de la filière de recyclage qui fabrique du verre recyclé. C'est donc le verre recyclé, qui sera considéré comme intrant potentiel (pour le budget matériau assigné), et donc la quantité de verre nécessaire au projet qui sera estimée (pour les besoins du bâtiment). Afin de faire cette distinction, nous nommons la nomenclature « *Matériaux* » et non « *Ressources* ».

En effet, d'après l'INSEE, les ressources sont des « sources de matière et d'énergie accessibles économiquement dans l'environnement naturel sous forme primaire avant leur transformation par l'activité humaine » et d'après Larousse, un matériau est une « substance quelconque utilisée à la construction des objets, machines, bâtiments, etc. (On classe les matériaux en grandes classes : métaux, céramiques, verres, textiles, polymères, pierres et bétons, matériaux composites naturels [bois, os] ou artificiels.) ».

Afin de garantir l'homogénéité entre les différentes bases de données et outils qui seront utilisés, ces nomenclatures s'inspirent de celles déjà existantes.

La nomenclature PCE est basée sur TyPy, une base de données et un outil de gestion de typologies de bâtiments et des composants du bâtiment développés par le CSTB (Tirado et al., 2021).

Les unités des composants varient en fonction du type du composant : par exemple, la quantité d'un isolant est exprimée en surface, en m², et celle des tuyaux d'évacuation en mètre linéaire.

Ces unités sont en cohérence avec les unités fonctionnelles des fiches de déclaration environnementale et sanitaire présentes dans la base de données nationale française Inies (Alliance HQE-GBC, 2020).

Quant à la nomenclature Matériaux, nous nous sommes basés sur celle utilisée par TyPy pour exprimer la composition matérielle des composants.

Les valeurs dans les matrices utilisant cette nomenclature relative aux matériaux sont des masses et sont exprimées en kg.

Ci-dessous des extraits de ces nomenclatures :

Nomenclature Matériaux		} n lignes
Acier		
Aluminium		
Laine de verre		
...		
Céramique		

Figure 4-3 Extrait de la nomenclature Matériaux

Nomenclature PCE			} m lignes
Bloc baie	Bloc baie double	Acier	
Élément de structure	Poutrelle	Acier	
Élément de structure	Armature métallique	Acier	
Escalier	Escalier droit	Aluminium	
...	
Fenêtre	Fenêtre triple	Bois-aluminium	

Figure 4-4 Extrait de la nomenclature PCE

6. L'unité temporelle

L'unité temporelle considérée pour les flux anthropiques est l'année. Cette unité a été jugée comme la plus adaptée pour deux raisons.

La première correspond aux spécificités du secteur du bâtiment. En effet, d'un côté, l'année correspond en ordre de grandeur à l'échelle temporelle à laquelle les bâtiments sont actuellement construits et à la granularité des données statistiques disponibles. Entre 1990 et 2010, la durée moyenne de construction des logements en France

métropolitaine a varié entre 11 et 13 mois pour les maisons individuelles, et entre 16 et 23 mois pour les logements collectifs (Ghewy, 2019).

De l'autre, le stockage des matériaux issus de la déconstruction est une source de coûts importante, la méthode MiMOSA prend donc en compte une durée de stockage limitée.

Le deuxième est relatif à des considérations méthodologiques. Dans une approche PB-LCA, l'inventaire de cycle de vie doit être modélisé pour exprimer les flux annuels de ressources consommées ou d'émissions produites (Ryberg et al., 2016, 2018a, 2018b). Ainsi, pour respecter une cohérence méthodologique avec le cadre de l'approche PB-LCA de laquelle s'inspire ce travail, nous considérons l'annualisation comme lissage statistique.

Comme les besoins en matériaux du bâtiment interviennent tout au long de son cycle de vie, pour le remplacement des produits de construction et des équipements par exemple, la méthode MiMOSA prend en compte les besoins du projet étudiés et les flux issus de l'économie circulaire pour chaque année de la durée de vie du bâtiment étudié.

Ainsi, les étapes présentées dans le schéma de la figure 4-1 sont effectuées pour chaque année et les indicateurs de réemploi et de recyclage sont aussi calculés pour chaque année.

Cependant, dans un intérêt de simplification et en première approche, l'étude de cas (présentée au chapitre 6) va se contenter de calculer les indicateurs de réemploi potentiel et de recyclage potentiel pour l'« année » de construction du bâtiment qui représente le pic de consommation.

7. Développements méthodologiques

Dans les paragraphes suivants, les différents développements méthodologiques et étapes de MiMOSA vont être détaillés en définissant au fur et à mesure les paramètres et matrices nécessaires.

7.1 Description des besoins du projet étudié

Comme expliqué dans le paragraphe précédent, seule la phase de construction est considérée dans cette première approche de la méthode.

De plus, seules les consommations de ressources liées aux produits de construction et équipements et qui représentent la plus grosse masse de matériaux, vont être prises

en compte. Nous catégorisons donc les consommations du bâtiment en consommations « directes » de ressources minérales et métalliques, constituées des produits de construction et équipements présents dans le bâtiment, et consommations « indirectes » des ressources minérales et métalliques qui concernent l’approvisionnement en énergie et en eau ou le transport des matériaux par exemple (voir figure 4-5).

En ne considérant que les consommations « directes » des ressources, nous nous écartons ici des principes de l’ACV qui exigent d’estimer les impacts tout au long du cycle de vie des systèmes. Cependant, il s’agit ici d’une première approche liée à l’absence de données sur l’ensemble du cycle de vie du projet. Il sera intéressant d’évaluer, dans des travaux futurs, la part des quantités mises en œuvre et la contribution aux pressions qu’un bâtiment exerce sur les ressources minérales et métalliques de l’arrière-plan du système, relative, par exemple, à la consommation d’eau et d’énergie, au transport des produits et matériaux de construction, au traitement des déchets du chantier de construction.

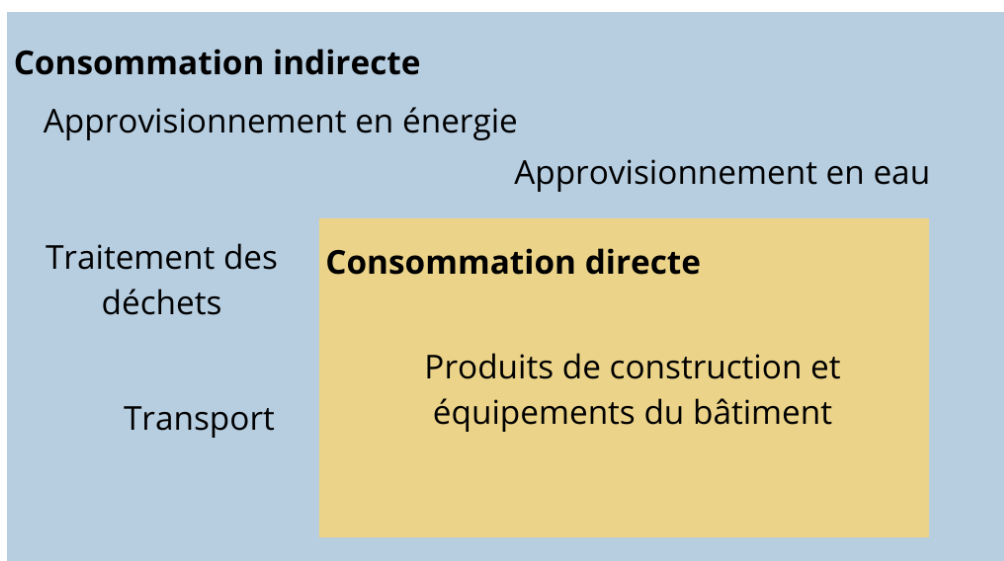


Figure 4-5 Les consommations directes et indirectes de ressources dans un bâtiment

La consommation directe de la construction du bâtiment est exprimée sous forme de produits de construction et d’équipements. Nous définissons donc une matrice exprimée à l’aide de la nomenclature PCE comme suit :

- $P_{reuse}(m, 1)$: Vecteur matriciel contenant les besoins en produits de construction et équipements du bâtiment, en Unité Fonctionnelle (UF). L’UF dépend de chaque produit de construction ou équipement et est en cohérence avec les unités des fiches de déclaration environnementale et sanitaire de la

base nationale française Inies (Alliance HQE-GBC, 2020). Les besoins sont exprimés en quantité de surface pour des isolants ou des quantités de longueur pour des câbles électriques par exemple.

Avec :

- m : le nombre de lignes de la nomenclature PCE telle que définie dans le paragraphe 5 de ce chapitre 4.

Les valeurs de ce vecteur matriciel sont définies par l'utilisateur-rice de la méthode en indiquant les quantités de produits de construction et équipements correspondant au projet étudié. Ces valeurs proviennent de la modélisation des bâtiments étudiés et sont traduites dans la nomenclature PCE de la méthode MiMOSA.

Voici un exemple qui illustre la construction du vecteur matriciel $P_{reuse}(m, 1)$

Avec :

$$P_i \in \mathbb{Q}^+, \forall i \in [0; m]$$

\mathbb{Q}^+ : L'ensemble des nombres rationnels positifs

Nomenclature PCE			$P_{reuse}(m, 1)$	UF
Bloc baie	Bloc baie double	Acier	p_1	m^2
Élément de structure	Poutrelle	Acier	p_2	m
Élément de structure	Armature métallique	Acier	p_3	m
Escalier	Escalier droit	Aluminium	p_4	m
Fenêtre	Fenêtre triple	Bois-aluminium	p_5	m^2
...
Toit	Couverture en bac acier	Acier	p_m	m^2

Figure 4-6 Extrait du vecteur matriciel $P_{reuse}(m, 1)$

7.2 Définition du budget matériau global

D'après l'article L110-1-1 de la loi de la transition énergétique pour la croissance verte du 17 août 2015 du Code de l'environnement, « La transition vers une économie circulaire vise à dépasser le modèle économique linéaire consistant à extraire, fabriquer, consommer et jeter en appelant à une consommation sobre et responsable des ressources naturelles et des matières premières primaires ainsi que, par ordre de priorité, à la prévention de la production de déchets, notamment par le réemploi des

produits, et, suivant la hiérarchie des modes de traitement des déchets, à une réutilisation, à un recyclage ou, à défaut, à une valorisation des déchets.» (Légifrance, 2015a).

De cette définition de l'économie circulaire, nous pouvons définir une hiérarchie des modes de traitement des déchets qui priorise une action par rapport à l'autre.

Le réemploi est priorisé par rapport à la réutilisation qui est elle-même priorisée par rapport au recyclage qui est lui-même priorisé par rapport aux autres formes de valorisation.

Le réemploi est l'action par laquelle des produits sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus (ADEME, 2021b).

La réutilisation consiste à utiliser un produit de nouveau mais pour un usage différent que son usage initial (ADEME, 2021b).

Le recyclage regroupe toute opération de valorisation par laquelle les déchets sont retraités en substances ou matières au vu d'une réintégration dans le processus de fabrication de nouvelles ressources (ADEME, 2021b).

Le budget matériau, défini dans notre recherche pour des études dans le secteur du bâtiment, représente la quantité maximale de matériaux qu'un projet de construction neuve ou de rénovation peut consommer afin d'être considéré comme soutenable. Ce budget matériau contient des produits de construction et équipements issus du réemploi et de la réutilisation et des ressources minérales et métalliques provenant du recyclage et dépend des règles d'assignation, définies par la suite dans ce chapitre 4.

Dans la suite de ce chapitre, à des fins de simplification, le terme réemploi désignera à la fois le réemploi et la réutilisation.

Les matériaux issus de l'économie circulaire sont d'abord immobilisés dans les produits et les bâtiments avec de courtes ou longues durées de vie en œuvre. par exemple l'aluminium contenu dans une cannette a une durée de vie en œuvre faible et des qualités différentes par rapport à l'aluminium utilisé dans un bâtiment. Ainsi, le budget matériau doit tenir compte de la vie en œuvre et de la qualité des matériaux afin de refléter au mieux la disponibilité réelle des matériaux et leur employabilité (Tirado, 2022).

Le budget matériau, qui pour rappel, représente la quantité maximale de matériaux qu'un projet de construction neuve ou de rénovation peut consommer afin d'être

considéré comme soutenable, est donc égal, dans ces travaux de recherche, aux produits de construction issus du réemploi pour un usage requérant une qualité donnée et aux matériaux issus du recyclage pour une année donnée et dans une échelle spatiale donnée.

Par exemple, nous allons différencier d'une part les flux de fenêtres pouvant être réemployées en répondant aux exigences techniques (thermiques, acoustiques, étanchéité...) qui lui sont associées et d'autre part les flux de fenêtres ne répondant pas à ces exigences mais qui peuvent néanmoins être réutilisées pour la construction de cloisons vitrées internes par exemple, comme le suggère le bureau d'étude lyonnais spécialisé dans le réemploi des produits de construction (Bobi réemploi, 2021).

Cette définition du budget matériau de la méthode MiMOSA, contrairement aux méthodes d'EICV relatives aux ressources minérales et métalliques existantes dans la littérature, limite la méthode aux matériaux issus de l'économie circulaire.

Ainsi, elle consiste à quantifier des flux présents dans la techno sphère, et ne cherche donc pas à évaluer les pressions des activités de la techno sphère sur l'envirosphère, mais plutôt à évaluer la soutenabilité de l'utilisation des matériaux minéraux et métalliques en estimant dans quelle mesure un projet donné peut ne dépendre que des flux qui se trouvent dans la techno sphère.

Ces flux de la techno sphère sont recyclés ou réemployés afin d'être réintégrés dans de nouveaux produits ou bâtiments. La figure 4-7 décrit les différents flux et stocks évoqués issus de la déconstruction et qui permettent d'estimer le budget matériau qui peut être assigné au projet étudié afin d'évaluer sa soutenabilité vis-à-vis de sa consommation de matériaux minéraux et métalliques.

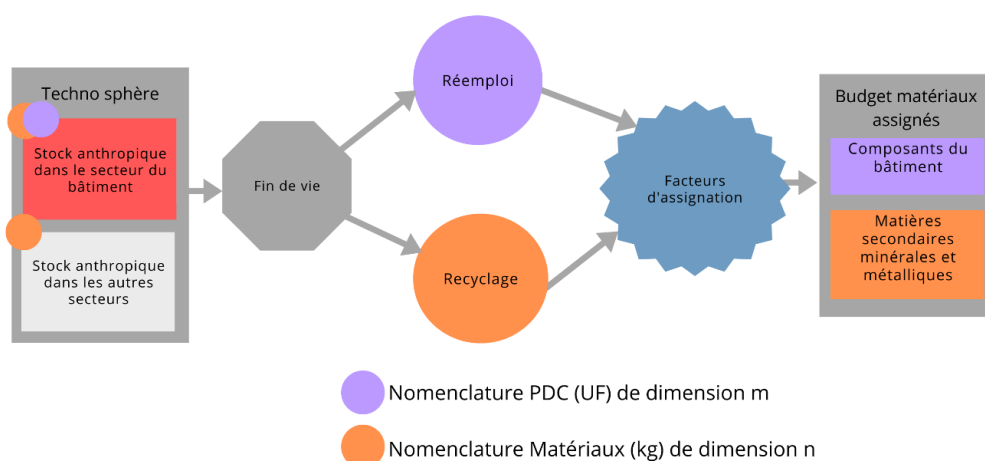


Figure 4-7 Les flux de recyclage et réemploi

Dans ce chapitre, nous définissons les matrices suivantes :

- $A_{reuse} (m, 1)$: Vecteur matriciel contenant les quantités des produits de construction et équipements du bâtiment issus du réemploi, exprimées en UF. Ce vecteur est exprimé de la même manière que le vecteur P_{reuse} exprimant les besoins de produits de construction et équipements (mêmes typologies, mêmes unités par ligne) mais A_{reuse} contient la quantité des composants du bâtiment en sortie des filières de réemploi. Il s'agit des flux de produits de construction et équipements du bâtiment issus de la déconstruction des bâtiments et auxquels les taux de rendement des filières de réemploi ont été appliqués. Ces taux dépendent du composant mais aussi de la fonction après réemploi auquel le composant est censé répondre, ils dépendent donc de l'efficacité des processus de réemploi et prennent en compte les pertes.
- $A_{recycling} (n, 1)$: Vecteur matriciel contenant les quantités de matières secondaires en entrée des filières de recyclage des matériaux minéraux et métalliques, exprimées en kg. La figure 4-9 met en évidence la fraction de matières secondaires en entrée des filières de recyclage. Cette quantité dépend de chaque matériau, des technologies de recyclage déployées et de la qualité souhaitée et prend en compte les pertes (Caevel et al., 2010).

Avec :

- m : le nombre de lignes de la nomenclature PCE
- n : le nombre de lignes de la nomenclature Matériaux telle que définie dans le paragraphe 5 de ce chapitre 4.

La figure 4-8 présente où se situent ces vecteurs matriciels par rapport au schéma global de la méthode MiMOSA présenté au début de ce chapitre :

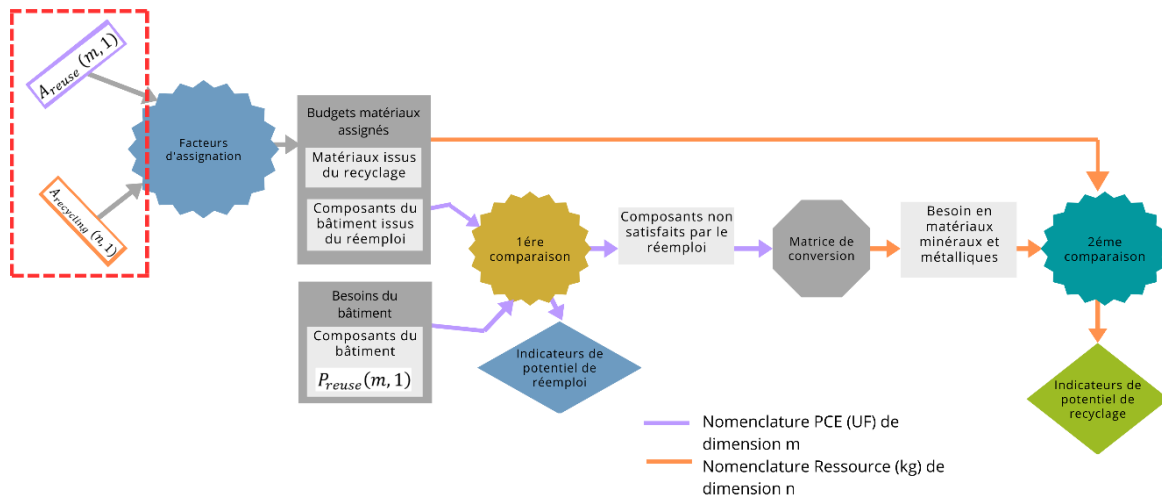


Figure 4-8 Localisation des vecteurs matriciels contenant les budgets globaux de réemploi et recyclage par rapport au schéma global de la méthode MiMOSA

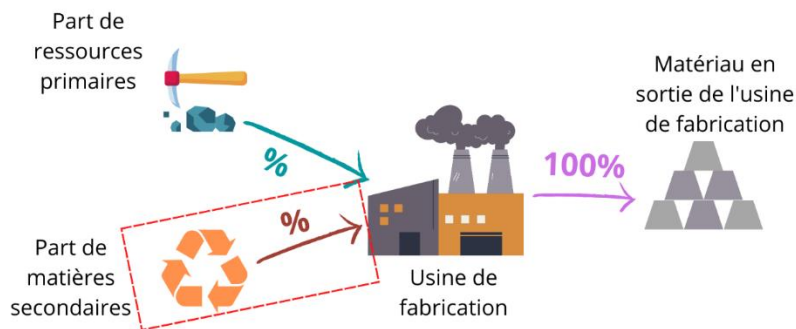


Figure 4-9 Encadrée en rouge la fraction de matières secondaires intégrées dans le processus de production des matériaux

La figure 4-10 montre où se situe la méthode MiMOSA par rapport aux méthodes d'EICV existantes dans la littérature dans un schéma initialement développé par (Sonderegger et al., 2020). La figure 4-10 modélise les flux de matières, représentés à l'aide des flèches grises et les mécanismes d'impacts représentés en couleur en fonction de leur catégorie comme définis dans (Sonderegger et al., 2020).

En vert, les méthodes d'épuisement, en jaune les méthodes qui caractérisent les efforts futurs, en orange les méthodes de comptabilité thermodynamique, en bleu les méthodes du risque d'approvisionnement et en violet l'approche de la « dilution des stocks totaux ». La méthode MiMOSA est représentée en rouge.

Nous observons donc que la méthode MiMOSA est la seule méthode qui se situe au niveau des flux de la techno sphère, et précisément les flux du recyclage et réemploi.

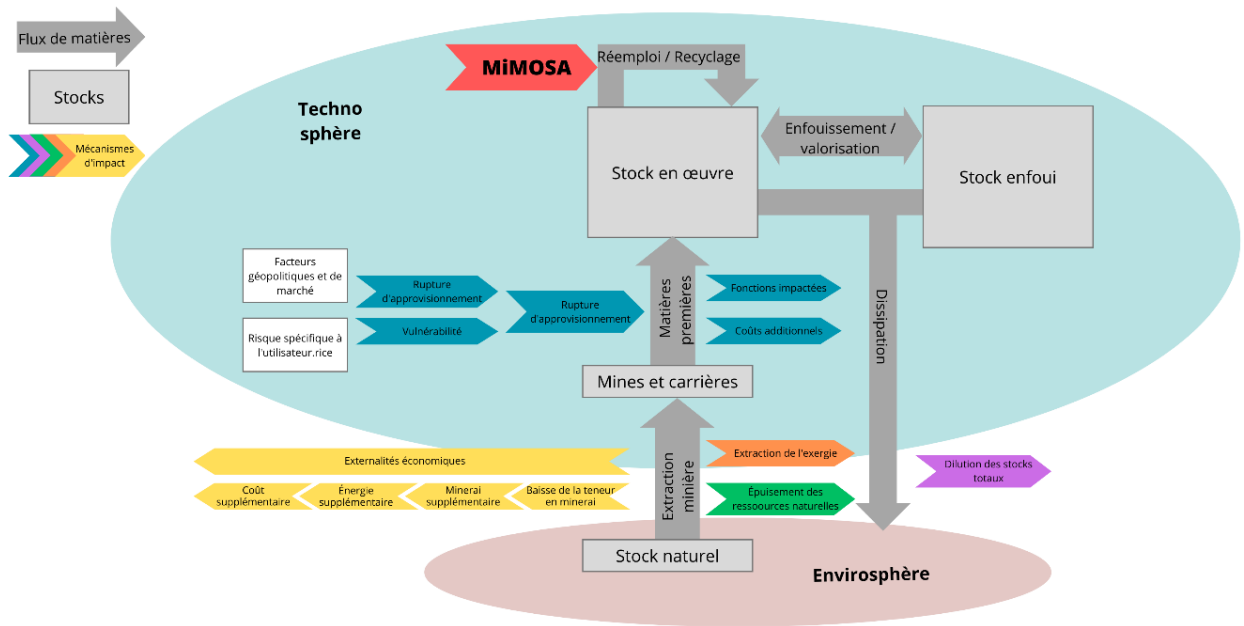


Figure 4-10 Positionnement des mécanismes d'impact des méthodes EICV existantes en fonction des flux caractérisés. La méthode MiMOSA, représentée avec une flèche rouge, caractérise les flux de réemploi et de recyclage, des flux présents dans la techno sphère. Cette figure a été reprise de (Sonderegger et al., 2020)

Et la figure 4-11 montre où se situe la méthode MiMOSA par rapport aux flux entrants et sortants d'un bâtiment donné. Dans cette figure, les flux entrants proviennent de la techno sphère, les flux du réemploi et du recyclage, et de l'envirosphère, les flux de matières premières. Concernant les flux de sortie, une différenciation a été faite entre, d'un côté, les flux dissipés, qui reviennent donc dans l'envirosphère et de l'autre, les matériaux qui sont réemployés ou recyclés ou qui vont vers un autre scénario sous une autre forme.

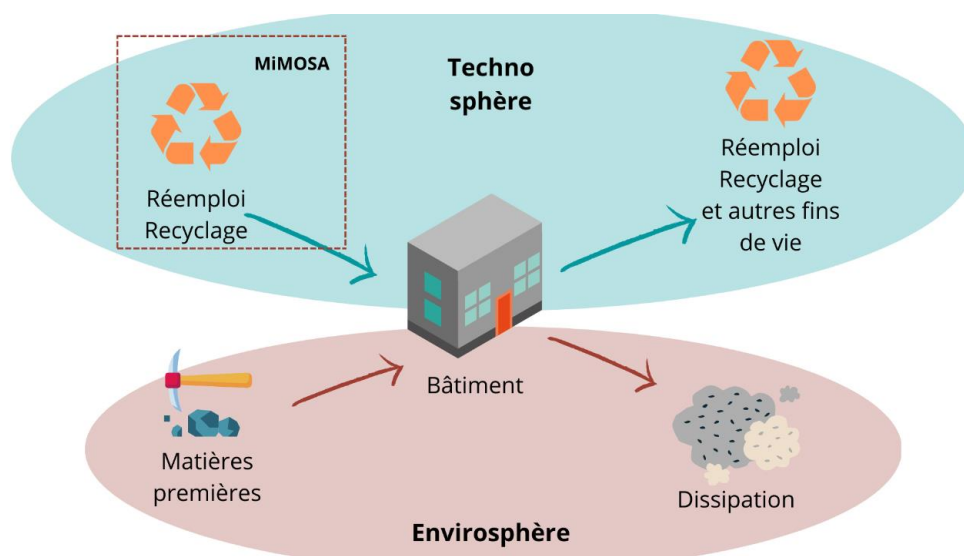


Figure 4-11 Où se situe MiMOSA par rapport aux flux de matières entrants et sortants d'un bâtiment

7.3 Calcul des budgets matériaux assignés au bâtiment étudié

Afin de déterminer les budgets matériaux pouvant être assignés au bâtiment, il est d'abord nécessaire d'estimer les flux annuels issus du recyclage et du réemploi en provenance du secteur du bâtiment mais aussi des autres secteurs. C'est ce qui va être détaillé lors du chapitre 5 et 6. Ensuite, la définition des facteurs d'assignation, permettra d'assigner ces flux au bâtiment étudié.

La définition des facteurs d'assignation doit respecter des principes de partage (sharing principles) actuellement amplement discutés dans la littérature sur l'AESA (Baabou et al., 2022; Ryberg et al., 2018a). Elle dépend du projet étudié et est éminemment liée à des principes d'« équité » dont le choix ne devrait pas être réalisé par les développeur-se-s des méthodes mais par les utilisateur-ric-e-s (Hjalsted et al., 2021).

Depuis l'article 3 de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) en 1992 (CCNUCC, 1992), des discussions portent sur la contribution 'équitable' que chaque pays doit réaliser pour réduire ses émissions de gaz à effet de serre et ainsi atteindre les objectifs de réduction de température fixés au niveau mondial ont lieu.

Ces discussions ont mené à l'émergence d'une littérature abondante qui définit des approches de « partage de l'effort » basées sur des principes d'équité tels que la « capacité », l'« égalité », la « responsabilité » et la « souveraineté » (Höhne et al., 2014). Le tableau 4-1 résume quelques-unes de ces approches.

Ces approches de « partage de l'effort » sont utilisées pour estimer les quotas d'émissions ou les objectifs de réduction des émissions requis dans le temps pour chaque pays ou région afin d'atteindre les objectifs globaux. Ils sont aussi utilisés afin de définir des budgets carbone à l'échelle des pays ou régions (Höhne et al., 2014; Ryberg et al., 2020). Dans le cadre de la méthode MiMOSA, ces approches servent à assigner les budgets matériaux au projet de construction étudié.

Tableau 4-1 Les approches d'assignation et les principes d'"équité" identifiés dans la littérature

Approche	Principe d'« équité »	Explication
Droits acquis	Souveraineté	L'approche des droits acquis priorise les utilisateurs existants par rapport aux nouveaux arrivants, en fonction de leur utilisation antérieure en suivant le principe du « premier arrivé, premier servi ». (Damon et al., 2012)

Egale par habitant-e	Egalité	L'approche égale par habitant-e donne une valeur égale à tous les humains et considère que chacun-e a un droit égal d'accéder aux biens mondiaux
Egale par habitant-e cumulative	Egalité / Responsabilité	L'approche égale par habitant-e cumulative prend en compte le fait que les pays industrialisés ont déjà utilisé une grande quantité de quotas d'émission cumulés par habitant-e-s et ont consommé une large quantité de ressources par habitant-e-s par rapport aux autres pays. Ils doivent donc fournir plus d'effort.
Droit au développement	Responsabilité / Capacité / Egalité	L'approche droit au développement garantit le droit des personnes à atteindre un niveau digne du développement humain durable.

Dans ce chapitre 4, nous définissons le cadre théorique de la méthode MiMOSA indépendamment de la disponibilité des données en posant les matrices suivantes :

- $F_{reuse}(m, 1)$: Vecteur matriciel contenant les facteurs d'assignation des produits de construction et équipements du bâtiment issus du réemploi au niveau du bâtiment étudié
- $F_{recycling}(n, 1)$: Vecteur matriciel contenant les facteurs d'assignation des matières secondaires minérales et métalliques issues du recyclage au niveau du bâtiment étudié.

Ces deux vecteurs matriciels contiennent des valeurs comprises entre 0 et 1. Si la valeur est égale à zéro, c'est que le composant du bâtiment ou le matériau minéral ou métallique correspondant n'est pas assigné au projet étudié (en d'autres termes, il n'est pas disponible pour ce projet) . La consommation du bâtiment de ce composant ou de ce matériau ne peut donc pas être soutenable.

Si la valeur est égale 1, c'est que la totalité du flux est assigné au bâtiment étudié. Ceci ne donne cependant pas d'indication sur la soutenabilité potentielle qui est déduite en comparant les budgets assignés et les besoins, comme détaillé par la suite.

Dans un second temps, les facteurs d'assignation permettent de calculer, à partir des vecteurs matriciels $A_{reuse}(m, 1)$ et $A_{recycling}(n, 1)$, les budgets de produits de construction ou équipements et matériaux secondaires pouvant être issus, respectivement, du réemploi et recyclage assignés au projet étudié.

Les budgets produits de construction et équipements assignés sont calculés en faisant un produit matriciel de la matrice diagonale $\widehat{F_{reuse}}$ calculée à partir du vecteur matriciel F_{reuse} et du vecteur matriciel A_{reuse} selon la formule suivante :

$$B_{reuse} = \widehat{F_{reuse}} \cdot A_{reuse}$$

Et les budgets matériaux secondaires assignés sont calculés en faisant un produit matriciel de la matrice diagonale $\widehat{F_{recycling}}$ calculée à partir du vecteur matriciel $F_{recycling}$ et du vecteur matriciel $A_{recycling}$ selon la formule suivante :

$$B_{recycling} = \widehat{F_{recycling}} \cdot A_{recycling}$$

Avec :

- $B_{reuse}(m, 1)$: Vecteur matriciel contenant les budgets de produits de construction et équipements du bâtiment issus du réemploi assignés au projet étudié, en UF. Ces quantités de produits de construction et équipement sont les quantités que la consommation du projet étudié ne doit pas dépasser afin d'atteindre une soutenabilité vis-à-vis des matériaux en fonction de l'indicateur de de réemploi.
- $B_{recycling}(n, 1)$: Vecteur matriciel contenant les budgets de matières secondaires minérales et métalliques issues du recyclage assignés au projet étudié, en kg. Ces quantités de matières secondaires minérales et métalliques sont les quantités que la consommation du projet étudié ne doit pas dépasser afin d'atteindre une soutenabilité vis-à-vis des matériaux en fonction de l'indicateur de de recyclage.
- \widehat{V} la matrice diagonale calculée à partir de tout vecteur matriciel V . $\widehat{V}_{ij} = V_i \delta_{ij}$ avec δ_{ij} le delta de Kronecker.
- m : le nombre de lignes de la nomenclature PCE
- n : le nombre de lignes de la nomenclature Matériaux

7.4 Calcul des indicateurs de réemploi potentiel

Les indicateurs de réemploi potentiel ont pour objectif de tenir compte et de valoriser les choix au niveau de la conception permettant de mettre en place des actions de réemploi.

La première étape de comparaison entre les budgets assignés et les besoins du bâtiment se mesure au niveau des produits de construction et équipements en intégrant les actions de réemploi.

A l'issue de cette comparaison, deux matrices sont définies, une qui contient les indicateurs de réemploi potentiel et une autre qui contient les besoins du bâtiment étudié qui n'ont pas été satisfaits par le réemploi. Nous définissons ces deux matrices comme suit :

- $I_{reuse}(m, 1)$: Vecteur matriciel contenant les indicateurs de réemploi potentiel. Les valeurs de ce vecteur matriciel sont supérieures ou égales à zéro.
- $P_{reuse}(m, 1)$: Vecteur matriciel contenant les besoins totaux en produits de construction et équipements du bâtiment, en UF, tel que défini dans la section 7.1. de ce chapitre.
- $B_{reuse}(m, 1)$: Vecteur matriciel contenant les budgets de produits de construction et équipements du bâtiment issus du réemploi assignés au projet étudié, en UF.
- $N_{reuse}(m, 1)$: Vecteur matriciel contenant les besoins en produits de construction et équipements du bâtiment non satisfaits par le réemploi.

Pour chaque ligne i , $I_{reuse,i}$ est égale, en pourcentage, au ratio entre $P_{reuse,i}$ et $B_{reuse,i}$ et $N_{reuse,i}$ est égale à la différence entre $P_{reuse,i}$ et $B_{reuse,i}$.

$$I_{reuse,i} = \frac{P_{reuse,i}}{B_{reuse,i}} \% ; \forall i \in [0; m]$$

$$N_{reuse,i} = P_{reuse,i} - B_{reuse,i} ; \forall (B_{reuse,i} - P_{reuse,i}) < 0$$

Avec :

- m : le nombre de lignes de la nomenclature PCE

L'indicateur de réemploi potentiel exprime un usage soutenable pour un produit de construction ou équipement donné i , et seulement si :

$$I_{reuse,i} = \frac{P_{reuse,i}}{B_{reuse,i}} \cdot 100\% \leq 100; \forall i \in [0; m]$$

Ceci voudrait dire que le besoin du projet étudié pour ce produit de construction ou équipement est inférieur ou égal au budget qui lui est assigné. C'est-à-dire que, pour les produits de construction ou équipements du bâtiment i , les besoins du projet étudié peuvent être satisfaits par des produits issus du réemploi.

Si l'indicateur est égal à l'infini, c'est que le produit de construction ou équipement en question ne peut provenir du réemploi, faute de possibilité technique ou de filière disponible, c'est le cas de la peinture ou du mortier par exemple.

7.5 Calcul des besoins en matières secondaires minérales et métalliques

Une fois les actions de réemploi prises en compte, il est fort probable qu'un nombre de besoins en produits de construction et équipements du bâtiment étudiés ne soient pas totalement satisfaits.

Cette étape vise à traduire les besoins non satisfaits par le réemploi en besoin de matières secondaires à l'aide d'une matrice de conversion contenant la composition matérielle des produits et de la fraction des matières secondaires à l'entrée des filières de recyclage des matériaux minéraux et métalliques.

La composition matérielle des produits de construction est estimée à partir des quantités des produits constitutifs de l'unité fonctionnelle des FDES et des PEP de la base de données Inies (Alliance HQE-GBC, 2020). Il s'agit ici d'estimer la quantité de matériaux minéraux et métalliques nécessaires pour fabriquer les produits de construction ou les équipements du bâtiment qui ne peuvent être fournis en totalité par le réemploi.

Concernant la fraction des matières secondaires à l'entrée des filières de recyclage des matériaux minéraux et métalliques, elle est estimée à l'aide de l'indicateur « utilisation des matières secondaires » des FDES et PEP présentes dans la base de données Inies (Alliance HQE-GBC, 2020). La détermination des valeurs de la matrice M se fait lors du chapitre 6 de ce manuscrit.

- $M(n, m)$: matrice de conversion contenant la quantité de matières secondaires présentes dans la composition matérielle des produits de construction et équipements du bâtiment, en kg/UF
- $P_{recycling}(n, 1)$: Vecteur matriciel contenant les besoins en ressources du bâtiment après prise en compte du réemploi, en kg
- $N_{reuse}(m, 1)$: Vecteur matriciel contenant les besoins du bâtiment non satisfaits par le réemploi, comme définis dans la section précédente.

$$P_{recycling} = M \cdot N_{reuse}$$

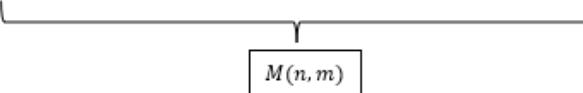
Avec :

- m : le nombre de lignes de la nomenclature PCE
- n : le nombre de lignes de la nomenclature Matériaux

Ci-dessous un exemple qui illustre la construction de la matrice de conversion $M(n, m)$

Tableau 4-2 Extrait de la matrice de conversion $M(n,m)$

Nomenclature PCE / Nomenclature Matériaux			Aluminium	Verre	Béton	Acier	Laine de	Laine de	Terre cuite	Plâtre	...	Mortier
Bloc baie	Bloc baie double	Acier	$x_{1,1}$	$x_{1,2}$	$x_{1,3}$	$x_{1,4}$	$x_{1,5}$	$x_{1,6}$	$x_{1,7}$	$x_{1,8}$	...	$x_{1,n}$
Elément de structure	Poutrelle	Acier	$x_{2,1}$	$x_{2,2}$	$x_{2,3}$	$x_{2,4}$	$x_{2,5}$	$x_{2,6}$	$x_{2,7}$	$x_{2,8}$	...	$x_{2,n}$
Elément de structure	Armature métallique	Acier	$x_{3,1}$	$x_{3,2}$	$x_{3,3}$	$x_{3,4}$	$x_{3,5}$	$x_{3,6}$	$x_{3,7}$	$x_{3,8}$	...	$x_{3,n}$
Escalier	Escalier droit	Aluminium	$x_{4,1}$	$x_{4,2}$	$x_{4,3}$	$x_{4,4}$	$x_{4,5}$	$x_{4,6}$	$x_{4,7}$	$x_{4,8}$	...	$x_{4,n}$
Fenêtre	Fenêtre triple	Bois-aluminium	$x_{5,1}$	$x_{5,2}$	$x_{5,3}$	$x_{5,4}$	$x_{5,5}$	$x_{5,6}$	$x_{5,7}$	$x_{5,8}$	...	$x_{5,n}$
...
Toit	Couverture en bac acier	Acier	$x_{m,1}$	$x_{m,2}$	$x_{m,3}$	$x_{m,4}$	$x_{m,5}$	$x_{m,6}$	$x_{m,7}$	$x_{m,8}$	...	$x_{m,n}$



7.6 Calcul des indicateurs de recyclage potentiel

Le calcul des indicateurs de recyclage potentiel vient à la suite de la comparaison entre les besoins en matériaux du projet étudié après prise en compte des flux de réemploi et des budgets matières secondaires issues du recyclage assigné au projet.

Nous définissons ainsi les matrices suivantes :

- $I_{recycling}(n, 1)$: Vecteur matriciel contenant les indicateurs de recyclage potentiel

$$I_{recycling,i} = \frac{P_{recycling,i}}{B_{recycling,i}} \% ; \forall i \in [0; n]$$

Avec :

- n : le nombre de lignes de la nomenclature Matériaux

La consommation d'un matériau i par le projet de construction est considérée comme absolument soutenable vis-à-vis de sa consommation de matières minérales et métalliques si, et seulement si :

$$I_{recycling,i} = \frac{P_{recycling,i}}{B_{recycling,i}} \cdot 100\% \leq 100; \forall i \in [0; n]$$

Tout comme les indicateurs de réemploi potentiel, un indicateur de recyclage potentiel inférieur à 100% veut dire que le besoin en ce matériau peut être entièrement satisfait par le recyclage.

7.7 Soutenabilité de la consommation matière minérale et métallique du projet étudié

A l'issue de la méthode MiMOSA, deux indicateurs sont ainsi calculés : en premier, l'indicateur de réemploi potentiel (I_{reuse}), calculé pour chaque produit de construction ou équipement et en deuxième, l'indicateur de recyclage potentiel ($I_{recycling}$), calculé pour chaque matériau minéral ou métallique.

Un projet de construction est considéré comme soutenable vis-à-vis de la consommation de matières minérales et métalliques si et seulement si les indicateurs de recyclage potentiel pour tous les matériaux sont inférieurs à 100%.

En effet, la soutenabilité du projet est déduite après la prise en compte des actions de réemploi et des actions de recyclage.

Les résultats des indicateurs de réemploi potentiel influent sur ceux des indicateurs de recyclage potentiel car plus on répond au besoin du bâtiment par le réemploi, moins on fait appel au recyclage.

8. Conclusion du chapitre

Ce chapitre a présenté, d'une manière très théorique, les différentes étapes et développements méthodologiques de la méthode MiMOSA. Dans le schéma suivant, un résumé de toutes les matrices définies dans ce chapitre 4 ainsi que les liens entre elles sont présentés.

Une fois le cadre méthodologique théorique défini, il est nécessaire de l'illustrer, l'opérationnaliser et le valider en l'appliquant tel que défini dans ce chapitre à une étude de cas et en précisant les aspects techniques d'une manière plus concrète ou en adaptant la méthode quand nécessaire.

L'étude de cas portera sur la construction d'une maison individuelle dans le département Seine-Saint-Denis dans la région Ile-de-France.

Pour ce faire, il sera aussi indispensable de quantifier les flux issus du réemploi et du recyclage aux échelles géographiques adaptées afin de répondre aux exigences de la méthode MiMOSA définies précédemment.

Ainsi, le chapitre 5 aura pour objectif de présenter une méthode pour la définition des taux de réemploi et de réutilisation des produits de construction et équipements du secteur du bâtiment dans une approche prospective et pour un contexte français. Il aura aussi pour objectif d'estimer les quantités de matières secondaires issues du recyclage.

Le chapitre 6, quant à lui, cherchera à appliquer la méthode MiMOSA à une étude de cas. Dans ce chapitre, les flux issus du réemploi et de la réutilisation seront aussi estimés en utilisant les taux calculés dans le chapitre 5 et des paramètres propres aux scénarios considérés dans l'étude de cas. Une approche d'assignation sera aussi proposée dans ce chapitre.

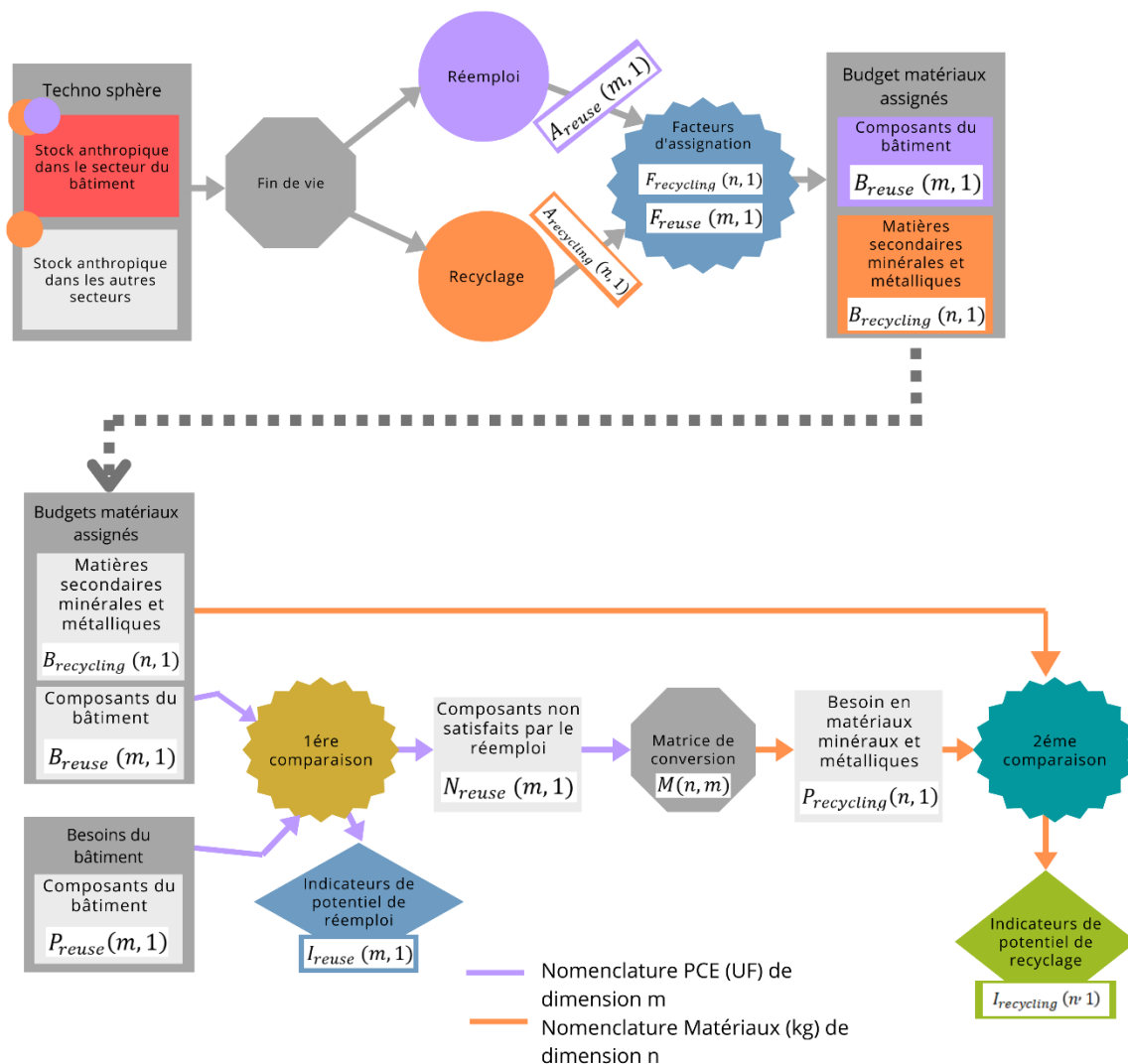


Figure 4-12 Schéma récapitulatif de la méthode MiMOSA et des matrices utilisées

Chapitre 5. Estimation des taux de réemploi et de réutilisation des produits de constructions issus du secteur du bâtiment et des flux issus du recyclage dans une approche prospective

1. Objectifs du chapitre

Ce chapitre se base en partie sur les travaux de stage de S. Clavier et ont fait l'objet d'une publication dans le journal Environnement Ingénierie et Développement (Clavier et al., 2023).

Le chapitre précédent a développé le modèle théorique de la méthode MiMOSA et une des données d'entrée essentielle à cette méthode sont les flux issus du réemploi, de la réutilisation et du recyclage. Ce chapitre vise donc à répondre à la question de recherche suivante : Comment estimer les gisements de produits de construction et de matériaux minéraux et métalliques issus du réemploi, réutilisation et recyclage et qui peuvent être disponibles pour un projet de construction ?

Afin d'estimer les flux de réemploi et de réutilisation, il faut d'un côté estimer les flux issus de la déconstruction des bâtiments et de l'autre, définir des taux de réemploi et de réutilisation pour chaque produit et pour chaque usage auquel il permet de répondre.

Le premier objectif de ce chapitre est de proposer une méthode pour estimer les taux de réemploi et réutilisation des produits issus du secteur du bâtiment.

Dans ce sens, plusieurs questions de recherche surgissent lorsque nous essayons de répondre à cet objectif :

- Pour quels flux doit-on définir les taux de réemploi et de réutilisation ?
- A quelle échelle géographique la quantification doit être effectuée ?
- Comment définir des taux de réemploi et de réutilisation ?

Dans la suite de cette recherche, le terme réemploi désigne aussi la réutilisation pour un intérêt de simplification sauf quand il est nécessaire de les distinguer.

La quantification des flux, en appliquant les taux de réemploi définis dans ce chapitre, se fera sera présentée dans le chapitre suivant, relatif à l'étude de cas.

Le deuxième objectif du chapitre est de quantifier les quantités de flux de matières secondaires minérales et métalliques issues du recyclage.

Afin de répondre à ce deuxième objectif, il est nécessaire de répondre aux questions suivantes :

- Quels flux doit-on quantifier ?
- A quelle échelle géographique la quantification doit être effectuée ?

2. Freins au réemploi et à la réutilisation

Le réemploi et la réutilisation sont quelquefois présenté-e-s comme une innovation de l'économie circulaire, comme des pratiques nouvelles auxquelles le secteur du bâtiment doit apprendre à s'adapter.

Or, il s'agissait de pratiques courantes depuis des siècles, et ce n'est que depuis la seconde révolution industrielle avec, notamment, la généralisation de l'utilisation du béton pour la construction rapide des bâtiments après la deuxième guerre mondiale que ces pratiques ont disparu progressivement (Lachat, 2022; Queheille, 2019). Elles ne font que réapparaître face aux enjeux d'épuisement de ressources et de dérèglement climatique actuels.

(Ghyoot et al., 2018), ont mis en lumière plusieurs exemples qui relatent que le réemploi et la réutilisation étaient des pratiques courantes avant la reconstruction après la deuxième guerre mondiale pour des raisons, à ce moment-là, principalement économiques. Les corps de ferme, les châteaux, les maisons et les églises qui tombaient en ruines voyaient leurs pierres récupérées pour être utilisées de nouveau dans des bâtiments. Car à quoi bon perdre de l'argent, du temps et de l'énergie à extraire des pierres des carrières et les tailler quand des pierres déjà taillées étaient à disposition ? Cependant, depuis le développement du béton, l'ère du réemploi et de la réutilisation est révolue et fait face maintenant à plusieurs freins

A travers une enquête menée auprès des acteur·rice·s du réemploi, plusieurs freins ont été cités et la figure ci-dessous les résume (Clavier et al., 2023).

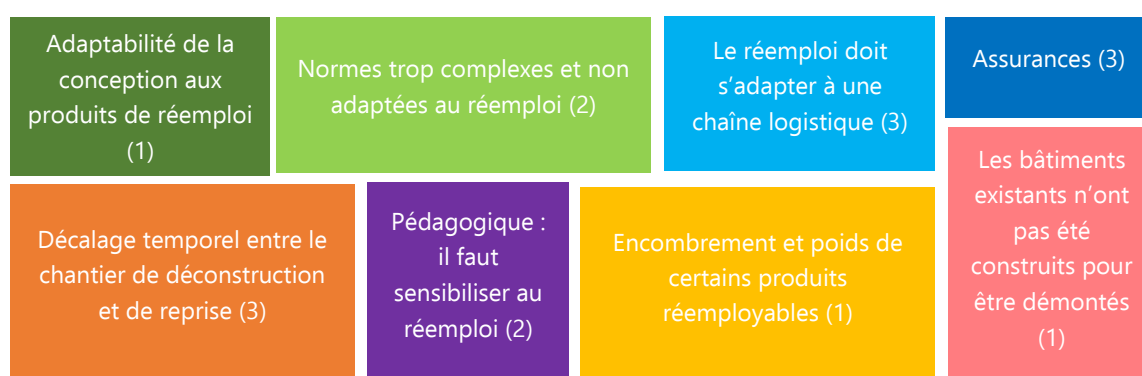


Figure 5-1 Freins liés au réemploi mentionnés par les acteur·rice·s, entre parenthèse le nombre de mentions du frein

Nous pouvons classer ces freins en 4 catégories, économique, juridique et assurantielle, sociale et technique. Les freins techniques seront développés dans la suite de ce chapitre, concernant les autres freins, nous les détaillons ici :

- Economiques : ces freins sont liés à plusieurs facteurs. Premièrement, le coût élevé du stockage, que ce soit pour le tri en pied de chantier ou pour le stockage des éléments à réemployer et à réutiliser dans des conditions optimales pour préserver leur qualité.
Deuxièmement, les chantiers de déconstruction sélective nécessitent un plus grand nombre de travailleur·euse·s et plus de temps pour démonter le bâtiment. En effet, afin de récupérer un maximum d'éléments, il faut démonter le bâtiment de haut en bas d'une façon minutieuse, ce qui prolonge les chantiers de déconstruction et peut parfois y augmenter les nuisances générées (bruit, poussière). Ainsi, la déconstruction sélective reste très minoritaire malgré les bénéfices à moyen long terme qu'elle présente (Lachat, 2022).
Troisièmement, l'offre d'éléments de réemploi et de réutilisation est très hétérogène et propose des produits de construction et équipements de dimensions différentes. Cependant, la conception actuelle des bâtiments ne permet pas d'intégrer cette hétérogénéité. Il est donc plus facile et moins cher de se procurer des produits de construction et équipements neufs.
- Juridiques et assurantiels : en France, il existe quelques plateformes de réemploi et de réutilisation mais qui ne réussissent pas à vendre leurs produits auprès des professionnel·le·s à cause des garanties qui présentent un risque de non prise en charge par les assurances en cas de recours aux produits issus du réemploi et de la réutilisation (Lachat, 2022).
- Sociaux : ces freins se manifestent par les pratiques sur le chantier, surtout de déconstruction, et également par le fait que les usager·ère·s des bâtiments refusent l'intégration de produits issus du réemploi et de la réutilisation et optent pour du neuf (Lachat, 2022).

3. Hypothèses de travail

Afin d'estimer les flux issus du réemploi et de la réutilisation, nous avons établi un scénario global qui considère que l'économie circulaire est pleinement déployée et optimisée, mais sans considérer une évolution technologique améliorant notablement les rendements de processus de réemploi et de réutilisation car pour l'instant l'existence de ces technologies n'est pas certaine.

Ce scénario, considère une réelle évolution des pratiques actuelles, où tous les freins économiques, juridiques, assurantiels et sociaux relatifs au réemploi et la réutilisation

sont ignorés, seuls les freins techniques actuels au réemploi et à la réutilisation sont considérés.

Nous faisons aussi l'hypothèse que tout-e-s les acteur-ric-e-s du bâtiment œuvrent pour réemployer et réutiliser le maximum de produits de construction et équipements du bâtiment. Ceci implique la généralisation de la déconstruction au détriment de la démolition, qui est la pratique majoritaire actuellement.

La déconstruction, en opposition à la démolition, est une opération planifiée et contrôlée qui a pour but de récupérer les produits de construction, les équipements et les matériaux valorisables à la fin de vie d'un bâtiment, permettant ainsi de préserver la qualité de produits pour une meilleure valorisation. Une large littérature a été produite afin de mettre en lumière les avantages, qu'ils soient environnementaux ou économiques, de la (Coelho & de Brito, 2013; Tahira Elias-Ozkan, 2014; Thomsen et al., 2011)ira Elias-Ozkan, 2014; Thomsen et al., 2011)

Ainsi, pour déterminer les taux de réemploi, nous nous positionnons aussi dans ce scénario et nous estimons les taux en ne prenant en compte que les freins techniques.

4. Quels produits de construction et équipements étudier ?

Les produits de construction et équipements dont les taux de réemploi vont être estimés dans ce chapitre sont ceux pris en compte dans les flux issus de la déconstruction de l'outil BTP-flux présenté ci-après.

4.1 Flux issus de la déconstruction : présentation de l'outil BTP-flux

4.1.1 Objectif et méthodologie de l'outil BTP-flux

BTP-flux est un outil qui a pour but d'améliorer la connaissance du parc bâtiment. Son objectif est d'estimer le parc par typologie de bâtiment ainsi que les déchets de construction générés par la déconstruction et la rénovation et ce pour différentes échelles géographiques, allant du niveau départemental au niveau national, en passant par le département et la région (Tirado, 2022).

Afin de répondre à cette objectif, BTP-flux est construit en assemblant plusieurs briques logicielles développés par le CSTB et en intégrant une multitude de bases de données (Tirado et al., 2021). Les principales briques qui constituent l'outil sont :

- La Base de Données Nationale des Bâtiments (BDNB) qui comprend plus de 20 millions de géométries de bâtiments avec leur localisation, les matériaux principaux de leurs murs et toitures, leur performance énergétique ainsi que leur

consommation d'énergie⁴. Cette base de données est en accès libre sur le site suivant : <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/base-de-donnees-nationale-des-batiments/>

- TyPy, qui est une base de données et un outil de gestion des typologies et des composants du bâtiment ainsi que leur assemblage en macro-composants. Les composants présents dans TyPy sont reliés à une FDES ou une PEP de la base Inies et héritent de ses propriétés (Tirado et al., 2021).
- Le service géométrique : un module qui, à partir des données géospatiales d'un bâtiment, permet d'identifier ses propriétés géométriques (dimensions des façades, des fenêtres, des toitures...).

BTP-flux, en intégrant toutes les informations fournies par les outils présentés ci-dessus, estime les flux issus de la déconstruction et de la rénovation des bâtiments en extrapolant les résultats calculés pour un échantillon donné à l'ensemble du parc bâtiment d'un territoire déterminé.

Comme le schématise la figure 5-2, un échantillon de bâtiments issus de la BDNB est d'abord sélectionné puis sa matérialité (nature et quantité des composants) est définie via TyPy et le service géométrique. Les flux de déconstruction et rénovation permettent de déduire les déchets générés par l'échantillon de bâtiments et sont ensuite extrapolés à l'ensemble du territoire étudié

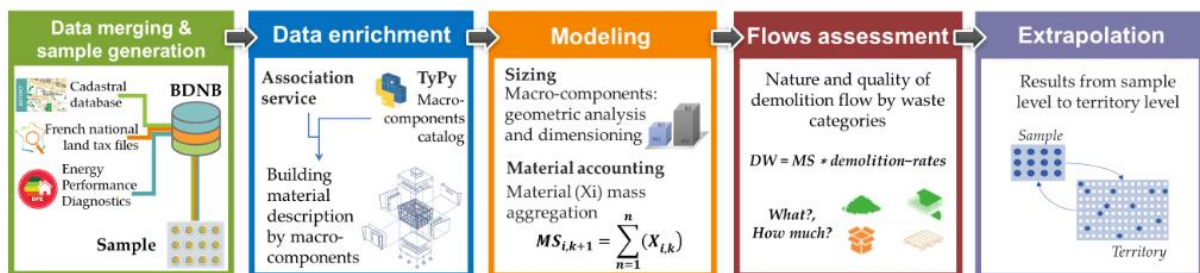


Figure 5-2 La structure de BTP-flux (Tirado, 2022)

Afin d'estimer les flux issus de la déconstruction et de la rénovation, l'outil BTP-flux applique des taux de déconstruction et rénovation aux bâtiments.

Ces taux sont définis en fonction de la période de construction et de la typologie des bâtiments (maison individuelle, logement collectif, bureaux et écoles, industries) et

⁴ [Un Gitlab présentant la méthodologie de la construction de la Base Donnée Nationale des Bâtiments](#)

sont estimés en cohérence avec les tendances et les taux de démolition actuels en se basant sur une large littérature sur le sujet (Tirado, 2022).

4.1.2 Description des bâtiments en macro-composants

La description des matériaux des bâtiments utilisée dans BTP-flux est réalisée à l'aide des macro-composants de TyPy. Ainsi, les flux de déconstruction et de rénovation issus de BTP-flux dépendent fondamentalement des macro-composants considérés dans TyPy et de la manière dont ils sont décrits, la figure 5-3 montre les macro-composants pris en compte par TyPy.

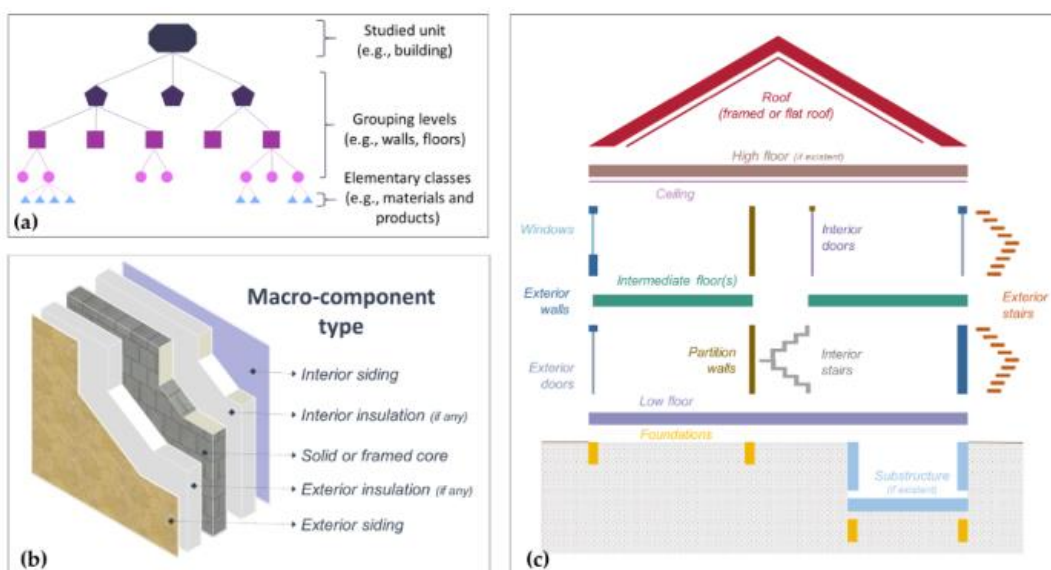


Figure 5-3 a. Nomenclature arborescente de TyPy pour la description du bâtiment, b. Type de macro-composant, exemple d'un mur extérieur, c. les macro-composants considérés (Tirado et al., 2021)

On remarque que tous les équipements électriques et électroniques ne sont par exemple pas considérés. En instaurant le parallèle avec les lots établis dans la Réglementation Environnementale 2020 (RE2020) TyPy modélise les lots suivants :

- Fondations et infrastructure
- Superstructure - maçonnerie
- Couverture
- Cloisonnement, plafonds suspendus et menuiseries intérieures
- Façades et menuiseries extérieures
- Revêtement des sols, murs et plafonds

Et ne prend pas en compte :

- VRD

- CVC
- Installations sanitaires
- Réseaux d'énergie
- Réseaux de communication

Ainsi, les produits de construction et équipements présents dans les lots VRD, CVC, Installations sanitaires, Réseaux d'énergie et Réseaux de communication, et issus du réemploi ne vont pas être quantifiés.

Les taux à estimer dans cette méthodologie ne concernent donc pas ces produits. De plus, pour l'application de la méthode MiMOSA à l'étude de cas, qui fera l'objet du chapitre suivant, il faut prendre en compte cette limite, qui sera plus détaillée et approfondie dans le chapitre 8 détaillant les limites et perspectives de ce travail.

4.2 Expression des flux issus de la déconstruction et de la rénovation

Les flux de déconstruction et rénovation estimés par BTP-flux peuvent être exprimés à différents niveaux. La façon commune d'exprimer ces flux est d'utiliser la nomenclature déchet française fixée par le décret n° 2011-610, lui-même basé sur la directive européenne 2008/98/E.C. et exprimé en masse.

Le tableau suivant résume les familles de déchets de cette nomenclature avec le type de déchet correspondant :

Tableau 5-1 Famille de déchet et leur type

Famille de déchet	Type de déchet
Briques en terre cuite	Déchet inerte (DI)
Tuiles en terre cuite	Déchet inerte (DI)
Céramiques	Déchet inerte (DI)
Béton et roches (ardoise, pierre naturelle, gravier)	Déchet inerte (DI)
Plaques et planches de plâtre	Déchet non dangereux non inerte (DNDNI)
Isolant en laine minérale	Déchet non dangereux non inerte (DNDNI)

Autres isolants	Déchet non dangereux non inerte (DNDNI)
Métaux ferreux	Déchet non dangereux non inerte (DNDNI)
Métaux non ferreux	Déchet non dangereux non inerte (DNDNI)
Fenêtres	Déchet non dangereux non inerte (DNDNI)
Bois	Déchet non dangereux non inerte (DNDNI)
Autres DNDNI	Déchet non dangereux non inerte (DNDNI)

Cependant, cette description des flux ne permet pas la prise en compte des actions de réemploi. Afin de pallier à ce problème, l'outil BTP-flux permet de décrire les flux de déconstruction au niveau de chaque bâtiment, afin de les exprimer en composants et en unité fonctionnelle, ce qui permet de mieux prendre en compte le réemploi.

Le tableau 5-2 montre un extrait du fichier obtenu en sortie de BTP-flux et présente les quantités des composants exprimés en unité fonctionnelle, cependant, nous avons aussi des colonnes relatives à des macro-composants (exemple : ceiling) il est donc nécessaire d'écartier ces colonnes afin d'éviter un double comptage des quantités. Un autre point à soulever est qu'il n'y a aucune homogénéité dans les noms des différents composants.

Tableau 5-2 Extrait du fichier avec les sorties BTP-flux pour deux bâtiments et pour deux composants, baie vitrée et plafond. Les données présentées dans le tableau sont celles en sortie de BTP-flux sans traitement au préalable. On remarque que certains champs sont en anglais alors que d'autres en français. L'unité fonctionnelle area est exprimée en m²

Usage du bâtiment	Baie vitrée UF	Baie vitrée masse (kg)	Baie vitrée nom	Baie vitrée QTT (UF)	Plafond UF	Plafond masse (kg)	Plafond nom	Plafond QTT (UF)
Individual_housing	area	2813	Bloc baie : {'glazing_type': 'double', 'material_family': 'PVC'}	68	area	6708	Plafond : Plafond fixé plaque de plâtre	559

Individual_housing	area	3497	Bloc baie : {'glazing_type': 'double', 'material_family': 'PVC'}	84	area	7202	Plafond : Plafond fixé plaque de plâtre	600
--------------------	------	------	--	----	------	------	--	-----

Pour ces raisons, il a fallu traiter ces données afin d'obtenir des données propres qui expriment, pour un territoire donné, la quantité des composants issus de la déconstruction ou de la rénovation, exprimée dans leur unité fonctionnelle et décrite dans une nomenclature homogène.

Cette étape a donc permis de définir la nomenclature Produits de Construction et Equipements (PCE) présentée dans les développements méthodologiques exposés dans le chapitre 4 de cette étude. Initialement, la nomenclature PCE est censée intégrer des lignes correspondant à des produits de construction ainsi qu'à des équipements du bâtiment. Cependant, en raison d'un manque de données, BTP-flux ne permet pas d'estimer les flux des équipements issus de la déconstruction. Ainsi, il a fallu adapter cette nomenclature en supprimant les lignes relatives aux équipements du bâtiment. On se réfère maintenant à cette nomenclature en la nommant Produit De Construction (PDC) plutôt que PCE, l'appellation initiale adoptée tout le long du chapitre 4.

La quantité des composants issus de la déconstruction ou de la rénovation et potentiellement disponible pour de nouveaux projets est ainsi exprimée à l'aide d'un vecteur matriciel dont le nombre de lignes est égal à la dimension de la nomenclature PDC : $D_{reuse}(m, 1)$, avec m la dimension de la nomenclature PDC. Ce vecteur matriciel sera présenté dans le chapitre suivant, le chapitre 6, ce qui nous intéresse à cette étape est de définir la nomenclature PDC et donc les produits pour lesquels il faut estimer les taux de réemploi. La nomenclature PDC est présentée dans l'annexe 5.1.

La figure 5-4 reprend un schéma présenté dans le chapitre 4 afin de positionner cette étape par rapport aux différentes étapes méthodologiques développées dans le chapitre 4.

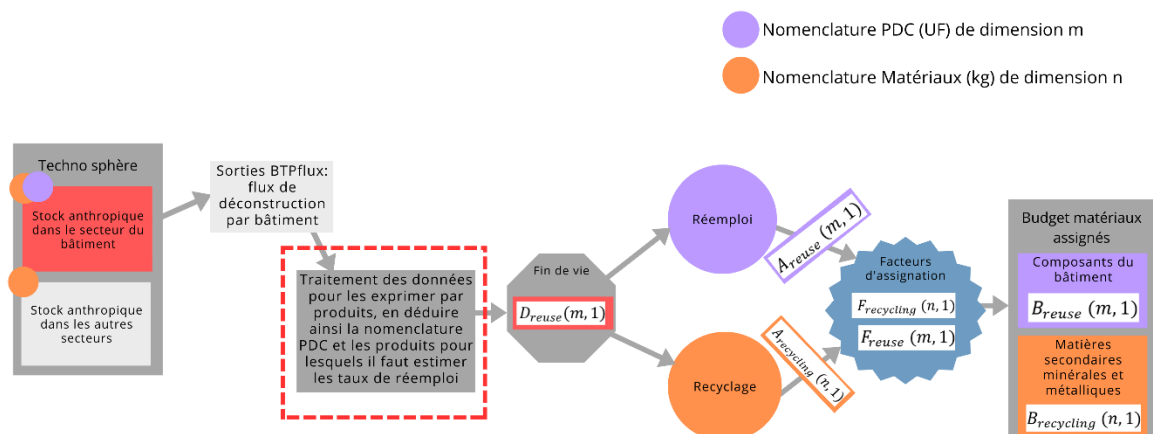


Figure 5-4 L'étape détaillée dans cette section est encadrée dans la figure, le schéma est repris du chapitre 4 et explique les différentes étapes résultant du calcul des budgets matériaux assignés au projet étudié

Le tableau 5-3 montre un extrait de la nomenclature PDC ainsi définie et les unités fonctionnelles correspondantes à chaque produit.

Tableau 5-3 Extrait de la nomenclature PDC avec les unités fonctionnelles correspondantes à chaque produit

Macro-composant	Composant	Famille de matériau	UF
Bloc baie	Bloc baie double	Acier	m ²
Cloison	Cloison vitrée	Aluminium	m ²
Élément de structure	Poutrelle	Béton précontraint	m
Escalier	Escalier droit	Pierre naturelle	m
Fenêtre	Fenêtre double	Aluminium	m ²
Isolant	Isolant intérieur, Isolant extérieur	Laine de verre	m ²
...
Toit	Couverture en bac acier	Acier	m ²

5. Méthode de quantification des taux de réemploi et de détermination de l'échelle géographique la plus adaptée

5.1 Comment définir les taux de réemploi ?

La capacité d'un élément à être réemployé, techniquement parlant, dépend de plusieurs facteurs, différents d'un élément à un autre, même s'ils appartiennent à la même famille de composant.

On peut définir les facteurs suivants (CSTB, 2022) :

- Facilité d'accès : plus un élément se trouve dans les couches extérieures du bâtiment, plus il est facile d'accès et donc réemployable. Par exemple, un isolant pour mur intérieur recouvert d'une plaque de plâtre est plus facilement accessible qu'un isolant sous chape liquide.
- Démontabilité : un élément fixé mécaniquement est plus facilement démontable qu'un élément collé par exemple.
- Conditions de mise en œuvre : le contact avec l'eau détériore notablement les produits de construction, par exemple, les briques en terre cuite d'un mur intérieur sont de meilleure qualité que celles d'un mur de fondation, qui était en contact avec l'humidité. Aussi, un élément qui a été en contact avec des substances dangereuses, comme l'amiante, ne peut être réemployé car il met en péril la sécurité des usagers du bâtiment.

Le potentiel de réemploi varie donc en fonction de la famille des produits mais aussi des conditions de mise en œuvre dans les bâtiments d'origine.

Ainsi, afin d'estimer les flux issus du réemploi, il faut tenir compte de ces éléments.

Pour illustrer les éléments qui peuvent être pris en compte dans la détermination des taux de réemploi, le schéma de la figure 5-5 présente l'exemple des laines minérales :

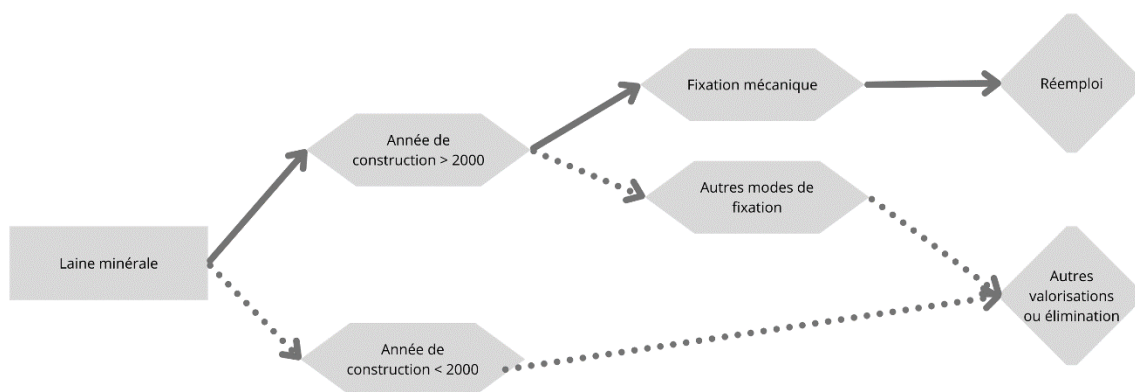


Figure 5-5 Les paramètres pris en compte pour la détermination des taux de réemploi des laines minérales

5.2 Les usages à l'issue du réemploi

Comme vu précédemment, le terme réemploi comprend les opérations par lesquelles un produit de construction est utilisé de nouveau dans un usage identique à celui pour lequel il a été conçu, mais il désigne aussi les opérations de réutilisation où l'usage après réemploi est différent de l'usage initial. Ainsi, il est nécessaire de déterminer pour

chaque produit réemployé à quel usage il va répondre. La différenciation entre les usages secondaires après réemploi est essentielle pour la prise en compte de la qualité des composants après réemploi, et ainsi répondre à une des exigences fixées pour la méthode MiMOSA. Ainsi, pour chaque composant, nous définissons les usages qui lui sont associés en quantifiant la part des flux issus du réemploi qui va répondre à chaque usage, suite à cela, un vecteur matriciel contenant les produits de construction et équipements du bâtiment issus du réemploi exprimés dans leur nouvel usage est défini comme suit :

- $A_{reuse}(m, 1)$: Vecteur matriciel contenant les produits de construction et équipements du bâtiment issus du réemploi exprimés dans leur nouvel usage, en UF

Avec :

- m : le nombre de lignes de la nomenclature PDC

Ce vecteur matriciel a été défini dans le chapitre 4 et la figure 5-6 rappelle les différentes étapes de la méthode MiMOSA avec les paramètres et matrices utilisé-e-s à chaque étape.

Afin de calculer le vecteur matriciel A_{reuse} , il faut appliquer aux flux issus de la déconstruction de la matrice D_{reuse} des taux de potentiel réemploi définis pour chaque usage secondaire. Nous définissons la matrice contenant ces taux de potentiel de réemploi comme suit :

- $\tau_{reuse}(m, 1)$: Vecteur matriciel contenant les taux de potentiel de réemploi pour chaque usage secondaire, en %

Avec :

- m : le nombre de lignes de la nomenclature PDC

Ainsi, nous calculons comme suit les valeurs de la matrice A_{reuse} :

$$A_{reuse,k,i} = D_{reusek} * \tau_{reusek,i} \quad \forall i, k \in [0, m]$$

Avec :

- $A_{reusek,i}$: la quantité du produit k répondant à l'usage secondaire après réemploi i exprimée dans l'UF du produit associé à son usage secondaire i
- D_{reusek} : la quantité du produit k issu de la déconstruction exprimé dans l'UF du produit associé à son usage initial

- $\tau_{reuse,i,k}$: le taux de potentiel de réemploi du produit k associé à son usage secondaire après réemploi i
- m : le nombre de lignes de la nomenclature PDC

Le tableau 5-4 illustre cette étape pour le produit Baie vitrée double en PCV et les deux usages secondaires après réemploi qui lui sont associés.

Tableau 5-4 Table de correspondance donnant l'exemple d'usages possibles après le réemploi des baies vitrées

Usage primaire				Usage secondaire après réemploi				
Macro-composant	Composant	Famille de matériaux	Quantité de flux déconstruit en UF (D_{reuse})	Macro-composant	Composant	Famille de matériaux	Taux de potentiel de réemploi en % (τ_{reuse})	Quantité de flux pouvant être issus du réemploi en UF (A_{reuse})
Baie vitrée	Baie vitrée double	PVC	$D_{reuse,1}$	Baie vitrée	Baie vitrée double	PVC	$\tau_{reuse1,1}$	A_{reuse1}
				Cloison	Cloison vitrée	PVC	$\tau_{reuse2,1}$	A_{reuse2}

Dans ce chapitre, la méthode présentée permet d'estimer les taux de potentiel de réemploi, c'est-à-dire les valeurs du vecteur matriciel τ_{reuse} (cf paragraphes suivants). Le calcul des flux de déconstruction, résumés dans le vecteur matriciel D_{reuse} , dépend des dynamiques du secteur du bâtiment qui peuvent être illustrés dans différents scénarios. L'estimation de ces flux est effectuée à l'aide de l'outil BTP-flux et des paramètres propres aux scénarios considérés dans l'étude de cas et est présentée dans le chapitre 6. Ainsi, les valeurs des vecteurs matriciels D_{reuse} et A_{reuse} sont calculées et présentées dans le chapitre 6.

Si nous reprenons le schéma de la méthode MiMOSA en y positionnant les matrices définies précédemment, nous obtenons la figure 5-6. En rouge les vecteurs matriciels estimés dans ce présent chapitre, en bleu les vecteurs matriciels estimés dans le chapitre suivant.

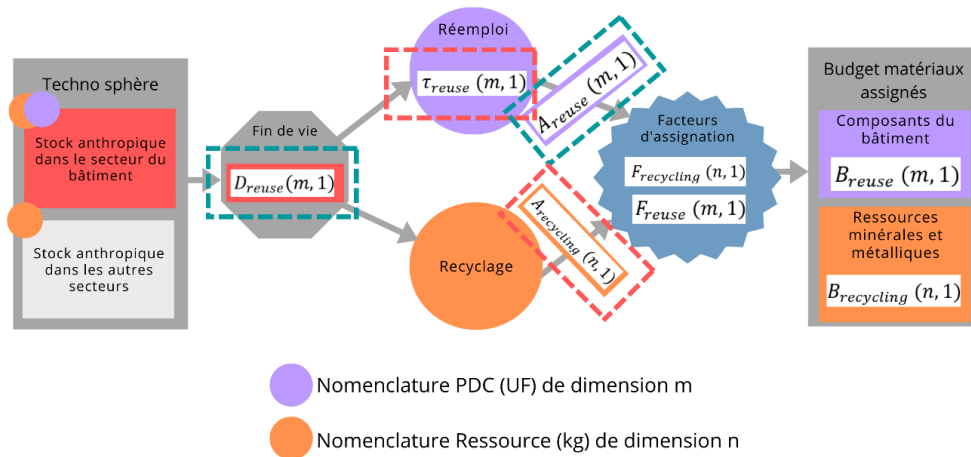


Figure 5-6 Les différentes étapes et matrices afin d'obtenir le budget des composants du bâtiment assignés au projet étudié, encadrées en rouge les matrices à calculer dans ce chapitre 5, encadrées en bleu, les matrices à calculer lors du chapitre 6

5.3 Spatialisation et quantification des flux de réemploi

5.3.1 Recherche bibliographique

Une première approche de quantification des taux de réemploi a été d'extraire des informations à l'aide d'une recherche bibliographique qui a été principalement conduite par Sarah Clavier lors de son stage de master 1, suivi dans le cadre de cette thèse (Clavier et al., 2023).

Plusieurs documents ont servi de base à cette recherche bibliographique : le guide Orée (Orée & CSTB, 2021), l'étude de la préfiguration de la filière REP Produits et Matériaux de Construction du secteur du bâtiment (ADEME, 2021a), fiches matériaux Opalis, FCRBE et des publications scientifiques (Devènes et al., 2022; Küpfer et al., 2023; Lachat, 2022).

Cette recherche bibliographique avait pour objectif de déterminer l'échelle la plus adaptée pour le réemploi, les usages possibles après le réemploi des composants ainsi que les paramètres techniques à prendre en compte pour chaque composant au moment de le réemployer.

Ces paramètres permettent ensuite d'estimer les taux de réemploi. Le tableau suivant résume les sources d'information analysées et les matériaux qui y sont traités.

Tableau 5-5 Les ressources bibliographiques exploitées et les matériaux qui y sont traités

Source Bibliographique	Matériaux traités
Bilan national du recyclage (ADEME, 2022)	Métaux ferreux; Aluminium; Cuivre; Plomb; Zinc; Verre; Les inertes du BTP
Guide CSTB <i>CSTB 2020 (Confidentiel) Etat des lieux des filières de valorisation matière</i>	Béton; Briques; Tuiles en terre cuite; Enrobés; Verre plat; Métaux; Plâtre; Laine de verre
Démoclés guide d'informations sur les filières de valorisation des déchets du second œuvre (Démoclés, 2018)	Bitume; Briques plâtrières; Laines minérales; Métaux; Plâtre; Verre plat
Empreinte carbone de la valorisation des déchets du bâtiment en France (SEDDRe, 2019)	Béton; Plâtre; Métaux; Inertes en mélanges; Non dangereux en mélange
Fiches réemploi matériaux FCRBE (FCRBE, 2021)	Poutrelle acier; Briques; Tuiles; Ardoise; Pierre naturelle; Faïence; Carreau de ciment; Carreau terre cuite; Carreau grès cérame; Lavabos; Urinoir; Fonte; Acier; Inox; Aluminium; Béton
Rapport sur les filières de recyclage de déchets en France métropolitaine (Aujollet et al., 2020)	Métaux; Granulats; Verre
Guide Orée (Orée & CSTB, 2021)	Portes/ Fenêtres; Briques; Tuiles; Revêtement intérieurs; Plomberie et appareil sanitaire; Gravats; Béton; Verre plat; Plâtre; Laine Minérales; Métaux
Guide de gestion des déchets de construction et de démolition réalisé par l'institut bruxellois pour la gestion de l'environnement (IBGE, 2009)	Débris; Métal; Verre
Etude sur les pratiques de tri sur les chantiers de déconstruction (SEDDR & ADEME, 2020)	Métaux; Plâtre; Fenêtres et verre plat; Déchets inertes
Etude de préfiguration de la filière REP Produits et Matériaux de Construction du secteur du bâtiment (ADEME, 2021a)	Déchets Inertes; DNDNI (Métaux; Laines minérales; plâtre; verre plat)
Etude de scénarii pour la mise en place d'une organisation permettant une gestion efficace des déchets du bâtiment dans le cadre d'une économie circulaire (MTES, 2019)	Déchets inertes; Verre plat; Laines minérales; Plâtre

5.3.2 Enquêtes auprès des acteur·rice·s de valorisation

Afin de compléter et de confirmer les résultats de la recherche bibliographique, des enquêtes auprès des acteur·rice·s de réemploi ont été effectuées, dans le cadre du stage de Sarah Clavier.

Lors de ces enquêtes, un questionnaire leur a été adressé. Ce questionnaire comporte des questions générales qui portent sur la structure, sa date de création, ses activités, les flux de matière traités et sa localisation.

Ensuite des questions qui portent sur les flux de réemploi en général sont adressées, notamment sur l'échelle géographique à considérer dans un scénario où l'économie circulaire est pleinement déployée, puis des questions spécifiques à chaque famille de produits sont posées. L'annexe 5.2 présente le questionnaire adressé aux acteur·rice·s, l'annexe 5.3 contient le rapport complet des entretiens et le tableau 5-6 présente les acteur·rice·s questionné·e·s, la typologie de leur activité ainsi que leur localisation.

Nous avons ciblé les acteur·rice·s en Ile-de-France car l'étude de cas sur laquelle a porté la méthode dans le chapitre suivant se situe en Seine-Saint-Denis dans la région Ile-de-France.

Tableau 5-6 Les acteurs et actrices questionné·e·s

Acteur·rice	Typologie d'activité	Région
ECOMAT38	Déconstruction, Plateforme de reconditionnement	Auvergne Rhône Alpes
Cycle Up	AMO réemploi, Marketplace	Ile-de-France
Backacia	AMO réemploi, Marketplace	Ile-de-France
Elan (Bouygues)	AMO réemploi, Plateforme de reconditionnement, Entreprise de travaux	Ile-de-France
La ressourcerie du BTP	Plateforme de reconditionnement, Entreprise de travaux	Ile-de-France
Tricycle	Plateforme de reconditionnement, AMO réemploi	Ile-de-France
Remix	AMO réemploi, BET spécialisé	Ile-de-France

5.3.3 Méthode quantitative d'estimation des taux à travers la bibliographie et l'enquête

Les informations obtenues à la suite de l'étude bibliographique et des enquêtes sont des informations approximatives et exprimées d'une manière qualitative plutôt que quantitative.

Or, les taux de réemploi, afin d'être exploités par la méthode MiMOSA doivent être exprimés en termes de valeurs. Ainsi, faute de données quantitatives davantage disponibles actuellement, nous avons choisi de définir une table de correspondances entre les mots de la littérature identifiés dans la recherche bibliographique ou employés par les acteurs et actrices du réemploi lors des entretiens et des plages de valeurs en pourcentage.

Tableau 5-7 Proposition de table de correspondance mots-taux

Taux	Mots retrouvés dans la littérature
0 à 1%	Presque jamais, quasiment nul, impossible
1 à 20%	Parfois, peu, rarement, difficilement
21 à 50%	Souvent, couramment, facilement
51 à 80%	Principalement, majoritairement, généralement, la plupart du temps, très facilement
81 à 100%	Presque toujours

Afin d'illustrer cette approche, supposons que dans un document étudié ou lors d'un entretien, nous rencontrons l'affirmation suivante : « les briques creuses en terre cuite ne sont presque jamais réemployées, mais, principalement recyclées ». De cette assertion, nous exportons les informations suivantes :

- 0 à 1% des briques creuses en terre cuite sont réemployées
- 81 à 100% des briques creuses en terre cuite sont recyclées

Etant donné que les valeurs sont exprimées sous forme de plages et non d'une valeur précise, plusieurs estimations des taux peuvent être réalisées en respectant le principe de conservation de la masse, c'est-à-dire, en reprenant l'exemple des briques creuses en terre cuite, si le pourcentage de réemploi est fixé à 1%, alors le taux de recyclage doit être au moins inférieur à 99%. Nous nous contentons de définir deux estimations de jeux de valeurs des taux de réemploi.

Nous sommes conscient·e·s des limites de cette méthode semi-quantitative. Les valeurs pourront être corrigées dans la méthode MiMOSA, comme des paramètres, si des données plus précises sont proposées ultérieurement sur les taux de réemploi et de recyclage.

5.3.4 L'échelle géographique la plus adaptée pour le réemploi

Les échelles géographiques d'opération des filières de réemploi peuvent être définies en termes de distance autour d'un chantier. En effet, un chantier de construction neuve ou de rénovation doit évaluer l'offre disponible en matériaux valorisés afin de répondre à ses besoins. Il est donc nécessaire de déterminer l'échelle géographique la plus adéquate autour du futur chantier dans laquelle des chantiers de déconstruction sont des potentiels fournisseurs de composants du bâtiment issus du réemploi.

Dans la littérature identifiée, peu d'informations sur l'échelle géographique la plus adaptée pour la circulation des flux de réemploi ont été identifiées. Cependant, les études relatant des cas de réemploi de produits et matériaux de construction, montrent que les chantiers neufs sont fournis de chantiers de déconstruction relativement proche (de moins de 100 km) (Devènes et al., 2022; Küpfer et al., 2023).

Afin de compléter ces informations, une question relative à l'échelle géographique la plus adaptée pour les flux de réemploi a été posée aux acteurs et actrices du réemploi. Ce qui ressort de cette enquête est que l'échelle géographique la plus adaptée pour la circulation (du chantier de déconstruction au nouveau chantier de construction en passant par la plateforme de réemploi) est le département. Cependant, plusieurs d'entre eux font des exceptions pour des produits de construction particuliers, souvent décoratifs ou artistiques.

Ainsi, dans notre étude, nous définissons l'échelle géographique la plus adaptée pour les flux issus du réemploi comme étant le département. La quantification des flux issus de la déconstruction et pouvant être réemployés se fera donc au niveau du département où est localisée l'étude.

Toutefois, les taux de réemploi estimés dans cette étude ne dépendent pas de l'échelle géographique considérée. Ils sont valables pour tous les bâtiments se situant en France ou toute région avec les mêmes spécificités climatiques.

5.3.5 Exemple des briques en terre cuite

Afin de garder une trace des sources de données qui ont permis d'estimer les taux de réutilisation et de se rendre compte, pour chaque élément des plus gros freins à leur réutilisation, des schémas pour chaque flux ont été réalisés détaillant tous les paramètres techniques pris en compte pour l'estimation du potentiel de réemploi ainsi que les taux estimés.

Or, au moment de la réalisation de ce travail, les flux en sortie de BTP-flux étaient exprimés en catégories de déchets et non à l'aide de la nomenclature PDC de la méthode MIMOSA. Ainsi, les informations et les schémas ont été développés pour les flux de catégories de déchets suivantes :

- Briques en terre cuite
- Tuiles en terre cuite
- Béton et roche
- Céramiques
- Plaques et planches de plâtre
- Fenêtres

Par la suite, une correspondance entre les flux de catégories de déchets et les flux de la nomenclature PDC a été réalisée afin d'exprimer les taux de réemploi pour chaque composant de la nomenclature PDC. Le détail de cette correspondance est donné en annexe 5.4.

Cependant, il est intéressant de montrer le processus de détermination des taux de réemploi à travers les schémas développés dans le cadre du stage de Sarah Clavier, et la figure 5-7 montre l'exemple des briques en terre cuite. Par exemple, on estime que les briques pleines en terre cuite, qui ne sont pas en contact pendant leur vie en œuvre avec des polluants ou de l'eau et qui ont été mises en œuvre avant 1970, ont un taux de réemploi de 50% et 1 à 20% peuvent être réemployées en maçonnerie portante.

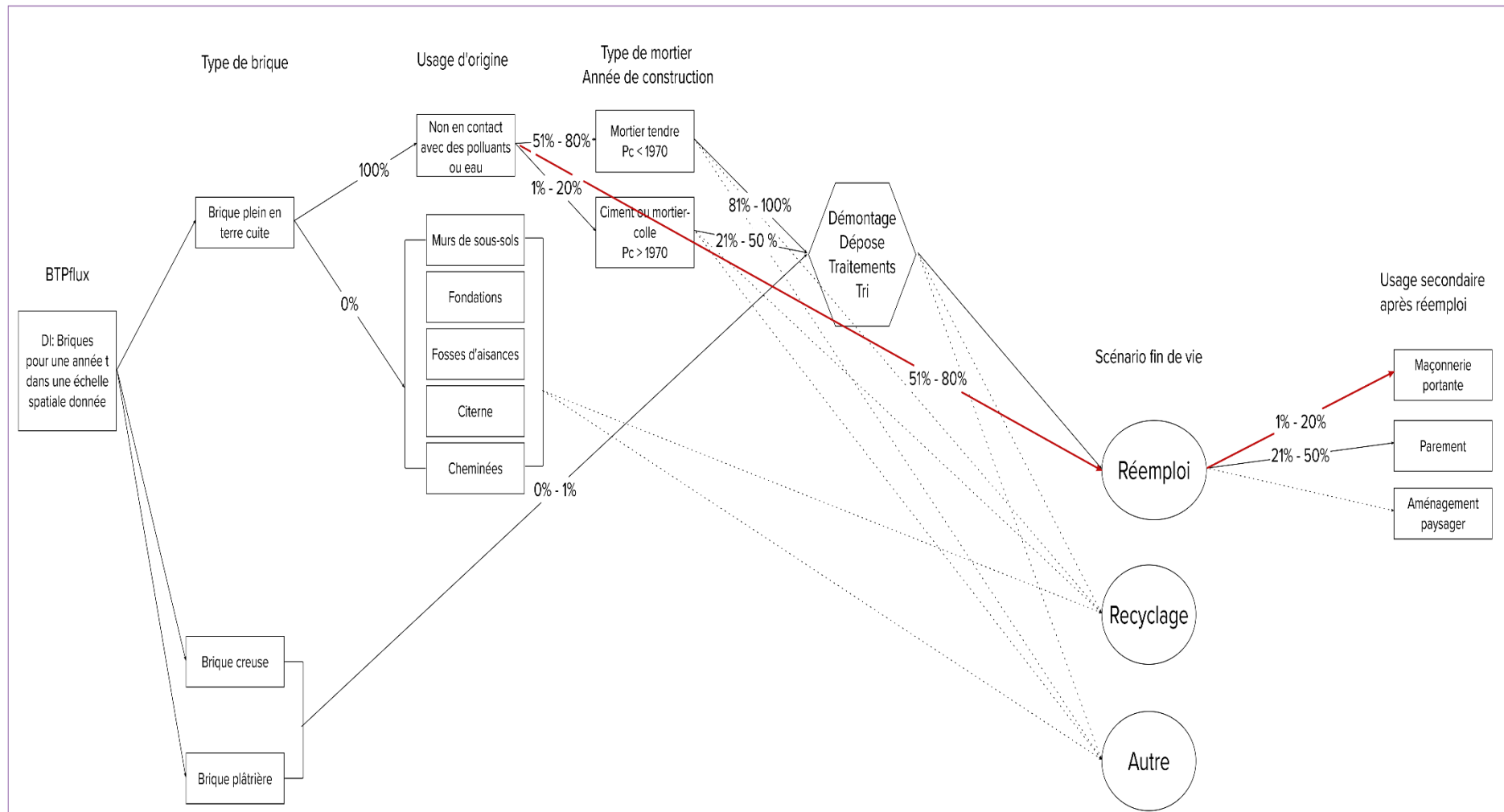


Figure 5-7 Exemple des briques, le schéma montre les différentes étapes pour définir le taux de réemploi des briques en terre cuite. Ces étapes dépendent des spécificités du produit. La première branche, qui considère que 100% des briques pleines en terre cuite n'ont pas été en contact avec de l'eau ou des polluants est du fait que dans l'outil BTP-flux, les murs de sous-sols, de fondations, de fosses d'aisance, de citerne et de cheminées ne sont pas modélisés

5.4 Estimation quantitative des taux de réemploi

Une fois les schémas réalisés pour chaque catégorie de déchet, les estimations des taux de réemploi ont été réalisées en concaténant les pourcentages de chaque branche des schémas afin d'obtenir des valeurs de taux de réemploi au niveau de chaque composant et de chaque usage après réemploi associé. L'annexe 5.5 résume les résultats obtenus. Pour reprendre notre exemple précédent, les briques pleines en terre cuite ont un taux maximum de réemploi en maçonnerie portante de $80\% \times 20\% = 16\%$.

Cependant, ces taux de réemploi ne sont pas exprimés au niveau de la nomenclature PDC de la méthode MiMOSA, il a donc fallu faire correspondre les composants pour lesquels des taux de réemploi ont été définis avec les lignes de la nomenclature PDC de la méthode MiMOSA.

Concernant les lignes de la nomenclature PDC pour lesquelles il n'y a pas de correspondances, des assimilations ont été réalisées afin de combler le manque quand cela a été possible. Ces assimilations ont été réalisées entre des produits qui ont les mêmes conditions de mise en œuvre et de démontage. Par exemple, une fenêtre en aluminium double vitrage est par exemple assimilée à un bloc baie en aluminium double vitrage. Une estimation a été réalisée en se basant sur la bibliographie quand ni la correspondance ni l'assimilation n'ont été possibles. La figure 5-8 montre des exemples de correspondance et d'assimilation et l'annexe 5.4 détaille cette opération pour toutes les lignes de la nomenclature PDC.

Nomenclature PDC			Estimation taux réemploi 1	Estimation taux réemploi 2	Valeur définie lors du stage de Sarah Clavier corresponda nte	Assimilation/Correspon d ance
Macro- composant	Composant	Famille de matériau				
Bloc baie	Bloc baie double	Aluminium	10%	4%	Fenêtres en aluminium double vitrage	Assimilation
Cloison	Cloison vitrée double	Aluminium	10%	7%	Cloisons intérieures vitrées double	Correspondance
Fenêtre	Fenêtre double	Aluminium	10%	4%	Fenêtres en aluminium double vitrage	Correspondance

Figure 5-8 Exemple de correspondance entre les résultats obtenus dans ce travail d'estimation des taux de réemploi et des composants de la nomenclature PDC de la méthode MiMOSA

Les taux de réemploi obtenus pour une sélection des produits de construction sont résumés dans la figure 5-8. Les taux de réemploi pour tous les produits de construction de la nomenclature PDC sont présentés dans l'annexe 5.4. Ainsi, suite à cette étape, le vecteur matriciel τ_{reuse} a été estimé.

Les taux de réemploi calculés dans cette section sont exprimés à l'aide d'un vecteur matriciel.

Etant donné que les estimations ont été réalisées à l'aide de plages de données, deux estimations des taux de réemploi ont été effectuées pour chaque usage secondaire possible après réemploi. Il est à noter que ces deux estimations ne correspondent pas à une valeur maximale et une autre minimale car il a fallu garantir que la somme des quantités de produits répondant à un usage donné soit inférieure ou égale à la quantité issue de la déconstruction de ce même produit. Ainsi, les taux de réemploi correspondant à chaque usage pour un même produit doivent être inférieurs à 100%.

Les taux de réemploi des produits en béton peuvent interpeller car très éloignés des pratiques actuelles. En effet, en analysant les données des FDES présentes dans Inies et relatives aux produits en béton, le taux de réemploi est inférieur à 1%. Cependant, ces taux de réemploi, à première vue très optimistes, se basent sur des études qui ont démontré la faisabilité du réemploi du béton, notamment les travaux de Devènes et al., 2022 et Küpfer et al., 2023.

Concernant les baies vitrées et fenêtres en simple vitrage, elles n'ont pas été réemployées dans leurs fonctions initiales afin de garantir les performances thermiques exigées par la réglementation environnementale française des bâtiments, la RE2020.

Nous sommes conscient·e·s que ces taux contiennent une grande incertitude de par la méthode semi-quantitative adoptée et les hypothèses prises pour combler le manque de données. Cependant, cela reste une première approche afin de pallier le manque de données sur le réemploi des produits du bâtiment. Une perspective nécessaire à ce travail est de quantifier des taux plus robustes, une fois les données disponibles.

Tableau 5-8 Les taux de réemploi pour une sélection de produits de construction

Nomenclature PDC			Estimation taux réemploi 1	Estimation taux réemploi 2
Macro-composant	Composant	Famille de matériau		
Bloc baie	Bloc baie double	Acier	10%	4%
Cloison	Cloison vitrée double	Aluminium	10%	7%
Escalier	Escalier droit	Pierre naturelle	90%	50%
Fenêtre	Fenêtre double	Aluminium	10%	4%
Isolant	Isolant intérieur, Isolant extérieur	Laine de verre	20%	11%
Plafond, Cloison	Plaque	Plâtre	12%	6%
...
Revêtement	Toit	Terre cuite	40%	33%

Concernant l'échelle géographique la plus adaptée pour le réemploi, il ressort de l'étude bibliographique ainsi que des entretiens que c'est l'échelle départementale.

6. Quantification des flux issus du recyclage

Les matériaux utilisés dans cette étude de cas sont : l'aluminium, le verre, le béton, l'acier, la laine de verre, la laine de roche, la terre cuite, le plâtre, la céramique et le mortier.

Ces matériaux ont été sélectionnés en fonction de la composition matérielle des produits de construction présents dans la maison individuelle étudiée.

A long terme, le but est de prendre en compte tous les matériaux minéraux et métalliques à minima présents dans le secteur du bâtiment. Cependant, au vu de la complexité de l'estimation des flux du recyclage et du manque de données, nous nous contentons, d'une première approche aux matériaux directement liés à l'étude de cas.

6.1 Quels flux ?

D'après l'article L. 541-1-1 du code de l'environnement, le recyclage fait référence à toute opération de valorisation par laquelle les déchets sont retraités en substances, matières ou produits aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins.

Le recyclage permet ainsi de substituer les matières premières vierges avec des matières premières secondaires. Cependant, au vu des procédés industriels actuels et de la qualité exigée par les différents usages des différents matériaux, le recyclage ne permet pas d'avoir des matériaux issus à 100% des déchets.

En effet, il est nécessaire d'intégrer dans le procédé de fabrication un pourcentage de matière première vierge plus ou moins important pour répondre aux exigences techniques et aux normes de sécurité des produits.

Le schéma de la figure 5-9 montre les différents flux en entrée et en sortie d'une usine de fabrication intégrant les flux de matières secondaires issues du recyclage.

Pour rappel, la méthode MiMOSA telle que définie actuellement n'intègre que les flux de matières présents dans la techno sphère, voir chapitre 4.

Ainsi, les flux qui nous intéressent ne sont pas les flux en sortie des usines de fabrication mais bien la part de matières secondaires maximale qu'un procédé de fabrication peut intégrer.

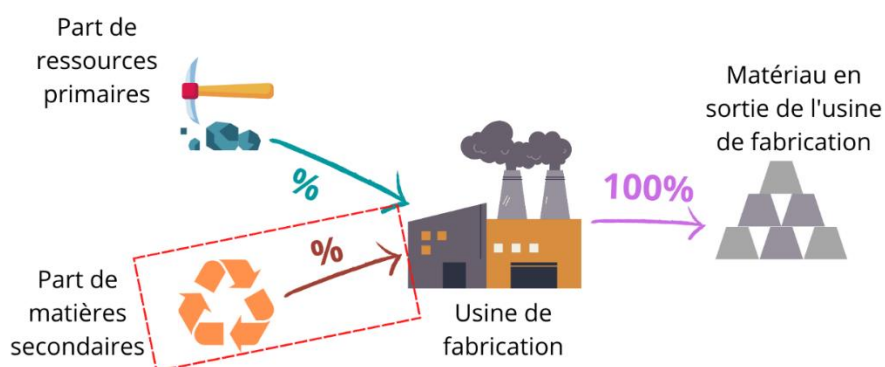


Figure 5-9 Schéma représentant les flux en entrée pour produire un matériau donné en intégrant les matières secondaires issues du recyclage

6.2 Quelles échelles géographiques ?

Une des exigences principales de la méthode MiMOSA est de considérer l'échelle géographique la plus adaptée pour chaque flux.

Concernant les flux de recyclage, cette échelle géographique représente l'échelle de circulation des matières depuis le site de déconstruction jusqu'au nouveau chantier où le produit contenant la matière secondaire en question est réintroduit, en passant par le centre de tri et les usines de fabrication comme le montre la figure 5-10.

Cette échelle dépend de chaque matériau et est influencée par différents paramètres, comme la nature des déchets, s'ils sont peu ou très pondéreux.

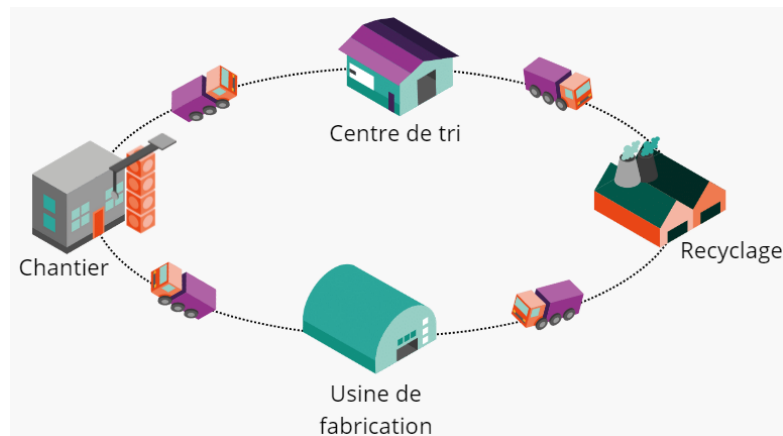


Figure 5-10 L'échelle géographique est le périmètre de circulation des ressources issues du recyclage tout au long du processus, depuis la collecte jusqu'à la fabrication, en passant par le tri

Afin de définir l'échelle la plus adaptée pour chaque flux de recyclage une première approche a consisté à analyser les données SitraM (Commissariat Général au développement durable, 2012) qui représentent les données sur le transport national, international ainsi que sur le commerce extérieur de la France pour l'année 2015.

Parmi les données extraites de SitraM, nous retrouvons des données de transport de marchandises pour différents types de produits pour chaque région de la France qui sont exprimés en masse de produits transportées et catégorisées en trois échelles : régional (au sein d'une même région), national (entre différentes régions) et international (avec un autre pays). Parmi ces catégories de marchandises, seules trois pouvaient potentiellement nous être utiles :

- Minerais et autres produits d'extraction ; tourbe ; uranium et thorium.
- Produits minéraux non métalliques.
- Métaux basiques, produits métalliques, sauf machines et équipements.

A l'issue de l'analyse des données pour ces trois catégories de marchandises, qui a consisté à effectuer une moyenne de ces valeurs pour toutes les régions métropolitaines de la France, nous avons obtenu ces échelles géographiques :

Tableau 5-9 Exploitation des données Sitram : Le pourcentage des masses de marchandises qui circulent dans une échelle géographique régionale, nationale ou internationale en moyenne pour toutes les régions administratives françaises. Par exemple, la masse des produits minéraux non métalliques qui circulent en moyenne à 76% dans une même région administrative française, à 21% dans toute la France et à 3% dans d'autres pays

Marchandise	Valeur moyenne		
	Régionale	Nationale	Internationale
Minerais et autres produits d'extraction ; tourbe ; uranium et thorium	79%	21%	1%
Produits minéraux non métalliques	76%	21%	3%
Métaux basiques, produits métalliques, sauf machines et équipements	18%	26%	56%

Cette première approche a permis d'obtenir une première idée des échelles géographiques adaptées pour certaines catégories de matières minérales et métalliques, mais, présentent de fortes limites qui empêchent l'exploitation de ces résultats dans la présente étude.

Premièrement, les flux de recyclage ne sont pas présents dans les données Sitram, alors que ce sont ces flux qui nous intéressent et non les flux de matière première vierge.

Deuxièmement, ces données de transport sont représentatives du système actuel et ne représentent pas le scénario global dans lequel s'inscrit cette méthode, qui considère un monde où l'économie circulaire est parfaitement déployée en France.

Dans un monde où l'économie circulaire est parfaitement déployée, les distances parcourues par les matériaux doivent être aussi diminuées pour une cohérence environnementale globale.

De plus, le transport est un vrai bras de levier pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre, il serait donc dommage de recycler mais de polluer énormément à cause d'un transport conséquent, surtout au vu des objectifs fixés par la stratégie bas carbone.

Ainsi, afin d'avoir une première réponse à la question - quelle serait la meilleure échelle géographique de circulation pour les flux de recyclage dans un monde où l'économie circulaire est bien déployée ?- une enquête a été menée auprès de sept acteurs et actrices de valorisation des déchets du bâtiment et du BTP.

Le tableau suivant résume les résultats de cette enquête et l'annexe 5.3 présente un rapport complet des résultats de l'enquête menée.

Tableau 5-10 Résumé de l'enquête menée auprès des acteurs et actrices du réemploi concernant l'échelle géographique la plus adaptée pour les flux issus du recyclage

Flux de recyclage	Echelle géographique
Granulats	Départementale
Calcin pour fabrication de laine de verre	Régionale
Eléments pour fabrication de laine de roche	Régionale
Gypse pour fabrication de plâtre	Régionale
Calcin pour fabrication de verre	Régionale
Métaux	Nationale

Nous observons que les échelles géographiques les plus adaptées sont différentes des pratiques actuelles.

L'échelle géographique la plus grande est nationale et concerne les métaux, la plupart des matériaux seraient recyclés au niveau régional, et les granulats, au vu de leur caractère très pondéreux, au niveau du département.

6.3 Estimation quantitative des flux du recyclage

Une fois les flux et les échelles géographiques adaptées défini-e-s, il a fallu les quantifier. Malgré le développement du recyclage ces dernières décennies, les données sur le recyclage ne sont pas facilement accessibles.

Ainsi, plusieurs sources d'information ont été sollicitées, les portails d'information des principaux producteurs en France, des syndicats des filières de recyclage et des filières matériaux, mais aussi en exploitant les informations mises à disposition par l'Institut National de l'Economie Circulaire (INEC).

Les données présentes sur Inies et stockées dans les Fiches de Déclaration Environnementales et Sanitaires (FDES) ont aussi été exploitées afin d'estimer la part de matière secondaire maximale en entrée des produits de construction avec un matériau principal donné.

Ces approximations ont été nécessaires pour combler le grand manque de données.

La quantification des flux devait être réalisée au niveau de l'échelle géographique la plus adaptée, cependant, au vu du manque de données, les informations obtenues n'ont permis qu'une estimation au niveau national.

Le tableau suivant présente les échelles les plus adaptées pour chaque flux, l'échelle à laquelle la quantification a pu être effectuée, les valeurs estimées ainsi que les sources d'information qui ont permis les estimations de la masse et du pourcentage maximale de matière secondaire possible d'intégrer en entrée du processus de fabrication.

Tableau 5-11 Tableau résumant les échelles géographiques les plus adaptées pour chaque ressource de la nomenclature Ressource de MiMOSA, les échelles géographiques auxquelles les données ont pu être estimées, les données obtenues ainsi que les sources mobilisées pour estimer la masse et le pourcentage maximale de matière secondaire possible d'intégrer en entrée du processus de fabrication. ND les données qui n'ont pas pu être estimées. (ND : Non Défini). Etant l'importance de la laine de verre, et comme première approximation, une valeur indicative de 100 000 t produites par an a été définie. Parmi les sources mobilisées, on retrouve des industriels et des syndicats de produits du bâtiment mais aussi des FDES présentes dans la base Inies qui ont permis de définir le pourcentage maximal de matière secondaire possible à intégrer en entrée du processus de fabrication des matériaux étudiés. C'est-à-dire, que dans la base Inies, pour une famille de produit données, la valeur de la FDES avec le taux de recyclage le plus élevée a été considérée

Nomenclature Ressource	Echelle géographique la plus adaptée	Echelle géographique où les données ont pu être obtenues	Masse (t)	Pourcentage maximale de matière secondaire possible d'intégrer en entrée du processus de fabrication (%)	Source
Aluminium	Nationale	Nationale	472 000	45	Fédération Aluminium France Id Inies : 26705
Verre	Régionale	Nationale	104 000	50	Saint-Gobain
Béton (granulats recyclés)	Départementale	Nationale	6 600 000	100	INEC
Acier	Nationale	Nationale	6 200 000	87	Sénat Id Inies : 9055
Laine de verre	Régionale	Nationale	ND (100 000)	65	Id Inies : 8765
Laine de roche	Régionale	Nationale	159 000	49	Batirama Id Inies : 7127
Terre cuite	ND	ND	ND	ND	
Plâtre	Régionale	Nationale	107 000	30	Syndicat National du Plâtre Id Inies : 27549
Céramique	ND	ND	ND	ND	
Mortier	ND	ND	ND	ND	

Ainsi, la matrice $A_{recycling}(n, 1)$ avec $n = 7$, définie dans le chapitre 4, est calculée en multipliant la masses des matériaux et le pourcentage maximal de matière secondaire possible d'intégrer en entrée du processus de fabrication. Pour rappel, la matrice $A_{recycling}(n, 1)$ contient les quantités des matières secondaires maximales en entrée des filières de recyclage des ressources minérales et métalliques, exprimées en kg. A droite, la nomenclature a été rappelée. La figure 5-11 met en évidence cette étape par rapport à la méthode MiMOSA.

$$A_{recycling} = \begin{pmatrix} 212\,400\,000 \\ 52\,000\,000 \\ 6\,600\,000\,000 \\ 5\,394\,000\,000 \\ 65\,000\,000 \\ 77\,910\,000 \\ 0 \\ 32\,100\,000 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{matrix} Aluminium \\ Béton \\ Verre \\ Acier \\ Laine de verre \\ Laine de roche \\ Terre cuite \\ Plâtre \\ Céramique \\ Mortier \end{matrix}$$

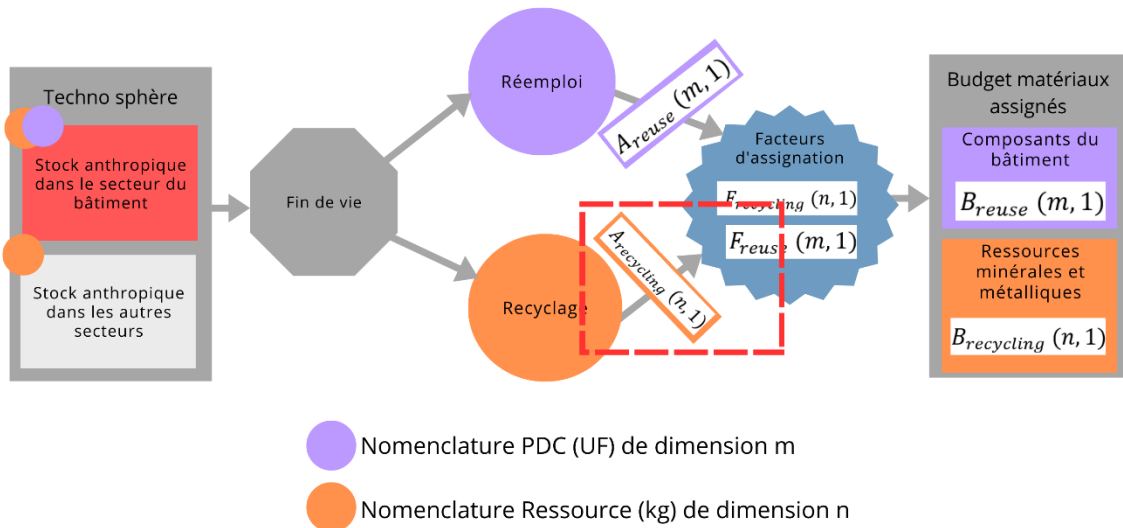


Figure 5-11 Localisation de la matrice $A_{recycling}$ par rapport aux étapes de la méthode MiMOSA

Les valeurs de la matrice $A_{recycling}$ qui expriment la quantité de matières secondaires maximale possible d'intégrer en entrée de la fabrication des matériaux contiennent beaucoup d'incertitudes. Ceci est dû au manque de données disponibles sur le recyclage. Les résultats obtenus sont ainsi influencés par la qualité de ces valeurs et ceci est à prendre en compte lors de l'analyse et l'interprétation des résultats de l'étude de cas obtenus. Ces valeurs sont amenées à changer quand les données seront accessibles et plus robustes.

7. Conclusion du chapitre

Ce chapitre a eu pour objectif d'estimer les taux de réemploi pour chaque composant de la nomenclature PDC définie dans la méthode MiMOSA et les matières secondaires en entrée de fabrication des matériaux de la nomenclature Matériaux de la méthode MiMOSA.

Les taux sont issus d'une étude qui a eu pour but de combler le manque de données sur le réemploi dans le secteur du bâtiment en France, ils sont donc très liés aux

hypothèses de travail, que ce soient les hypothèses qui découlent du scénario considéré où l'économie circulaire est bien déployée, ou les hypothèses liées à la méthodologie de traitement des informations obtenues à travers la recherche bibliographique ou les enquêtes.

Les résultats obtenus sont perfectibles et ont vocation à pallier l'absence de données robustes sur le réemploi dans le secteur du bâtiment et se positionnent comme une première proposition, à compléter, corriger et amender de quantification des gisements de produits, équipements et matériaux pouvant être issus de la déconstruction des bâtiments.

Vu les dynamiques poussées par les politiques pour le déploiement de l'économie circulaire, le développement des filières REP, une meilleure connaissance du parc du bâtiment des flux de réemploi qui en sont issus et des flux du recyclage, ce qui permettra de fiabiliser ces estimations et données dans les années à venir est en train de se mettre en place et s'avère nécessaire.

Cependant, afin de mieux rendre compte de l'influence de l'estimation des taux de réemploi sur les résultats de l'étude de cas, une étude de sensibilité de ce paramètre sera conduite dans le chapitre 7. Le chapitre 6 lui aura pour objectif d'appliquer la méthode MiMOSA à une étude de cas après avoir quantifié les flux de déconstruction au niveau du département de la localisation du projet étudié et en appliquant les taux estimés dans ce chapitre.

*Chapitre 6. De MiMOSA à un outil opérationnel
– Application à une étude de cas*

1. Objectifs du chapitre

Les objectifs, exigences et principes de la méthode MiMOSA ont été définis et détaillés au fil du chapitre 4 de ce manuscrit. Tous les paramètres et toutes les équations de la méthode ont été définis conceptuellement.

Le chapitre 5 a, quant à lui, permis d'estimer les taux de réemploi et de réutilisation des produits de construction et équipements issus de la déconstruction et de la rénovation des bâtiments et les flux de matières secondaires issues du recyclage.

Ce chapitre a pour but d'appliquer la méthode à une étude de cas afin d'opérer les derniers ajustements nécessaires à MiMOSA pour la rendre opérationnelle, en rajoutant ou modifiant des étapes intermédiaires quand nécessaire.

Cette étude de cas doit être considérée comme une « preuve de concept » dont l'objectif premier est de démontrer que l'on peut appliquer la méthode MiMOSA et obtenir des résultats sur un cas réel. L'analyse des résultats et l'exploitation de la méthode sont des objectifs secondaires du travail. Tout au long de ce chapitre 6, les différentes étapes et résultats intermédiaires seront détaillés.

En appliquant la méthode MiMOSA à l'étude de cas, ce chapitre répond aux questions de recherche suivantes : Comment assigner les gisements pour définir des budgets soutenables au niveau du projet étudié ? Comment définir les besoins en produits et ressources d'un projet pour les comparer aux budgets assignés ?

La méthode telle que développée met en avant deux jeux d'indicateurs d'approvisionnement en matériaux minéraux et métalliques issus de l'économie circulaire dans une approche d'évaluation absolue de la soutenabilité :

- Un indicateur exprime la consommation des budgets matériaux pouvant être issus du réemploi assigné au projet, calculé pour chaque produit de construction et équipement qui compose le bâtiment étudié.
- Un indicateur exprime le dépassement des budgets de matières secondaires pouvant être issues du recyclage et assignées au projet, calculé pour chaque matériau minéral et métallique étudié. Pour des fins de simplification, ces deux types d'indicateurs ont été nommés « Indicateur de réemploi potentiel » et « Indicateur de recyclage potentiel ».

Ces indicateurs sont calculés à l'issue d'une comparaison entre les besoins du bâtiment étudié et les budgets matériaux issus de l'économie circulaire qui peuvent lui être

assignés pour un territoire donné. Cette approche est réalisée à deux niveaux : une comparaison au niveau des produits de construction et équipements afin de prendre en compte les actions de réemploi et une au niveau des matériaux pour prendre en compte les actions de recyclage.

A l'issue de ces deux comparaisons, le niveau de soutenabilité en termes de consommation de ressources minérales et métalliques du bâtiment est établi.

La méthode MiMOSA propose ainsi un indicateur de réemploi potentiel pour chaque composant du bâtiment et un indicateur de recyclage potentiel pour chaque matériau. Elle ne propose pour l'instant pas de méthode d'agrégation qui permettrait d'estimer une note globale sur ces deux aspects pour le bâtiment étudié.

L'agrégation des résultats des indicateurs peut être intéressante vis-à-vis de l'accompagnement dans l'aide à la décision ou dans un cadre d'évaluation réglementaire des performances des bâtiments. Cependant, elle induit, en contrepartie une grande perte d'informations.

A ce stade, aucune méthode d'agrégation et d'interprétation au niveau du bâtiment n'a été développée, mais des éléments qui nous paraissent pertinents à prendre en compte ont été définis afin d'alimenter les réflexions pour des travaux futurs. Parmi ces éléments, nous citons : le niveau des réserves naturelles de chacune des ressources, leur criticité, les impacts environnementaux générés par l'exploitation de ces ressources, etc. Ces aspects seront approfondis dans le chapitre 8 relatif aux perspectives de ce travail de recherche.

Pour rappel, le schéma de la figure 6-1 résume les étapes principales de la méthode MiMOSA, en rouge sont encadrées les matrices calculées dans ce chapitre 6. Pour plus de détail, se référer au chapitre 4 de ce manuscrit.

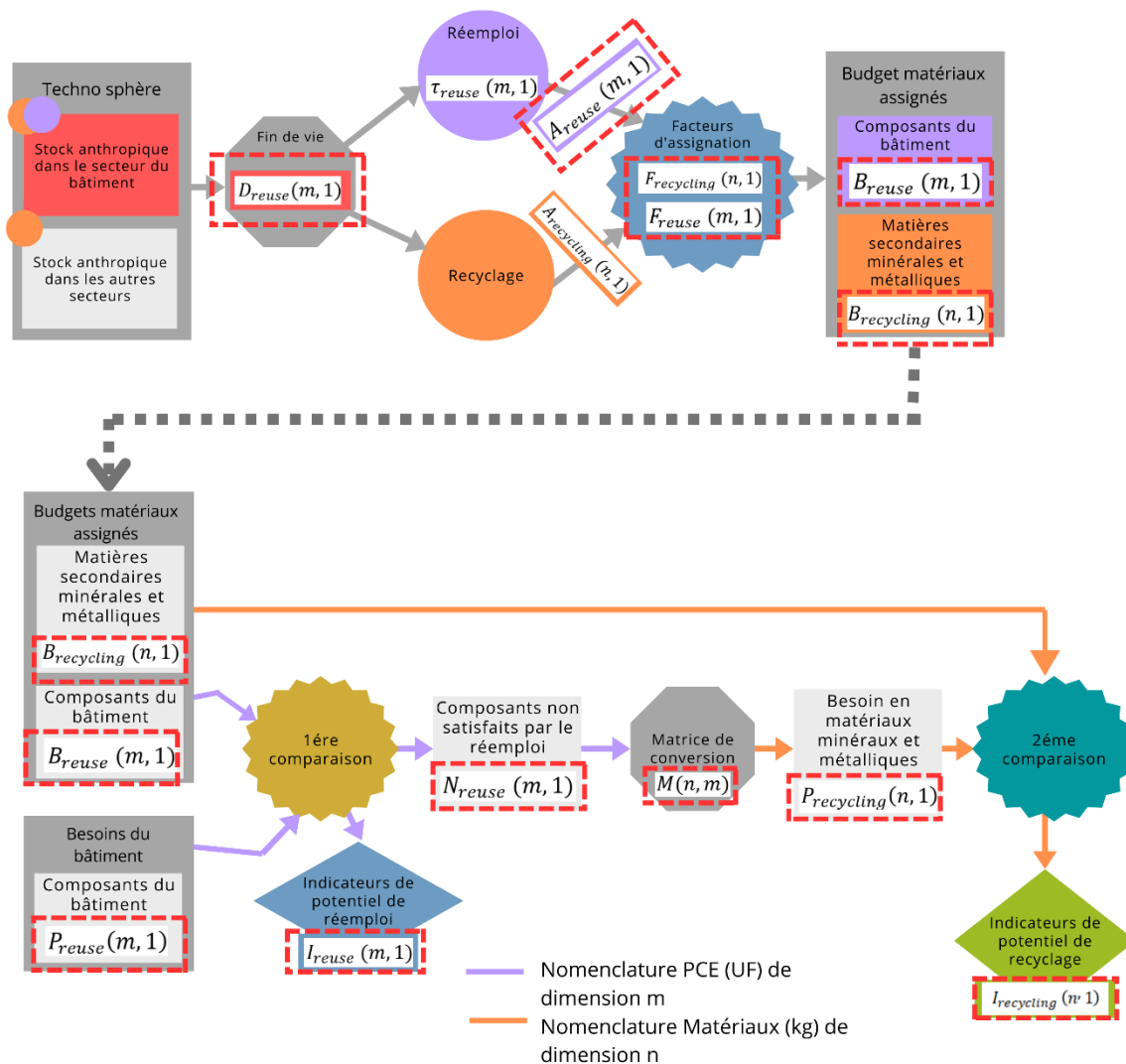


Figure 6-1 Schéma global résumant les étapes principales de la méthode MiMOSA pour une année de vie du bâtiment avec les matrices calculées à chaque étape. Les matrices encadrées en rouge sont calculées dans ce chapitre

6

Dans la suite de ce chapitre, une présentation de l'étude de cas est réalisée. Elle comprend une définition des frontières de l'étude sur le bâtiment concerné et du scénario qui nous permettra d'estimer les données nécessaires à MiMOSA pour représenter le contexte du secteur du bâtiment (nombre de constructions et de démolitions par an, par exemple). Ensuite, toutes les étapes de calcul seront détaillées, en présentant au fur et à mesure les résultats intermédiaires. Finalement, les résultats des indicateurs vont être interprétés et analysés.

Afin de tester la méthode MiMOSA et de l'opérationnaliser en l'appliquant à l'étude de cas, un modèle de calcul a été développé sous Python. Les données d'entrée de ce modèle concernent les flux de déconstruction du département Seine-Saint-Denis issus

de l'outil BTP-flux, les besoins en produits de construction de la maison individuelle considérée, la matrice de conversion permettant d'estimer la composition matérielle des produits de construction, les taux de réemploi, les flux issus du recyclage et les paramètres liés aux scénarios considérés. Les données de sortie de ce modèle sont les indicateurs de réemploi et de recyclage potentiels. Ce modèle de calcul Python est compatible avec d'autres études de cas et d'autres territoires d'étude, à condition de la disponibilité des données en entrée. Dans ce chapitre, les différentes étapes de calcul qui constituent ce modèle Python sont présentées.

2. Présentation de l'étude de cas

2.1 Le projet de construction considéré.

Le bâtiment considéré dans le cadre de cette étude de cas est une maison individuelle constituée d'un rez-de-chaussée et d'un étage. La surface habitable de la maison individuelle est de 110 m², sa typologie est T4 et son matériau constructif principal est la terre cuite, sa localisation est en Seine-Saint-Denis (93), France. Cette étude de cas est fictive et a été dimensionnée dans le cadre du projet COMPAMODES porté par l'ADEME et le CSTB (Sibiude & Vesson, 2017), ce qui nous a permis d'accepter à un inventaire de cycle de vie complet.

La figure 6-2 présente les plans en 2D de la maison individuelle considérée.

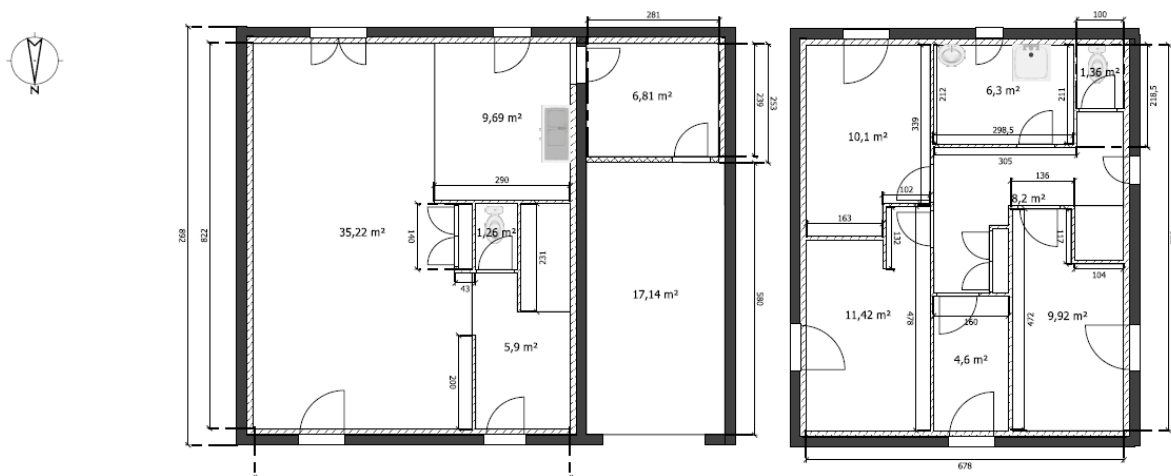


Figure 6-2 Plans 2D de la maison individuelle considérée

Les lots du bâtiment, tels que définis dans le cadre de la réglementation environnementale des bâtiments, la RE2020, qui sont considérés dans cette étude de cas sont :

- Fondations et infrastructure.
- Superstructure – maçonnerie.

- Couverture.
- Cloisonnements, plafonds suspendus et menuiseries intérieures.
- Façade et menuiseries extérieures.
- Revêtement des sols, murs et plafonds.

Le lot Voirie et Réseaux Divers (VRD), ne fait pas partie du périmètre de l'étude. Les lots Chauffage, Ventilation, Climatisation (CVC), installations sanitaires, réseaux d'énergie et réseaux de communication, n'ont pas été pris en compte dans la modélisation, faute de données disponibles sur les produits issus de la déconstruction pouvant être mobilisés par ces lots.

En effet, comme vu dans le chapitre 5, les flux issus de la déconstruction et de la rénovation en sortie de BTP-flux ne considèrent pas ces 3 lots faute de données disponibles sur les quantités disponibles à l'issue de la déconstruction.

Prendre en compte ces flux pour les besoins du bâtiment mais sans les prendre en compte dans les actions de réemploi fausserait les résultats de l'étude. Ainsi, ils n'ont pas été intégré dans le périmètre de notre étude dans cette première approche. Cependant, une perspective de ce travail est de les intégrer lorsque des données suffisantes seront à disposition.

Notons cependant que la part la plus importante de la masse totale des matériaux d'un bâtiment est présente dans les 6 lots considérés dans cette étude, notamment dans sa fondation et sa structure.

Les matériaux minéraux, tels que le béton, sont en grande partie consommés par les lots fondations, infrastructures et superstructure, maçonnerie. Cependant, certains matériaux métalliques, tels que le cuivre, sont surtout présents dans les équipements électriques et électroniques qui sont majoritairement dans les lots CVC, réseaux d'énergie et réseaux de communication. Il semblerait donc particulièrement pertinent d'inclure ces lots dans de prochaines études afin d'estimer la quantité des équipements du bâtiment qui pourraient être issus du réemploi ou des matériaux métalliques qui pourraient être issus du recyclage.

2.2 Les scénarios et hypothèses de l'étude de cas

2.2.1 Scénario global : hypothèses et scénarios sur le développement de l'économie circulaire

Dans cette étude de cas, et comme expliqué dans le chapitre 5 pour estimer les taux de réemploi des produits de construction, nous nous positionnons dans un scénario global qui considère que l'économie circulaire est parfaitement déployée. C'est-à-dire que les freins administratifs, juridiques, économiques et assurantiels ne sont pas considérés et que tous les acteur·rice·s du bâtiment mettent tout en œuvre pour optimiser le réemploi et le recyclage, du chantier de déconstruction au nouveau chantier de construction.

Ce scénario global définit des hypothèses qui ont permis d'estimer des taux optimistes de produits et équipements pouvant être issus du réemploi et des flux de matériaux issus du recyclage dans le chapitre 5. Ces taux ont été définis.

Par ailleurs, nous ne considérons pas des développements technologiques futurs qui viendraient améliorer les rendements des processus de réemploi et recyclage actuels au vu de l'incertitude du déploiement de ces technologies.

Nous sommes conscient·e·s que les freins actuels au réemploi et au recyclage ne sont pas que techniques. Un indicateur est une *représentation* d'une réalité. L'objectif est ici de représenter une estimation du gisement maximal de produits de construction et matériaux pouvant être réemployés ou recyclés pour une année donnée.

2.2.2 Les scénarios développés par l'ADEME dans l'étude Transitions 2050

Afin d'opérationnaliser la méthode MiMOSA en l'appliquant à l'étude de cas, nous avons besoin de paramètres tels que le nombre de logements et de locaux tertiaires déconstruits et à construire ou à rénover pour une année donnée en France, du taux d'occupation de ces logements, ainsi que du nombre d'habitant·e·s par logement.

L'ADEME, afin d'accompagner la transition vers une neutralité carbone à l'horizon de 2050, a mené une étude qui propose 4 trajectoires différentes qui correspondent à des choix de société distincts mais qui aboutissent tous à la neutralité carbone. Ces scénarios ont été développés pour la France métropolitaine et reposent tous sur les mêmes données macroéconomiques, climatiques et démographiques.

Chaque scénario s'inscrit dans une trajectoire cohérente et est décliné pour 8 secteurs d'activité principaux : le bâtiment, le transport (des personnes et des marchandises), l'alimentation, l'agriculture, la forêt, l'industrie, les déchets et l'énergie.

Ces scénarios proposent une description détaillée de la dynamique du secteur du bâtiment français en 2050 en termes de démolitions, de constructions neuves, de rénovations, de taux d'occupation des logements et même de consommations de matériaux.

Dans cette étude de cas, nous adoptons le premier scénario proposé dans le cadre de cette étude afin d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 : le scénario « *Génération frugale* ». Ce scénario implique des changements importants dans la manière de consommer, et donc des transformations drastiques de la société, sans considérer le déploiement de technologies nouvelles ou incertaines. Concernant le secteur du bâtiment, ce scénario se traduit par une rénovation massive performante et rapide du parc bâti. Les rénovations sont globales et permettent à 80% du parc bâti d'atteindre le niveau Bâtiment Basse Consommation. La construction neuve, de son côté connaît une limitation forte qui passe par la réquisition des logements vacants et résidences secondaires pour qu'elles deviennent des résidences principales et par une diminution forte des surfaces individuelles d'habitation (ADEME, 2021c).

Tableau 6-1 Les paramètres extraits du scénario « *Génération frugale* » de l'étude *Transitions 2050* ADEME et utilisés dans l'étude de cas, les valeurs sont données à l'échelle de la France métropolitaine

Scénario	Nombre de logements construits en 2050	Nombre de logements rénovés en 2050	Surface (en m ²) de parc tertiaire construit entre 2015 et 2050	Surface (en m ²) de parc tertiaire rénové entre 2015 et 2050	Nombre d'habitants par logement en 2050	Surface (en m ²) par habitant en 2050	Nombre de logements résidentiels construits entre 2015 et 2050
<i>Génération frugale</i>	2000	330000	130000000	560618000	2.12	12	4000000

Les résultats de tous les autres scénarios ainsi qu'une étude de sensibilité au sujet de leur influence sur les indicateurs de réemploi et de recyclage potentiels seront présentés dans le chapitre suivant, le chapitre 7.

3. Estimation des besoins du bâtiment étudié

Les produits de construction qui constituent la maison individuelle étudiée dans cette étude de cas ont été décrits, dans le cadre du projet COMPAMODES, sans une nomenclature précise. Ainsi, une première étape est d'exprimer ces besoins à l'aide de la nomenclature PDC définie dans le cadre de la méthode MiMOSA (voir chapitre 5) et présentée exhaustivement dans l'annexe 5.1.

Ainsi, les 19 produits de construction définis dans la modélisation du projet COMPAMODES ont été exprimés dans la nomenclature PDC à l'aide d'une correspondance entre les produits et la nomenclature, voir schéma ci-dessous.

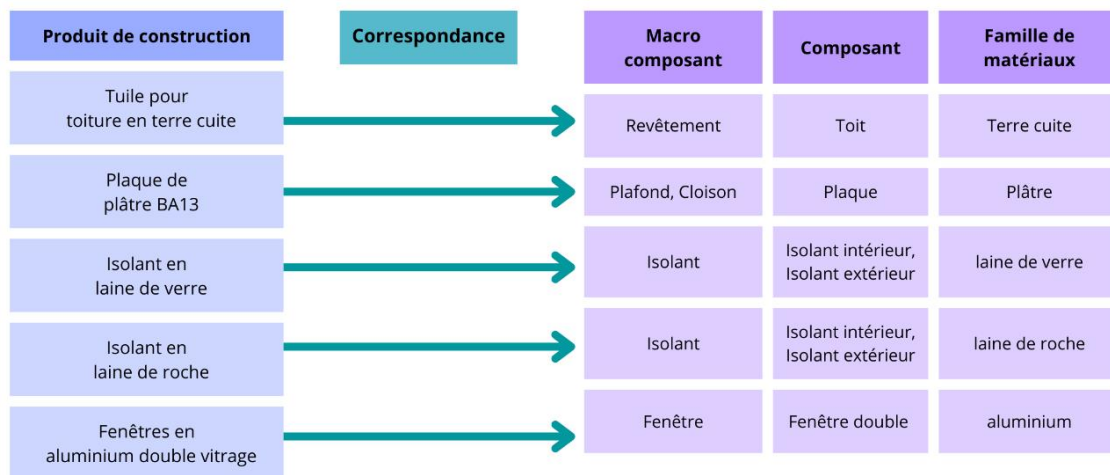


Figure 6-3 Table de correspondance permettant d'exprimer les besoins de la maison individuelle dans la nomenclature PDC de la méthode MiMOSA

A l'issue de cette étape, le vecteur matriciel P_{reuse} , contenant les besoins du projet étudié exprimé dans la nomenclature PDC est calculé. Le tableau suivant en montre un extrait pour une sélection de produits et l'annexe 6.1 le présente en complet.

Tableau 6-2 Extrait de la matrice Preuse

Macro-composant	Composant	Famille de matériaux	Besoin bâtiment	UF
Bloc baie	Bloc baie double	Acier	0	m ²
Bloc baie	Bloc baie double	Aluminium	17.4	m ²
Element de structure	Poutrelle	Béton précontraint	230.8	m
Isolant	Isolant intérieur, Isolant extérieur	Laine de roche	56	m ²
Mur	Mur extérieur, Mur intérieur	Terre cuite	217.4	m ²
Mur	Voile en béton	Béton armé	0	m ²
Plafond, Cloison	Plaque	Plâtre	399.7	m ²
Plafond, Cloison	Rail	Acier	258.1	m
Revêtement	Toit	Terre cuite	71.8	m ²
...
Toit	Couverture en bac acier	Acier	0	m ²

P_{reuse}

4. Estimation des flux pouvant être issus de l'économie circulaire

4.1 Les flux issus du réemploi

4.1.1 Estimation des flux de déconstruction grâce à l'outil BTP-flux

Les flux issus de la déconstruction et de la rénovation dans le département Seine-Saint-Denis ont été estimés à l'aide de l'outil BTP-flux (Tirado et al., 2021) et exprimés dans la même nomenclature PDC utilisée pour l'expression des besoins de la maison étudiée.

Cet outil, présenté lors du chapitre 5, prend en compte tout le parc de bâtiments avec les spécificités de chaque type de bâtiments (maisons individuelles, logements collectifs, bureaux, ...).

Une fois le parc de bâtiments et le stock de matériaux correspondant définis, les flux issus de la déconstruction et de la rénovation sont calculés en appliquant des taux de déconstruction et de rénovation.

Ces taux, définis comme le nombre de bâtiments démolis par bâtiment présent sur le territoire considéré, dépendent de plusieurs facteurs :

- Des facteurs intrinsèques aux bâtiments, comme leur période de construction ou encore leur typologie.

- Des facteurs basés sur des données d'estimation actuelles, notamment le nombre de logements démolis par an (entre 35 000 et 95 000) et le nombre de m² de tertiaire démolis par an (entre 1.8 et 8 millions de m²) en France.

Le tableau 6-3 montre les taux de démolition minimaux et maximaux considérés pour chaque typologie de bâtiment.

Le taux maximal calculé pour chaque type de bâtiment correspond à 95 000 logements résidentiels démolis et 8 millions de m² pour le tertiaire, par an, pour l'ensemble du parc de bâtiments résidentiel et tertiaire, en France.

Le taux minimal calculé pour chaque type de bâtiment correspond lui à 35 000 logements démolis dans le résidentiel et 1.8 millions de m² démolis dans le tertiaire, par an, en France.

Tableau 6-3 Les taux minimal et maximal de démolition considérés dans BTP-flux par typologie de bâtiment (Tirado et al., 2021)

Type de bâtiment	Taux minimal	Taux maximal
Maison individuelle	0.00825	0.02258
Logement collectif	0.00474	0.01297
Bâtiment industriel	0.00730	0.00730
Bureaux et écoles	0.00212	0.00940

Nous définissons le vecteur matriciel $D_{reuse_{BTPflux,max}}(m, 1)$ contenant la quantité en UF des flux issus de la déconstruction estimés à l'aide des taux de déconstruction maximaux par BTP-flux en Seine-Saint-Denis, avec m le nombre de lignes de la nomenclature PDC. Le tableau 6-4 présente un extrait de ce vecteur matriciel pour une sélection de produits de construction de la nomenclature PDC.

Tableau 6-4 Les flux issus de la déconstruction dans le département Seine-Saint-Denis tels qu'estimés par BTP-flux

Macro-composant	Composant	Famille de matériaux	Quantité en UF	UF
Bloc baie	Bloc baie double	Aluminium	7195.5	m ²
Élément de structure	Poutrelle en béton précontraint	Béton précontraint	6371.6	m
Mur	Mur en blocs de béton	Béton	251559.9	m ²
Isolant	Isolant intérieur	Laine de verre	313511	m ²
Fenêtre	Fenêtre double	PVC	76979.9	m ²
Fenêtre	Fenêtre triple	Bois-aluminium	1351.4	m ²

$$D_{reuse_{BTPflux,max}}(m, 1)$$

Afin de réaliser cette étude de cas, nous nous positionnons dans le cadre des hypothèses proposées par le scénario « Génération frugale » de l'ADEME, en 2050.

Les hypothèses de ce scénario font que le nombre de démolitions par an est différent de celui pris dans le modèle BTP-flux. Ceci implique que les taux de déconstruction par typologie de bâtiments en 2050 dans le cadre du scénario « *Génération frugale* » est différent des valeurs considérées par BTP-flux.

Cependant, les modèles des scénarios développés par l'ADEME ne mettent pas à disposition toutes les données nécessaires pour calculer ces taux pour chaque typologie de bâtiments, seul le nombre de logements démolis en 2050 est estimé (64 000 logements pour le scénario 1).

Une approximation a donc été faite en utilisant le taux de démolition maximal considéré dans BTP-flux mais en appliquant un facteur de correction égal au nombre de logements démolis en 2050 tel qu'estimé dans le scénario de l'ADEME divisé par le nombre de logements correspondant au taux de démolition maximal considéré dans BTP-flux.

Ainsi, nous définissons un facteur de correction afin d'estimer des taux de démolition adaptés au scénario « *Génération frugale* » de l'ADEME F_{c1} , comme suit :

$$F_{c1} = \frac{D_{d_S1}}{D_{d_BTPflux_max}} = \frac{64\ 000}{95\ 000} = 0.67$$

Avec :

- D_{d_S1} : Le nombre de logements démolis en 2050 par le scénario « *Génération frugale* » de l'ADEME.
- $D_{d_BTPflux_max}$: Le nombre de logements démolis correspondant au taux maximal de démolition considéré par BTP-flux.

La valeur de ce facteur illustre bien la diminution, d'un tiers environ, du taux de déconstruction considéré par le scénario « *Génération frugale* » en 2050, par rapport à actuellement.

En appliquant ce facteur de correction au vecteur matriciel $D_{reuse_{BTPflux,max}}$ contenant les flux de déconstruction calculés initialement par BTP-flux, nous obtenons la matrice D_{reuse} contenant une estimation des flux de déconstruction cohérents avec les hypothèses du scénario « *Génération frugale* » de l'ADEME. $D_{reuse}(m, 1)$, avec $m = 64$, le nombre des lignes de la nomenclature PDC, est calculé comme suit :

$$D_{reuse} = F_{c1} \cdot D_{reuse_{BTPflux,max}}$$

Le tableau 6-4 montre un extrait de la matrice D_{reuse} .

Tableau 6-5 Flux de déconstruction issus du département Seine-Saint-Denis avec le taux de démolition considéré dans le scénario "Génération frugale"

Macro-composant	Composant	Famille de matériaux	Quantité en UF	UF
Bloc baie	Bloc baie double	Aluminium	4847.5	m ²
Élément de structure	Poutrelle en béton précontraint	Béton précontraint	4292.4	m
Mur	Mur en blocs de béton	Béton	169471.9	m ²
Isolant	Isolant intérieur	Laine de verre	211207.4	m ²
Fenêtre	Fenêtre double	PVC	51860.1	m ²
Fenêtre	Fenêtre triple	Bois-aluminium	910.4	m ²

$$D_{reuse}(m, 1)$$

4.1.2 Estimation des flux pouvant être issus du réemploi

Cette section a pour but de calculer les flux pouvant être issus du réemploi, qu'on résume dans le vecteur matriciel A_{reuse} en appliquant les taux de réemploi estimés lors du chapitre 5 et contenus dans la matrice τ_{reuse} aux flux issus de la déconstruction estimés dans la section précédente et contenus dans la matrice D_{reuse} .

Tout au long du chapitre 5, nous avons vu que la méthode qui a permis d'estimer les taux du réemploi potentiel afin de pallier le manque de données actuel sur ces différents flux. Nous sommes conscient·e·s qu'elle n'est ni assez précise ni assez robuste pour le moment, mais elle permet une première estimation pour définir les flux de réemploi, dans le cadre du scénario adopté pour cette étude de cas qui stipule que l'économie circulaire est bien déployée.

Afin de pallier ce manque de précision, dans le chapitre 5, deux taux de réemploi sont estimés pour chaque produit de construction. Ainsi, deux estimations pour la matrice τ_{reuse} sont réalisées.

Dans le cadre de cette étude de cas, seule une des deux estimations sera prise en compte, et donc les résultats des indicateurs obtenus sont imminemment liés à cette estimation étant donné que les budgets calculés dépendent de ces taux.

Toutefois, nous rappelons que notre travail ne vise pas à établir une estimation précise du taux du réemploi potentiel, mais, à proposer une preuve de concept d'une méthodologie qui, pour être mise en place de façon plus complète, a besoin d'informations qui ne sont pas disponibles actuellement.

Le chapitre 7, détaille une étude de sensibilité qui sera menée sur la méthode MiMOSA, les différentes valeurs de taux de réemploi estimées pour chaque produit de construction sont prises en compte afin d'identifier à quel point et de quelle manière ces estimations influent sur les résultats des indicateurs.

Nous calculons le vecteur matriciel A_{reuse} , dont la dimension est égale à m , avec m le nombre de lignes de la nomenclature PDC, comme suit :

$$A_{reuse} = \widehat{r}_{reuse} \cdot D_{rese}$$

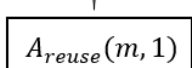
Avec :

- \widehat{V} la matrice diagonale calculée à partir de tout vecteur matriciel V . $\widehat{V}_{ij} = V_i \delta_{ij}$ avec δ_{ij} le delta de Kronecker.

Le tableau suivant présente, pour une sélection de produits de la nomenclature PDC, les valeurs de A_{reuse} et l'annexe 6.2 les présente dans leur intégralité.

Tableau 6-6 Flux pouvant être issus du réemploi dans le département Seine-Saint-Denis en 2050 selon les hypothèses du scénario "Génération frugale"

Macro-composant	Composant	Famille de matériaux	Quantité en UF	UF
Bloc baie	Bloc baie double	Acier	267.8	m ²
Cloison	Cloison vitrée	Bois	6509.5	m ²
Fenêtre	Fenêtre double	PVC	4700.7	m ²
Fondation	Béton de propreté	Béton	0	m ³
Fondation	Béton de semelle	Béton	0	m ³
...
Toit	Couverture en bac acier	Acier	6238.8	m ²



$A_{reuse}(m, 1)$

L'analyse de ces flux de produits de construction, pouvant être issus du réemploi par macro-composant, permet de se rendre compte, pour un produit donné, quel macro-composant est le plus disponible. Si on prend l'exemple des fenêtres, le diagramme suivant résume les quantités de fenêtres pouvant être issues du réemploi en Seine-Saint-Denis en 2050.

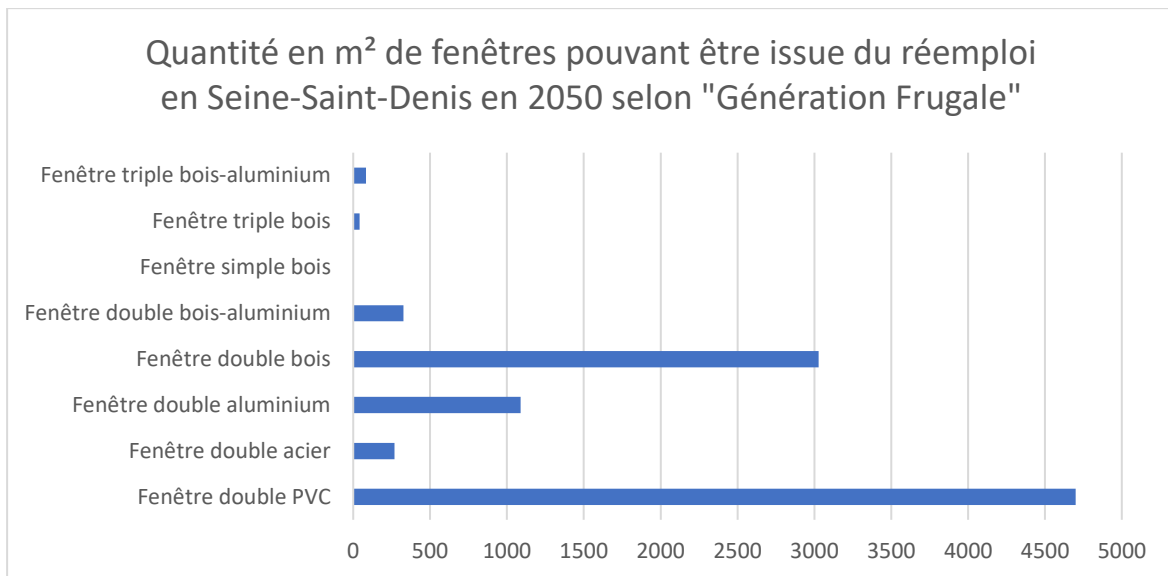


Figure 6-4 Quantité en m² de fenêtres pouvant être issue du réemploi en Seine-Saint-Denis en 2050 selon "Génération frugale"

Nous observons que les fenêtres en double vitrage en PVC pouvant être issues du réemploi sont en plus grande quantité que les autres types de fenêtres. Dans une démarche d'éco-conception et d'optimisation des flux pouvant être issus du réemploi, il pourrait être intéressant de prendre en considération ce paramètre dans la conception des nouveaux bâtiments afin d'équilibrer les besoins du territoire avec les flux de réemploi produits par ce même territoire.

Dans ce qui suit, nous n'allons pas considérer les potentiels d'optimisation pouvant s'exprimer au niveau de la conception du bâtiment étudié. Nous calculons les indicateurs pour le bâtiment en considérant ses besoins tels qu'exprimés initialement. Le chapitre 8 permettra d'approfondir cette piste de l'intégration de l'objectif de maximisation du réemploi dans la conception du bâtiment.

4.2 Les flux issus du recyclage

Les flux issus du recyclage ont été estimés dans le chapitre 5 et sont résumés dans la matrice suivante :

$$A_{\text{recycling}} = \begin{pmatrix} 212\,400\,000 \\ 52\,000\,000 \\ 6\,600\,000\,000 \\ 5\,394\,000\,000 \\ 65\,000\,000 \\ 77\,910\,000 \\ 0 \\ 32\,100\,000 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{matrix} \text{Aluminium} \\ \text{Béton} \\ \text{Verre} \\ \text{Acier} \\ \text{Laine de verre} \\ \text{Laine de roche} \\ \text{Terre cuite} \\ \text{Plâtre} \\ \text{Céramique} \\ \text{Mortier} \end{matrix}$$

Ces flux ont été quantifiés au niveau de la France et en provenance de tous les secteurs, contrairement aux flux de réemploi qui ne proviennent que du secteur du bâtiment. Au vu du manque de données disponibles et accessibles sur le recyclage, les quantités de matériaux secondaires pouvant être issues du recyclage ont été estimées à l'aide de plusieurs sources d'information comme les portails d'information des principaux producteurs en France, des syndicats des filières de recyclage et des filières matériaux, mais aussi en exploitant les informations mises à disposition par l'Institut National de l'Economie Circulaire (INEC) ou encore les données présentes sur Inies et stockées dans les Fiches de Déclaration Environnementales et Sanitaires (FDES).

Cette quantification reflète donc le recyclage tel qu'il se fait actuellement et n'est pas en cohérence avec les scénarios considérés dans cette étude de cas. Cependant, au vu du manque de données, nous nous contentons de cette approximation. Nous sommes conscient·e·s que ceci représente une limite de notre travail et nous le notons comme une perspective afin d'améliorer les données d'entrée du modèle MiMOSA.

5. Calcul des budgets matériaux

5.1 Les facteurs d'assignation

Les flux de réemploi et de recyclage estimés, respectivement dans ce chapitre pour le réemploi et dans le chapitre précédent pour le recyclage, peuvent potentiellement être utilisés par plusieurs projets de construction, voire pour d'autres usages.

En fonction des flux, les usages répondent à des fonctionnalités au sein du secteur du bâtiment, et d'autres, comme les métaux issus du recyclage, sont des intrants de plusieurs secteurs d'activités.

Ainsi, il est nécessaire de quantifier la part de ces flux qui peut être assignée au projet étudié en calculant, à l'aide de facteurs d'assignation, des budgets matériaux pour le projet étudié.

Dans le chapitre 4, une revue des méthodes d'assignation présentes dans la littérature a été réalisée. Dans le cadre de cette étude, une approche d'assignation des budgets, a été retenue et est présentée ci-après.

Ainsi, à l'issue de ce paragraphe les vecteurs matriciels F_{reuse} et $F_{recycling}$ encadrés en pointillés rouges dans la figure 6-9 vont être estimés. Pour rappel, les valeurs de ces vecteurs sont sans unités.

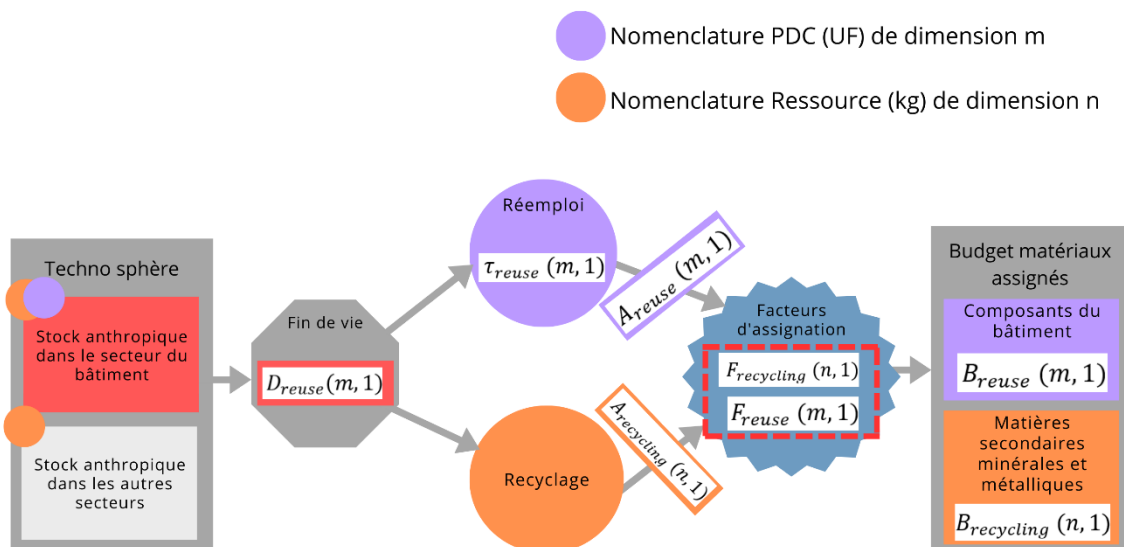


Figure 6-5 Les vecteurs matriciels estimés dans ce paragraphe

5.2 Estimation des budgets matériaux pouvant être issus du réemploi assignés au projet étudié

Les flux issus du réemploi ne circulent qu'au sein du secteur du bâtiment, c'est-à-dire qu'ils proviennent de la déconstruction des bâtiments et ne sont réemployés que dans d'autres bâtiments.

Par exemple, une fenêtre peut être réemployée comme fenêtre ou comme cloison vitrée, comme vu dans le chapitre 5, mais cette étude ne prend pas en considération, d'après les hypothèses considérées, le fait qu'elle puisse être réemployée pour construire une serre agricole par exemple.

Ainsi, les flux issus du réemploi sont à 100% assignés au secteur du bâtiment.

Afin d'estimer le budget réemploi de la maison individuelle étudiée, il faut assigner les flux du réemploi estimés au niveau du département de Seine-Saint-Denis au m^2 de surface habitable.

La surface habitable est un paramètre clé de la modélisation des bâtiments et est utilisée dans plusieurs cadres réglementaires, comme dans le cadre de la Réglementation Environnementale 2020 (RE2020).

Cette assignation comporte plusieurs étapes résumées dans la figure 6-10 et détaillées ci-dessous :

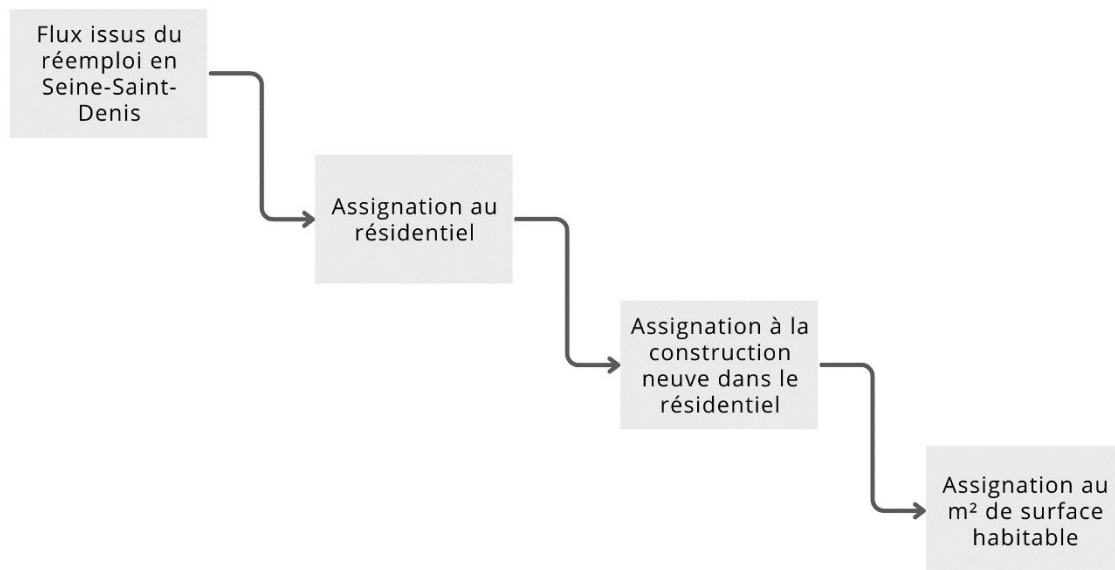


Figure 6-6 Etapes d'assignation des flux issus du réemploi

5.2.1 Assignation au niveau du secteur résidentiel

L'assignation au niveau des bâtiments résidentiels permet de calculer le budget total de flux de réemploi qui seraient disponibles pour tous les bâtiments résidentiels qui vont être construits ou rénovés en 2050 dans le département de Seine-Saint-Denis.

Afin de calculer ce budget pour le secteur résidentiel, les flux de réemplois estimés en 2050 en Saint Denis dans le cadre du scénario « *Génération frugale* » ont été multipliés par le ratio A_r :

$$A_r = \frac{R}{R + T} \%$$

Avec :

- R = les m² de résidentiel construits ou rénovés en 2050 en France d'après le scénario 1 de l'ADEME.
- T = les m² de tertiaire construits ou rénovés en 2050 en France d'après le scénario 1 de l'ADEME.

Afin de calculer le ratio d'assignation A_r , il a fallu d'abord estimer les paramètres R et T en fonction des données mises à disposition dans les modèles des scénarios ADEME.

Ici nous considérons, et en cohérence avec les scénarios de l'ADEME, que le secteur bâtiment est divisé en deux catégories, le résidentiel, qui regroupe les logements, et le

tertiaire, qui regroupe les bâtiments industriels, les bureaux et les écoles (ADEME, 2021c).

Le tableau 6-7 montre les données relatives au scénario « *Génération frugale* » mises à disposition par l'ADEME et qui ont servi au calcul des paramètres R et T.

Tableau 6-7 Paramètres du scénario « *Génération frugale* » de l'ADEME à l'échelle de la France

Nom du paramètre	Nombre de logements construits en 2050	Nombre de logements rénovés en 2050	Nombre de logements construits entre 2015 et 2050	Surface (m ²) de parc tertiaire construit entre 2015 et 2050	Surface (m ²) de parc tertiaire rénové entre 2015 et 2050	Nombre d'habitants par logement en 2050	Surface (m ²) par habitant en 2050 (NégaWatt, 2022)
Notation du paramètre	R_c	R_r	$R_{c(2015-2050)}$	$T_{c(2015-2050)}$	$T_{r(2015-2050)}$	N_{hab}	S_{hab}
Unités	nombre de logements	nombre de logements	nombre de logements	m ²	m ²	nombre d'habitants par logement	m ² par habitant
Scénario « <i>Génération frugale</i> »	2000	330000	4000000	130000000	560618000	2.12	41

Nous calculons donc les paramètres R et T, qui correspondent, respectivement, à la surface, en m² de logements résidentiels construits ou rénovés et à la surface, en m², de bâtiments tertiaires construits ou rénovés en 2050 en France d'après le scénario « *Génération frugale* » de l'ADEME.

Afin de calculer le paramètre R, le nombre de logements rénovés et construits en 2050 est multiplié par le nombre d'habitants par logement et par la surface par habitant.

Afin de calculer le paramètre T, nous divisons les m² de tertiaire construits et rénovés entre 2015 et 2050 par le nombre d'années dans cette période. N'ayant pas d'information sur la dynamique de construction et de rénovation du tertiaire au fil des années, nous faisons l'hypothèse qu'elle est stable.

$$R = (R_c + R_r) \cdot N_{hab} \cdot S_{hab} = 28\,857\,440 \quad \text{en } m^2$$

$$T = (T_{c(2015-2050)} + T_{r(2015-2050)}) \cdot \frac{R_c}{R_{c(2015-2050)}} = 19\,183\,833.33 \quad \text{en } m^2$$

$$\text{Ainsi, } A_r = \frac{R}{R+T} \% = 60 \%$$

5.2.2 Assignation au niveau de la construction neuve résidentielle

Une fois le budget assigné au résidentiel, il faut estimer le budget assigné à la construction neuve résidentielle, par opposition à celui à assigner à la rénovation.

Pour ce faire, une première étape est de déterminer les produits de construction utilisés dans la rénovation et ceux utilisés dans la construction neuve.

Cette différenciation a été faite en fonction des macro-composants des produits de construction.

En considérant que l'objectif de la rénovation est d'améliorer les performances énergétiques des bâtiments, nous faisons l'hypothèse que les blocs baie, les fenêtres et les isolants sont utilisés pour la construction neuve mais aussi pour la rénovation.

Cette classification étant faite, le facteur d'assignation au niveau de la construction neuve dans le résidentiel A_{r_c} se calcule de la manière suivante, en utilisant les mêmes paramètres et notations définis dans le tableau 6-7 :

Pour les produits utilisés dans la rénovation et la construction :

$$A_{r_c_cn/réno} = \frac{R_c}{(R_c + R_r)} \cdot \% = 0.60 \%$$

Pour les produits utilisés seulement dans la construction :

$$A_{r_c_cn} = 100 \%$$

Avec :

- R_c : Nombre de logements construits en 2050.
- R_r : Nombre de logements rénovés en 2050.

5.2.3 Assignation au m²

Afin d'assigner le budget de la construction neuve résidentielle au m², ces flux sont divisés par les surfaces de construction neuve résidentielle qui seront construites en 2050 en Seine-Saint-Denis, en suivant le principe « égal par habitant-e ».

Cependant, le nombre de logements résidentiels construits en 2050 n'a été estimé qu'à l'échelle nationale et pas au niveau départemental, il faut donc descendre d'échelle ce besoin afin d'estimer celui du département de la Seine-Saint-Denis.

Il est possible de faire cette descente d'échelle au prorata de la population, cependant, il n'y a pas de détail sur l'évolution démographique par département en 2050 dans les modèles ADEME.

Pour pallier ce manque, nous utilisons les données démographiques connues à ce jour, à savoir une population de 67 750 000 au niveau de la France métropolitaine et 1 644 903 en Seine-Saint-Denis en 2019, d'après l'INSEE (INSEE, 2019).

Nous établissons l'hypothèse que tous les territoires français connaissent la même évolution de population et du nombre de logements à construire. Ainsi, pour calculer le budget par m², le budget de produits assignés à la construction neuve résidentielle est multiplié par le facteur suivant :

$$A_{S_SSD} = \frac{67\,750\,000}{1\,644\,903} \cdot \frac{1}{R_c \cdot N_{hab} \cdot S_{hab}} = 2.37E^{-04} \quad \text{en /m}^2$$

Avec :

- R_c : Nombre de logements construits en 2050.
- N_{hab} : Nombre d'habitant·e·s par logement en 2050.
- S_{hab} : Surface en m² par habitant·e en 2050.

5.2.4 Assignation des flux pouvant être issus du réemploi au projet étudié

Ainsi, afin d'assigner les flux pouvant être issus du réemploi au projet étudié, nous multiplions les quantités de produits de construction issus du réemploi en Seine-Saint-Denis par ces deux facteurs, en fonction des produits :

- Les produits des macro-composants blocs baie, des fenêtres et des isolants, qui sont utilisés pour la construction neuve et pour la rénovation, le facteur d'assignation est égal à :

$$F_{reuse} = A_r \cdot A_{r_c_cn/réno} \cdot A_s \cdot S_p = 9.38E^{-05}$$

Avec :

- A_r : Facteur d'assignation au secteur résidentiel.
- A_{r_c_cn/réno} : Facteur d'assignation à la construction neuve dans le résidentiel pour les produits utilisés dans la construction neuve et la rénovation.
- A_s : Facteur d'assignation au m² de surface habitable.
- S_p : Surface habitable de l'étude de cas, égale à 110 m².

Les produits des autres macro-composants, qui sont utilisés seulement pour la construction neuve le facteur d'assignation est égal à :

$$F_{reuse} = A_r \cdot A_{r_c_cn} \cdot A_s \cdot S_p = 1.56E^{-02}$$

Avec :

- A_r : Facteur d'assignation au parc résidentiel.
- $A_{r_c_cn}$: Facteur d'assignation à la construction neuve dans le résidentiel pour les produits utilisés seulement dans la construction neuve.
- A_{s_SSD} : Facteur d'assignation au m^2 de surface habitable au niveau du département Seine-Saint-Denis.
- S_p : Surface habitable de l'étude de cas, égale à $110 m^2$.

La figure 6-11 résume les paramètres d'assignation présentés ci-dessus :

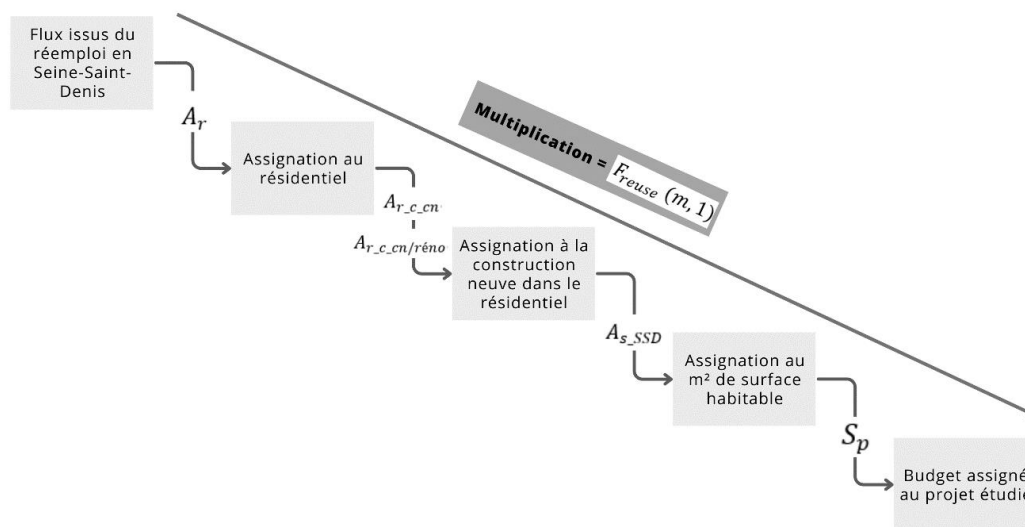


Figure 6-7 Processus et facteurs d'assignation des flux pouvant être issus du réemploi

5.3 Budgets matériaux issu du recyclage

Les flux issus du recyclage doivent être assignés par m^2 mais aussi par lot. En effet, étant donné que la modélisation ne considère que les lots Fondations – infrastructure, Superstructure – maçonnerie, Couverture, Cloisonnement, plafonds suspendus et menuiseries intérieures, Façades et menuiseries extérieures et Revêtement des sols, murs et plafonds, il serait erroné d'assigner la totalité des matériaux issus du recyclage à ces seuls lots en négligeant ainsi les lots non pris en compte, à savoir : Voirie Réseaux Divers (VRD), Chauffage Ventilation Climatisation (CVC), Installations sanitaires, Réseaux d'énergie et Réseaux de communication. D'autant plus que les métaux sont majoritairement présents dans les équipements des lots CVC et Réseaux.

De plus, les matériaux issus du recyclage, contrairement aux produits de construction issus du réemploi, peuvent être utilisés dans le secteur du bâtiment mais aussi dans d'autres secteurs d'activités.

Ainsi, la méthode d'assignation des flux issus du recyclage comporte deux étapes supplémentaires comparée à l'assignation des flux de réemploi.

La figure 6-12 présente les étapes d'assignation des flux de recyclage, certains paramètres calculés dans la section précédente sont réutilisés comme le montre la figure. Il est cependant à noter que dans le cas du recyclage, les flux ont été estimés à l'échelle de la France et donc le paramètre A_s est égal ici à :

$$A_{s_FR} = \frac{1}{R_c \cdot N_{hab} \cdot S_{hab}} = 5.75E^{-06} \quad \text{en } /m^2$$

Avec :

- R_c : Nombre de logements construits en 2050.
- N_{hab} : Nombre d'habitant-e-s par logement en 2050.
- S_{hab} : Surface en m^2 par habitant-e en 2050.

De la même manière qu'il a fallu différencier les produits de construction utilisés dans la rénovation et la construction neuve de ceux utilisés seulement dans la construction neuve pour la détermination du facteur A_{r_c} , il faut en faire de même pour les matériaux.

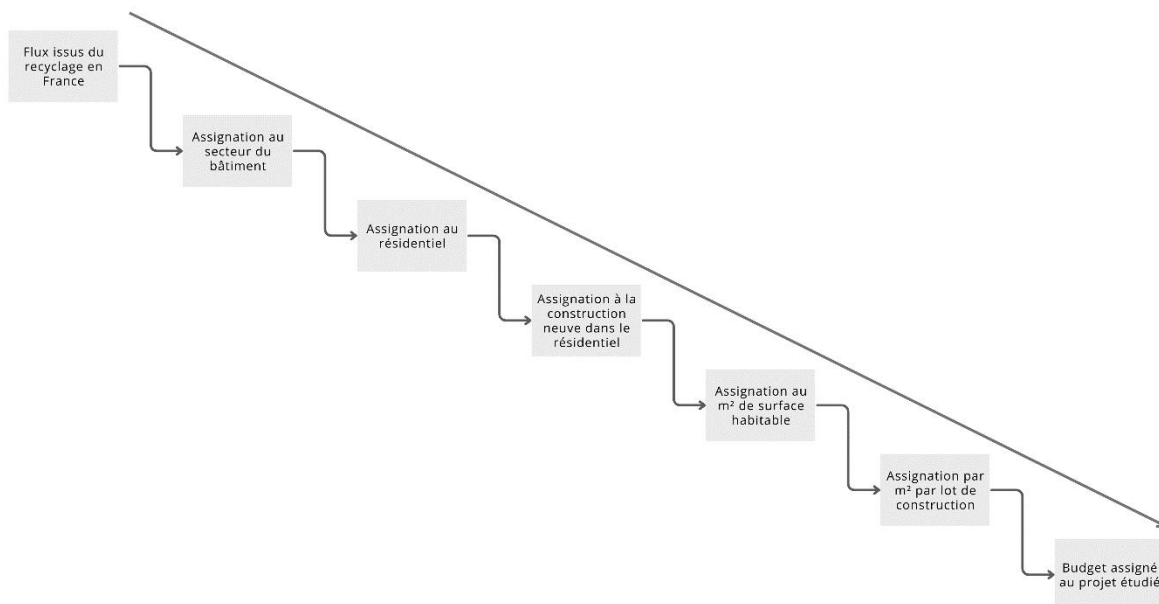


Figure 6-8 Etapes d'assignation des flux issus du recyclage

5.3.1 Assignation au secteur du bâtiment

Afin d'assigner les budgets au secteur du bâtiment, nous nous basons sur les données mises à dispositions dans les scénarios ADEME qui estiment la demande totale en

matériaux par secteur en 2050. Ces données concernent l'aluminium, le verre, le ciment et l'acier (ADEME, 2021c).

Nous avons fait l'hypothèse que la part de la demande de ciment attribuée au secteur du bâtiment par rapport aux autres secteurs est équivalente à celle du béton et du mortier.

Quant aux autres matériaux (laine de verre et de roche, terre cuite, plâtre et céramique), nous considérons qu'ils ne sont utilisés que dans le secteur du bâtiment.

Ainsi, afin d'assigner le budget en aluminium, verre, béton, acier et mortier au secteur du bâtiment, le facteur suivant, calculé pour chacun des matériaux, est utilisé :

$$A_b = \frac{\text{Demande du matériau dans le secteur du bâti}}{\text{Demande du matériau dans tous les secteurs}} \%$$

Le tableau 6-8 résume ce facteur pour les matériaux considérés dans l'étude de cas.

Tableau 6-8 Le facteur d'assignation au secteur du bâtiment pour les ressources considérées (Ab), nous mettons en valeur les données utilisées issues des scénarios de l'ADEME

Matériau	Demande totale en Mt (issue de l'ADEME)	Demande secteur du bâtiment en Mt (issue de l'ADEME)	Assignation au secteur bâti (Ab) (Calculé)
Aluminium	0.9	0.2	16.51%
Verre	3.1	0.5	16.13%
Béton	2.6	0.6	57.69%
Acier	5.8	1.7	29.31%
Laine de verre	-	-	100%
Laine de roche	-	-	100%
Terre cuite	-	-	100%
Plâtre	-	-	100%
Céramique	-	-	100%
Mortier	-	-	100%

5.3.2 Assignation à la construction neuve dans le résidentiel

Une fois les budgets assignés au secteur du bâtiment, le même facteur d'assignation utilisé pour les flux de réemploi A_r est utilisé pour assigner au résidentiel.

Cependant, pour l'assignation au niveau de la construction neuve, il a fallu définir quels matériaux sont utilisés pour la rénovation et la construction et lesquels sont utilisés seulement pour la construction.

Pour ce faire, nous nous sommes basé-e-s sur les données des modèles de l'ADEME (ADEME, 2021c) qui stipulent que tous les matériaux sont utilisés pour la rénovation, ainsi, comme pour les flux pouvant être issus du réemploi et utilisés dans la construction neuve et dans la rénovation :

$$A_{r_c_cn/réno} = \frac{R_c}{(R_c + R_r)} \cdot \% = 0.60 \%$$

Avec :

- R_c : Nombre de logements construits en 2050.
- R_r : Nombre de logements rénovés en 2050.

Suite à cette étape d'assignation, les flux de matières secondaires issues du recyclage sont assignés au m² de surface habitable à l'aide du facteur A_s tel que défini dans la section précédente.

5.3.3 Assignation par lot

L'objectif de cette étape d'assignation est de calculer le budget ressources de l'étude de cas en fonction des lots pris en compte dans la modélisation de la maison individuelle. Pour ce faire, nous multiplions le budget au m² de chaque ressource par le facteur suivant :

$$A_l = \frac{\text{Quantité du matériau présente dans les lots modélisés}}{\text{Quantité du matériau présente dans tous les lots}} \%$$

La meilleure estimation de la quantité de chaque matériau dans chaque lot pourrait être effectuée à l'aide des compositions matérielles des produits de construction et équipements présents dans chaque lot. Cependant, cette information n'étant pas disponible, nous avons réalisé des hypothèses pour estimer les valeurs du facteur A_l . Nous faisons l'hypothèse qu'un tiers de la quantité de l'aluminium et la moitié de la quantité d'acier utilisés dans un bâtiment sont consacrés aux lots modélisés dans notre

étude de cas. Concernant les autres ressources, nous considérons que la totalité est présente dans les lots pris en compte par l'étude de cas.

5.3.4 Assignment des flux pouvant être issus du recyclage au projet étudié

Afin d'assigner les flux pouvant être issus du recyclage au projet étudié, nous multiplions les quantités de matériaux par les facteurs résumés dans la figure 6-13, les facteurs sont sans unité.

	Assignment au projet étudié
Aluminium	1.15E-09
Verre	3.36E-09
Béton	1.20E-08
Acier	3.05E-09
Laine de verre	2.08E-08
Laine de roche	2.08E-08
Terre cuite	2.08E-08
Plâtre	2.08E-08
Céramique	2.08E-08
Mortier	2.08E-08

} $F_{recycling}$

Figure 6-9 Facteurs d'assignment des matières secondaires pouvant être issues du recyclage au projet étudié, ces facteurs sont sans unité

La figure 6-14 résume les paramètres d'assignment présentés ci-dessus :

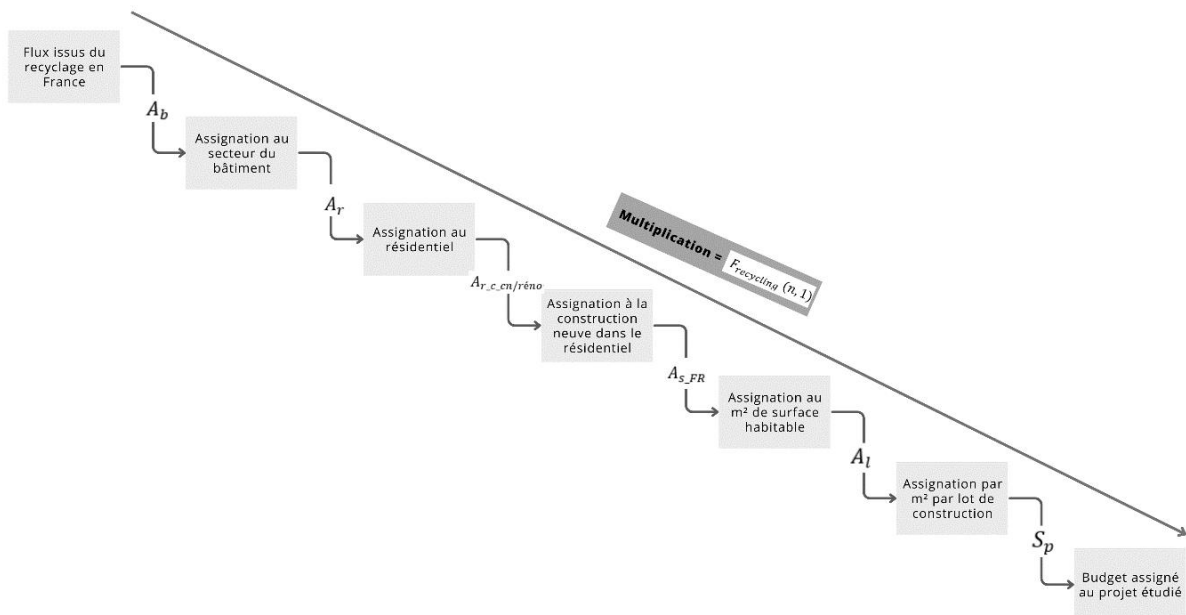


Figure 6-10 Processus et facteurs d'assignment des flux pouvant être issus du recyclage

5.4 Les approches d'assignation choisies

Le processus d'assignation appliqué dans cette étude de cas s'est largement appuyé sur le modèle du scénario « *Génération frugale* » de l'ADEME et en appliquant le principe de « l'égalité par personne ».

Le choix de ces méthodes d'assignation dans le cadre de cette étude est une proposition méthodologique. La méthode MiMOSA est compatible avec d'autres approches d'assignation.

D'un autre côté, cette étude en France métropolitaine et nous faisons l'hypothèse que les différences de développement ou d'historique de pollution ou de consommation de ressources entre les différentes régions de la France métropolitaine, peuvent à ce stade, être négligées.

Ainsi, dans la méthode d'assignation proposée, nous avons effectué les hypothèses suivantes :

- Evolution identique du secteur du bâtiment au sein de tous les territoires français métropolitains, quel que soit leur niveau préalable de densité et de développement.
- Egalité de surface par habitant·e, même si certains territoires, au vu de l'historique de développement, d'émissions et de consommation de ressources, pourraient légitimement prétendre à des consommations supplémentaires.

6. Les indicateurs de soutenabilité en termes de consommation de matériaux minéraux et métalliques

6.1 Les indicateurs de réemploi potentiel

6.1.1 Comment les interpréter ?

Les indicateurs I_{reuse} , tels que définis dans le chapitre 4, sont exprimés en pourcentage et sont calculés pour chaque produit de construction du bâtiment étudié.

La consommation en un produit de construction donné est considérée potentiellement soutenable si et seulement si l'indicateur de réemploi potentiel qui lui est associé est inférieur ou égal à 100%. Pour chaque type de produits et équipements, ce pourcentage correspond au pourcentage de produits ou équipements qui pourraient être mobilisés par le projet étudié au sein du "budget" de produits et équipements

disponibles pour réemploi au niveau du territoire étudié (ici, le département de la Seine Saint-Denis).

Cette consommation est donc considérée comme excessive si l'indicateur de réemploi potentiel est supérieur à 100% : cela signifie que le projet va mobiliser davantage de produits et équipements que la quantité disponible sur le territoire étudié pour le réemploi.

Pour certains produits de construction, le résultat de l'indicateur de réemploi potentiel est infini, ceci veut dire qu'il n'y a aucun flux issu du réemploi qui correspondent à ces produits.

6.1.2 Analyse et interprétation des résultats obtenus par produits de construction

Le tableau 6-9 présente les résultats des indicateurs de réemploi potentiel pour la maison individuelle considérée dans cette étude de cas. Pour un souci de simplification d'affichage, tous les indicateurs égaux à zéro, i.e. correspondant à des produits de construction qui ne font pas partie des besoins de l'étude de cas, n'ont pas été affichés.

Tableau 6-9 Résultats des indicateurs de réemploi potentiel non nuls. En orange, les indicateurs supérieurs à 100%, en vert les indicateurs inférieurs à 100% et en gris les indicateurs égaux à l'infini

Macro-composant	Composant	Famille de matériaux	Ireuse (%)
Bloc baie	Bloc baie double	Aluminium	41967
Élément de structure	Poutrelle	Béton précontraint	413
Élément de structure	Béton de structure courante	Béton	∞
Élément de structure	Armature métallique	Acier	∞
Fenêtre	Fenêtre double	bois-aluminium	13000
Fondation	Béton de propreté	Béton	∞
Fondation	Béton de semelle	Béton	∞
Isolant	Isolant intérieur	Laine de roche	4353
Isolant	Isolant intérieur	Laine de verre	4736
Mur	Mur extérieur, Mur intérieur	Béton	1

Mur	Mur extérieur, Mur intérieur	Terre cuite	5558
Plafond, Cloison	Plaque	Plâtre	15
Plafond, Cloison	Rail	Acier	1
Plancher	Dalle	Béton armé	∞
Plancher	Béton de rives	Béton	∞
Plancher	Treillis métallique	Acier	∞
Plancher	Chape flottante	Béton	∞
Plancher	Entrevous	Béton	∞
Porte	Porte extérieure	Bois	68
Porte	Porte extérieure	Verre, Bois	10
Porte	Porte intérieure	Bois	2
Revêtement	Sol, Mur extérieur, Mur intérieur	Carreaux de céramique	70
Revêtement	Sol, Mur extérieur, Mur intérieur, Toit	Terre cuite	7
Revêtement	Mortier	Enduit minéral	∞

La figure 6-15 présente les résultats des indicateurs à l'aide d'un histogramme où la barre des 100% a été mise en valeur. Lorsqu'un indicateur est supérieur à 100%, la partie excédante est représentée en orange. Lorsqu'un indicateur est inférieur à 100%, il est représenté en vert. Lorsque l'indicateur est égal à l'infini, il est représenté en gris.

Zoom: Indicateur de réemploi potentiel, scénario 'Génération frugale' de l'ADEME

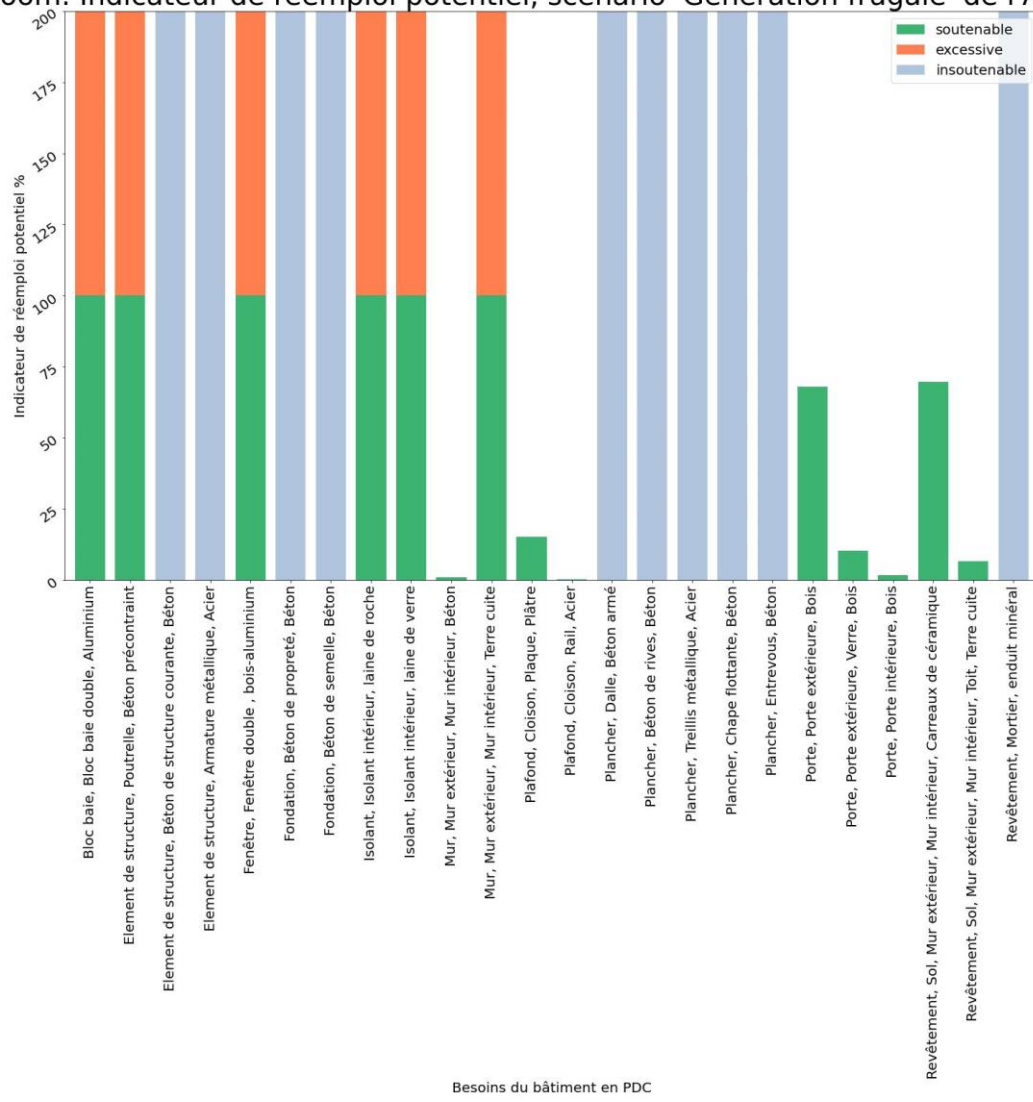


Figure 6-11 Les résultats des indicateurs de réemploi potentiel : zoom sur la partie comprise entre 0 et 200%

La figure 6-15 montre que 8 produits (murs en béton, plaque de plâtre, rails de plafond ou cloison en acier, porte extérieure en bois, porte extérieure vitrée en bois, porte intérieure en bois, carreaux de céramique, revêtements en terre cuite) ont des indicateurs de réemploi potentiel inférieurs à 100%, donc pouvant être considérés comme soutenable. Cela signifie que la construction de la maison, pour ces éléments, pourrait se faire à partir de produits issus de la déconstruction, sous réserve de la conception du projet et de sa mise en œuvre se donnant les moyens d'utiliser les produits issus du réemploi.

Cependant, tous les autres flux présentent des consommations excessives, ce qui signifie que le "budget" de produits pouvant être réemployés et assigné au projet ne permettrait de répondre que partiellement aux besoins de construction du bâtiment étudié.

Pour 11 produits, l'indicateur révèle une consommation non soutenable. C'est-à-dire qu'aucun flux issu du réemploi ne permet de répondre, partiellement ou intégralement, à ces besoins en produits.

L'indicateur relatif aux murs en béton, inférieur à 100%, peut étonner au premier abord. Ce résultat peut être expliqué par des taux potentiellement élevés de réemploi du béton considéré dans cette estimation et qui se base sur une littérature qui porte sur des projets prouvant la possibilité du réemploi du béton (Devènes et al., 2022; Küpfer et al., 2023; Lachat, 2022). Cependant, cette pratique est loin d'être courante actuellement.

L'autre élément à prendre en compte en analysant cet indicateur, est que le matériau constructif principal de la maison individuelle considérée ici est la terre cuite, il y a donc un faible besoin en produits en béton.

Concernant les fenêtres, les baies vitrées et les isolants, leur indicateur de réemploi potentiel est supérieur à 100%, ce qui traduit que le budget assigné ne permet pas de répondre aux besoins de la maison individuelle. Ceci est dû à la mobilisation de ces produits pour les travaux de rénovation. Si le scénario « *Génération frugale* » considère un faible nombre de logements à construire en 2050, égal à 2000 logements, il prévoit, par ailleurs, la rénovation de 330 000 logements. Ainsi, le budget assigné des produits qui sont demandé par la construction neuve et la rénovation est très faible et ne permet pas de répondre au besoin du projet de construction étudié.

6.1.3 La soutenabilité en termes de potentiel d'approvisionnement des produits de construction issus du réemploi du projet.

À la suite des résultats des indicateurs de réemploi potentiel des produits de construction de l'étude de cas, nous concluons que le projet étudié a un faible potentiel d'approvisionnement en produits de construction issus du réemploi.

6.2 La traduction des besoins ne pouvant pas être satisfaits par le réemploi en besoins de matières secondaires

La première étape a été de construire la matrice de conversion M présentée dans le chapitre 4 et qui contient la part des matières secondaires présentes dans la composition matérielle des produits de construction afin de traduire les besoins non satisfaits par le réemploi en besoins matériaux secondaires.

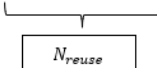
Les besoins ne pouvant pas être satisfaits par le réemploi sont calculés en soustrayant la quantité de produits pouvant être issus du réemploi de la quantité des besoins en produits du projet et sont résumés dans le vecteur matriciel N_{reuse} . Les valeurs du vecteur matriciel N_{reuse} sont résumées dans le tableau 6-10.

Seuls les matériaux minéraux et métalliques, qui sont l'objet de cette recherche, ont été pris en compte dans la composition matérielle.

La figure 6-12, montre, dans le schéma global de la méthode MiMOSA, où se situe cette étape et les matrices calculées dans cette section.

Tableau 6-10 Besoins ne pouvant pas être satisfaits par le réemploi N_{reuse} en UF

Macro-composant	Composant	Famille de matériaux	Besoins ne pouvant pas être satisfaits par le réemploi
Bloc baie	Bloc baie double	Aluminium	17.35
Elément de structure	Poutrelle	Béton précontraint	174.90
Elément de structure	Béton de structure courante	Béton	2.26
Elément de structure	Armature métallique	Acier	439.57
Fenêtre	Fenêtre double	Bois-aluminium	3.97
Fondation	Béton de propreté	Béton	1.45
Fondation	Béton de semelle	Béton	13.90
Isolant	Isolant intérieur	Laine de roche	54.71
Isolant	Isolant intérieur	Laine de verre	170.81
Mur	Mur extérieur, Mur intérieur	Terre cuite	213.54
Plancher	Dalle	Béton armé	72.99
Plancher	Béton de rives	Béton	5.36
Plancher	Treillis métallique	Acier	232.09
Plancher	Chape flottante	Béton	124.77
Plancher	Entrevous	Béton	58.69
Revêtement	Mortier	Enduit minéral	191.21



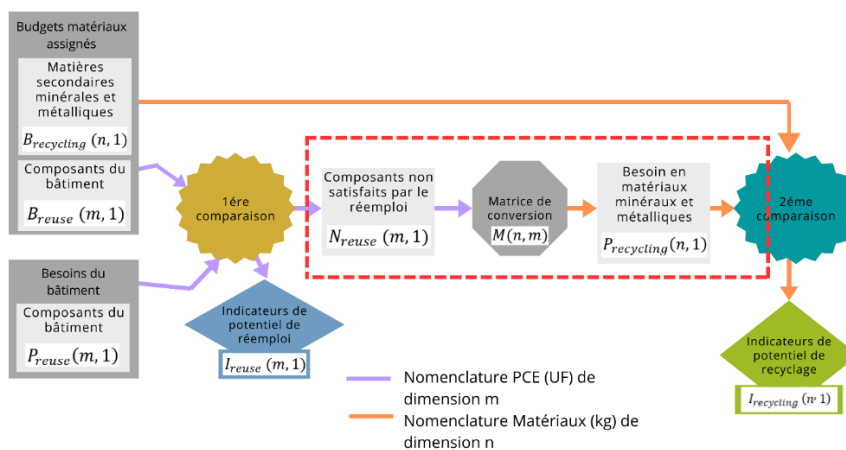


Figure 6-12 Les matrices calculées dans cette section

6.2.1 Matrice de conversion

Afin de définir les valeurs de la matrice de conversion M , il a été nécessaire, dans un premier temps, de définir la composition matérielle des produits et dans un deuxième temps de calculer la quantité de matières secondaires présente dans la composition matérielle.

La composition matérielle des produits de construction a été obtenue à l'aide des FDES présentes dans la base Inies (Alliance HQE-GBC, 2020).

Une FDES est un document qui présente les résultats de l'ACV et des informations sanitaires d'un produit dans l'objectif de calculer la performance environnementale et sanitaire des bâtiments en France (Alliance HQE-GBC, 2020).

En plus des informations relatives à l'ACV et aux performances sanitaires du produit, les déclarant-e-s des FDES, depuis 2021, ont l'obligation de décrire les produits constitutifs de l'unité fonctionnelle, leur quantité et leur nature, nécessaires pour remplir la fonction de leur produit déclaré. Cependant, cette obligation ne précise pas le niveau de détail exigé pour la description de ces produits constitutifs ce qui induit une hétérogénéité entre les différentes FDES.

Afin de définir la composition matérielle des produits, la FDES présentant un niveau de détail des produits constitutifs de l'unité fonctionnelle satisfaisant ont été sélectionnées. Ainsi, les quantités de leurs produits constitutifs ont été prises comme référence pour la famille de produit et seuls les produits constitutifs principaux (hors produits de fixation et emballage) ont été considérés.

Le tableau 6-11 présente la description des produits constitutifs pour une FDES relative à une fenêtre en double vitrage en aluminium.

Tableau 6-11 Produits constitutifs d'une fenêtre en double vitrage en aluminium présente dans Inies

Produit constitutif	Quantité en kg
Profilés aluminium	5.6
Vitrage	17
Barrette rupture de pont thermique	0.7
Joints	0.4
Quincaillerie	0.96
Bois	5
Carton	0.07
Film plastique	0.33
Polystyrène	0.16

Concernant la part de matières secondaires, les mêmes estimations que celles utilisées dans le paragraphe 6.3 du chapitre 5 ont été prises en compte, le tableau 6-12 rappelle ces valeurs.

Tableau 6-12 Pourcentage maximal de matière secondaire possible d'intégrer en entrée du processus de fabrication des matériaux. ND : Non défini

Matériaux	Pourcentage maximal de matière secondaire possible d'intégrer en entrée du processus de fabrication (%)
Aluminium	45
Verre	50
Béton	100
Acier	87
Laine de verre	65
Laine de roche	49
Terre cuite	ND
Plâtre	30
Céramique	ND
Mortier	ND

L'annexe 6.3 présente la matrice de conversion M , concernant la terre cuite, la céramique et le mortier, étant donné que la fraction de matière secondaire maximale possible en entrée de leur processus de fabrication, toutes les colonnes de la matrice M relatives à ces matériaux sont nulles. Cependant, les indicateurs de recyclage potentiel de ces matériaux sont calculés et seront très probablement infinis étant donné que les flux de matières secondaires de ces matériaux sont également nuls.

6.2.2 Calcul des besoins en matières secondaires après prise en compte des actions de réemploi.

Une fois les valeurs de la matrice de conversion M définies (voir Annexe 6.3), les besoins en matières secondaires des produits ne pouvant pas être satisfaits par le réemploi, et donc les valeurs du vecteur matriciel $P_{recycling}$ sont calculées, le tableau 6-13 résume ces valeurs et la figure 6-19 montre schématiquement cette étape.

Matériaux	Besoins en matières secondaires du projet en kg
Aluminium	49
Verre	179
Béton	25837
Acier	38546
Laine de verre	594
Laine de roche	84
Terre cuite	-
Plâtre	1129
Céramique	-
Mortier	-

} $P_{recycling}$

Figure 6-13 Les besoins en matières secondaires du projet étudié

Macro-composant	Composant	Famille matériaux	de	Besoins ne pouvant pas être satisfaits par le réemploi	Matrice de conversion
Bloc baie	Bloc baie double	Aluminium		17.35	
Elément structure	de Poutrelle	Béton précontraint		174.90	
Elément structure	de Béton de structure courante	Béton		2.26	
Elément structure	de Armature métallique	Acier		439.57	
Fenêtre	Fenêtre double	Bois-aluminium		3.97	
Fondation	Béton de propreté	Béton		1.45	
Fondation	Béton de semelle	Béton		13.90	
Isolant	Isolant intérieur	Laine de roche		54.71	
Isolant	Isolant intérieur	Laine de verre		170.81	
Mur	Mur extérieur, Mur intérieur	Terre cuite		213.54	
Plancher	Dalle	Béton armé		72.99	
Plancher	Béton de rives	Béton		5.36	
Plancher	Treillis métallique	Acier		232.09	
Plancher	Chape flottante	Béton		124.77	
Plancher	Entrevous	Béton		58.69	
Revêtement	Mortier	Enduit minéral		191.21	

Matériaux	Besoins en matières secondaires en kg
Aluminium	49.08
Verre	179.28
Béton	25837.07
Acier	38546.45
Laine de verre	594.01
Laine de roche	83.64
Terre cuite	0
Plâtre	1128.77
Céramique	0

Figure 6-14 Traduction des besoins non satisfaits par le réemploi en besoins en matières secondaires à l'aide de la matrice de conversion

6.3 Les indicateurs de recyclage potentiel

6.3.1 Comment les interpréter ?

Les indicateurs de recyclage potentiel, $I_{recycling}$, tels que définis dans le chapitre 4, sont calculés après la prise en compte des flux issus du réemploi en établissant une comparaison entre les besoins du bâtiment et les budgets assignés au projet, mais, cette fois, au niveau des matières secondaires, en prenant en compte les flux issus du recyclage.

Pour un matériau donné, sa consommation est considérée soutenable si et seulement si l'indicateur qui lui est associé est inférieur ou égal à 100%. Ce pourcentage correspond au pourcentage de matières secondaires qui pourraient être mobilisées par le projet étudié au sein du "budget" de matières secondaires disponibles au niveau du territoire étudié (ici, la France métropolitaine)

Cette consommation est considérée comme excessive si l'indicateur de recyclage potentiel est supérieur à 100%. Cela signifie que le "budget" de matières secondaires assigné ne permettrait de répondre que partiellement aux besoins de construction du bâtiment étudié.

Pour certains produits de construction, le résultat de l'indicateur de recyclage potentiel est infini, ceci veut dire qu'il n'y a pas de flux issus du recyclage qui corresponde ce matériau.

6.3.2 Présentation et analyse des résultats obtenus

La figure 6-20 montre les résultats sous une forme de graphe, comme pour les indicateurs de réemploi potentiel.

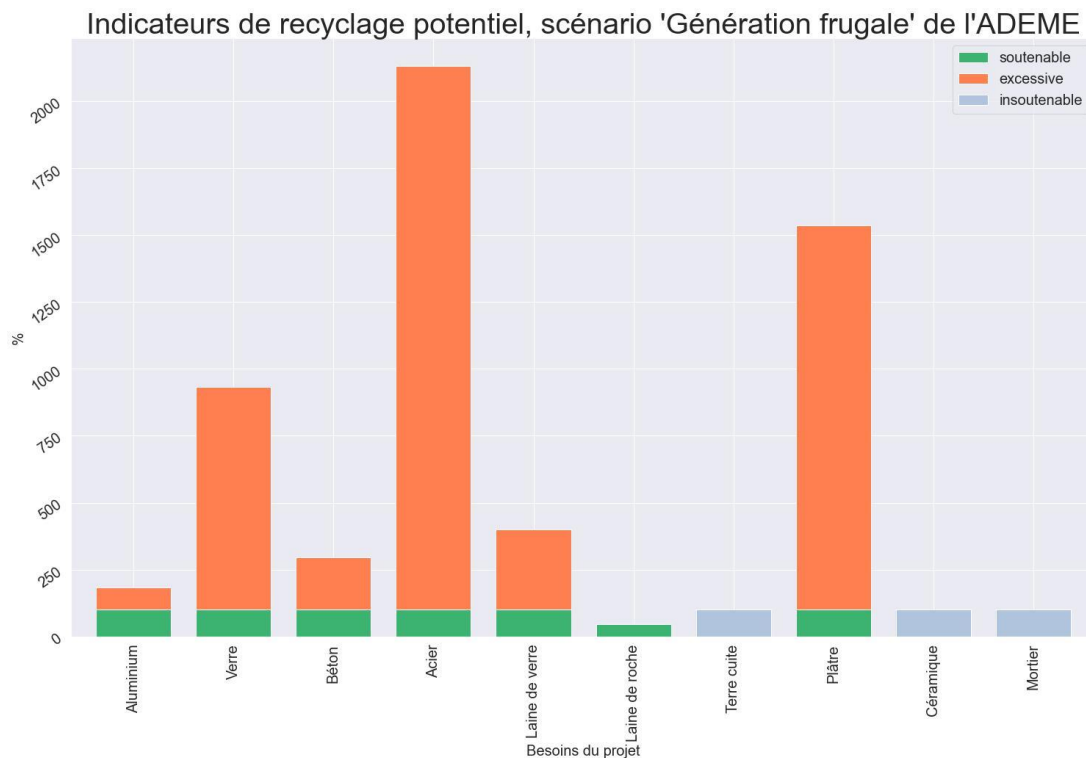


Figure 6-15 Résultats des indicateurs de recyclage potentiel pour chaque matériau de l'étude de cas

D'après la figure, nous observons que les besoins du projet étudié en matières secondaires n'ont pas été satisfaits par les budgets qui lui ont été assignés, sauf pour la laine de roche au vu de la faible demande du projet en ce matériau.

D'après Grosse, pour atteindre une économie réellement *circulaire*, il faut, tout d'abord, que la demande en matières ne croisse pas de plus de 1% par an. A savoir qu'en 2019, en France, la consommation intérieure apparente de matières, donc l'extraction intérieure de matières augmentée des importations et diminuée des exportations, s'élève à 772 millions de tonnes (Ministère de la transition écologique, 2022). 1% représente donc une quantité non négligeable. Et il faut également, que les taux de recyclage des matériaux dépassent 80% et que la production de matière valorisée en fin de vie représente plus de 80% de la quantité de matière consommée (Grosse, 2010b, 2010a; Grosse & Mainguy, 2011).

Ainsi, malgré tous les efforts déployés dans le scénario « Génération Frugale » de l'ADEME pour diminuer drastiquement la construction neuve et ainsi, diminuer fortement la demande en matériaux, le réemploi et le recyclage ne semblent pas pouvoir faire face à la demande en matériaux, que ce soit pour répondre aux exigences techniques et de qualité exigée par les usages ou pour pallier la faible quantité de flux issus de l'économie circulaire comparée aux besoins.

Toutefois, le scénario « Génération Frugale » considère un faible taux de démolition. Ceci peut être à double tranchant au regard de l'angle de vue développé par notre mémoire de thèse, car d'un côté cela permet de répondre aux besoins en logement en rénovant le parc existant au lieu de construire de nouveaux bâtiments ce qui diminue la demande en matériaux globale. Mais, d'un autre côté, ceci implique une grande durée en œuvre des produits de construction et équipements et donc une faible quantité de flux en entrée des filières de recyclage et de réemploi.

Il faut aussi noter que cette méthode ne nous permet d'étudier la soutenabilité qu'en termes d'approvisionnement en matières secondaires, il est important, en analysant ces résultats, de prendre en compte le fait qu'il y a une grande part de l'approvisionnement en ressources qui doit être satisfaite par les ressources vierges. Pour ce faire, il faudrait évaluer la soutenabilité de la consommation des flux issus de l'environnement également.

7. Conclusion du chapitre

Actuellement, aucune méthode ne permet, à notre connaissance, de réaliser une étude qui compare les besoins en produits, équipements et matériaux avec les flux issus de l'économie circulaire à l'échelle du bâtiment, en comparant, d'un côté, les besoins du bâtiment, et de l'autre les flux issus du réemploi et du recyclage dans un territoire donné qui lui sont assignés.

La méthode MiMOSA propose une première approche en ce sens en calculant des indicateurs de pression sur les produits et matériaux pouvant être issus du réemploi et du recyclage, en considérant l'économie circulaire comme un pilier principal de la soutenabilité.

Ce chapitre a eu pour objectif d'appliquer cette méthode à une étude de cas qui porte sur une maison individuelle afin d'opérationnaliser MiMOSA et de creuser les premières pistes d'interprétation et d'exploitation des résultats des indicateurs obtenus.

Ce chapitre a aussi proposé une méthode permettant d'estimer les budgets pouvant être issus du réemploi et du recyclage et qui peuvent être assignés au projet étudié ainsi qu'une première approche pour définir les besoins en produits de construction et en matériaux d'un projet afin de les comparer aux budgets qui lui sont assignés.

Une fois les budgets et besoins définis, les indicateurs de réemploi potentiel et recyclage potentiel ont été calculés.

Les résultats des indicateurs obtenus concluent que le bâtiment a un faible potentiel d'approvisionnement en produits issus du réemploi et en matières secondaires issus du recyclage. Ce qui nous permet de déduire que la construction de la maison individuelle en terre cuite, considérée dans cette étude de cas, n'est pas soutenable dans le cadre du scénario « *Génération Frugale* » de l'ADEME en 2050 avec les hypothèses utilisées.

Cette conclusion démontre que les taux de recyclage et de réemploi ainsi que la circulation des stocks actuels ne sont pas suffisants pour répondre à la demande et que le réemploi et le recyclage, malgré le scénario qui considère que l'économie circulaire est bien déployée, ne peuvent répondre à une demande en matières en constante croissance.

Les résultats des indicateurs de réemploi potentiel obtenus permettent aussi de mettre en lumière la forte tension exercée sur les produits pouvant être issus du réemploi et utilisés pour la construction neuve et la rénovation au vu du nombre important de rénovations considéré par le scénario « *Génération Frugale* » de l'ADEME en 2050. Cependant, certains indicateurs de réemploi potentiel montrent un résultat soutenable : ceux correspondant aux murs en béton, plaque de plâtre, rails de plafond ou cloison en acier, porte extérieure en bois, porte extérieure vitrée en bois, porte intérieure en bois, carreaux de céramique et revêtements en terre cuite. Cela pourrait encourager les acteur·rice·s de déconstruction, de la conception des bâtiments et de leur construction à mettre en œuvre les efforts nécessaires pour favoriser leur réemploi, en particulier au niveau de la déconstruction des bâtiments, la conception des nouveaux bâtiments ainsi que la construction.

Les résultats de cette étude de cas sont fortement dépendants des hypothèses de l'étude ainsi que des scénarios considérés, que ce soit l'hypothèse centrale qui considère un monde où l'économie circulaire est bien déployée et qui fait abstraction de tous les freins non techniques, ou la mobilisation du scénario « *Génération frugale* », défini dans le cadre de l'étude de l'ADEME transitions 2050.

Il est important de noter que la méthode permet seulement d'évaluer la soutenabilité du projet au regard de son potentiel d'approvisionnement en produits de construction pouvant être issus du réemploi et en matières secondaires pouvant être issus du recyclage mais n'évalue pas la soutenabilité au regard des flux issus de l'environnement.

Ainsi, une étude de sensibilité sera menée dans le chapitre 7, en prenant en compte différentes estimations des taux de réemploi et les différents scénarios établis par l'ADEME dans le cadre de l'étude transition 2050.

Cette étude de sensibilité permettra, d'une part, d'identifier les hypothèses et paramètres qui influent le plus sur les résultats des indicateurs et d'autre part, d'identifier le scénario ADEME le plus favorable à la soutenabilité d'un point de vue économie circulaire, et plus spécifiquement d'un point de vue matériaux minéraux et métalliques.

Cette étude de cas a permis de tester la méthode MiMOSA dans un cadre d'évaluation, c'est-à-dire, dans un cadre qui permet de répondre à la question suivante : « est-ce que la consommation en ressources minérales et métalliques du projet étudié est soutenable ? ».

Chapitre 7. Analyse de sensibilité

1. Objectifs du chapitre

Le chapitre précédent a eu pour objectif de valider et opérationnaliser la méthode MiMOSA en l'appliquant à une étude de cas.

Pour faire cela, plusieurs hypothèses et choix ont dû être effectués et peuvent influencer les résultats obtenus, notamment, les taux de réemploi estimés dans le chapitre 5 et les scénarios considérés pour l'assignation des budgets matériaux qui impactent les résultats. En effet, les facteurs d'assignation dépendent de paramètres tels que le nombre de logements construits et rénovés, les m² de tertiaires construits et rénovés, le nombre d'occupant·e par logements ou les m² par habitant·e. La valeur de ces paramètres dépend du scénario ADEME considéré.

Dans ce sens, l'objectif de ce chapitre est de mener une analyse de sensibilité afin de tester la robustesse des résultats obtenus en prenant en compte ces deux paramètres : les scénarios ADEME et les taux de réemplois considérés.

2. Les scénarios ADEME

2.1 Présentation des scénarios

Pour rappel, l'ADEME, dans le cadre de l'étude Transitions 2050 qui pour objectif de proposer des trajectoires opérationnelles pour atteindre la neutralité carbone en France en 2050, a proposé 4 scénarios différents.

Le premier scénario proposé dans le cadre de cette étude afin d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 est le scénario « *Génération frugale* ». Ce scénario a été présenté dans le chapitre 6 et a été utilisé dans le cadre de l'étude de cas de la construction neuve de la maison individuelle en terre cuite en Seine-Saint-Denis.

Le deuxième scénario est le scénario « *Coopérations territoriales* ». Ce scénario mise sur une transformation de la société par les *Coopérations territoriales* et une gouvernance partagée entre différent·e·s acteur·rice·s pour permettre une cohésion sociale. Ces coopérations mèneront à une société où la consommation est mesurée et responsable et où le partage des biens et des services est monnaie courante. Du côté du secteur du bâtiment, les transformations sont surtout menées dans les villes qui se densifieront en hauteur avec un principe global de proximité entre les différents lieux de la vie quotidienne. La construction neuve ne diminue pas drastiquement comme c'est le cas du premier scénario mais connaît des usages différents qui permettent de la limiter, en partageant les lieux de vies mais aussi les équipements. La rénovation quant à elle est

massive et permet à 80% du parc bâti d'atteindre le niveau Bâtiment Basse Consommation (ADEME, 2021c).

Le troisième scénario, « *Technologies vertes* », mise sur le développement technologique plutôt que par des changements sociétaux, contrairement aux deux premiers scénarios. La technologie et le numérique sont donc le fer de lance pour la transition carbone. Le secteur du bâtiment, dans ce scénario, doit faire face à une urbanisation intensive des métropoles et nécessite donc une évolution de son parc bâti pour répondre à cette demande en commençant de grands cycles de déconstruction – reconstruction de logements neufs. Ces changements impliquent une consommation massive des ressources naturelles et une demande importante en transport. A côté de ces évolutions du parc bâti, grâce à de nouvelles technologies, il y a un développement de matériaux innovants et de systèmes constructifs moins carbonés plus efficaces. La rénovation est aussi envisagée dans ce scénario mais ne se concrétise que par une rénovation par geste et non globale ce qui fait que seulement la moitié atteint un niveau Bâtiment Basse Consommation (ADEME, 2021c).

Le quatrième scénario, dont le nom, « *Pari réparateur* » résume bien sa philosophie, est un scénario qui maintient la même société au début du 21^e siècle avec les mêmes modes et niveaux de consommation en pariant sur la capacité de l'humain à réparer et gérer les crises environnementales et sociétales qui en découlent. Pour se faire, ce scénario s'appuie exclusivement sur des technologies futures ou nouvelles mais qui à ce stade sont encore très peu matures pour être réellement envisagées. Le secteur du bâtiment dans ce scénario doit faire face à la politique du « toujours plus de confort et de sécurité », la construction neuve est maintenue au même rythme et les villes s'agrandissent avec un taux d'artificialisation des sols qui ne cherche plus à diminuer. Ainsi, la surface par habitant·e·s et la surface chauffée globale augmentent par rapport à aujourd'hui. Face à cette expansion du parc bâti, il y a un développement d'équipements innovants et performants (ADEME, 2021c).

L'ADEME a aussi développé un scénario tendanciel qui projette les tendances actuelles à horizon 2050. Il a été jugé intéressant d'intégrer aussi ce scénario à l'analyse de sensibilité.

2.2 Les résultats obtenus pour chaque scénario

2.2.1 Les facteurs d'assignation

Afin d'effectuer l'analyse de sensibilité, l'étude de cas présentée dans le chapitre 6 a été considérée, avec le même inventaire et les mêmes hypothèses d'assignation. Cependant, d'un scénario à l'autre, les facteurs d'assignation sont différents car ils sont calculés à l'aide de paramètres (nombre de logements construits et rénovés, m² de tertiaires construits et rénovés, nombre d'occupant·e par logements et les m² par habitant·e) dont les valeurs diffèrent d'un scénario à l'autre.

Le tableau 7-1 résume les paramètres des différents scénarios tels qu'estimés par les modèles développés par l'ADEME (ADEME, 2021c), le tableau 7-2 résume les différents facteurs d'assignation obtenus pour chaque scénario et pour chaque matériau et le tableau 7-4 les facteurs d'assignation des produits de construction en fonction de leur utilisation ou non dans la construction neuve seulement ou également dans la rénovation pour chaque scénario. Les figures 7-1, 7-2 et 7-3 permettent quant à elles de mieux comparer les différents paramètres et les différents facteurs d'assignation d'un scénario à l'autre.

Tableau 7-1 Les paramètres extraits des scénarios développés dans l'étude Transitions 2050 de l'ADEME et utilisés pour l'étude de sensibilité, les valeurs sont données à l'échelle de la France métropolitaine

Scénario	Nombre de logements construits en 2050	Nombre de logements rénovés en 2050	Surface (en m ²) de parc tertiaire construits entre 2015 et 2050	Surface (en m ²) de parc tertiaire rénovés entre 2015 et 2050	Nombre d'habitants par logement en 2050	Surface (en m ²) par habitant·e en 2050 (NégaWatt, 2022)	Nombre de logements résidentiels construits entre 2015 et 2050
<i>Génération frugale</i>	2000	330000	130000000	560618000	2.12	41	4000000
<i>Coopérations territoriales</i>	69000	500000	132000000	497378000	2.12	41	5000000
<i>Technologies vertes</i>	262000	220000	166000000	595154000	2.02	41	12000000
<i>Pari réparateur</i>	180000	228000	261000000	539656000	2.02	41	9000000
<i>Tendanciel</i>	179000	200000	260000000	452302000	2.02	41	9000000

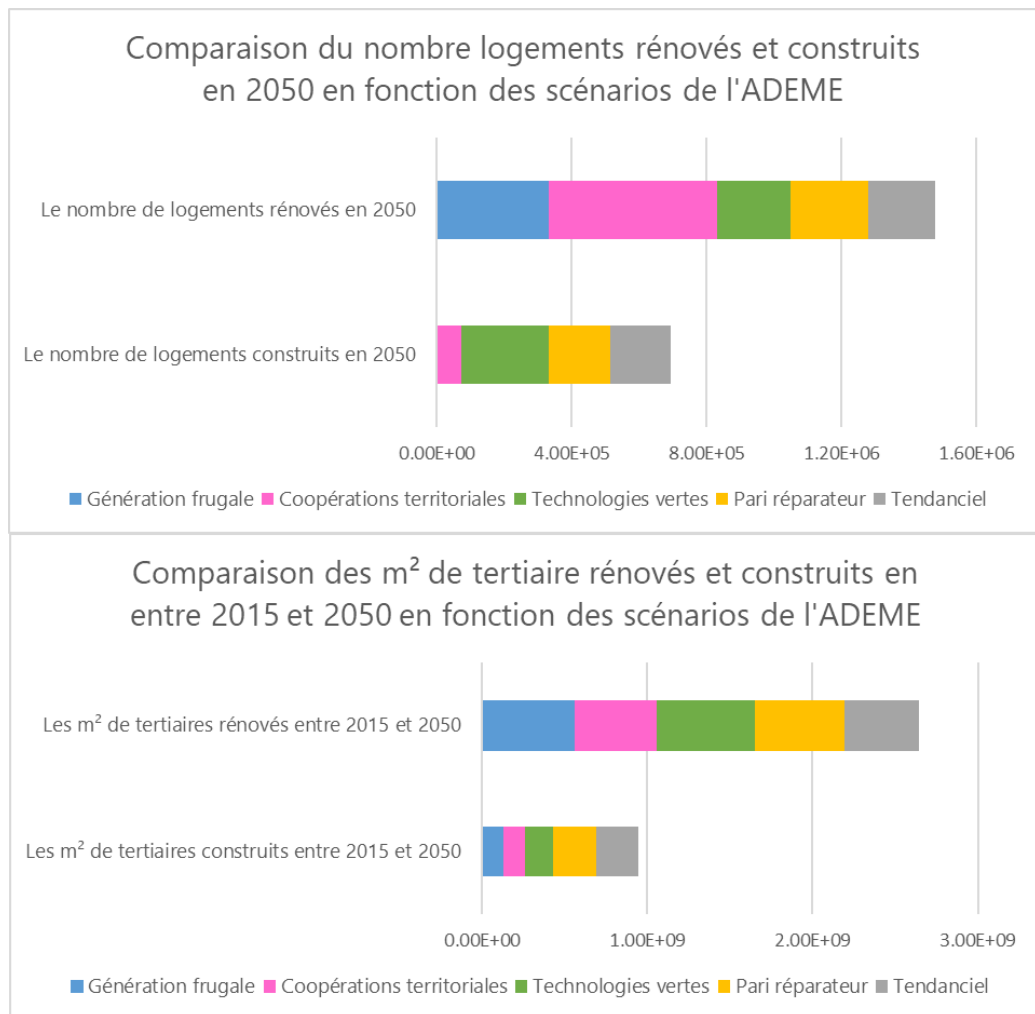


Figure 7-1 Comparaison des paramètres considérés dans chaque scénario de l'ADEME. Au vu des différences des ordres de grandeur, le nombre de logements et les m² de tertiaire ont été représentés dans deux graphiques distincts

Nous observons que le nombre de logements construits en 2050 est très faible dans le scénario « *Génération frugale* » comparé aux autres scénarios et que la rénovation est la plus importante dans le scénario « *Coopérations territoriales* ». Le scénario « *Technologie verte* » est celui qui considère le plus de constructions neuves et les scénarios « *Pari réparateur* » et tendanciel ont approximativement les mêmes dynamiques.

Tableau 7-2 Facteurs d'assignation au m² de surface habitable pour chaque matériau ou pour chaque scénario

Facteurs d'assignation	<i>Génération frugale</i>	<i>Coopérations territoriales</i>	<i>Technologies vertes</i>	<i>Pari réparateur</i>	<i>Tendanciel</i>
Aluminium	4.72E-08	2.47E-08	2.74E-08	2.22E-08	2.29E-08
Verre	1.38E-07	1.14E-07	1.45E-07	1.16E-07	1.48E-07
Béton	4.95E-07	3.92E-07	4.68E-07	4.49E-07	5.55E-07
Acier	1.26E-07	7.90E-08	9.85E-08	8.77E-08	1.03E-07

Laine de verre	8.57E-07	6.15E-07	6.75E-07	7.35E-07	8.05E-07
Laine de roche	8.57E-07	6.15E-07	6.75E-07	7.35E-07	8.05E-07
Terre cuite	8.57E-07	6.15E-07	6.75E-07	7.35E-07	8.05E-07
Plâtre	8.57E-07	6.15E-07	6.75E-07	7.35E-07	8.05E-07
Céramique	1.42E-04	5.07E-06	1.24E-06	1.67E-06	1.70E-06
Mortier	8.57E-07	6.15E-07	6.75E-07	7.35E-07	8.05E-07

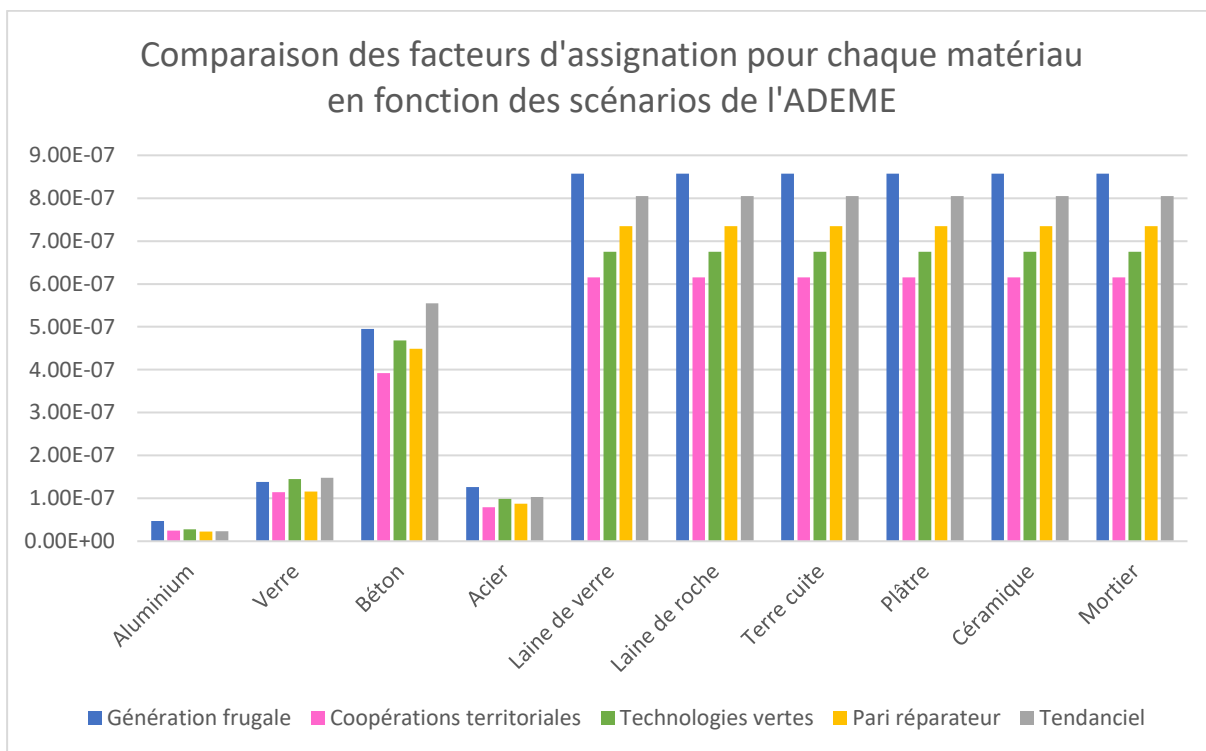


Figure 7-2 Comparaison des facteurs d'assignation pour chaque matériau en fonction des scénarios de l'ADEME. La représentation a été réalisée à l'aide d'un histogramme groupé afin de comparer les facteurs en fonction des scénarios mais aussi en fonction des matériaux

Nous observons que les facteurs d'assignation pour tous les scénarios sont faibles pour l'aluminium, l'acier le verre et le béton. Ceci est dû au fait que ces quatre matériaux sont en compétition entre différents secteurs et ne sont donc pas à 100% assignés au secteur du bâtiment. Les autres matériaux ont, pour chaque scénario, le même facteur d'assignation. Le tableau 7-3 résume les facteurs d'assignation au secteur du bâtiment pour ces matériaux, c'est-à-dire, le pourcentage de la quantité de ces matériaux qui est assigné au secteur du bâtiment en fonction de chaque scénario.

Les facteurs d'assignation pour l'aluminium et l'acier sont particulièrement faibles, car, comme expliqué dans le chapitre 6, il a fallu assigner les budgets de ces deux matériaux aux lots pris en compte par l'étude de cas étant donné qu'ils sont aussi utilisés dans

des lots non modélisés dans l'inventaire considéré, comme le lot Chauffage, Ventilation et Climatisation.

Tableau 7-3 Facteurs d'assignation au secteur du bâtiment en fonction de chaque scénario. Ces facteurs ont été calculés à l'aide de la modélisation des scénarios ADEME (ADEME, 2021c)

Assignation au secteur du bâtiment	Génération frugale	Coopérations territoriales	Technologies vertes	Pari réparateur	Tendanciel
Aluminium	16.51%	12.03%	12.19%	9.08%	8.55%
Verre	16.13%	18.52%	21.57%	15.79%	18.37%
Béton	57.69%	63.64%	69.44%	61.11%	69.01%
Acier	29.31%	25.68%	29.20%	23.85%	25.60%

Concernant la comparaison entre les différents scénarios, nous observons que, pour un matériau donné, les facteurs d'assignation des différents scénarios ont le même ordre de grandeur mais le scénario tendanciel propose des facteurs d'assignation plus élevés par rapport aux autres scénarios.

Tableau 7-4 Les facteurs d'assignation au m² de surface habitable pour les produits de construction pour chaque scénario

Facteurs d'assignation	Génération frugale	Coopérations territoriales	Technologies vertes	Pari réparateur	Tendanciel
Produits de construction utilisés dans la rénovation et la construction neuve	8.57E-07	6.15E-07	6.75E-07	7.35E-07	8.05E-07
Produits de construction utilisés seulement dans la construction neuve	1.42E-04	5.07E-06	1.24E-06	1.67E-06	1.70E-06

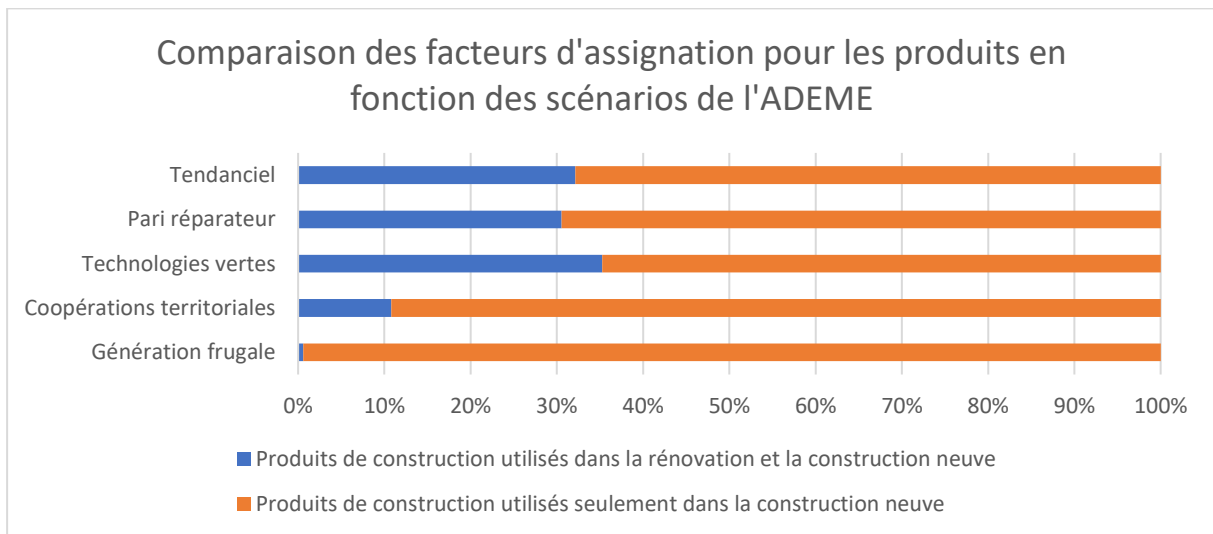


Figure 7-3 Comparaison des facteurs d'assignation des produits en fonction des scénarios de l'ADEME. La représentation a été réalisée à l'aide d'un graphique de barres empilées à 100% pour faciliter la comparaison au vu des ordres de grandeurs des différents facteurs

Ce graphique illustre, pour le scénario « *Génération frugale* », l'importance donnée aux projets de rénovation par rapport à la construction neuve. En effet, on observe que le facteur d'assignation pour les produits utilisés dans la rénovation et la construction neuve, dans le cadre de cette étude de cas, qui est un projet de construction neuve, est très faible. Ceci veut dire que les projets de rénovation sont favorisés, dans ce scénario, par rapport aux projets de construction neuve et que les produits de construction vont être en priorité assignés aux projets de rénovation. Cependant, concernant les produits utilisés seulement dans la construction neuve, nous observons que pour ce scénario, « *Génération frugale* », le facteur d'assignation est très élevé par rapport aux autres scénarios. Ceci est dû au faible nombre de logements neufs à construire en 2050 dans ce scénario, plus le nombre d'utilisateur-riche-s en compétition est faible plus le budget assigné à chacun-e d'entre eux-elles est élevé.

Concernant les autres scénarios, la construction neuve reste majoritaire par rapport à la rénovation, sauf pour le scénario « *Coopérations territoriales* ».

2.2.2 Indicateurs de réemploi potentiel

Maintenant que nous avons analysé les différents facteurs d'assignations pour chaque scénario, nous allons analyser les résultats des indicateurs de réemploi potentiel obtenus pour chaque scénario.

Afin de comparer au mieux les indicateurs de réemploi potentiel pour chaque produit en fonction des différents scénarios, une carte de chaleur a été tracée.

La carte de chaleur, en anglais Heat map, représente, dans une même grille de couleur les résultats des indicateurs de réemploi potentiel pour tous les produits (en ordonné) et pour tous les scénarios (en abscisse).

Les couleurs, ainsi que leur intensité, dépendent de la valeur de l'indicateur de réemploi potentiel pour chaque produit dans le cadre de chaque scénario. Le vert correspond à la valeur la plus faible et le bleu foncé à la valeur la plus élevée.

Dans la figure 7-4, la valeur la plus élevée a été fixée à 100%, ce qui correspond au seuil de soutenabilité. Ainsi, tous les indicateurs avec une valeur supérieure ou égale à 100% sont représentés en bleu foncé. En gris, les cases qui correspondent à une valeur infinie. Pour rappel, une valeur inférieure à 100% traduit que les besoins ont été satisfaits par le budget assigné, une valeur supérieure à 100% traduit que les besoins n'ont pas pu être totalement satisfaits par le budget assigné, et donc une consommation excessive et une valeur égale à l'infini traduit qu'aucun budget n'a été assigné au projet pour ce besoin, donc consommation non-soutenable.

La carte de chaleur tracée permet de mettre en lumière que pour les produits qui ne sont utilisés que dans la construction neuve, c'est-à-dire tous les produits de sauf les fenêtres, les baies vitrées et les isolants, l'indicateur de réemploi potentiel est très sensible au scénario considéré. Ceci s'explique par la forte influence du nombre de logements à construire en 2050 (qui varie de 2 000 à 262 000 en fonction des scénarios) sur les facteurs d'assignation. Ainsi, moins le nombre de logement à construire est faible plus le facteur d'assignation est élevé, plus le budget assigné est important et plus l'indicateur de réemploi potentiel est meilleur. Si on prend l'exemple des plaques plâtre, on observe qu'il n'y a un fort potentiel d'approvisionnement en réemploi que pour le scénario « *Génération frugale* ». En général, ce scénario, de par le faible nombre de logements à construire qu'il considère, 2 000 logements, il présente de meilleurs résultats comparés aux autres scénarios.

Concernant les fenêtres, baies vitrées et isolants, qui sont utilisés dans la construction neuve mais aussi dans la rénovation, les résultats sont, en ordre de grandeur, comparables pour tous les scénarios. En effet, si pour les produits utilisés que dans la construction le budget est fortement lié aux besoins de construction neuve, pour ces produits, le budget est lié aux besoins de construction neuve et de rénovation. Or, la

somme des logements à construire et à rénover en 2050 est équivalente en ordre de grandeur pour tous les scénarios. Par exemple, le scénario « *Génération frugale* » considère 2 000 logements à construire et 330 000 logements à rénovés en 2050, le scénario « *Pari réparateur* » considère quant à lui 180 000 logements à construire et 228 000 logements à rénovés en 2050. Ainsi, le budget total des produits pouvant être issus du réemploi et utilisés dans la construction neuve et la rénovation doit être partagé entre 332 000 logements pour le scénario « *Génération frugale* » et 408 000 logements pour le scénario « *Pari réparateur* ». Les budgets assignés sont donc du même ordre de grandeur pour les deux scénarios.

Ceci mène à deux conclusions : La première est que tous les scénarios de l'ADEME mènent à des indicateurs de réemploi potentiel d'un même ordre de grandeur quand il s'agit de produits utilisés pour la construction neuve et la rénovation. La deuxième est que, malgré les efforts pour diminuer les besoins en construction neuve, comme c'est le cas pour le scénario « *Génération frugale* », la rénovation massive des bâtiments risque d'amener à de fortes tensions sur les ressources et n'est potentiellement pas en adéquation avec un modèle d'approvisionnement en matériaux restreints aux flux issus de l'économie circulaire.

Pour conclure, on peut noter que les résultats des indicateurs de réemploi potentiel pour les produits utilisés seulement dans la construction neuve sont fortement liés au scénario considéré, alors que pour les produits utilisés dans la construction neuve et la rénovation, les résultats ont le même ordre de grandeur pour tous les scénarios.

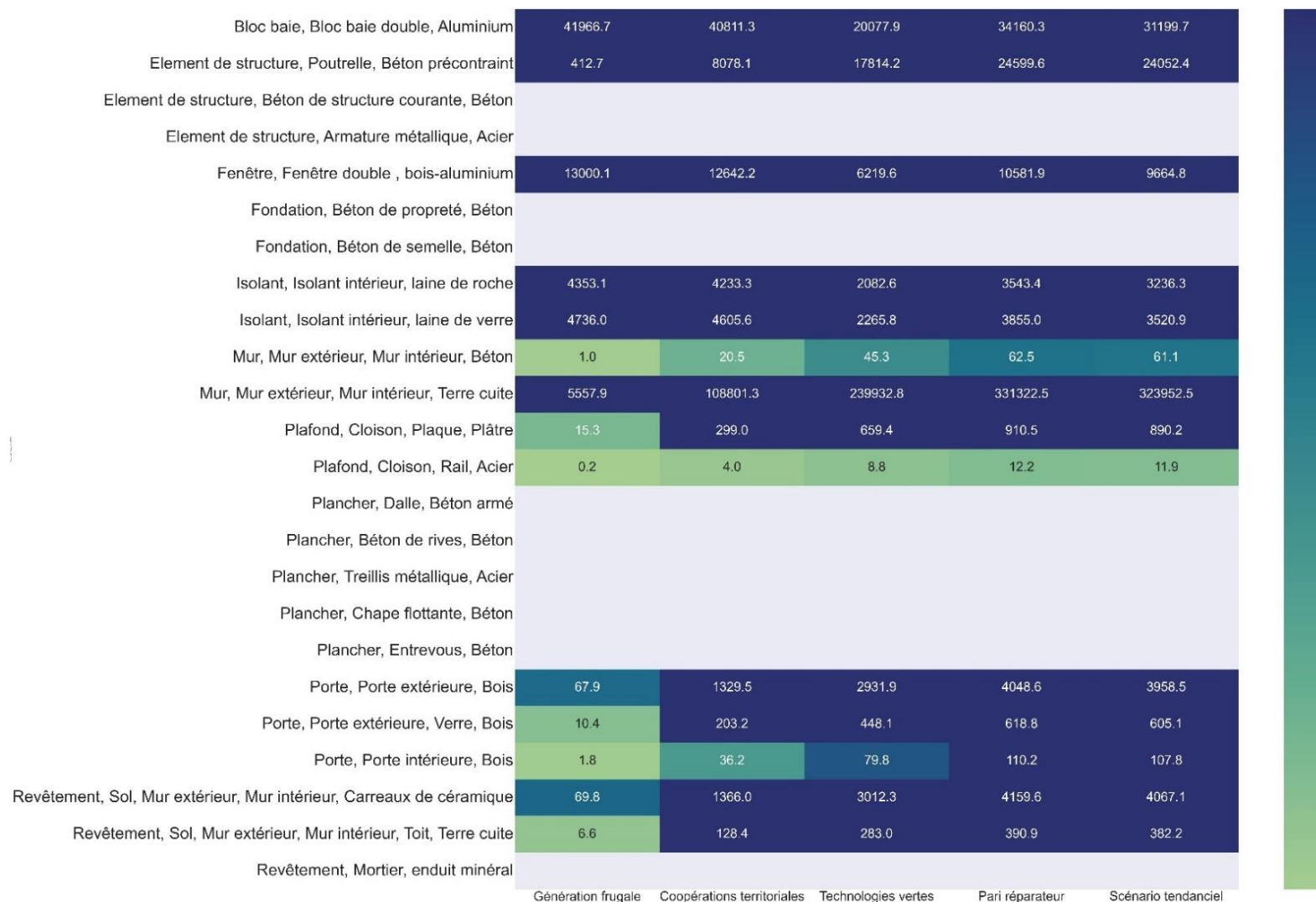


Figure 7-4 Carte de chaleur représentant les indicateurs de réemploi potentiel pour chaque produit dans chaque scénario ADEME. La valeur seuil a été fixée à 100

2.2.3 Les indicateurs de recyclage potentiel

Tout comme les indicateurs de réemploi potentiel, les indicateurs de recyclage potentiel dépendent des scénarios ADEME considérés étant donné que les facteurs d'assignation sont calculés en fonction de paramètres propres à ces scénarios.

La figure suivante montre la carte de chaleur représentant les résultats des indicateurs de soutenabilité pour chaque matériau et chaque scénario, avec une valeur seuil fixée à 100%.

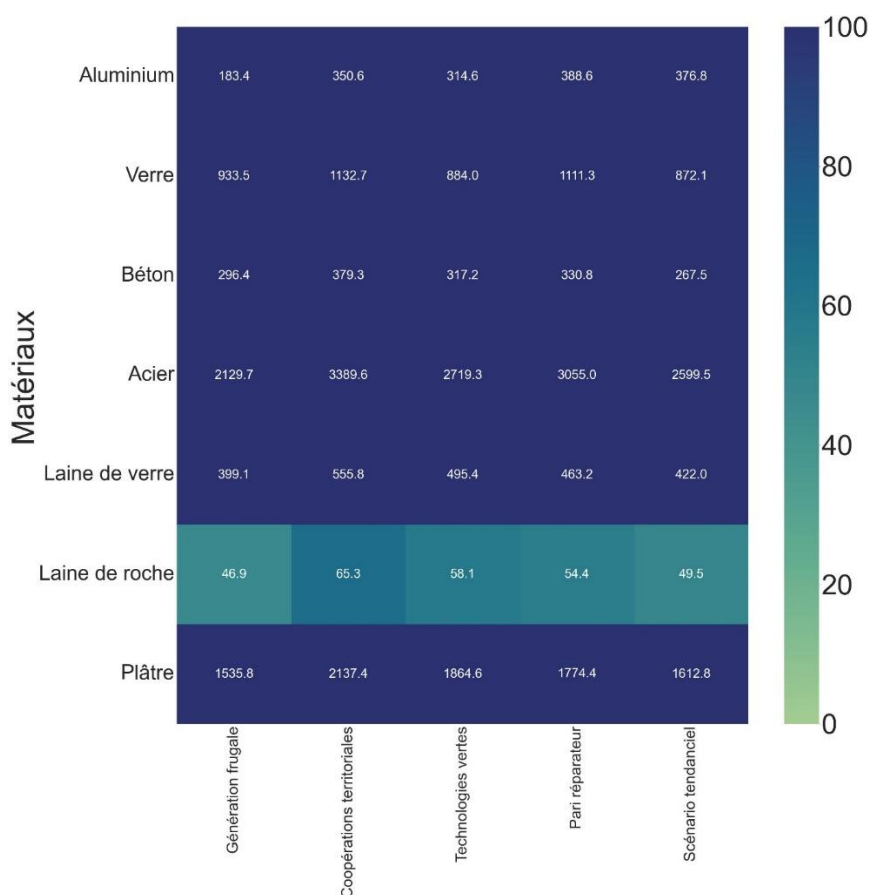


Figure 7-5 Carte de chaleur représentant les indicateurs de recyclage potentiel pour chaque matériau dans chaque scénario ADEME. La valeur seuil a été fixée à 100

Nous remarquons que les résultats des indicateurs pour un matériau donné, ont le même ordre de grandeur pour chaque scénario, ceci s'explique par le fait que tous les matériaux étudiés sont utilisés pour la construction neuve et la rénovation, comme indiqué dans les scénarios de l'ADEME (ADEME, 2021c). Ainsi, la même analyse réalisée pour les indicateurs de réemploi potentiel des produits utilisés dans la rénovation et la construction s'applique.

Concernant la soutenabilité du projet en termes de consommation de matières secondaires, l'étude de cas présente un faible potentiel d'approvisionnement en

matières secondaires pour les quatre scénarios de l'ADEME. On peut donc conclure que les indicateurs de recyclage potentiel sont globalement robustes considérant le scénario choisi.

3. Les taux de réemploi

Comme vu dans le chapitre 5 qui a eu pour objectif d'estimer les taux de réemploi, la méthode utilisée a permis de combler un grand manque de données, ce qui n'aurait pas permis d'appliquer la méthode à une étude de cas, et donc, de la valider et l'opérationnaliser.

Cependant, au vu des hypothèses et des estimations effectuées afin de déterminer les taux de réemploi, il y a une grande incertitude quant aux valeurs obtenues. Il est donc nécessaire de réaliser le calcul pour des valeurs différentes de ces taux de réemploi. L'annexe 5.4 présente les deux valeurs de ces estimations pour chaque produit de construction et le tableau 7-5, présent aussi dans le chapitre 5, rappelle ces deux estimations pour une sélection de produits de construction.

Tableau 7-5 Les deux estimations des taux de réemploi pour une sélection de produits de construction

Nomenclature PDC			Estimation taux réemploi 1	Estimation taux réemploi 2
Macro-composant	Composant	Famille de matériau		
Bloc baie	Bloc baie double	Acier	10%	4%
Cloison	Cloison vitrée double	Aluminium	10%	7%
Escalier	Escalier droit	Pierre naturelle	90%	50%
Fenêtre	Fenêtre double	Aluminium	10%	4%
Isolant	Isolant intérieur, Isolant extérieur	Laine de verre	20%	11%
Plafond, Cloison	Plaque	Plâtre	12%	6%
...
Revêtement	Toit	Terre cuite	40%	33%

La figure 7-6 présente une carte de chaleur qui compare les résultats obtenus en fonction des deux estimations pour le scénario « Génération frugale » avec une valeur seuil fixée à 100%.

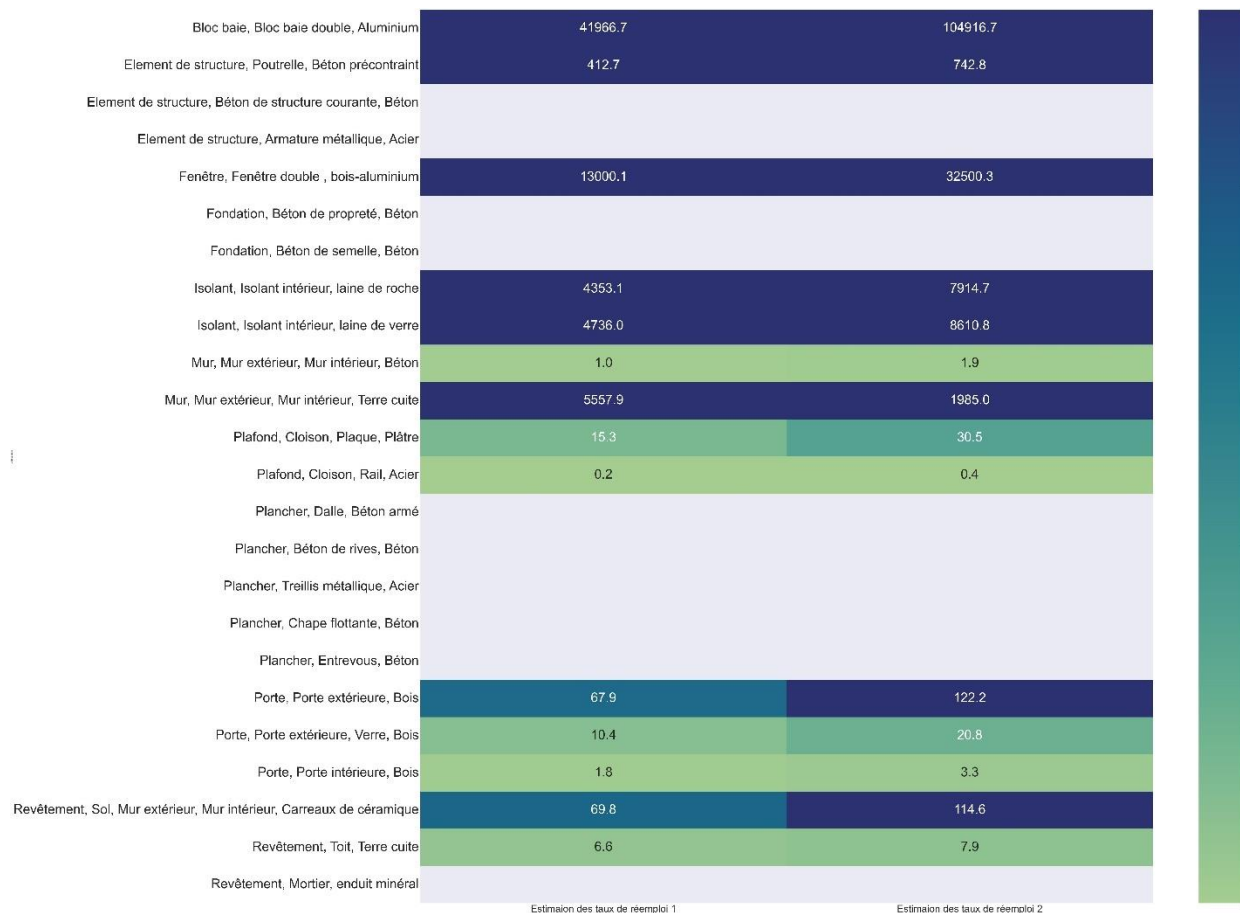


Figure 7-6 Comparaison des indicateurs de réemploi potentiel des produits en fonction des deux estimations des taux de réemploi calculées dans le chapitre 5

A travers la carte de chaleur, nous observons que les résultats sont meilleurs pour la première estimation des taux de réemploi et que pour deux produits les indicateurs deviennent supérieurs à 100% avec la deuxième estimation. Ceci n'est pas étonnant étant donné que les taux de réemploi considérés dans la deuxième estimation sont plus faibles. Cependant, ça n'a modifié la conclusion en termes de soutenabilité que pour 2 produits sur 24.

Afin de compléter l'analyse, il aurait été intéressant de faire la comparaison avec d'autres valeurs de taux de réemploi, comme les taux actuels, mais cette première analyse nous permet de conclure que les indicateurs sont assez robustes vis-à-vis des taux de réemploi estimés au chapitre 5 et qui sont en accord avec les hypothèses prises sur le déploiement de l'économie circulaire.

En effet, ces deux estimations ont été établies dans le cadre d'un scénario où l'économie circulaire est très bien déployée, ce qui n'est clairement pas le cas actuellement.

Aujourd'hui, en se basant sur les fiches Inies par exemple, le réemploi pour les produits de construction et équipements est très majoritairement égal à zéro (Alliance HQE-GBC, 2020).

Si nous appliquons les taux actuels de réemploi dans le cadre de cette étude, les résultats seront nettement plus différents et représenteront des potentiels d'usages de produits issus de la déconstruction très faibles, laissant présager une non-soutenabilité par rapport aux résultats obtenus avec le scénario considéré dans cette étude de cas.

4. Conclusion du chapitre

La comparaison des scénarios de l'ADEME vis-à-vis des indicateurs de réemploi et de recyclage potentiel nous montre que si les indicateurs dépendent fortement des scénarios pour les produits utilisés seulement dans la construction neuve, les résultats des indicateurs pour ceux utilisés dans la construction neuve et rénovation sont comparables en ordre de grandeur.

A travers cette étude de sensibilité, nous avons aussi mis la lumière sur la potentielle tension sur les matériaux que pourrait engendrer un plan de rénovation massive des bâtiments.

Et concernant les taux de réemploi, ils influent sur les résultats des indicateurs étant donné qu'ils modifient la quantité de produits pouvant être issues du réemploi. Plus le taux est élevé plus le budget est important et donc le résultat de l'indicateur meilleur.

Conclusion

1. Bilan des travaux effectués durant la thèse

Les travaux que nous avons menés dans ce projet de recherche proposent une méthodologie d'évaluation absolue des pressions sur les ressources minérales et métalliques dans une approche performancielle de l'économie circulaire, dans le secteur du bâtiment. Cette méthode se base sur l'hypothèse centrale qui définit une consommation soutenable des ressources comme une consommation qui se limite aux matériaux issus du réemploi, réutilisation et recyclage.

Le chapitre 1 a mis en évidence les différents enjeux environnementaux et socio-économiques de l'exploitation des ressources minérales et métalliques et a donc permis de souligner l'importance de diminuer l'extraction des ressources minérales et métalliques vierges. Ce chapitre a aussi permis de mettre en lumière que les impacts environnementaux liés à l'extraction et pressions sur les ressources ne concernent pas seulement les ressources métalliques, mais également les ressources minérales en apparence plus abondantes telles que le sable.

Dans le chapitre 2, une revue systématique de la littérature qui a pour but d'identifier les publications relatives à nos thématiques de recherche a été conduite et ses résultats analysés.

À la suite de cette analyse de la littérature, le concept d'économie circulaire est apparu nécessaire à prendre en compte dans l'évaluation des pressions sur les ressources minérales et métalliques. Ensuite, des approches proposant des contributions pour l'intégration des ressources minérales et métalliques dans l'AESA ont été identifiées.

La majorité de ces méthodes s'inscrivent dans une approche d'AESA basée sur l'ACV. Nous avons donc conclu ce chapitre en se penchant sur cette approche.

La première étape pour une approche AESA basée sur l'ACV est d'identifier la meilleure méthode d'EICV relative aux ressources minérales et métalliques et candidate pour une approche absolue.

Le chapitre 3, a donc eu pour objectif d'investiguer comment sont actuellement évaluées les pressions sur les ressources minérales et métalliques dans le cadre de l'ACV et de définir la méthode d'EICV la plus adaptée pour une approche ACV-AESA.

Nous avons donc conclu, qu'il était nécessaire de proposer des indicateurs qui évaluent la pression sur les ressources minérales et métalliques d'un projet dans le secteur du bâtiment dans une approche socio-économique plutôt qu'environnementale, selon l'approche PB-ACV.

Le chapitre 4, en se basant sur les principes énoncés dans la conclusion du chapitre 3 a détaillé une proposition théorique pour la méthode MiMOSA (Mineral and Metal absolute Sustainability Assessment). Il décrit ainsi ses objectifs, ses exigences et les différentes étapes de calcul. L'ensemble des matrices et paramètres utilisés sont définis.

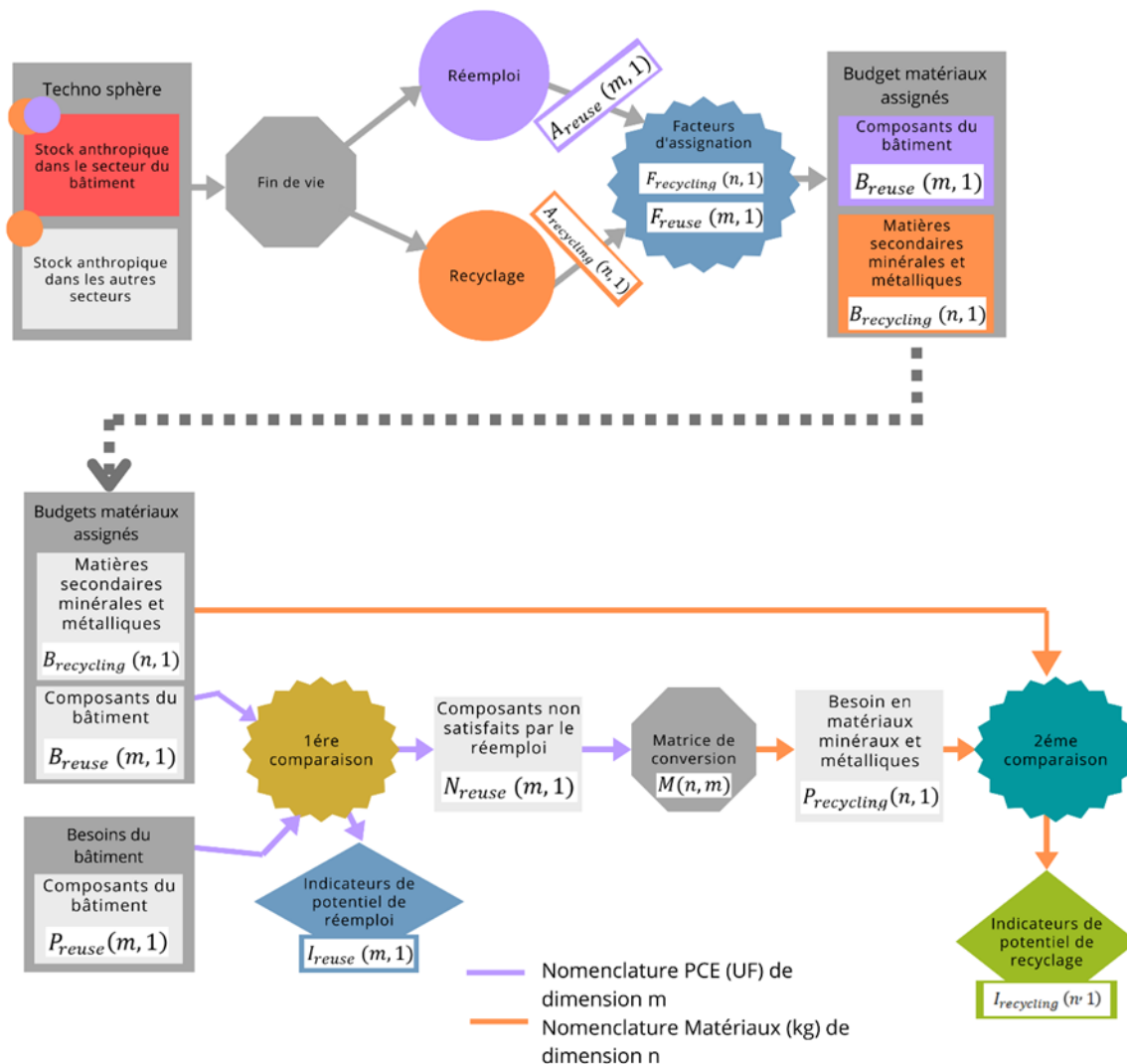


Schéma récapitulatif de la méthode MiMOSA et des matrices utilisées

Le chapitre 5 a permis d'estimer les taux de réemploi maximum pour chaque composant de la nomenclature PDC définie dans la méthode MiMOSA et les matières

secondaires en entrée de fabrication des matériaux de la nomenclature Matériaux de la méthode MiMOSA.

Les taux de réemploi ont été définis dans une approche performancielle de l'économie circulaire, c'est-à-dire que seuls les freins techniques ont été considérés, les freins économiques, juridiques ou assurantiels au déploiement de l'économie circulaire ont été négligés.

La méthode de quantification de ces taux a pour but de pallier le manque de données sur le réemploi dans le secteur du bâtiment en France. Les résultats obtenus sont donc très liés aux hypothèses de travail, que ce soient les hypothèses qui découlent du scénario considéré où l'économie circulaire est bien déployée, ou les hypothèses liées à la méthodologie de traitement des informations obtenues à travers la recherche bibliographique ou les enquêtes. Ces résultats, données d'entrées du modèle MiMOSA ont donc vocation à être remplacés par des chiffres plus robustes une fois les données nécessaires disponibles. Concernant la quantification des matières secondaires pouvant être issues du recyclage, elle s'est aussi basée sur des données très approximatives et devra, dans le futur, aussi être remplacée par des données plus robustes. Ce travail d'estimation des gisements de produits et matériaux disponibles pour le réemploi et le recyclage a été réalisé faute d'un système d'information quantifiant aujourd'hui les produits et matériaux disponibles à partir de la déconstruction et, plus largement, l'économie circulaire. Ce travail pose donc les bases pour un système d'information qui pourrait être mis en place en vue de mieux connaître ces gisements.

Le chapitre 6 a appliqué la méthode MiMOSA à une étude de cas afin de la rendre opérationnelle, en rajoutant ou modifiant des étapes intermédiaires quand nécessaire.

L'étude de cas considérée est relative à la construction d'une maison individuelle dont le matériau principal est la terre cuite. Cette étude de cas a été menée en considérant les dynamiques du secteur du bâtiment tel que décrit par le scénario « *Génération frugale* » de l'ADEME en 2050.

Les résultats des indicateurs obtenus sont évidemment très liés aux hypothèses de l'étude ainsi que des scénarios considérés et montrent que le potentiel d'approvisionnement en produits pouvant être issus du réemploi est plus élevés pour les produits mobilisés seulement dans la construction neuve que pour ceux mobilisés dans la construction neuve et la rénovation.

Concernant les indicateurs de recyclage potentiel, ils montrent un faible potentiel d'approvisionnement en matières secondaires.

Afin de tester la robustesse des résultats de l'étude de cas obtenus dans le chapitre 6, Le chapitre 7 a pour objectif de mener une analyse de sensibilité prenant en compte les deux paramètres pouvant le plus influencer sur les résultats : les scénarios ADEME et les taux de réemplois considérés.

Les résultats de cette analyse de sensibilité nous montrent que les résultats des indicateurs dépendent fortement des scénarios pour les produits utilisés seulement dans la construction neuve, alors que pour les produits et matériaux utilisés dans la construction neuve et la rénovation, les résultats sont comparables en ordre de grandeur.

2. Les limites du travail

Les limites de notre travail sont fortement liées aux données d'entrée disponibles. En effet, il est nécessaire d'améliorer la connaissance du parc bâtiment, des stocks matériaux qui le constituent ainsi que des flux qui lui sont associés.

Une meilleure connaissance des filières de valorisation (réemploi, réutilisation et recyclage) est aussi indispensable afin de quantifier au mieux les flux pouvant être issus du réemploi et du recyclage et pouvant être remobilisés dans le secteur du bâtiment pour de nouveaux projets de construction ou de rénovation.

Afin de pallier à ce manque de données, ce travail de recherche a dû se baser sur des taux de réemploi et des quantifications de flux de matières secondaires issues du recyclage, estimés de façon provisoire, et donc présentant de forts taux d'incertitudes.

Malgré le manque de données substitué par cette estimation des taux de réemploi et des flux issus du recyclage, plusieurs limites de notre travail peuvent être listées :

- La non prise en compte de la qualité des matériaux secondaires, ce qui risque de fausser la réelle disponibilité de ces matériaux pour des fonctions requérant un niveau de qualité donnée.
- Les caractéristiques des produits, par exemple les dimensions des fenêtres ou les épaisseurs des isolants, ne sont pas répertoriées, et n'ont donc pas pu être prises en compte. Or, un des plus importants freins au réemploi est l'hétérogénéité des produits pouvant en être issus.

- Les équipements du bâtiment, dont les flux issus de la déconstruction ne sont pas estimés par BTP-flux, n'ont pas pu être pris en compte. Or une grande majorité des métaux du bâtiment est mobilisée par les équipements.
- Les flux pouvant être issus du recyclage ont été estimés en se basant sur des sources de données qui reflète le contexte actuel et non les scénarios considérés dans l'étude de cas.
- Il pourrait être plus pertinent d'estimer les gisements dans un périmètre autour d'un point donné car certains projets de construction, se trouvant à la frontière de deux départements ou de deux régions administratives françaises peuvent être alimentés en matériaux du département ou de la région voisine.
- Les résultats des indicateurs de réemploi et de recyclage potentiel ont été calculés pour chaque produit ou chaque matériau, or, afin de mieux accompagner l'aide à la décision un résultat agrégé permettant de conclure au niveau du projet étudié pourrait être intéressant. Même s'il faut être vigilant-e-s à la perte d'information à l'issue de l'agrégation.

Afin de faire combler les lacunes identifiées et d'approfondir et de compléter les résultats obtenus, des perspectives à notre travail ont été identifiées.

3. Les perspectives

3.1 Mise en place d'un système d'information

Afin de pallier les différentes limites identifiées précédemment, une perspective majeure de notre travail serait de mettre en place un système d'information en vue de mieux connaître les gisements de produits et équipements pouvant être issus du réemploi ou de la réutilisation dans le secteur du bâtiment et les flux pouvant être issus du recyclage pour différentes régions et à l'issue de tous les secteurs d'activités. Ce système d'information devrait proposer un niveau de détail permettant d'estimer les quantités des flux mais aussi leur qualité afin d'identifier leur réelle disponibilité pour répondre aux exigences des usages après réemploi, réutilisation ou recyclage.

3.2 Méthode d'agrégation des résultats au niveau du projet étudié

Une perspective de ce travail serait de développer une méthode d'agrégation des indicateurs, qui ont été calculés pour chaque produit ou chaque matériau, afin d'accompagner l'aide à la décision.

L'agrégation des résultats peut être effectuée par différentes méthodes, après une éventuelle pondération des indicateurs relatifs aux matériaux. Les éléments pertinents à prendre en compte pour les choix méthodologiques d'agrégation sont, selon nous :

- La criticité des ressources : telle que définie par la Commission européenne, elle exprime la probabilité d'une rupture d'approvisionnement d'une matière et la vulnérabilité d'un système donné à cette rupture (Schrijvers et al., 2020).

Ainsi, plus une matière a une forte probabilité de rupture d'approvisionnement et plus le secteur du bâtiment est vulnérable à cette rupture plus le facteur de pondération lié à cette matière est élevé.

Ceci exprime la nécessité de substituer les ressources primaires auxquelles nos économies sont dépendantes et qui représentent des risques de rupture liés à des facteurs géopolitiques par exemple par des matières secondaires. Ceci permettrait de viser une certaine indépendance de nos économies et sociétés vis-à-vis des imports provenant de pays concernés par des tensions politiques et où les conditions de travail et enjeux sociaux liés au secteur minier sont questionnables (travail des enfants, néo-esclavagisme, etc.).

Cependant, si le concept de criticité des ressources a été largement développé pour les métaux précieux et rares, il serait pertinent de déterminer la criticité quand il s'agit de ressources telles que le sable ou les granulats, des ressources largement utilisées dans le bâtiment et qui subissent des tensions suite à l'urbanisation intensive dans certaines régions.

- Les impacts environnementaux liés à l'exploitation des ressources : plus l'exploitation d'une ressource présente des impacts environnementaux en termes d'émissions de gaz à effet de serre, de pollution des sols ou des eaux etc. et plus le facteur de pondération de ces matériaux doit être élevé. Ceci est en accord avec la nécessité de respecter les limites planétaires telles que définies par Steffen et al. (Steffen, Broadgate, et al., 2015).
- La disponibilité des ressources minérales et métalliques : en fonction des réserves présentes dans la croûte terrestre et des taux d'extraction de ces dernières, des ordres de grandeur du nombre d'années de réserves de certains métaux rares et précieux restant si la consommation et l'élimination se poursuivent au rythme actuel estimé ont été estimés (Dodson et al., 2012). Les facteurs de pondération peuvent prendre en compte cet élément, ainsi, plus une ressource dispose d'un faible nombre d'années de réserve, plus le facteur de

pondération doit être important pour appuyer l'urgence de substituer son approvisionnement par les ressources secondaires.

3.3 Que faire du budget assigné non utilisé par le projet étudié ?

Nous avons vu dans le chapitre 4 ainsi que dans le chapitre 6 relatif à l'étude de cas, que le budget des flux pouvant être réemployés ont été assignés et ensuite comparés aux besoins du projet étudié. Les résultats des indicateurs de réemploi potentiel nous montrent que la très grande majorité des besoins du projet de construction n'a pu être satisfaite par le réemploi. Les flux qui ont été assignés au projet mais qui ne correspondent pas aux besoins tels qu'exprimés n'ont pas été utilisés par le projet étudié Cet élément important n'est pas mis en évidence par la méthode utilisée.

Prenons l'exemple des fenêtres : la maison individuelle considérée dans l'étude de cas a un besoin de 4 m² en fenêtre double en bois-aluminium, le budget de fenêtre double en bois-aluminium assigné au projet, en considérant le scénario « *Génération frugale* » est de 3.08E-02 m², ce qui donne un indicateur de réemploi potentiel égal à 13000 %. Or, comme le montre le tableau 1b, un budget de fenêtre double en PVC, acier, aluminium et bois et de fenêtre triple en bois et bois-aluminium, est aussi assigné au projet. Si nous recalculons l'indicateur de réemploi potentiel en prenant en compte le budget assigné de toutes les fenêtres, nous obtenons un résultat de 445%. L'indicateur ne présente pas un résultat soutenable, c'est-à-dire inférieur à 100%, mais a considérablement diminué par rapport au premier résultat.

Les budgets de fenêtres pouvant être issues du réemploi assigné à la maison individuelle étudié dans le cadre du scénario "Génération frugale" de l'ADEME

Macro-composant	Composant	Famille de produit	Budget assigné au m ²
Fenêtre	Fenêtre double	PVC	4.43E-01
Fenêtre	Fenêtre double	acier	2.53E-02
Fenêtre	Fenêtre double	aluminium	1.03E-01
Fenêtre	Fenêtre double	bois	2.85E-01
Fenêtre	Fenêtre double	bois-aluminium	3.08E-02
Fenêtre	Fenêtre triple	bois	3.88E-03
Fenêtre	Fenêtre triple	bois-aluminium	7.78E-03

Ceci montre qu'il est essentiel, afin de développer au mieux l'économie circulaire dans le secteur du bâtiment, de prendre en compte les gisements de produits de construction et équipements pouvant être issus du réemploi dans la conception des nouveaux bâtiments. Cela montre que, pour favoriser le réemploi, les produits et matériaux issues de la déconstruction disponibles pour de nouvelles constructions

devraient être privilégiées dans les choix de conception et que les objectifs de réemploi et recyclage doivent être pris en compte dès les choix architecturaux et la conception des bâtiments. Pour MiMOSA, cela reviendrait à définir des budgets non pas pour répondre à un besoin précis mais à une fonction. C'est-à-dire, au lieu de répondre de définir un budget pour répondre au besoin «X m² de fenêtres double vitrage en bois-aluminium », le budget est défini de manière à répondre à la fonction X m² de fenêtres.

Une autre manière d'optimiser et de mieux utiliser les flux pouvant être issus du réemploi serait de combler les besoins non satisfaits d'un projet A par les budgets assignés à un autre projet B et non utilisés par ce dernier. Ceci reviendrait à faire une analyse comparative des flux pouvant être issus du réemploi et des besoins estimés à l'échelle d'un territoire donné plutôt qu'à l'échelle d'un bâtiment.

La méthode MiMOSA telle que développée actuellement permet de réaliser ce genre d'étude, les freins n'ayant pas permis de les réaliser dans le cadre de cette thèse sont relatifs au manque de données. En effet, il ne suffit pas d'estimer les besoins d'un territoire seulement à un niveau macro, c'est-à-dire agrégé au niveau du territoire étudié, mais d'avoir aussi le détail des besoins par bâtiment afin de répondre au mieux aux besoins de chaque bâtiment. Ainsi, il faudrait avoir une analyse à l'échelle macro mais aussi à l'échelle de chaque bâtiment et de mettre en cohérence les résultats obtenus. Cela plaide pour la nécessité d'un vrai système d'information recensant les produits de constructions et matériaux issus de la déconstruction et disponibles pour de nouveaux projets.

3.4 Meilleure prise en compte des besoins de l'étude de cas

Comme première approche de cette méthode, nous n'avons considéré que les consommations directes des ressources minérales et métalliques, dues aux produits de construction et équipements du bâtiment étudiés. Comme perspective de ce travail, il serait intéressant de prendre en compte les consommations indirectes, liées à l'approvisionnement en eau en énergie ou au traitement des déchets par exemple. Ceci permettrait d'estimer leur part de contribution aux pressions exercées sur les ressources minérales et métalliques.

3.5 L'échelle temporelle considérée

Dans cette étude, nous avons considéré l'année comme échelle temporelle, ce qui est cohérent avec la méthode PB-LCA proposée par (Ryberg, 2018). Or, si nous faisons un

petit saut dans le passé, les maisons, châteaux ou tout autre monument, nécessitaient des années pour achever leur construction.

L'achèvement de Notre Dame de Paris, dont le chantier a commencé en 1163, a nécessité 183 ans⁵, et il aura fallu 35 ans⁶ pour construire le château de Chambord par exemple.

Ces différents exemples montrent que si entre 1990 et 2010, la durée moyenne de construction des logements en France métropolitaine a varié entre 11 et 13 mois pour les maisons individuelles, et entre 16 et 23 mois pour les logements collectifs (Ghewy, 2019), cela n'a pas toujours été le cas par le passé.

A travers l'étude de cas, nous avons vu que les flux pouvant être issus du réemploi et du recyclage ne répondent pas aux besoins de la maison individuelle, or, en augmentant la durée du chantier, nous aurions pu cumuler assez de matériaux issus de la déconstruction afin de réaliser le projet. Ceci poserait évidemment des problèmes de stockage, mais il serait intéressant d'estimer le nombre d'années nécessaires à générer suffisamment de flux pouvant être issus du réemploi et du recyclage afin de satisfaire les besoins.

3.6 Améliorer les résultats des indicateurs

Les résultats des indicateurs obtenus sont assez pessimistes, et seulement deux manières s'offrent à nous afin de les améliorer : Augmenter les flux pouvant être issus du réemploi et du recyclage, ou diminuer nos besoins.

Dans le cadre de cette étude, les taux de réemploi considérés sont majorés du fait qu'ils négligent tous les obstacles administratifs, économiques, juridiques ou assurantiels au déploiement de l'économie circulaire. Ainsi, la piste d'amélioration qui pourrait notablement améliorer les résultats est de diminuer nos besoins.

Depuis au moins 1972, avec le rapport du club de Rome « Les limites à la croissance » rédigé principalement par les écologues Donella Meadows et Dennis Meadows, les scientifiques alertent sur les conséquences écologiques de la croissance économique.

⁵[Bibliothèque Nationale de France : la cathédrale de Paris](#)

⁶[Bibliothèque Nationale de France : le château de Chambord](#)

Ainsi, diminuer nos besoins ne permettrait pas seulement de réduire le nombre de constructions neuves, mais pourrait s'inscrire dans une réflexion globale et systémique qui révolutionne nos modes de production et de consommation.

Si on se focalise sur le secteur du bâtiment, on peut déjà déterminer quelques pistes de réflexion.

Par exemple en mettant en commun des espaces partagés ou réquisitionner les logements vacants ou de diminuer drastiquement les maisons secondaires.

En France, en 2023, dans son rapport annuel, la fondation Abbé Pierre⁷ a estimé à 30 000 le nombre de Sans Domicile Fixe dans la métropole, et au total 4.5 millions de personnes mal logées (dans des logements insalubres par exemple). Or, le ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires a recensé, en 2022, environ 3.1 millions de logements vacants en France métropolitaine (Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, 2022). Une meilleure gestion de ces logements vacants pourrait diminuer nos besoins en construction neuve et répondre à un réel enjeu social.

Une perspective de la méthode MiMOSA pourrait ainsi être de prendre en compte les logements vacants ou une diminution des maisons secondaires dans les scénarios avant le calcul des indicateurs, ce qui a été considéré dans le scénario « *Génération frugale* » de l'ADEME, mais pas dans les autres scénarios (ADEME, 2021c).

Cette thèse a permis de mettre au point la méthode MiMOSA et une preuve de concept de cette méthode, même-si, nous sommes conscient·e·s des limites opérationnelles actuelles, nous pensons qu'elle ouvre de nombreuses perspectives de futurs développements en vue de représenter les flux pouvant être issus du réemploi et du recyclage dans des projets de rénovation ou construction de bâtiments.

⁷[Fondation Abbé Pierre](#)

Bibliographie

- ADEME. (2020). *Le sable, une ressource qui pourrait bien nous filer entre les doigts*.
- ADEME. (2021a). *Etude de préfiguration de la filière REP Produits et Matériaux de Construction du secteur du Bâtiment*. <https://librairie.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/4573-etude-de-prefiguration-de-la-filiere-rep-produits-et-materiaux-de-construction-du-secteur-du-batiment.html>
- ADEME. (2021b). *Le traitement des déchets*. [https://expertises.ademe.fr/economie-circulaire/dechets/quoi-parle-t/prevention-gestion-dechets/traitement-dechets#:~:text=Le%20recyclage%20consiste%20en%20toute,code%20de%20I%27environnement\).](https://expertises.ademe.fr/economie-circulaire/dechets/quoi-parle-t/prevention-gestion-dechets/traitement-dechets#:~:text=Le%20recyclage%20consiste%20en%20toute,code%20de%20I%27environnement).)
- ADEME. (2021c). *Transition(s) 2050: Choisir maintenant agir pour le climat- Rapport*. <https://www.ademe.fr/les-futurs-en-transition/>
- ADEME. (2022). *Bilan national du recyclage 2010 - 2019*. <https://librairie.ademe.fr/>
- Alliance HQE-GBC. (2020). *INIES – Les données environnementales et sanitaires de référence pour le bâtiment*. 35. <https://www.inies.fr/accueil/>
- Andersen, C. E., Ohms, P., Rasmussen, F. N., Birgisdóttir, H., Birkved, M., Hauschild, M., & Ryberg, M. (2020). Assessment of absolute environmental sustainability in the built environment. *Building and Environment*, 171(October 2019). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106633>
- Aujollet, Y., Douard, P., Girardot, P.-E., & Legait, B. (2020). *Les filières de recyclage de déchets en France métropolitaine*. https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/cge/filieres-dechets-recyclage.pdf
- Baabou, W., Bjørn, A., & Bulle, C. (2022). Absolute Environmental Sustainability of Materials Dissipation: Application for Construction Sector. *Resources*, 11(8), 76. <https://doi.org/10.3390/resources11080076>
- Bach, V., Berger, M., Finogenova, N., & Finkbeiner, M. (2019). Analyzing changes in supply risks for abiotic resources over time with the ESSENZ method-A data update and critical reflection. *Resources*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/resources8020083>

- Bach, V., Berger, M., Henßler, M., Kirchner, M., Leiser, S., Mohr, L., Rother, E., Ruhland, K., Schneider, L., Tikana, L., Volkhausen, W., Walachowicz, F., & Finkbeiner, M. (2016). Integrated method to assess resource efficiency – ESSENZ. *Journal of Cleaner Production*, 137, 118–130. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.077>
- Bendahmane, N., Gondran, N., & Chevalier, J. (2022). AESA approach applied to mineral and metal resources use sustainability in the building sector: The MiMOSA method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1078(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1078/1/012124>
- Berger, M., Sonderegger, T., Alvarenga, R., Bach, V., Cimprich, A., Dewulf, J., Frischknecht, R., Guinée, J., Helbig, C., Huppertz, T., Jolliet, O., Motoshita, M., Northey, S., Peña, C. A., Rugani, B., Sahnoune, A., Schrijvers, D., Schulze, R., Sonnemann, G., ... Young, S. B. (2020). Mineral resources in life cycle impact assessment: part II – recommendations on application-dependent use of existing methods and on future method development needs. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(4), 798–813. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01737-5>
- Bernd Polster. (1995). *Contribution à l'étude de l'impact environnemental des bâtiments par analyse du cycle de vie*. <https://www.theses.fr/1995ENMP0625>
- Bjørn, A., Chandrakumar, C., Boulay, A. M., Doka, G., Fang, K., Gondran, N., Hauschild, M. Z., Kerkhof, A., King, H., Margni, M., McLaren, S., Mueller, C., Owsianiak, M., Peters, G., Roos, S., Sala, S., Sandin, G., Sim, S., Vargas-Gonzalez, M., & Ryberg, M. (2020). Review of life-cycle based methods for absolute environmental sustainability assessment and their applications. *Environmental Research Letters*, 15(8). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab89d7>
- Bjørn, A., & Hauschild, M. Z. (2015). Introducing carrying capacity-based normalisation in LCA: framework and development of references at midpoint level. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(7), 1005–1018. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0899-2>
- Bjørn, A., Margni, M., Roy, P. O., Bulle, C., & Hauschild, M. Z. (2016). A proposal to measure absolute environmental sustainability in life cycle assessment. *Ecological Indicators*, 63, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.11.046>
- Bjørn, A., Richardson, K., & Hauschild, M. Z. (2019a). A Framework for Development and Communication of Absolute Environmental Sustainability Assessment Methods. *Journal of Industrial Ecology*, 23(4), 838–854. <https://doi.org/10.1111/jiec.12820>

- Bjørn, A., Richardson, K., & Hauschild, M. Z. (2019b). A Framework for Development and Communication of Absolute Environmental Sustainability Assessment Methods. *Journal of Industrial Ecology*, 23(4), 838–854. <https://doi.org/10.1111/jiec.12820>
- Bjørn, A., Sim, S., King, H., Patouillard, L., Margni, M., Hauschild, M. Z., & Ryberg, M. (2020). Life cycle assessment applying planetary and regional boundaries to the process level: a model case study. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(11), 2241–2254. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01823-8>
- Bobi réemploi. (2021). *Etude de cas réemploi de fenêtres*.
- Bonnet, R., Sement, N., Schiopu, N., Chevalier, J., & Perrissin-fabert, AS. (2017). Ovalec: Rapport de synthèse sur l'identification des besoins des acteurs de la construction. *ADEME*, 1–20. <https://ovalec.dimn-cstb.fr/>
- Bösch, M. E., Hellweg, S., Huijbregts, M. A. J., & Frischknecht, R. (2007). Applying Cumulative Exergy Demand (CExD) indicators to the ecoinvent database. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(3), 181–190. <https://doi.org/10.1065/lca2006.11.282>
- Boutaud, A., & Gondran, N. (2020). *Les limites planétaires*. https://www.editions-ladecouverte.fr/les_limites_planetaires-9782348046230
- Brejnrod, K. N., Kalbar, P., Petersen, S., & Birkved, M. (2017). The absolute environmental performance of buildings. *Building and Environment*, 119, 87–98. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.04.003>
- Briffa, J., Sinagra, E., & Blundell, R. (2020). Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. In *Heliyon* (Vol. 6, Issue 9). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>
- Bringezu, S. (2015). Possible target corridor for sustainable use of global material resources. *Resources*, 4(1), 25–54. <https://doi.org/10.3390/resources4010025>
- Buczko, C., Hinterberger, F., & Stricks, V. (2016). Towards SDG implementation: The role of global resource policy and resource targets. *Brief for GSDR*, 4. [https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/1047072_Buczko_Towards SDG implementation-The role of global resource policy and resource targets.pdf](https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/1047072_Buczko_Towards%20SDG%20implementation-The%20role%20of%20global%20resource%20policy%20and%20resource%20targets.pdf)
- Bulle, C., Margni, M., Patouillard, L., Boulay, A. M., Bourgault, G., De Bruille, V., Cao, V., Hauschild, M., Henderson, A., Humbert, S., Kashef-Haghighi, S., Kounina, A.,

- Laurent, A., Levasseur, A., Liard, G., Rosenbaum, R. K., Roy, P. O., Shaked, S., Fantke, P., & Jolliet, O. (2019). IMPACT World+: a globally regionalized life cycle impact assessment method. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(9), 1653–1674. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01583-0>
- Caebel, B. de, van Overbeke, E., & Devaux, J. (2010). *Identification des limitations techniques et environnementales du recyclage matière des déchets (hors BTP)*. www.record-net.org
- Calvo, G., & Valero, A. (2021). Strategic mineral resources: Availability and future estimations for the renewable energy sector. *Environmental Development*, November 2020, 100640. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2021.100640>
- CCNUCC. (1992). *Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques*. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convfr.pdf>
- CEREMA. (2020). *L'artificialisation et ses déterminants d'après les Fichiers fonciers Synthèse du rapport de janvier 2020 Photo éventuelle*. <https://artificialisation.biodiversitetousvivants.fr/determinants-artificialisation->
- CGDD. (2011). De Sitadel à Sit @ del2. *SERVICE DE L'OBSERVATION ET DES STATISTIQUES*, 2. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/la-base-de-donnees-sitadel2-methodologie>
- Cimprich, A., Karim, K. S., & Young, S. B. (2018). Extending the geopolitical supply risk method: material “substitutability” indicators applied to electric vehicles and dental X-ray equipment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(10), 2024–2042. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1418-4>
- Clavier, S., Bendahmane, N., Gondran, N., & Chevalier, J. (2023). *Méthode de quantification des flux des mines urbaines: cas des briques en terre cuite en Ile de France*. <https://doi.org/10.46298/eid.2023.10159>
- Coelho, A., & de Brito, J. (2013). Conventional demolition versus deconstruction techniques in managing construction and demolition waste (CDW). In *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste* (pp. 141–185). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1533/9780857096906.2.141>
- Coffey, S. (2009). *Establishing a Legal Framework for Property Rights to Natural Resources in Outer Space*.

- Commissariat Général au développement durable. (2012). *Sitram-I: LE CHAMP D'APPLICATION DES DONNÉES À PARTIR DE 2009*. 11. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-11/sitram-metadonnees.pdf>
- CSTB. (2022). *Label Env - Document technique: signe de qualité écoconception - volet circularité*. <https://evaluation.cstb.fr/fr/rechercher/>
- Damon, M., Cole, D. H., Ostrom, E., & Sterner, T. (2012). *Grandfathering: Environmental Uses and Impacts*. <http://hdl.handle.net/10.1093/reep/reyp017>
- Dan Gavriletea, M. (2017). Environmental impacts of sand exploitation. Analysis of sand market. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 9, Issue 7). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su9071118>
- De Bruille, V. (2014). *Impact de l'utilisation des ressources minérales et métalliques dans un contexte de cycle de vie: une approche fonctionnelle*. <https://publications.polymtl.ca/1591/>
- Démoclés. (2018). *Guide d'informations sur les filières de valorisation des déchets du second-oeuvre*. https://www.democles.org/uploads/2019/04/sned_guide_info_filiere.pdf
- Denyer, D., & Tranfield, D. (2009). Producing a Systematic Review. In *The SAGE Handbook of Organizational Research Methods* (pp. 671–689). <https://doi.org/10.1080/03634528709378635>
- Descola, P., & Pignocchi, A. (2022). *Ethnographies des mondes à venir*.
- Devènes, J., Brütting, J., Küpfer, C., Bastien-Masse, M., & Fivet, C. (2022). Re:Crete – Reuse of concrete blocks from cast-in-place building to arch footbridge. *Structures*, 43, 1854–1867. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.07.012>
- Dewulf, J., Bösch, M. E., De Meester, B., Van Der Vorst, G., Van Langenhove, H., Hellweg, S., & Huijbregts, M. A. J. (2007). Cumulative exergy extraction from the natural environment (CEENE): A comprehensive life cycle impact assessment method for resource accounting. *Environmental Science and Technology*, 41(24), 8477–8483. <https://doi.org/10.1021/es0711415>
- Dodson, J. R., Hunt, A. J., Parker, H. L., Yang, Y., & Clark, J. H. (2012). Elemental sustainability: Towards the total recovery of scarce metals. *Chemical Engineering*

- and Processing: Process Intensification*, 51, 69–78.
<https://doi.org/10.1016/j.cep.2011.09.008>
- Down, C. G., & Stocks, J. (1977). *Environmental impact of mining*.
- Drezet, E. (2014). *Épuisement des ressources naturelles*.
- Duc, M. (2017). *Extractivisme*.
- EcoSD, & ADEME. (2019). *Guide de bonnes pratiques pour la prise en compte des ressources minérales et de leur criticité en Analyse du Cycle de Vie*.
<https://hal.inrae.fr/hal-02609812/document>
- Eheliyagoda, D., Zeng, X., & Li, J. (2020). A method to assess national metal criticality: the environment as a foremost measurement. *Humanities and Social Sciences Communications*, 7(1). <https://doi.org/10.1057/s41599-020-00537-4>
- European Commission. (2012). Characterisation factors of the ILCD Recommended Life Cycle Impact Assessment methods: database and supporting information. In *European Commission*. <https://doi.org/10.2788/60825>
- European Commission. (2020). *Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020) Final Report*. <https://doi.org/10.2873/904613>
- Farahani, H., & Bayazidi, S. (2018). Modeling the assessment of socio-economical and environmental impacts of sand mining on local communities: A case study of Villages Tatao River Bank in North-western part of Iran. *Resources Policy*, 55, 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.11.001>
- FCRBE. (2021). *Fiches matériaux*. www.opalis.eu
- Fleurence, C. (2018). Satisfaire les besoins en énergie d'une mine d'or, la mine d'Essakane au Burkina Faso. *Annales Des Mines - Réalités Industrielles*, Novembre 2018(4), 20. <https://doi.org/10.3917/rindu1.184.0020>
- Forbidden stories. (2019). *The green blood project*.
- Frischknecht, R., & Büsler Knöpfel, S. (2013). Swiss Eco-Factors 2013 according to the Ecological Scarcity Method. *Federal Office for the Environment FOEN*, 256. <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01750/index.html?lang=en>
- Galeano, E. (1981). *Les veines ouvertes de l'Amérique latine : Une contre-histoire*. 1. <https://doi.org/10.7202/701336ar>

- Ghewy, X. (CGDD). (2019). Commissariat général au développement durable. Bilan 2012 de la production de déchets en France. *DATA-LAB*, 4. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/CS615-2.pdf>
- Ghyoot, M., Devlieger, L., Billet, L., & Warnier, A. (2018). *Déconstruction et réemploi - Comment faire circuler les éléments de construction*. <https://www.epflpress.org/produit/872/9782889152391/deconstruction-et-reemploi>
- Goedkoop, M., & Huijbregts, M. (2012). *ReCiPe 2008 - A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and endpoint level. First edition (revised). Report 1: Characterization*. 1–137. https://web.universiteitleiden.nl/cml/ssp/publications/recipe_characterisation.pdf
- Goedkoop, M., & Spriensma, R. (2001). The Eco-indicator 99 - A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. *Assessment, January 2001*, 144. <https://doi.org/10.1007/BF02979347>
- Grosse, F. (2010a). *Is recycling "part of the solution"? The role of recycling in an expanding society and a world of finite resources*. <https://journals.openedition.org/sapiens/906>
- Grosse, F. (2010b). *Le découplage croissance _ matières premières. De l'économie circulaire à l'économie de la fonctionnalité vertus et limites du recyclage*. <https://www.futuribles.com/le-decouplage-croissance-matieres-premieres-de-lec/>
- Grosse, F., & Mainguy, G. (2011). *Quasi-Circular Growth: a Pragmatic Approach to Sustainability for Non-Renewable Material Resources*. 4, 2. <https://journals.openedition.org/sapiens/1242>
- Guinée, J. B., & Heijungs, R. (1995). A proposal for the definition of resource equivalency factors for use in product life-cycle assessment. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 14(5), 917–925. <https://doi.org/10.1002/etc.5620140525>
- Habib, K., & Wenzel, H. (2016). Reviewing resource criticality assessment from a dynamic and technology specific perspective - Using the case of direct-drive wind turbines. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 112, pp. 3852–3863). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.064>
- Hache, E. (2021). *Les métaux dans la transition énergétique*.

- Hauschild, M. Z., & Potting, J. (2005). *Spatial Differentiation in Life Cycle Impact Assessment – The EDIP 2003 Background for spatial differentiation in LCA impact assessment*. November. <https://www2.mst.dk/udgiv/publications/2005/87-7614-579-4/pdf/87-7614-580-8.pdf>
- Hjalsted, A. W., Laurent, A., Andersen, M. M., Olsen, K. H., Ryberg, M., & Hauschild, M. (2021). Sharing the safe operating space: Exploring ethical allocation principles to operationalize the planetary boundaries and assess absolute sustainability at individual and industrial sector levels. *Journal of Industrial Ecology*, 25(1), 6–19. <https://doi.org/10.1111/jiec.13050>
- Höhne, N., den Elzen, M., & Escalante, D. (2014). Regional GHG reduction targets based on effort sharing: a comparison of studies. *Climate Policy*, 14(1), 122–147. <https://doi.org/10.1080/14693062.2014.849452>
- Huppertz, T., Weidema, B. P., Standaert, S., de Caemel, B., & van Overbeke, E. (2019). The social cost of sub-soil resource use. *Resources*, 8(1). <https://doi.org/10.3390/resources8010019>
- IBGE. (2009). *Guide de gestion des déchets de construction et de démolition*. http://www.cifful.ulg.ac.be/images/annexes_reemploi2013/phase1/1_2/IBGE_Guide_Dejets_construction.pdf
- ILCD. (2011). ILCD Handbook. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- INSEE. (2019). *Département de la Seine-Saint-Denis*. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1405599?geo=DEP-93>
- INSEE. (2021). *Répartition du parc de logements*. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/5761272>
- INSEE. (2022). *Logements mis en chantier*. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/series/103181511>
- Ioannidou, D., Meylan, G., Sonnemann, G., & Habert, G. (2017). Is gravel becoming scarce? Evaluating the local criticality of construction aggregates. *Resources, Conservation and Recycling*, 126(December 2016), 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.016>
- ISO 14040. (2006). *Nf en iso 14040: Environmental management: Life cycle assessment Principles and framework*. <https://www.iso.org/standard/37456.html>

- Itsubo, N., & Inaba, A. (2014). *LIME2 Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling Chapter 2: Characterization and Damage Evaluation Methods*. 18. https://lca-forum.org/english/pdf/No13_CO_Introduction.pdf
- IUCN. (2022). *INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE ANNUAL REPORT*.
- Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., & Rosenbaum, R. (2003). *IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology*. 32(1531), 411–424. <https://doi.org/10.5479/si.00963801.32-1531.411>
- Kedir, F., & Hall, D. M. (2021). Resource efficiency in industrialized housing construction – A systematic review of current performance and future opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 286, 125443. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125443>
- Kempinski, F. B., Grandin, J., Thibaud, G., & Mastrangelo, M. (2023). *Matières premières critiques : l'Europe soumise à la Chine*.
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. In *Resources, Conservation and Recycling* (Vol. 127, pp. 221–232). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Küpfer, C., Bastien-Masse, M., & Fivet, C. (2023). Reuse of concrete components in new construction projects: Critical review of 77 circular precedents. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 383). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135235>
- Lacarrière, S. (2011). La croissance verte: Un mythe salutaire pour un monde solidaire? *Revue Internationale et Stratégique*, 81(1), 183–188. <https://doi.org/10.3917/ris.081.0183>
- Lachat, A. (2022). *Le Réemploi Appliqué au Domaine de la Construction : Principe, Impact Environnemental et Mesure dans le Cadre d'une Économie Circulaire* [Thèse]. <https://www.theses.fr/2022ENPC0009>
- Lebert, Alexandra., & Chevalier, J.-Luc. (2018). *L'analyse du cycle de vie dans le bâtiment : comprendre et réaliser une ACV*. <https://boutique.cstb.fr/guides-et-livres/556-l-analyse-du-cycle-de-vie-dans-le-batiment-9782868916563.html>
- Lèbre, É., Stringer, M., Svobodova, K., Owen, J. R., Kemp, D., Côte, C., Arratia-Solar, A., & Valenta, R. K. (2020). The social and environmental complexities of extracting energy transition metals. *Nature Communications*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18661-9>

- Légifrance. (2015a). *Article L110-1-1 -loi de transition énergétique pour la croissance verte du 17 Aout 2015, Code de l'environnement.* <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2015/7/27/DEVL1513989A/jo/texte>
- Légifrance. (2015b). *LOI n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte.* <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000031044385>
- Légifrance. (2020). *LOI no 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire.* <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000041553759/>
- Lehoucq, R., Rio, E., & Graner, F. (2020). *Tourisme spatial: quand les plaisirs de quelques-uns polluent la planète de tous.*
- Leonardon, P., Laurenceau, S., Louerat, M., & Core, E. (2018). Prospective De Consommation De Matière Pour Les Batiments Neufs Aux Horizons 2035 Et 2050. *ADEME, CSTB*, 116. <https://librairie.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/439-prospectives-2035-et-2050-de-consommation-de-materiaux-pour-la-construction-neuve-et-la-renovation-energetique-bbc.html>
- Maharajh, D., Grewar, T., Neale, J., & Van Rooyen, M. (2018). *Mine Water: A resource for the circular economy in South African Mining communities.*
- Mancini, L. (2018). *Social assessment of raw materials supply chains.* <https://doi.org/10.2760/470881>
- Mette, B., Best, J., Hackney, C., & Lonsmann Iversen, L. (2019). Time is running out for sand. *Nature*.
- Ministère de la transition écologique. (2022). *Bilan environnemental de la France Édition 2021.* <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/bilan-environnemental-de-la-france-edition-2021>
- Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires. (2020). *Guide RE 2020.* <https://www.ecologie.gouv.fr/re2020-nouvelle-etape-vers-future-reglementation-environnementale-des-batiments-neufs-plus>
- Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires. (2022). *Datalab: chiffres clés du logement.* www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr

- Monange, B., & Flipo, F. (2019). *EXTRACTIVISME: LUTTER CONTRE LE DÉNI*.
<https://doi.org/10.3917/ecopo1.059.0015>
- Moreno Ruiz, E., Valsasina, L., Brunner, F., Symeonidis, A., FitzGerald, D., Treyer, K., Bourgault, G., & Wernet, G. (2018). *Documentation of changes implemented inecoinvent database v3.5*. Ecoinvent, Zürich, Switzerland. 5, 1–97.
https://ecoinvent.org/wp-content/uploads/2021/09/change_report_v3_5_20180823.pdf
- Moreno-Camacho, C. A., Montoya-Torres, J. R., Jaegler, A., & Gondran, N. (2019). Sustainability metrics for real case applications of the supply chain network design problem: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 231, 600–618. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.278>
- Mots-clés. (2017). *Pour une communication publique sans stéréotype de sexe: guide pratique*. https://www.haut-conseil-egalite.gouv.fr/IMG/pdf/guide_egacom_sans_stereotypes-2022-versionpublique-min.pdf
- Mouterde, P., & Depardon, M. (2022). *Enquête Le Monde: MARCHANDS DE SABLE*.
- MTES. (2019). *Etude de scénarii pour la mise en place d'une organisation permettant une gestion efficace des déchets du bâtiment dans le cadre d'une économie circulaire*. <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-33661-etude-professionnels-batiment-reprise-dechets.pdf>
- Mudd, G. M. (2013). The limits to growth and “finite” mineral resources: re-visiting the assumptions and drinking from that half-capacity glass. In *Int. J. Sustainable Development* (Vol. 16).
- Mustansar, H. C., & Nuzhat, S. (2022). *Mining Industry Source reduction and waste minimization in the mining industries*.
- Nassar, N. T., Graedel, T. E., & Harper, E. M. (2015). By-product metals are technologically essential but have problematic supply. *Science Advances*, 1(3). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1400180>
- NégaWatt. (2022). *Le scénario en détail - 2022*. <https://negawatt.org/Scenario-negaWatt-2022>
- NF EN 15804+A2 (CN). (2022). *NF EN 15804+A2 (CN)*. <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-15804-a2-cn/contribut...>

- NF EN 15804/CN. (2016). *NF EN 15804/CN: Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction - Complément national à la NF EN 15804+A1*.
https://www.steico.com/fileadmin/user_upload/importer/downloads/umwelt-produktdeklaration_epd/Approved_iqc_2021_12-06_STEICO_Annex_FR_STEICO_joist_v03_final-1.pdf
- OCDE. (2013). *Moving towards a Common Approach on Green Growth Indicators*.
- Ohms, P., Andersen, C. E., Rasmussen, F. N., Ryberg, M., Hauschild, M., Birkved, M., & Birgisdottir, H. (2019). Assessing buildings' absolute environmental sustainability performance using LCA focusing on climate change impacts. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 352(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/352/1/012058>
- ONU. (2019). *La recherche de solutions pour l'extraction de sable durable a débuté*.
- ONU. (2022). *Notre utilisation du sable nous met le dos au mur, avertit le PNUE*.
- Orée, & CSTB. (2021). *Guide orée*. <http://www.oree.org/actualites-actions/actions-economie-circulaire.html>
- Pearce, D. W., & Turner, R. K. (1989). *Economics of Natural Resources and the Environment*. <https://www.jstor.org/stable/3146419>
- Persson, L., Carney Almroth, B. M., Collins, C. D., Cornell, S., de Wit, C. A., Diamond, M. L., Fantke, P., Hassellöv, M., MacLeod, M., Ryberg, M. W., Søggaard Jørgensen, P., Villarrubia-Gómez, P., Wang, Z., & Hauschild, M. Z. (2022). Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities. *Environmental Science and Technology*, 56(3), 1510–1521. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04158>
- Prior, T., Giurco, D., Mudd, G., Mason, L., & Behrisch, J. (2011). *Resource depletion , peak minerals and the implications for sustainable resource management*. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.08.009>
- Queheille, E. (2019). *Economie Circulaire et conception d'Outil d'Optimisation de la stratégie de gestion des Déchets de Déconstruction* [Thèse].
- Ren, Z., Jiang, M., Chen, D., Yu, Y., Li, F., Xu, M., Bringezu, S., & Zhu, B. (2022). Stocks and flows of sand, gravel, and crushed stone in China (1978–2018): Evidence of the

- peaking and structural transformation of supply and demand. *Resources, Conservation and Recycling*, 180. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106173>
- Ricky J., L. (2009). *Creating a Practical Legal Framework for the Commercial Exploitation of Mineral Resources in Outer Space*.
- Rockström, J. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*. <https://www.nature.com/articles/461472a>
- Rodriguez, J., Monfort, D., Bazzana, M., Schiopu, N., Bonnet, R., Sement, N., & Chevalier, J. (2016). *Développements méthodologiques OVALEC - Économie Circulaire pour les flux matériaux / déchets de bâtiment*. <https://ovalec.dimn-cstb.fr/>
- Ruddiman, W. F. (2013). The anthropocene. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 41, 45–68. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-050212-123944>
- Ryberg, M. W., Andersen, M. M., Owsianiak, M., & Hauschild, M. Z. (2020). Downscaling the planetary boundaries in absolute environmental sustainability assessments – A review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 276). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123287>
- Ryberg, M. W., Owsianiak, M., Richardson, K., & Hauschild, M. Z. (2016). Challenges in implementing a Planetary Boundaries based Life-Cycle Impact Assessment methodology. *Journal of Cleaner Production*, 139, 450–459. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.074>
- Ryberg, M. W., Owsianiak, M., Richardson, K., & Hauschild, M. Z. (2018a). Development of a life-cycle impact assessment methodology linked to the Planetary Boundaries framework. *Ecological Indicators*, 88(December 2017), 250–262. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.065>
- Ryberg, M. W., Owsianiak, M., Richardson, K., & Hauschild, M. Z. (2018b). Development of a life-cycle impact assessment methodology linked to the Planetary Boundaries framework. *Ecological Indicators*, 88(December 2017), 250–262. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.065>
- Rybicka, H. E. (1996). Impact of mining and metallurgical industries on the environment in Poland. In *Applied Geochemistry* (Vol. 11).
- Sala, S., Crenna, E., Secchi, M., & Sanyé-Mengual, E. (2020). Environmental sustainability of European production and consumption assessed against planetary boundaries.

Journal of Environmental Management, 269(June 2019).
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110686>

Salopek, P. (2019). *Inside the deadly world of India's sand mining mafia*.

Samson, S. (2010). *Les « trésors méconnus » de l'Afrique subsaharienne française* (pp. 385–391). <https://doi.org/10.3917/droz.feier.2010.01.0385>

Schneider, L., Berger, M., & Finkbeiner, M. (2011). The anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP) as a new parameterisation to model the depletion of abiotic resources. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(9), 929–936. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0313-7>

Schneider, L., Berger, M., & Finkbeiner, M. (2015). Abiotic resource depletion in LCA—background and update of the anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP) model. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(5), 709–721. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0864-0>

Schneider, L., Berger, M., Schüler-Hainsch, E., Knöfel, S., Ruhland, K., Mosig, J., Bach, V., & Finkbeiner, M. (2014). The economic resource scarcity potential (ESP) for evaluating resource use based on life cycle assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(3), 601–610. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0666-1>

Schrijvers, D., Hool, A., Blengini, G. A., Chen, W. Q., Dewulf, J., Eggert, R., van Ellen, L., Gauss, R., Goddin, J., Habib, K., Hagelüken, C., Hirohata, A., Hofmann-Antenbrink, M., Kosmol, J., Le Gleuher, M., Grohol, M., Ku, A., Lee, M. H., Liu, G., ... Wäger, P. A. (2020). A review of methods and data to determine raw material criticality. In *Resources, Conservation and Recycling* (Vol. 155). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104617>

SEDDR, & ADEME. (2020). *Etude sur les pratiques de tri sur les chantiers de déconstruction*. www.ademe.fr/mediatheque

SEDDRe. (2019). *Empreinte carbone de la valorisation des déchets du bâtiment en France*. <https://seddre.fr/media/empreinte-carbone-de-la-valorisation-des-dechets-du-batiment-en-france-rapport-technique-vd.pdf>

Sengupta, M. (2021). *Environmental Impacts of Mining: Monitoring, Restoration and Control*.

- Sibiude, G., & Vesson, M. (2017). *Projet COMPAMODES: Etudes de sensibilité et paramétriques de l'ACV bâtiment*. <https://librairie.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/1815-etude-de-sensibilite-et-parametriques-de-l-acv-batiment.html>
- Sonderegger, T., Berger, M., Alvarenga, R., Bach, V., Cimprich, A., Dewulf, J., Frischknecht, R., Guinée, J., Helbig, C., Huppertz, T., Jolliet, O., Motoshita, M., Northey, S., Rugani, B., Schrijvers, D., Schulze, R., Sonnemann, G., Valero, A., Weidema, B. P., & Young, S. B. (2020). Mineral resources in life cycle impact assessment—part I: a critical review of existing methods. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(4), 784–797. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01736-6>
- Sreebha, S., & Padmalal, D. (2011). Environmental impact assessment of sand mining from the small catchment rivers in the Southwestern Coast of India: A case study. *Environmental Management*, 47(1), 130–140. <https://doi.org/10.1007/s00267-010-9571-6>
- Stahel, W. (2016). *Circular economy*. <https://www.nature.com/articles/531435a>
- Stanford Encyclopedia of Philosophy. (2006). *Colonialism*.
- Steen, B. (2014). *A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS)*. December. <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Systematic-Approach-to-Environmental-Priority-in-Steen/987f1b3dfc47c7d02e0c3d8d072b6de7af9b706d>
- Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O., & Ludwig, C. (2015). The trajectory of the anthropocene: The great acceleration. In *Anthropocene Review* (Vol. 2, Issue 1, pp. 81–98). SAGE Publications Inc. <https://doi.org/10.1177/2053019614564785>
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., De Vries, W., De Wit, C. A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G. M., Persson, L. M., Ramanathan, V., Reyers, B., & Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223). <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- Stewart, M., & Weidema, B. (2005). *A Consistent Framework for Assessing the Impacts from Resource Use A focus on resource functionality*. 10(1996), 240–247. <https://link.springer.com/article/10.1065/lca2004.10.184>

- Swart, P., & Dewulf, J. (2013). Quantifying the impacts of primary metal resource use in life cycle assessment based on recent mining data. *Resources, Conservation and Recycling*, 73, 180–187. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.02.007>
- SystExt. (2021). *Controverses minières: pour en finir avec certaines contrevérités sur la mine et les filières minérales*. www.systext.org
- Tahira Elias-Ozkan, S. (2014). *Demolition versus Deconstruction: Impacts of fenestration Disposal in Building Renovation projects* (Vol. 39, Issue 1). <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/OHI-01-2014-B0006/full/html>
- Thomsen, A., Schultmann, F., & Kohler, N. (2011). Deconstruction, demolition and destruction. In *Building Research and Information* (Vol. 39, Issue 4, pp. 327–332). <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.585785>
- Tirado, R. (2022). *Contribution to the development of a model for the analysis of stocks and flows of waste materials from buildings at a territorial scale* [Thèse]. <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/590565>
- Tirado, R., Laurenceau, S., Thorel, M., Louërat, M., & Habert, G. (2021). Component-Based Model for Building Material Stock and Waste-Flow Characterization: A Case in the Île-de-France Region. *Sustainability (Switzerland)*. <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/23/13159>
- Toniolo, H., & Schultz, J. (2005). Experiments on sediment trap efficiency in reservoirs. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 10(1), 13–24. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1770.2005.00256.x>
- Valero, A., & Valero, A. (2015). Thermodynamic rarity and the loss of mineral wealth. *Energies*, 8(2), 821–836. <https://doi.org/10.3390/en8020821>
- Van den Avenne, C. (2021). Colonialisme. *Langage et Société, Hors série(HS1)*, 47–50. <https://doi.org/10.3917/l.s.hs01.0048>
- van Oers, L., de Koning, A., Guinée, J. B., & Huppes, G. (2002). Abiotic Resource Depletion in LCA: Improving characterisation factors for abiotic resource depletion as recommended in the new Dutch LCA Handbook. *Road and Hydraulic Engineering Institute, June*, 1–75. https://books.google.co.uk/books?id=uvYOnQEACAAJ%0Ahttps://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/projects/lca2/report_abiotic_depletion_web.pdf

- Vargas-Gonzalez, M., Witte, F., Martz, P., Gilbert, L., Humbert, S., Jolliet, O., van Zelm, R., & L'Haridon, J. (2019). Operational Life Cycle Impact Assessment weighting factors based on Planetary Boundaries: Applied to cosmetic products. *Ecological Indicators*, 107. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105498>
- Ventura, A. (2014). *Approches systémiques et éco-conception Une réflexion sur les fondements conceptuels et les applications de l'Analyse de Cycle de Vie*. <https://hal.science/tel-01009234/>
- Veraart, F. (2019). Land or lakes: Gravel excavation in Dutch spatial and resources policies through the lens of sustainability developments, 1950–2015. *Land Use Policy*, 82(December 2018), 367–374. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.12.023>
- Vidal, O., Rostom, F., François, C., & Giraud, G. (2017). Global trends in metal consumption and supply: The raw material-energy nexus. *Elements*, 13(5), 319–324. <https://doi.org/10.2138/gselements.13.5.319>
- Vieira, M. D. M., Goedkoop, M. J., Storm, P., & Huijbregts, M. A. J. (2012). Ore grade decrease as life cycle impact indicator for metal scarcity: The case of copper. *Environmental Science and Technology*, 46(23), 12772–12778. <https://doi.org/10.1021/es302721t>
- Vieira, M. D. M., & Huijbregts, M. A. J. (2018). Comparing mineral and fossil surplus costs of renewable and non-renewable electricity production. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(4), 840–850. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1335-6>
- Vieira, M. D. M., Ponsioen, T. C., Goedkoop, M. J., & Huijbregts, M. A. J. (2016). Surplus cost potential as a life cycle impact indicator for metal extraction. *Resources*, 5(1). <https://doi.org/10.3390/resources5010002>
- Vieira, M. D. M., Ponsioen, T. C., Goedkoop, M. J., & Huijbregts, M. A. J. (2017). Surplus Ore Potential as a Scarcity Indicator for Resource Extraction. *Journal of Industrial Ecology*, 21(2), 381–390. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jiec.12444>
- Vörösmarty, C. J., Meybeck, M., Fekete, B., Sharma, K., Green, P., & Syvitski, J. P. M. (2003). Anthropogenic sediment retention: Major global impact from registered river impoundments. *Global and Planetary Change*, 39(1–2), 169–190. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(03\)00023-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(03)00023-7)

- Wang-Erlandsson, L., Tobian, A., van der Ent, R. J., Fetzer, I., te Wierik, S., Porkka, M., Staal, A., Jaramillo, F., Dahlmann, H., Singh, C., Greve, P., Gerten, D., Keys, P. W., Gleeson, T., Cornell, S. E., Steffen, W., Bai, X., & Rockström, J. (2022). A planetary boundary for green water. In *Nature Reviews Earth and Environment* (Vol. 3, Issue 6, pp. 380–392). Springer Nature. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00287-8>
- Weidema, B. P., Wesnae, M., Hermansen, J., Kristensen, I., & Halberg, N. (2008). Environmental improvement potentials of meat and dairy products. In *SciencesNew York* (Vol. 23491, Issue JCR 46650). <https://doi.org/10.2791/38863>
- Wenzel, H., Hauschild, M. Z., Alting, L., & Overcash, M. (1997). Environmental assessment of products. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 4, 6. <https://link.springer.com/book/9780412808005>
- Yossapol, C., Axe, L., Watts, D., Caudill, R., Dickinson, D., & Mosovsky, J. (2002). *Carrying Capacity Estimates For Assessing Environmental Performance And Sustainability*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1003234>

Annexe 2.1 les équations de mots-clés ayant servies à la revue systématique de la bibliographie

Dans cet annexe sont résumés les équations de mots-clés utilisées pour mener la revue systématique de la littérature. Nous avons établi ces équations de mots-clés en combinant les mots-clés identifiés pour chaque axe de recherche et en utilisant des opérateurs logiques.

Research axis combination	Keywords equation
Mineral and metallic resources AND LCA	(Mineral and metallic resources OR Critical resources OR Abiotic resources OR Reserves OR Depletion OR Raw materials OR Resource use OR Minerals OR Metals) AND (Impact Assessment OR Criticality OR Indicator OR Life cycle assessment OR Life cycle assessment-based indicator OR Life cycle impact assessment)
Mineral and metallic resources AND Building sector	(Mineral and metallic resources OR Critical resources OR Abiotic resources OR Reserves OR Depletion OR Raw materials OR Resource use OR Minerals OR Metals) AND (Construction OR Building OR Building performance OR Building standards OR Building certifications OR Building stakeholders)
Mineral and metallic resources AND AESA	(Mineral and metallic resources OR Critical resources OR Abiotic resources OR Reserves OR Depletion OR Raw materials OR Resource use OR Minerals OR Metals) AND (AESA OR Absolute evaluation OR Threshold OR Absolute assessment OR Target OR Absolute sustainability OR Carrying capacity OR Consumption patterns OR Sustainable development goals OR Sustainable development OR Acceptable environmental burden OR Science-based targets OR Planetary boundaries)
Mineral resources AND LCA AND Building sector	(Mineral and metallic resources OR Critical resources OR Abiotic resources OR Reserves OR Depletion OR Raw materials OR Resource use OR Minerals OR Metals) AND (Impact Assessment OR Criticality OR Indicator OR Life cycle assessment OR Life cycle assessment-based indicator OR Life cycle impact assessment) AND (Construction OR Building OR Building performance OR Building standards OR Building certifications OR Building stakeholders)
Mineral resources AND LCA AND AESA	(Mineral and metallic resources OR Critical resources OR Abiotic resources OR Reserves OR Depletion OR Raw materials OR Resource use OR Minerals OR Metals) AND (Impact Assessment OR Criticality OR Indicator OR Life cycle assessment OR Life cycle assessment-based indicator OR Life cycle impact assessment) AND (AESA OR Absolute evaluation OR Threshold OR Absolute assessment OR Target OR Absolute sustainability OR Carrying capacity OR Consumption patterns OR Sustainable development goals OR Sustainable development OR Acceptable environmental burden OR Science-based targets OR Planetary boundaries)

Mineral resources AND Building sector AND AESA	(Mineral and metallic resources OR Critical resources OR Abiotic resources OR Reserves OR Depletion OR Raw materials OR Resource use OR Minerals OR Metals) AND (Construction OR Building OR Building performance OR Building standards OR Building certifications OR Building stakeholders) AND (AESA OR Absolute evaluation OR Threshold OR Absolute assessment OR Target OR Absolute sustainability OR Carrying capacity OR Consumption patterns OR Sustainable development goals OR Sustainable development OR Acceptable environmental burden OR Science-based targets OR Planetary boundaries)
--	--

Annexe 5.1 La nomenclature Produits De Construction de la méthode MiMOSA

Ici est détaillée la nomenclature PDC, relative aux produits de construction considérée dans la méthode MiMOSA. Elle a été basée sur la nomenclature produit TyPy et améliorée pour prendre en compte tous les besoins de la maison individuelle considérée dans l'étude de cas. Elle se compose de trois niveaux, un niveau relatif au macro-composant, un au composant et un dernier à la famille de matériau du produit de construction.

Macro-composant	Composant	Famille de matériau	UF
Bloc baie	Bloc baie double	Acier	m ²
Bloc baie	Bloc baie double	Aluminium	m ²
Bloc baie	Bloc baie double	Bois	m ²
Bloc baie	Bloc baie double	Bois-aluminium	m ²
Bloc baie	Bloc baie double	PVC	m ²
Bloc baie	Bloc baie simple	Aluminium	m ²
Bloc baie	Bloc baie simple	Bois	m ²
Bloc baie	Bloc baie simple	Bois-aluminium	m ²
Bloc baie	Bloc baie simple	PVC	m ²
Bloc baie	Bloc baie triple	Bois	m ²
Bloc baie	Bloc baie triple	Bois-aluminium	m ²
Cloison	Cloison vitrée	Acier	m ²
Cloison	Cloison vitrée	Aluminium	m ²
Cloison	Cloison vitrée	Bois	m ²
Cloison	Cloison vitrée	Bois-aluminium	m ²
Cloison	Cloison vitrée	PVC	m ²

Elément de structure	Poutrelle	Acier	m
Elément de structure	Poutrelle	Béton précontraint	m
Elément de structure	Béton de structure courante	Béton	m3
Elément de structure	Armature métallique	Acier	kg
Escalier	Escalier droit	Aluminium	m
Escalier	Escalier droit	Béton armé	m
Escalier	Escalier droit	Pierre naturelle	m
Escalier	Escalier hélicoïdal	Béton armé	m
Fenêtre	Fenêtre double	PVC	m ²
Fenêtre	Fenêtre double	acier	m ²
Fenêtre	Fenêtre double	aluminium	m ²
Fenêtre	Fenêtre double	bois	m ²
Fenêtre	Fenêtre double	bois-aluminium	m ²
Fenêtre	Fenêtre simple	bois	m ²
Fenêtre	Fenêtre triple	bois	m ²
Fenêtre	Fenêtre triple	bois-aluminium	m ²
Fondation	Béton de propreté	Béton	m3
Fondation	Béton de semelle	Béton	m3
Isolant	Isolant intérieur, Isolant extérieur	laine de roche	m ²
Isolant	Isolant intérieur, Isolant extérieur	laine de verre	m ²
Mur	Mur extérieur, Mur intérieur	Béton	m ²
Mur	Mur extérieur, Mur intérieur	Pierre de taille	m ²
Mur	Mur extérieur, Mur intérieur	Pierre moellon	m ²
Mur	Mur extérieur, Mur intérieur	Terre cuite	m ²
Mur	Voile en béton	Béton armé	m ²

Plafond, Cloison	Plaque	Plâtre	m ²
Plafond, Cloison	Rail	Acier	m
Plancher	Chape	Béton	m ²
Plancher	Hourdis alvéolés	Terre cuite	m ²
Plancher	Dalle	Béton armé	m ²
Plancher	Béton de rives	Béton	m ³
Plancher	Treillis métallique	Acier	kg
Plancher	Chape flottante	Béton	m ²
Plancher	Entrevous	Béton	m ²
Porte	Porte extérieure	Bois	m ²
Porte	Porte extérieure	Verre, Bois	m ²
Porte	Porte intérieure	Bois	m ²
Revêtement	Sol	Béton	m ²
Revêtement	Sol, Mur extérieur, Mur intérieur	Carreaux de céramique	m ²
Revêtement	Sol, Mur extérieur, Mur intérieur	Mosaïque de céramique	m ²
Revêtement	Sol, Mur extérieur, Mur intérieur	Pierre de taille	m ²
Revêtement	Sol, Mur extérieur, Mur intérieur	Pierre naturelle	m
Revêtement	Sol, Mur extérieur, Mur intérieur	Terre cuite	m ²
Revêtement	Toit	Ardoise	m ²
Revêtement	Toit	Terre cuite	m ²
Revêtement	Sol, Mur extérieur, Mur intérieur, Toit	Zinc	m ²
Revêtement	Mortier	enduit minéral	m ²
Toit	Couverture en bac acier	Acier	m ²

Annexe 5.2 Questionnaire de l'enquête menée auprès des acteur·rice·s du réemploi et du recyclage

Ce questionnaire a été utilisé pour mener une enquête auprès des acteur·rice·s du réemploi et du recyclage afin d'estimer les taux de valorisation des différents matériaux issus de la déconstruction. Les enquêtes ont été majoritairement réalisées avec un entretien téléphonique mené par Sarah Clavier, en stage dans le cadre de cette thèse. Deux visites ont été effectuées par Sarah et moi chez des acteur·rice·s du réemploi et de recyclage dans l'Isère.

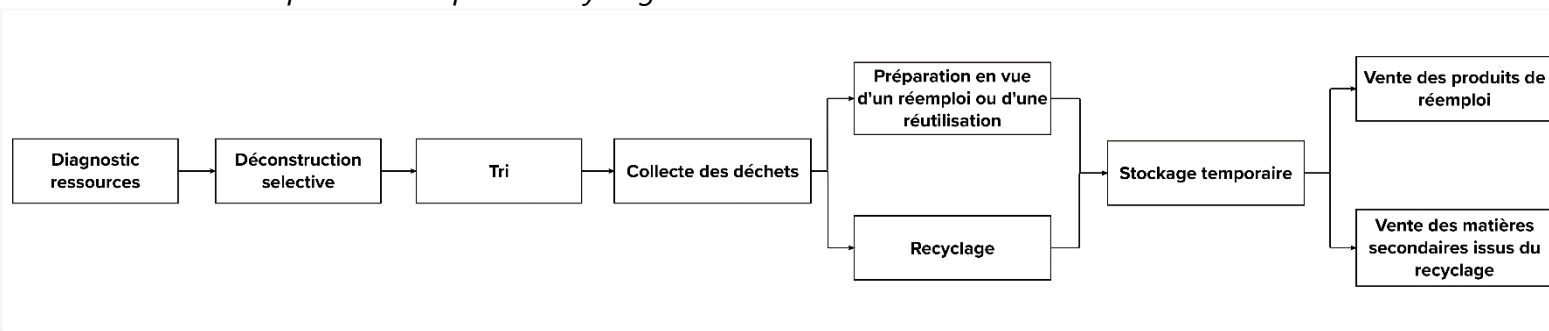
Questionnaire

- Questions générales :

Quelle est la date de création de l'entreprise ?

Quelles sont vos principales activités ?

A quel moment intervenez-vous ? Pendant le chantier de démolition ou après ? Réemploi ? Recyclage ?



Quels matériaux recevez-vous sur votre site ?

- | | |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> Briques en terre cuite | <input type="checkbox"/> Gravier |
| <input type="checkbox"/> Tuiles en terre cuite | <input type="checkbox"/> Béton |
| <input type="checkbox"/> Céramique | <input type="checkbox"/> Laine minérale (de verre et de roche) |
| <input type="checkbox"/> Pierre naturelle | <input type="checkbox"/> Plâtre |
| <input type="checkbox"/> Ardoise | |

Fenêtres et portes vitrées

Autres :

Les déchets reçus proviennent de quels secteurs ?

Bâtiment

Travaux publics

Autres :

Êtes-vous implantés seulement en IDF ou ailleurs en France ?

IDF

Ailleurs :

En IDF,

Actuellement quel est le rayon de provenance/d'approvisionnement des déchets (en km) ?

Quel est le rayon d'export des produits/ matières premières secondaires à l'issus de la valorisation (en km) ?

Avez-vous une idée des périmètres idéaux (en km) ?

- Questions spécifiques aux produits pris en charge

Pour les taux de valorisation : Comment sont-ils calculés ? Qu'est-ce-qui est pris en compte ?

Type de déchets	Taux de réemploi	Taux de recyclage	Usages	Quantité récupérée VS quantité vendue	Que faire des invendus ?	Obstacles à la valorisation	Obstacles techniques (économique, assurance)
Briques en terre cuite							
Tuiles en terre cuite							
Céramique (carrelage et plinthe)							
Pierre naturelle (murs)							
Tuiles en ardoise							
Béton*							
Laine minérale (verre et roche)							
Plâtre (plaque, carreaux, enduit)							
Fenêtres (et portes vitrées ext)							

**les murs (en béton de mâchefer, en voile béton (armé), en bloc de béton, en panneau préfabriqué en béton, en bloc de béton pleins, en béton cellulaire, en panneau sandwich), les poteau et poutre de structure en béton armé, les poutrelles en béton précontraint, houris en béton, dalle en béton armé, chape béton et mortier à base de ciment ainsi que les bétons pour fondations.*

Commentaires :

Quelle est la durée de vie d'un produit issue du réemploi ?

Dans quelle mesure la pollution des produits est un problème pour le réemploi/ le recyclage ? Y-a-t-il la possibilité de décontaminer les produits ? Ou du moment où ils sont pollués, ils sont envoyés en enfouissement ?

Après avoir été orienté dans une filière de réemploi et que le produit n'en respecte pas les conditions, y-a-t-il besoin de refaire un tri sur l'état des produits ? pollution etc.. ? pour qu'il soit recyclé ?

Procédés de recyclage

Le recyclage des granulats/terre cuite pour la fabrication de béton est-elle viable environnementalement parlant ? Selon les dire d'un expert c'est un procédé compliqué, quel est votre avis ?

Il y a-t-il d'autres procédés énergivores qui sont techniquement faisable mais mauvais d'un point de vue environnemental ?

- **Questions plus détaillées et spécifiques à chaque matériau :**

Briques en terre cuite

Avez-vous une idée du potentiel de recyclage des briques creuses (séparation de l'enduit ?) ? Une idée des chiffres ?

Une seule filière de valorisation des briques plâtrières en France, avez-vous une idée à quelle point le procédé est efficace ? Avez-vous une idée de la raison pour laquelle la filière ne s'est pas encore généralisée en France ?

Tuiles en terre cuite

Est-ce qu'une tuile pour couverture de toit est différente d'une tuile pour bardage ? Peut-on utiliser une tuile de manière indifférente pour ces deux usages ?

Céramique (carrelage et plinthe)

Il y-a-t-il beaucoup de carrelage émaillé dans les carrelages (en céramique)? Si oui, quel est le potentiel de réemploi des carreaux émaillés par rapport à ceux qui ne le sont pas ?

(Le carrelage contaminé au plomb (peinture rouge de Prusse), que peut-on en faire ? Décontamination possible ?)

Pierre naturelle (pierre de taille et moellon pour murs) :

Les pierres des murs peuvent-elles être récupérées ? D'après la documentation il semblerait que oui mais que ce n'est pas une pratique courante (part avec les gravats) et qu'elles sont généralement utilisées pour construire des murets ? Le réemploi dans

la construction de mur ne se fait pas car il y a une trop faible demande (coût très élevés de construction en pierre)? Ou un problème technique (pollution des pierres ?) ?

Ardoise (tuiles et bardage)

Quel est le potentiel de réemploi / recyclage des tuiles en ardoises ?

Est-ce qu'il vous semble correcte de supposer que les ardoises et les tuiles en terre cuite ont les mêmes taux de valorisation ?

Béton :

Quel est le potentiel de réemploi/ réutilisation du béton ? (Voile en béton, poteaux, poutres, planchers, dalles)

Quel est le taux de recyclage du béton ? Certaines sources indiquent 90% environ.

Laine minérale :

Les acteurs du réemploi préconisent de ne conserver que les laines de verre ayant été produites après 2000 pour des raisons performancielle plus adaptées à la réglementation actuelle. Les acteurs du recyclage n'acceptent que ces dernières également, pourquoi ?

Retrouvez-vous plus de laine de roche ou de laine de verre dans les déchets de déconstruction/rénovation ?

Est-ce que les deux laines minérales ont les mêmes taux de valorisation ?

Plâtre :

Quels sont les usages secondaires possible de la réutilisation des plaques ou des carreaux de plâtre si le réemploi n'est pas possible ? (Si non évoqué dans le tableau plus haut)

Fenêtres et portes :

Projet autour de la réutilisation des fenêtres : serres, kit de jardinage, tréteaux. Il y-a-t-il un intérêt à cette réutilisation ? Un besoin de serres importants ?

Le réemploi des portes vitrées extérieures est-elle aussi limitée que pour les fenêtres ?
(Réglementation thermique...)

Reprenez-vous les fenêtres qui peuvent être utilisées dans un contexte où l'isolation thermique n'est pas obligatoire ? (Ex : cabane de jardin...)

A partir de quelle année de fabrication est-il intéressant de réemployer une fenêtre ?

Pour les fenêtres ou les portes, (peu importe l'année de fabrication) est-il possible de récupérer les poignées et la quincaillerie pour les réemployer sur d'autres produits plus récents ?

Annexe 5.3 Rapport des entretiens auprès des acteur·rice·s du réemploi et du recyclage

Suite aux entretiens, un rapport détaillant les réponses au questionnaire fournies par les acteur·rice·s sollicité·e·s a été effectué par Sarah Clavier et est mis à disposition dans cet annexe.

Les acteur·rice·s rencontré·e·s :

Noms	Acteur/actrice rencontré.e	Localisation	Année de création	Type de valorisation	Activités	Principaux matériaux de leurs activités
ECOMAT38	Bruno Jalabert, Tsah Yahav, Cécile Magnin-Feysot	AURA	2015	Réemploi	Association de réemploi , ECOMAT38 est un pôle de l'association Aplomb (réalise des formations pour l'écoconstruction et de restauration du patrimoine). ECOMAT38 s'inscrit dans de nombreuses étapes nécessaires au réemploi : diagnostic ressources ; déconstruction sélective ; transport du chantier jusqu'à leur plateforme de reconditionnement ; vente des produits secondaires.	L'idée : prendre tout ce qui peut être intéressant (gros œuvre et second œuvre) . Sur leur site on a pu voir : Tuiles en terre cuite, carreaux de revêtement de sol, fenêtres, pierres naturelles (murs), sanitaires, luminaires, peinture, chemins de câble, poutres en bois...
Backacia	Adèle Vanhecke	IDF	2017	Réemploi	Activité la plus connue : leur MARKETPLACE (met en relation des professionnels avec des professionnels seulement) Autre activités : AMO Réemploi (suivi opérationnel, bilan, accompagnement), formation (auprès d'école, de maître d'ouvrage...): Diagnostic Ressources Réemploi, commercialisation des matériaux éligibles au réemploi, suivi opérationnel des récupérations, fourniture de bordereaux de traçabilité , bilan économique et environnemental . Ils travaillent donc en flux tendus avec les chantiers : Backacia se cale sur les plannings des chantiers. Aucun reconditionnement fait par leurs équipes.	Majoritairement du second œuvre provenant des bâtiments tertiaires et des logements d'IDF. Luminaires, sanitaires, revêtement de sol intérieur et toiture, portes et cloisons intérieures, plâtre et du mobilier.
Cycle Up	Hugo bonnet	IDF	2018	Réemploi	- Etude de conseil, diagnostic ressources (déconstruction, construction, rénovation) ex situ	De tout sur la Marketplace :Tuiles, Céramique, Laine

					<p>ou in situ. AMO – AMOE Réemploi et économie circulaire</p> <ul style="list-style-type: none"> - Plateformes : « l'entrepôt du réemploi », reconditionnement avec plusieurs types de plateforme de reconditionnement et stockage. L'objectif est d'en avoir 12, aujourd'hui 2 sont ouvertes. - Marketplace pour vendre et acheter (comme Backacia) : mettre en relation des preneurs et repreneurs - Etude de gestion des flux de matériaux à différentes échelles. - Module permettant d'importer une maquette BIM dans un module, et visualisez rapidement l'ensemble des matériaux de réemploi disponibles sur Cycle Up correspondant aux objets de la maquette - Formations 	<p>minérale, Plâtre, Fenêtres et portes vitrées...</p>
Elan (Bouygues)	Isaure Fraissinet	IDF + Agences ailleurs en France : 8 en tout, la plus grosse partie est en IDF	Démarrage des activités de génie écologique: 2009	Réemploi	<p>Bureau de conseil en immobilier durable, deux grands pôles : MOE et focus d'expert (conseil en immobilier durable, expert en bas carbone, diversité, énergie, Economie Circulaire...).</p> <p>Facilitateur d'économie circulaire, Le pôle EC fait :</p> <ul style="list-style-type: none"> - AMO, ELAN conseille sur 3 choses : La déconstruction sélective ; accompagnement pour concevoir l'ouvrage de façon durable ; Assistant stratégie en EC au niveau des directeurs qui peuvent choisir de mettre l'EC au centre de leur chantier. - Chercher acheteurs ou vendeurs/fournisseurs auprès de filières de réemploi. - Diagnostic PEMD - ELAN aide des filières à développer des processus de reconditionnement. Dans quelque temps, sera créé un endroit où ils aimeraient faire du reconditionnement (accueillir des reconditionneurs, hébergement). Spécifique sur 5 lots (peinture, sanitaire, faux planchers, carrelage, ?) 	<p>Que du conseil donc traite les demandes des clients : gros œuvre et second œuvre</p>
Nantet	M. Esteves	AURA	1989	Centre de tri/Recyclage	<p>Principale activité : préparateur de matières premières secondaires des déchets du BTP. Autres offres de services : Déconstruction sélective ; gestion de déchetteries professionnelles ; gestion des déchets ; éco chantiers ; collecte et valorisation des déchets. Après la déconstruction sélective, les</p>	<p>Bois (40kt/an), plâtre (avec complexe isolant, briques plâtrières) (40kt/an), DIB (40kt/an), ferraille, amiante, DEEE</p>

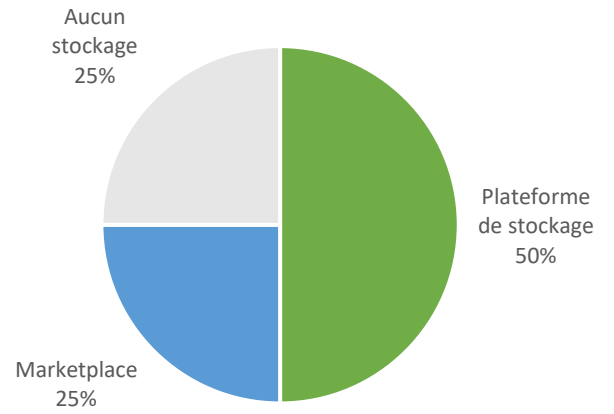
					équipes de Nantet envoient certains produits encore en bon état à Enfin Réemploi .	
Remix réemploi	Morgan Moinet	IDF	2019	Réemploi	<ul style="list-style-type: none"> - AMO : Aide la maîtrise d'ouvrage à monter des opérations de réemploi - Leur cœur de métier : la maîtrise d'œuvre : étude technique liée au réemploi, participation à la conception des ouvrages, intégrations de sujets réemploi dans les ouvrages (conception jusqu'à livraison des matériaux). Pas de Sourcing (aller chercher les produits issus du réemploi), ils décrivent les matériaux de réemploi et les inscrivent dans le projet et résolvent les problèmes qui peuvent rendre difficile le réemploi - Formation et information : cours, conférences, opère le média matériaux-réemploi.com <p>REMIX travaille sur plusieurs typologie d'opération : Construction neuve de logement, Construction ou Réhabilitation de lieux culturelles,</p>	Remix essaye de réemployer au maximum donc aucune limite sur les produits issus du réemploi. L'équipe a déjà travaillé avec : Laine minérales, fenêtres et portes, pierres naturelles, revêtements de sol extérieur, chauffages fonte et acier, sanitaires, lavabos, luminaires, mobilier, serrurerie...
Tricycle	Chloé Louis	IDF, besoin en province ; projet déployer en province	2009, création de Tricycle Environnement, puis Tricycle Office et en 2019 l'atelier Gepetto ainsi que Baticycle. Donc l'activité autour du réemploi commence véritablement entre 2009 et 2019 avec Tricycle Office.	Réemploi	<p>Plusieurs marques :</p> <p>Tricycle Environnement (Tri, vidage des sites, collecte) ; Tricycle Curage (dépose soignée du seconde œuvre) ; Magasin de réemploi Tricycle Office (vente de mobilier de bureau d'occasion) ; et magasin de réemploi Baticycle (revente de produits et équipements de construction) ; Gepetto (Upcycling des matières et matériaux en mobilier design).</p> <p>Ils ont également un atelier de reconditionnement (Redimensionnement et rénovation d'équipements et matériaux de construction par l'atelier pour Baticycle et Tricycle Office).</p> <p>Pas de diagnostic ressources.</p> <p>L'entrepôt fait 5000 m2</p> <p>Après le curage Tricycle peut envoyer en recyclage des matériaux grâce à des collaborations étroites avec leurs partenaires de recyclage certifiés et agréés.</p>	<p>Second œuvre (beaucoup de mobilier de bureau)</p> <p>Ce que Tricycle reprend le plus : Moquettes, plancher technique et équipement sanitaire.</p>
La ressourcerie du BTP (Vinci construction)	Aissi Sophia	IDF	2020	Réemploi	<p>Service proposés : dépose sélective, collecte, stockage puis recherche de repreneurs.</p> <p>4 catégories de matériaux issus du curage :</p> <p>-Les matériaux avec des filières de réemploi déjà identifiées : créer des partenariats avec les entités</p>	<p>Second œuvre (des bâtiments tertiaires principalement)</p> <p>La ressourcerie travaille sur le second œuvre. Mais Vinci à une entité</p>

				<p>repreneuses, en interne chercher les chantiers qui pourrait avoir ces types de matériaux et ceux qui pourraient accepter les produits issus du réemploi.</p> <p>-Les matériaux où il n’y a pas encore de filière : La ressourcerie du BTP essaie de les récupérer pour analyser le marché et ensuite cadrer les choses (délais, coût...). Une des filiales Vinci énergie a servi d’essai pour les chemins de câble : supervissations de toute la chaîne. Le but c’est de les faire passer en catégorie 1.</p> <p>-Pas d’intérêts qui se sont manifester, annonce sur des sites et si rien au moment du curage : curage classique.</p> <p>-Recyclage, ils récupèrent ce qu’ils ont déposé pour le remettre dans les chaînes de production</p> <p>La ressourcerie fait des formations en interne sur le réemploi.</p> <p>Ils ne travaillent qu’avec des professionnels et des associations du BTP.</p> <p>Plusieurs zones des stockages : une zone qui est dédiée à la ressourcerie du BTP ; d’autres en développement dans des zones qui appartiennent au groupe Vinci. Les équipes peuvent faire une remise en état (mais pas de reconditionnement avec certifications,...)</p>	<p>(Granulats +) pour la structure du bâtiment (récupère les gravats pour faire du béton).</p> <p>Le gros œuvre ce n’est pas le gros de la demande en IDF. Les réhabilitations sont très nombreuses.</p> <p>faux planchers, dalles, luminaires, radiateurs, robinetteries, chemins de câbles, menuiseries, parquets, moquettes, etc</p>
--	--	--	--	--	---

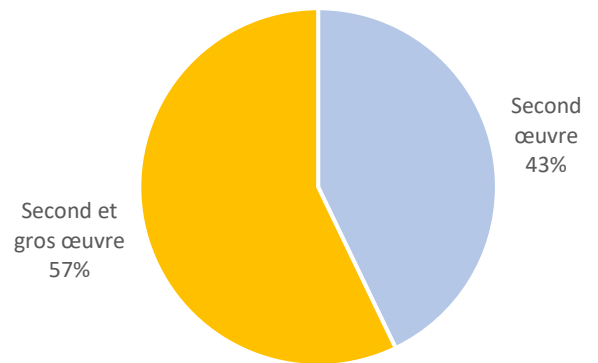
8 acteurs/actrices rencontrés dont **7** avec des activités autour du **réemploi** et **1** de **recyclage**.

6 en Ile-de-France et 2 en Auvergne Rhône Alpes.

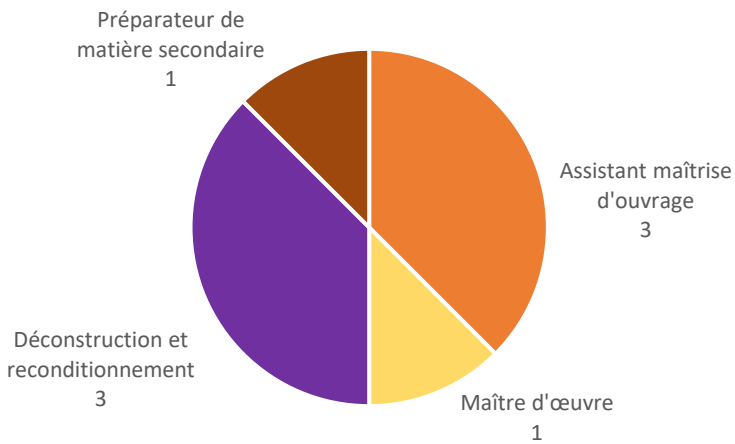
Types de gestion des produits de réemploi en sortie de chantier



Types de produits reçus/utilisés par les structures de réemploi contactées



Principale activité des structures contactées



Les échelles d'opérations des filières de valorisation :

Organisme	Actuellement quel est le rayon de provenance/d'approvisionnement des produits de réemploi (recyclage pour Nantet)?
ECOMAT38	Les chantiers sont principalement dans le département (notamment la métropole de Grenoble) mais parfois certains chantiers sont très intéressants (grosse demande, patrimoine, des produits vintage ou artistiques) ce qui peut justifier des transports plus lointains. ECOMAT38 peut être amené à travailler dans un autre département mais pas au-delà de la Région . Ils ont pu refuser des chantiers trop loin.
Backacia	Backacia couvre la France entière mais depuis leur site à Paris. Ils peuvent être appelé à intervenir en Bretagne, dans l'est : aucune limite en termes de géographie . Néanmoins Backacia est le plus sollicité en IDF .
Cycle Up	Pour import et export : Cycle Up a accès à l'adresse des acheteurs sur la Marketplace, or le problème étant que les acheteurs indiquent souvent l'adresse de leur siège social et non pas du chantier receveur. D'après eux, les produits du réemploi peuvent traverser la France
Elan (Bouygues)	Pour import et export : Globalement ELAN reste à proximité des chantiers de dépose. Les agences ELAN les plus proches peuvent s'échanger des produits. En IDF il y a beaucoup de demandes donc pas de soucis.
Nantet	Les déchets peuvent venir d'assez loin, ce sont les clients qui décident où les emmener. Typiquement, le site de Francin (38) peut recycler le plâtre lié à un complexe isolant ce qui ne se fait pas partout, de tels déchets peuvent donc être acheminés jusqu'au site depuis la suisse par exemple . Néanmoins, le transport de certains matériaux peut vite avoir un coût important (produits pondéreux) donc la collecte se fait quand même beaucoup en Savoie .
Remix réemploi	Pour import et export : Moins de 50km, max 100km
Tricycle	Leurs chantiers sont exclusivement en IDF . Les chantiers privilégiés sont les chantiers locaux . De manière générale : moins de 50km moins dans l'hyper centre de Paris en banlieue.
La ressourcerie du BTP (Vinci construction)	L'entrepôt est dans le 95. Les chantiers de déconstruction sont à 40-50km au centre de Paris (les projets sont toujours au même endroit : hyper centre de paris). Les bâtiments avec déconstructions sont des bâtiments tertiaires, donc souvent des bureaux ou établissements scolaires, qui se trouvent dans Paris intramuros. Le reste des chantiers (loin de Paris mais toujours en IDF) sont beaucoup plus rares. Dans des départements proches de Paris (93, 94) les surfaces sont plus faibles et c'est une autre filiale qui s'en occupe.

Organisme	Quel est le rayon d'export des produits/ matières premières secondaires à l'issus de la valorisation ?
ECOMAT38	Une fois la vente terminée, il est trop difficile de savoir exactement combien de kilomètres parcourent les produits réutilisés . Néanmoins, la clientèle locale est privilégiée et parfois certains acteurs nécessitant de grandes quantités sont livrés (Bretagne,...). Les produits uniques qui peuvent être utilisés pour le patrimoine ancien peuvent être recherchés plus loin. Cependant, les clients dont la demande est trop faible pour être écologiquement viable (ex : commande d'un seul interrupteur pour Strasbourg) voient leur achat refusé.
Backacia	Plus le produit va être rare, cher et attractif, plus ça vaut le coup d'aller le chercher loin. Mais généralement, sur leur fiche de traçabilité, les acheteurs viennent d'un rayon de 250 à 300km max .

Cycle Up	Pour import et export : Cycle Up a accès à l'adresse des acheteurs sur la Marketplace, or le problème étant que les acheteurs indiquent souvent l'adresse de leur siège social et non pas du chantier receveur. D'après eux, les produits du réemploi peuvent traverser la France
Elan (Bouygues)	Pour import et export : Globalement ELAN reste proche, les agences ELAN les plus proches peuvent s'échanger des produits. En IDF il y a beaucoup de demandes donc pas de soucis.
Nantet	Nantet envoie les matières secondaires principalement en Savoie (département) et un peu dans les départements voisins (plutôt échelle d'une région). En règle générale, la filière a besoin d'être réactive donc d'être proche de ses clients/fournisseurs ce qui privilégie la proximité géographique.
Remix réemploi	Moins de 50km, max 100km (import et export ensemble)
Tricycle	Les livraisons de Tricycle Office et Baticycle peuvent être dans toutes la France . Pour les livraisons en IDF Tricycle à sa propre flotte de véhicules. Si deux clients veulent la même chose, celui qui est le plus près est privilégié. Mais pour des gisements qui valent le coup ils s'autorisent à aller loin surtout si c'est pour éviter l'enfouissement.
La ressourcerie du BTP (Vinci construction)	Repreneurs souvent dans Paris même pour les bureaux ou établissements scolaires. A moins que ce soit un petit repreneur qui cherche lui-même des matériaux (quelques lots de luminaires, ...), qui peut se trouver à l'extérieur de Paris.

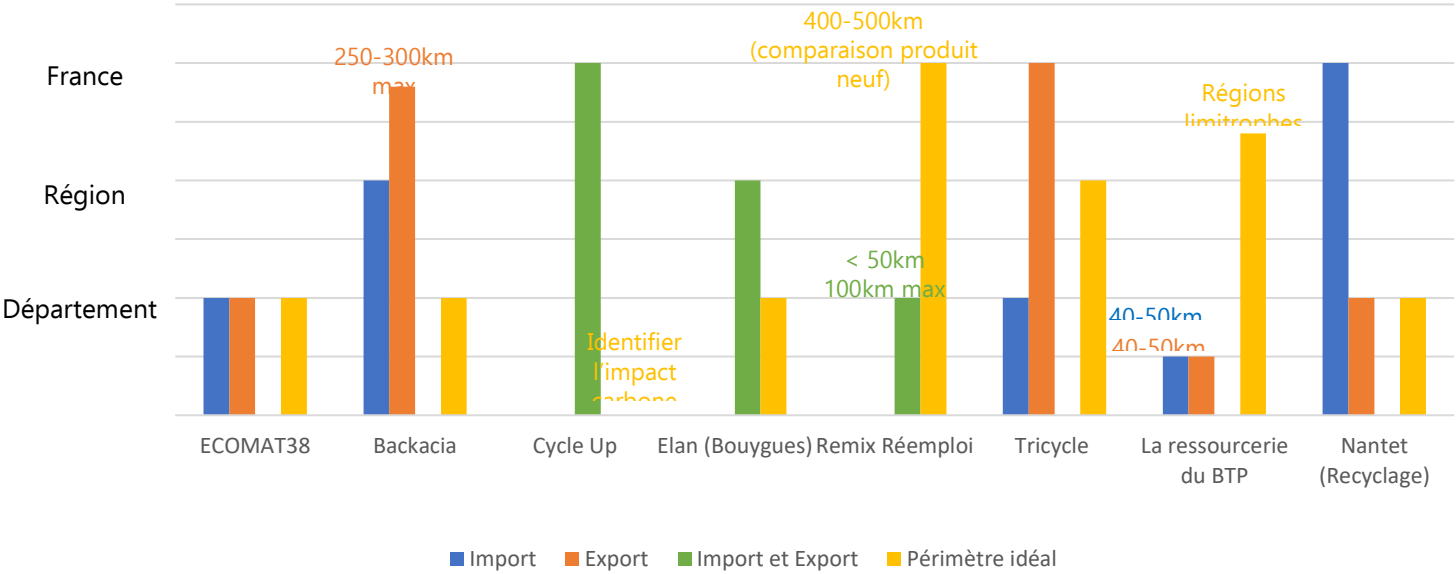
Organisme	Avez-vous une idée des périmètres idéaux (d'un point de vue environnemental) ?
ECOMAT38	Un maillage beaucoup plus fin doit être mis en place sur le territoire français (seulement 4 plateformes de stockage significatives en AURA) car ça n'a pas de sens d'envoyer des produits issus du réemploi plus loin que la région, le bilan environnemental n'est plus intéressant. Des points de stockage locaux (plus d'un par département) gérés par les régions seraient intéressants.
Backacia	Tout dépend de ce qui est demandé s'il faut faire un suivi de chantier complet à l'autre bout de la France ils le font mais si c'est deux appart non. Ils proposent, dans ce cas, la Marketplace. Ils se déplacent pour le diagnostic D'ailleurs sur la Marketplace, le rayon de provenance est presque nul (reste proche du chantier), c'est le professionnel qui dépose et qui stock, les acheteurs sont généralement des locaux.
Cycle Up	« On s'en contre moque » ; ce qui est important ce sont de connaître les volumes et les masses de matériaux transporté. Par exemple, pour les petites quantités aucun intérêt de faire un long transport, de plus grandes, si. L'idée est d'identifier l'impact carbone de ce transport.
Elan (Bouygues)	Dans le département. Trouver les distances critiques. Etudier pour chaque élément si je l'achète neuf quel est son impact ? Donc comparer le réemploi avec le neuf. Ex pierre mauvaise idée car il y a des carrières proches de Paris.
Nantet	Favoriser le local
Remix réemploi	L'ACV du produit neuf : l'impact surtout pendant le transport ou la production. Selon les matériaux ce n'est pas la même chose mais ça pourrait être proche de 400-500km en comparant avec le neuf.

	Pour les matériaux bio sourcés le gros de l'impact c'est le transport , pareil pour les matériaux issus du réemploi. Il faut se demander : est-ce que ça vaut le coup par rapport à d'autres modes de traitement ?
Tricycle	Le circuit court donc rester en IDF.
La ressourcerie du BTP (Vinci construction)	<p>Le transport à l'échelle de la France ce n'est pas le plus impactant à l'échelle de la durée de vie du produit et tout ce qu'il aura pu subir. Le plus impactant : remise en état voire le reconditionnement consommation de matière d'eau, transport de personne, stockage !</p> <p>Donc au niveau du transport : IDF et région limitrophe voire descendre jusqu'à Lyon.</p> <p>Par contre, la ressourcerie se questionne sur la pertinence d'aller récupérer un matériau loin sans regarder s'il y a déjà un besoin sur place (notamment sur le Faux plancher).</p> <p>Et pour l'impact environnemental par rapport à d'autres filières (recyclage, enfouissement), la ressourcerie ne se pose pas trop la question : « quand on peut le faire on le fait d'autant plus qu'il y a l'impact de ce que l'on vit (épuisement des ressources), les façons de penser évoluent. »</p>

Remarque : D'après ECOMAT38 :

ECOMAT38 étudie le bilan carbone de ses prestations et a conclu que malgré le faible pourcentage en masse qu'ils récupèrent sur les sites, estimé à environ 1%, (la majeure partie du poids des gisements étant le béton qui n'est pas réutilisé) la réutilisation des produits permet de réduire drastiquement le bilan carbone (les produits réutilisés ne disposent pas de filières de récupération et sont donc généralement enfouis).

Echelle géographique d'opération des filières pour les structures contactées



Freins/obstacles à la filière de réemploi

Organisme	Quels sont les freins pour développer la filière du réemploi ?
-----------	--

ECOMAT38	Principalement des assurances qui empêchent la réutilisation de certains produits sans preuve de leur fonctionnalité par rapport au neuf. Des normes trop complexes et non adaptées au réemploi des matériaux et qui peuvent être en contradiction avec le savoir-faire des artisans (ex. Tuiles où les travailleurs savent détecter si elles ne sont pas viables sans test en laboratoire). ECOMAT38 demande un retour de leur client aux moindres soucis. Les acteurs de la construction doivent avoir une vision des ressources suffisamment tôt pour prévoir l'utilisation de matériaux de réemploi. La construction doit s'adapter aux matériaux réemployés et non l'inverse (ex : ouverture des fenêtres).
Backacia	Pas d'entrepôt de stockage donc il faut être raccord avec le planning d'opération. Freins pendant le Sourcing : il peut y avoir de mauvaises surprises au moment de la remise en œuvre pour certains produits. Il faut des fiches techniques pour connaître leur provenance, leurs caractéristiques, ce qui est compliqué à obtenir pour le réemploi. Problème donc de garantie assurable .
Cycle Up	Chaîne logistique entre chantier et le stockage, ou reconditionnement : encore dans une économie linéaire, approvisionnement hyper cadré, augmentation de matériaux et chantier mis en péril en phase conception, il faut que les filières de réemploi soient capables de pouvoir répondre à une chaîne logistique. Le deuxième plus gros frein : pédagogique , sensibilisation de tous les acteurs, le réemploi c'est très faisable mais le savoir est trop concentré entre quelques personnes. Pour se massifier il faut que tout le monde en prenne conscience !
La ressourcerie du BTP	Pour tous les éléments dont on ne retrouve pas les fiches techniques, il faut faire des tests en labo mais ils sont très chers . Donc les acteurs sont découragés.

Organisme	Quels sont les obstacles techniques ?
ECOMAT38	Pour que la réutilisation soit mise en œuvre, il faut disposer de terrains pour stocker les matériaux . Si les matériaux sont pollués , la réutilisation n'est pas envisagée (pratique trop complexe pour les organisations). Incompatibilité en termes de temps pour répondre à la demande (une solution serait de prendre plus de temps ?). Si la déconstruction ne se fait pas par leur équipe on peut avoir plus de pertes que prévus.
Backacia	Les aléas de chantier : tout n'aura pas pu être déposé en réalité et on le découvre que quand la dépose se fait. L'évacuation des matériaux si les accès ne sont pas assez larges. L' encombrement et le poids sont d'autres critères car il faut pouvoir les déplacer .
Cycle Up	Le réemploi c'est très faisable mais les bâtiments n'ont pas été construits pour être démontés .
La ressourcerie du BTP	Décalage temporel : mettre en place une bonne logistique . Discussion avec le Booster du réemploi, qui a du mal à trouver certains éléments. Le but : améliorer la façon de chercher , de proposer des matériaux de réemploi ! Les architectes ont besoin d'être sensibilisés , convertis au sujet pour que le réemploi devienne courant et voir avec les bureaux de contrôle pour ne pas refaire tous les tests Espace de stockage à avoir pour faciliter la logistique

Remarque : Nantet recyclage a indiqué que tout ce qui peut être recyclé doit l'être (pas d'enfouissement inutile) donc **le recyclage est privilégié par la réglementation**

Les freins cités (nombre de mentions entre parenthèses) :

Adaptabilité de la conception aux produits de	Normes trop complexes et non adaptées au réemploi (2)	Le réemploi doit s'adapter à une chaîne logistique (3)	Assurances (3)
---	---	--	----------------

Décalage temporel entre
le chantier de
déconstruction et de
reprise (3)

Pédagogique :
il faut
sensibiliser au
réemploi (2)

Encombrement et poids de
certains produits
réemployables (1)

Les bâtiments
existants n'ont
pas été
construits
pour être

Gestion des invendus

Organisme	Que faire des invendus ?
ECOMAT38	<p><i>(Plateforme de stockage)</i> Après environ 6 mois (certains produits spéciaux peuvent rester plus longtemps ex : Belle porte extérieure), les invendus sont envoyés au recyclage, déposés à la déchetterie.</p> <p>Remarque : ECOMAT38 pèse chaque produit reçu sur son site de reconditionnement. A partir de là, ils peuvent calculer le poids vendu et le comparer à celui qui a été initialement prélevé dans le stock bâti.</p>
Backacia	<p><i>(Sans plateforme de stockage)</i> Les produits qui n'ont pas trouvés d'acheteurs avant le début du chantier ne sont pas déposés (un acheteur est identifié en amont de la déconstruction)</p>
Cycle Up	<p><i>(Plateforme de stockage et Marketplace)</i> Pas beaucoup d'invendus sur la Marketplace. La plateforme de stockage est récente donc pas de limite de temps de stockage pour l'instant. Mais s'il vient à en avoir : les emmener en recyclage ou don en amont.</p>
La ressourcerie du btp	<p>Dans le lieu de stockage il n'y aura que les éléments du chantier de curage qui ont trouvés des repreneurs pour ne pas avoir d'invendus. Mais la ressourcerie se pose la question pour être encore plus impactant de peut-être déposer plus de choses et de stocker car il y aura peut-être des repreneurs plus tard.</p>

Option 1 : ne pas déposer les éléments qui n'ont pas trouvés d'acheteurs.

Option 2 : Déposer tous les éléments intéressants et **les stocker quelque temps**. Après un certain temps de stockage (6 mois pour ECOMAT38, pas encore de limite de temps pour Cycle Up, questionnement pour la ressourcerie du BTP) : **recyclage** ou **dons**.

Potentiel de réemploi de divers matériaux minéraux

ELAN (Bouygues) : Pour le réemploi toujours se demander si le produit est :

En bon état ; noble ; quantité ; l'esthétique ou performance technique soit dépasser, mode de dépose facilité, Filières de réemploi présentent sur le territoire (sanitaire plus dur), Cher en achat neuf (tête de di)

Briques en terre cuite

Organisme	Potentiel de réemploi	Usages	Obstacles techniques
Elan (Bouygues)	Réemployable si elles ne sont pas jointées en ciment. Si c'est le cas elles partent en recyclage	Recyclage : Paillage brique, carrelage ; Réutilisation : revêtements muraux, terraso (revêtement de sol), en muret ou en mobilier d'extérieur	joints en ciment
Remix réemploi	Pleines pas facile mais très intéressant; Creux : nul	Refaire des murs en briques, revêtement de sol Recycler pour faire des paillages	Démontabilité Casse

Tuiles en terre cuite

Organisme	Potentiel de réemploi	Usages	Obstacles techniques
ECOMAT38		Couverture, Gabions	
Elan (Bouygues)	Réemployable en vérifiant l'étanchéité performance	Tuiles Même recyclage que pour les briques. Même si un peu casser : réutilisation en muret ou en mobilier d'extérieur	Attention à la dépose car peut se casser facilement
Remix réemploi	Facile	Tuiles/gabions, murs de pierre sèches	Coût du démontage, étanchéité, gélivité mais mesures possibles

Organisme	Est-ce qu'une tuile pour couverture de toit est différente d'une tuile pour bardage ? Peut-on utiliser une tuile de manière indifférente pour ces deux usages ?
------------------	---

Backacia	SON AVIS : Bureau de contrôle qui vérifie ça. Une tuile est fabriquée pour être mise en toiture avec un assemblage particulier, et les tuiles de bardage également. Il lui paraît simple de prendre une tuile de toit pour du bardage mais pas l'inverse.
-----------------	---

Carreaux de céramiques

Organisme	Potentiel de réemploi	Usages	Obstacles techniques
Backacia	Le carrelage : 0%		Casse trop facilement
Cycle Up	Le carrelage émaillé : très faible Tomette en terre cuite : énorme potentiel mais à la marge dans les carreaux retrouvés.	Revêtement de sol	Carrelage émaillé : ne se déposent pas car trop fin donc cassent . Si on en retrouve se sont surtout des surplus de stock ou des fin de stock,
Elan (Bouygues)	Tomette et les carreaux pas collé oui ; si collés pas réemployable	Réemploi sans aucun problème ; recyclage ou réutilisation pareil que les briques/tuiles. Si juste un peu cassés : réutiliser pour déco	Carrelage, 1 sur 10 qui est pas collé
Remix réemploi	Moyen facile	Reposer en carrelage, mosaïque	Démontage, nature des colles, épaisseurs
Tricycle	Très difficile (on retrouve plus souvent des surplus de chantier)		casse à la dépose
La ressourcerie du BTP	Produit pour lesquelles s'il y a du réemploi à faire il viendra de surplus de commande.	Gravats donc être recyclé	on peut pas déconstruire car la partie colle qui pose problème

Organisme	Il y-a-t-il beaucoup de carreaux émaillés dans les carreaux en céramique? Si oui, quel est le potentiel de réemploi des carreaux émaillés par rapport à ceux qui ne le sont pas ?
Backacia	Oui, la majorité des carreaux de céramiques sont émaillés, mais pas d'importance pour le réemploi
ELAN	Carreaux émaillés : Aucune idée si c'est la plus part du gisement mais peu importe ça doit être pareil pour le réemploi
La ressourcerie du BTP	Pas d'impact juste esthétique

Pierre naturelle (murs)

Organisme	Potentiel de réemploi	Usages	Obstacles techniques
ECOMAT38		Mur (structure et muret) et gabions	
Remix réemploi	Facile	Pierre de murs	Dépend du liant mais plutôt démontable

Organisme	Les pierres des murs peuvent-elles être récupérées ? D'après la documentation il semblerait que oui mais que ce n'est pas une pratique courante (part avec les gravats) et qu'elles sont généralement utilisées pour construire des murets ? Le réemploi dans la construction de mur ne se fait pas car il y a une trop faible demande (coût très élevés de construction en pierre)? Ou un problème technique?
ECOMAT38	Oui, techniquement, les pierres de murs peuvent être récupérées et réemployées pour construire des murs de structure. Cependant, ECOMAT38 ne peut pas transporter ces matériaux sur son site (trop pondéreux) et ne les reçoit que d'acteurs extérieurs (démolition).
Cycle Up	Ça se fait mais à la marge. Aujourd'hui 90% des pierres naturelles sont concassées et utilisées en remblaiement de carrière. C'est lourd comme matériau donc la dépose sélective est longue.

Couverture de toit en ardoise

Organisme	Potentiel de réemploi	Usages	Obstacles techniques
Cycle Up	Bon potentiel.	Si pas altérées les ardoises peuvent être réutilisées pour du paillage ou en revêtement.	Le problème pour le réemploi : compliqué de justifier qu'elles ont toujours de bonnes propriétés.
Elan (Bouygues)	, se réemploi en fonction de la région ; en IDF : peut-être maison privé mais rare qu'un immeuble soit comme ça		Pas facile et coûte cher à déposer
Remix réemploi	Facile mais plus fragile que celle en terre cuite	Couverture, sinon downcycling : cloisonner des espaces intérieur	Etanchéité, gélivité mais mesures possibles

Organisme	Est-ce qu'il vous semble correcte de supposer que les ardoises et les tuiles en terre cuite ont les mêmes taux de valorisation ?
Cycle Up	Ardoise un peu plus récupérées car les tuiles en terre cuite ont un peu moins de durabilité dans le temps.

Remix réemploi	Ardoise un peu plus fragile que celle en terre cuite donc plus de casse à la dépose
-----------------------	---

Béton

Organisme	Potentiel de réemploi	Usages	Obstacles techniques
ECOMAT38	Non réutilisé aujourd'hui		
Backacia		Voile en béton redécoupé pour faire des pavés extérieurs	Il faut faire des traitements en plus car il y a un changement de mise en œuvre intérieure extérieure.
Cycle Up	ça reste à la marge, les éléments préfabriqués en béton peuvent avoir un meilleur potentiel.	Scié pour faire du pavage	
Remix réemploi	Voile de béton et dalle : possible mais pas facile	Redécoupé pour en faire des pavés	Démontabilité, l'idéal : ne plus construire en béton

Laines minérales (verre et roche)

Organisme	Potentiel de réemploi	Usages	Obstacles techniques
Cycle Up	Compliqué		C'est très compliqué à reprendre, le mieux c'est de récupérer les isolants dans les cloisons acoustiques
Elan (Bouygues)	Oui soit recyclage, soit réemploi	Isolation	un peu sale au bout d'un moment mais non visible donc c'est bon ; attention au performance acoustique
Remix réemploi	Plutôt facile	Isolant	Ré-enrouler pour les transporter, craigne l'humidité
Tricycle	Laine minérale, eux ne les récupère pas, ne sont vendus que des surplus de chantier. Mais, ça peut se faire car les laines conservent bien leur qualité.	Isolant	

La ressource du BTP	Se dépose facilement donc réemployable si aucun impact sur la santé.	Recyclage en grande partie mais un élément qui est resté enfermé entre deux plaques de plâtre peut être réemployé, la qualité est toujours bonne.	Les questionnements sur la qualité de l'air intérieur : danger pour la santé des occupants ?
----------------------------	--	---	--

Organisme	Est-ce que les deux laines minérales ont les mêmes taux de valorisation ?
ECOMAT38	Oui
La ressource du BTP	Oui

Remarque : Dans le stock il y a plus souvent de la laine de verre déposée, mais la laine de roche bien présente !

Plâtre (carreaux, plaques)

Organisme	Potentiel de réemploi	Usages	Obstacles techniques
Backacia	Le plâtre n'est pas récupéré car plus facile à recycler. Plaques de BA13 cloison amovible récupéré sous réserve de repreneur.		
Cycle Up	c'est possible de réemployer	Plaques de plâtre, cloison plâtre-bois	vraiment beaucoup de pertes à la dépose, De plus, on ne peut récupérer que le plâtre non hydrofuge car on ne peut pas prouver sa qualité.
Remix réemploi	Pas facile à réemployer, Peu réemployable		Jointé ou recouvre les assemblages vissés : dur de voir les vis. Idée : refaire une conception (BA13) : à la conception mettre les vis toujours aux mêmes endroits
Tricycle	Aucune idée mais assez friable donc il faut faire attention. Les plaques de BA13 pourquoi pas		assez friable donc il faut faire attention
La ressource du BTP	Non pas de réemploi (elle ne croit pas)	Recyclage	Assez fragile : en dépose soignée de grosses pertes. De plus, les grandes

plaques devront être découpées ce qui augmentera le temps de traitement

Fenêtres et portes vitrées extérieures

Organisme	Potentiel de réemploi	Usages	Obstacles techniques
ECOMAT38	Possible	Le verre seul peut être utilisé pour des serres, les fenêtres simples vitrages là où il n'y a pas besoin de performance thermique, double vitrage particuliers ok, mais si réglementation à respecter alors ce n'est pas possible. Les fenêtres sont des fois démontées car les clients sont intéressés par les vitres	
Backacia	Fonctionne très bien		
Cycle Up		A la marge : réutilisation serre	
Elan (Bouygues)	Réemploi oui mais compliqué ; recyclage sans aucun problème	Recyclage verre plat	l'huissierie peut être très différente il faut donc dessiner le bâtiment en fonction de la fenêtre
Remix réemploi	Facile techniquement, difficile à remettre en œuvre, PVC non	Bâtiment type industriel non chauffé, parking, serre agricole, hall de marché, locaux de services dans des bâtiments	passés 4 ou 5 ans les fenêtres sont dépassées
Tricycle	Les portes extérieures ça se ferait très bien si taille standard. Moins bon fenêtres		Ce qui est compliqué c'est le dimensionnement de l'ouvrage qui va réemployer les fenêtres/portes ensuite. Il est plus simple de récupérer des portes intérieures qu'extérieures car elles génèrent beaucoup de stock alors que les seconde ne sont présentes qu'en faible quantité dans un ouvrage.
La ressourcerie du BTP	Fenêtres et portes : Sur le principe oui	Cloisons, déco dans les bâtiments	les freins : caractéristiques technique, est-ce qu'en terme d'isolation aux normes actuelles on peut les réemployer ?

Organisme	Projet autour de la réutilisation des fenêtres : serres, kit de jardinage, tréteaux. Il y-a-t-il un intérêt à cette réutilisation ?
ECOMAT38	Oui, il y a un intérêt lorsque le châssis est trop endommagé mais que le vitrage est intact. La création d'une serre a été évoquée lors de la visite.

Organisme	Le réemploi des portes vitrées extérieures est-elle aussi limitée que pour les fenêtres ? (Réglementation thermique...)
ECOMAT38	En vérité, tous les produits en bon état peuvent être réutilisés (surtout s'ils sont en double vitrage) et donc un chantier de particuliers qui n'a pas à respecter de normes et qui ne souhaite pas recevoir d'aides publiques peut très bien les réutiliser.
Backacia	Si on trouve de super portes avec un aspect patrimonial qui est intéressant, alors pas de problèmes pour les réemployer. La remise en œuvre doit apporter les garanties de la porte pour assurance (effraction possible si elle n'est pas neuve...)
Cycle Up	Beaucoup moins. S'il y en a qu'une à utiliser c'est ok ; s'il faut vraiment beaucoup de portes trop de pertes thermiques. En portes d'entrée d'immeuble ça semble correct.

Organisme	Reprenez-vous les fenêtres qui peuvent être utilisées dans un contexte où l'isolation thermique n'est pas obligatoire ? (Ex : cabane de jardin...)
ECOMAT38	Oui
Backacia	Pas fréquent, et il faut qu'elles soient en double vitrage obligatoirement. Pour les fenêtres en PVC ou en aluminium et double vitrage c'est beaucoup plus simple d'être adéquat à une reprise. Si c'est bois c'est très rare que ce le soit. Les vitraux sont beaucoup gardés par l'architecte.
Cycle Up	Don des fenêtres simple vitrages

Organisme	A partir de quelle année de fabrication est-il intéressant de réemployer une fenêtre ?
ECOMAT38	Au niveau de la réglementation les fenêtres sont généralement défaillantes
Backacia	Moins de 10 ans pour réemployer facilement.
Cycle Up	10 ans obsolète, voir avec des experts thermiques

Organisme	Pour les fenêtres ou les portes, (peu importe l'année de fabrication) est-il possible de récupérer les poignées et la quincaillerie pour les réemployer sur d'autres produits plus récents ?
-----------	--

ECOMAT38	Oui, seulement cela prend beaucoup de temps et c'est pour cela que cela ne se fait pas, mais techniquement oui. S'il y a beaucoup de vis c'est très intéressant de prendre le temps de les récupérer car elles ont beaucoup de valeur.
Backacia	Pas diagnostiqué dans les rapports, ils reprennent les portes complètes et les fenêtres complètes car sinon le temps de dépose est trop long. Mais c'est possible de le faire.
Cycle Up	Possibilité de reprendre des poignées portes intérieures et de la quincaillerie
Remix Réemploi	Quincaillerie en fonction du niveau de valeur
Tricycle	Ils enlèvent toutes les poignées et les serrures (+autres quincailleries).
La ressourcerie du Btp	Quincaillerie : Les poignées le réemploi marche très bien (autres : ferme porte, anciennes crémones... aussi très bien)

Durée de vie d'un produit issue du réemploi

Organisme	Quelle est la durée de vie d'un produit issue du réemploi ?
Tricycle	C'est réemployé donc ça repart pour une toute nouvelle vie. Après Tricycle peut se pencher sur le sujet pour des produits qui peuvent perdre en qualité (moquette). Dans tous les cas, on ne peut pas aller au-delà de la durée de vie indiquée par le fabricant initialement. Des portes en bois massif peuvent avoir une durée de vie infinie par contre. Les acheteurs ne sont pas intéressés par cette durée de vie pour tous les matériaux mais sur des équipements comme des chauffe-eau, ils aimeraient savoir en quelle année il a été posé (sûrement car c'est électrique), mais difficile d'avoir l'année.
La ressourcerie du BTP	La ressourcerie n'évalue pas la nouvelle durée de vie des produits, mais ce n'est pas forcément une demande . Sauver une ou deux années c'est déjà très bien.

La durée de vie : pas nécessairement une demande des acheteurs pour l'instant sauf pour **des produits électriques** où l'âge à son importance dans le fonctionnement de l'équipement ou que **la qualité peut se dégrader** avec le temps.

Pollution et réemploi

Organisme	Dans quelle mesure la pollution des produits est un problème pour le réemploi/ le recyclage ? Y-a-t-il la possibilité de décontaminer les produits ?
ECOMAT38	S'ils sont pollués, ils ne peuvent pas être réutilisés.
Backacia	Ils ne peuvent pas dire si c'est pollué ou pas. Par contre le MO doit faire un diagnostic et eux l'utilisent pour faire le diagnostic ressources réemploi. D'ailleurs pas de réemploi pour les produits pollués.
Remix	Réutiliser ou recycler, déplombage dans monument historique processus compliqué qui nécessite beaucoup d'attention mais si les produits ont une valeur patrimoniale particulière ok pour dépolluer . Déplombage, calfeutrage repeindre avec une peinture ou le polluant n'est plus accessible. Déroger au règle de sécurité amiante
Tricycle	Pas de récupération possible.
La ressourcerie du BTP	Pas de réemploi

Si pollué : pas de récupération sauf pour des produits à valeur patrimoniale où on peut gérer la pollution (recouvrement par de la peinture...)

Tri après le réemploi

Organisme	Après avoir été déposé, y-a-t-il besoin de refaire un tri sur l'état des produits en rentrant dans une filière de réemploi ou si le produit n'en respecte pas les conditions pour qu'il soit recyclé ?
ECOMAT38	En raison de la grande diversité des produits présents sur le site, la plupart des produits ne se retrouvent pas de manière significative (en masse) dans leur stock. Ainsi, lorsque la réutilisation n'est pas possible, ECOMAT38 apporte les produits à la déchèterie mais ne peut se permettre de les amener directement aux acteurs du recyclage . Par exemple, une vitre cassée, bien que verre plat, ne peut être apportée à un centre de recyclage spécialisé car ECOMAT38 n'en a pas une grande quantité sur son site. Il est alors mélangé à d'autres types de verre qui devront être retriés .
Backacia	Si un produit ne peut finalement pas être déposé ou casse lors de la dépose, ce n'est plus eux qui gère mais le chantier de démolition/rénovation basique.
Tricycle	Ça dépend, si c'est eux qui dépose : pas besoin de retrier quand ça arrive dans leur stock. Si ça vient d'ailleurs, tricycle passe par un tri . Il y a quand même un cahier des charges pour éviter le double tri si les produits arrivent de l'extérieur

Le recyclage, Nantet :

Type de déchets	Taux de recyclage	Usages
Bois A (non traité)		Valorisation énergétique
Bois B (mobilier,...)		Reconstruire des panneaux de bois
Bois C (traité dans des bains)		Brûlé avec des techniques particulières pour ne pas rejeter les polluants
Brique plâtrière	100% des briques qui arrivent sur site	Technique routière pour les briques et gypse pour le plâtre. Pas possible d'en faire du béton mais il ne sait pas pourquoi.
Plâtre (plaque, carreaux, enduit) avec complexe isolant	98%	Gypse pour refaire du plâtre (jusqu'à 50% de MPR intégré dans la fabrication) La partie cartonnée sert en composte
Fenêtres (et portes vitrées ext)		Démantèlement puis chaque part et recyclée ou enfoui (joint amianté)
DIB	80 à 85% valorisation matière ? 7 à 8% CSR	Les CSR pour la fabrication de ciment (four qui doivent être chauffés très fort)

Procédés de recyclage

Organisme	Le recyclage des granulats/terre cuite pour la fabrication de béton est-elle viable environnementalement parlant ? Selon les dire d'un expert c'est un procédé compliqué, quel est votre avis ?
Cycle Up	Ça ne sert à rien de re-fabriquer du béton mais le procédé n'est pas compliqué : Voir Cemex en idf.

Remarque Tricycle : Recyclage de la moquette (tarket ou interface) pas rentable du tout mais c'est soit ça soit ils doivent payer des taxes. Une machine arrache les poils de la moquette et fait fondre le tout.

Annexe 5.4 valeurs des taux de réemploi retenues pour chaque produit de construction

Le tableau présenté ici résume les taux de réemploi retenus pour les produits de constructions de la nomenclature PDC de la méthode MiMOSA. Comme expliqué dans le chapitre 5, l'enquête auprès des acteur-ric-e-s a été réalisé que pour certains produits de construction, ainsi, il a fallu compléter les données soit à l'aide de l'assimilation soit à l'aide de la bibliographie.

Nomenclature PDC					Valeur définie lors du stage de Sarah Clavier correspondante	Assimilation/Correspondance/Autre
Macro-composant	Composant	Famille de matériau	Estimation taux réemploi 1	Estimation taux réemploi 2		
Bloc baie	Bloc baie double	Acier	10%	4%	Fenêtres en acier double vitrage	Assimilation
Bloc baie	Bloc baie double	Aluminium	10%	4%	Fenêtres en aluminium double vitrage	Assimilation
Bloc baie	Bloc baie double	Bois	10%	4%	Fenêtres en bois triple vitrage	Assimilation
Bloc baie	Bloc baie double	Bois-aluminium	10%	4%	Fenêtres en bois-aluminium double vitrage	Assimilation
Bloc baie	Bloc baie double	PVC	10%	4%	Fenêtres en PVC double vitrage	Assimilation
Bloc baie	Bloc baie simple	Aluminium	0%	0%	Fenêtres en bois	Assimilation

					simple vitrage	
Bloc baie	Bloc baie simple	Bois	0%	0%	Fenêtres en bois simple vitrage	Assimilation
Bloc baie	Bloc baie simple	Bois-aluminium	0%	0%	Fenêtres en bois simple vitrage	Assimilation
Bloc baie	Bloc baie simple	PVC	0%	0%	Fenêtres en bois simple vitrage	Assimilation
Bloc baie	Bloc baie triple	Bois	10%	4%	Fenêtres en bois triple vitrage	Assimilation
Bloc baie	Bloc baie triple	Bois-aluminium	10%	4%	Fenêtres en bois-aluminium triple vitrage	Assimilation
Cloison	Cloison vitrée double	Acier	10%	7%	Cloisons intérieures vitrées double	Correspondance
Cloison	Cloison vitrée double	Aluminium	10%	7%	Cloisons intérieures vitrées double	Correspondance
Cloison	Cloison vitrée double	Bois	10%	7%	Cloisons intérieures vitrées double	Correspondance
Cloison	Cloison vitrée double	Bois-aluminium	10%	7%	Cloisons intérieures vitrées double	Correspondance
Cloison	Cloison vitrée double	PVC	10%	7%	Cloisons intérieures vitrées double	Correspondance
Element de structure	Poutrelle	Acier	90%	50%	-	Estimé ultérieurement

Element de structure	Poutrelle	Béton précontraint	90%	50%	-	Estimé ultérieurement
Element de structure	Béton de structure courante	Béton	90%	50%	-	Estimé ultérieurement
Element de structure	Armature métallique	Acier	0%	0%	-	Estimé ultérieurement
Escalier	Escalier droit	Aluminium	90%	50%	-	Estimé ultérieurement
Escalier	Escalier droit	Béton armé	90%	50%	-	Estimé ultérieurement
Escalier	Escalier droit	Pierre naturelle	90%	50%	-	Estimé ultérieurement
Escalier	Escalier hélicoïdal	Béton armé	90%	50%	-	Estimé ultérieurement
Fenêtre	Fenêtre double	PVC	10%	4%	Fenêtres en PVC double vitrage	Correspondance
Fenêtre	Fenêtre double	acier	10%	4%	Fenêtres en acier double vitrage	Correspondance
Fenêtre	Fenêtre double	aluminium	10%	4%	Fenêtres en aluminium double vitrage	Correspondance
Fenêtre	Fenêtre double	bois	10%	4%	Fenêtres en aluminium double vitrage	Correspondance
Fenêtre	Fenêtre double	bois-aluminium	10%	4%	Fenêtres en bois-aluminium double vitrage	Correspondance
Fenêtre	Fenêtre simple	bois	0%	0%	Fenêtres en bois simple vitrage	Correspondance
Fenêtre	Fenêtre triple	bois	10%	4%	Fenêtres en bois triple vitrages	Correspondance

Fenêtre	Fenêtre triple	bois-aluminium	10%	4%	Fenêtres en bois-aluminium triple vitrage	Correspondance
Fondation	Béton de propreté	Béton	0%	0%	-	Estimé ultérieurement
Fondation	Béton de semelle	Béton	0%	0%	-	Estimé ultérieurement
Isolant	Isolant intérieur, Isolant extérieur	laine de roche	20%	11%	Isolant en laine de roche	Correspondance
Isolant	Isolant intérieur, Isolant extérieur	laine de verre	20%	11%	Isolant en laine de verre	Correspondance
Mur	Mur extérieur, Mur intérieur	Béton	90%	50%	Voile en béton	Correspondance
Mur	Mur extérieur, Mur intérieur	Pierre de taille	25%	20%	Mur en pierre naturelle (Grès, Calcaire, Granite, Schiste, de taille ou moellon)	Correspondance
Mur	Mur extérieur, Mur intérieur	Pierre moellon	75%	45%	Moellons pour la construction de murets de soutènement, de clôtures, de gabions et autres applications paysagères	Correspondance
Mur	Mur extérieur, Mur intérieur	Terre cuite	14%	5%	Maçonnerie portante en terre cuite	Correspondance

Mur	Voile en béton	Béton armé	40%	35%	-	Estimé ultérieurement
Plafond, Cloison	Plaque	Plâtre	12%	6%	Plaque de plâtre	Correspondance
Plafond, Cloison	Rail	Acier	90%	50%	-	Estimé ultérieurement
Plancher	Chape	Béton	0%	0%	-	Estimé ultérieurement
Plancher	Hourdis alvéolés	Terre cuite	0%	0%	-	Estimé ultérieurement
Plancher	Dalle	Béton armé	90%	50%	-	Estimé ultérieurement
Plancher	Béton de rives	Béton	0%	0%	-	Estimé ultérieurement
Plancher	Treillis métallique	Acier	0%	0%	-	Estimé ultérieurement
Plancher	Chape flottante	Béton	0%	0%	-	Estimé ultérieurement
Plancher	Entrevous	Béton	0%	0%	-	Estimé ultérieurement
Porte	Porte extérieure	Bois	90%	50%	-	Estimé ultérieurement
Porte	Porte extérieure	Verre, Bois	80%	40%	-	Estimé ultérieurement
Porte	Porte intérieure	Bois	90%	50%	-	Estimé ultérieurement
Revêtement	Sol	Béton	90%	50%	-	Estimé ultérieurement
Revêtement	Sol, Mur extérieur, Mur intérieur	Carreaux de céramique	25%	14%	Revêtement de sol (intérieur, extérieur) et muraux en céramique	Correspondance
Revêtement	Sol, Mur extérieur, Mur intérieur	Mosaïque de céramique	1%	2%	Revêtement de sol effet mosaïque de céramique	Correspondance
Revêtement	Sol, Mur extérieur, Mur intérieur	Pierre de taille	10%	17%	Bardage décoratif ou	Assimilation

					parement intérieur	
Revêtement	Sol, Mur extérieur, Mur intérieur	Pierre naturelle	10%	17%	Bardage décoratif ou parement intérieur	Assimilation
Revêtement	Sol, Mur extérieur, Mur intérieur	Terre cuite	54%	32%	Bardage décoratif ou parement intérieur en terre cuite	Correspondance
Revêtement	Toit	Ardoise	40%	33%	Tuiles en ardoise (couverture de toit et bardage extérieur)	Correspondance
Revêtement	Toit	Terre cuite	40%	33%	Couverture de toit en terre cuite	Correspondance
Revêtement	Sol, Mur extérieur, Mur intérieur, Toit	Zinc	90%	50%	-	Estimé ultérieurement
Revêtement	Mortier	enduit minéral	0%	0%	-	Estimé ultérieurement
Toit	Couverture en bac acier	Acier	90%	50%	-	Estimé ultérieurement

Annexe 6.1 Besoins en produits de construction de la maison individuelle en terre cuite

Dans cet annexe sont résumés les besoins de la maison individuelle en terre cuite considérée dans l'étude de cas. Les besoins ont été exprimés à l'aide de la nomenclature PDC de la méthode MiMOSA.

Macro-composant	Composant	Famille de matériau	building_need	UF
Bloc baie	Bloc baie double	Acier	0	m ²
Bloc baie	Bloc baie double	Aluminium	17.39	m ²
Bloc baie	Bloc baie double	Bois	0	m ²
Bloc baie	Bloc baie double	Bois-aluminium	0	m ²
Bloc baie	Bloc baie double	PVC	0	m ²
Bloc baie	Bloc baie simple	Aluminium	0	m ²
Bloc baie	Bloc baie simple	Bois	0	m ²
Bloc baie	Bloc baie simple	Bois-aluminium	0	m ²
Bloc baie	Bloc baie simple	PVC	0	m ²
Bloc baie	Bloc baie triple	Bois	0	m ²
Bloc baie	Bloc baie triple	Bois-aluminium	0	m ²
Cloison	Cloison vitrée	Acier	0	m ²
Cloison	Cloison vitrée	Aluminium	0	m ²
Cloison	Cloison vitrée	Bois	0	m ²
Cloison	Cloison vitrée	Bois-aluminium	0	m ²
Cloison	Cloison vitrée	PVC	0	m ²
Element de structure	Poutrelle	Acier	0	m
Element de structure	Poutrelle	Béton précontraint	230.83	m

Element de structure	Béton de structure courante	Béton	2.26	m3
Element de structure	Armature métallique	Acier	439.57	kg
Escalier	Escalier droit	Aluminium	0	m
Escalier	Escalier droit	Béton armé	0	m
Escalier	Escalier droit	Pierre naturelle	0	m
Escalier	Escalier hélicoïdal	Béton armé	0	m
Fenêtre	Fenêtre double	PVC	0	m ²
Fenêtre	Fenêtre double	acier	0	m ²
Fenêtre	Fenêtre double	aluminium	0	m ²
Fenêtre	Fenêtre double	bois	0	m ²
Fenêtre	Fenêtre double	bois-aluminium	4	m ²
Fenêtre	Fenêtre simple	bois	0	m ²
Fenêtre	Fenêtre triple	bois	0	m ²
Fenêtre	Fenêtre triple	bois-aluminium	0	m ²
Fondation	Béton de propreté	Béton	1.45	m3
Fondation	Béton de semelle	Béton	13.9	m3
Isolant	Isolant intérieur, Isolant extérieur	laine de roche	56	m ²
Isolant	Isolant intérieur, Isolant extérieur	laine de verre	174.5	m ²
Mur	Mur extérieur, Mur intérieur	Béton	23.16	m ²
Mur	Mur extérieur, Mur intérieur	Pierre de taille	0	m ²
Mur	Mur extérieur, Mur intérieur	Pierre moellon	0	m ²
Mur	Mur extérieur, Mur intérieur	Terre cuite	217.45	m ²
Mur	Voile en béton	Béton armé	0	m ²
Plafond, Cloison	Plaque	Plâtre	399.7	m ²
Plafond, Cloison	Rail	Acier	258.09	m

Plancher	Chape	Béton	0	m ²
Plancher	Hourdis alvéolés	Terre cuite	0	m ²
Plancher	Dalle	Béton armé	72.99	m ²
Plancher	Béton de rives	Béton	5.36	m ³
Plancher	Treillis métallique	Acier	232.09	kg
Plancher	Chape flottante	Béton	124.77	m ²
Plancher	Entrevous	Béton	58.69	m ²
Porte	Porte extérieure	Bois	6.74	m ²
Porte	Porte extérieure	Verre, Bois	1.94	m ²
Porte	Porte intérieure	Bois	12.56	m ²
Revêtement	Sol	Béton		m ²
Revêtement	Sol, Mur extérieur, Mur intérieur	Carreaux de céramique	183.25	m ²
Revêtement	Sol, Mur extérieur, Mur intérieur	Mosaïque de céramique	0	m ²
Revêtement	Sol, Mur extérieur, Mur intérieur	Pierre de taille	0	m ²
Revêtement	Sol, Mur extérieur, Mur intérieur	Pierre naturelle	0	m
Revêtement	Sol, Mur extérieur, Mur intérieur	Terre cuite	0	m ²
Revêtement	Toit	Ardoise	0	m ²
Revêtement	Toit	Terre cuite	71.82	m ²
Revêtement	Sol, Mur extérieur, Mur intérieur, Toit	Zinc	0	m ²
Revêtement	Mortier	enduit minéral	191.21	m ²
Toit	Couverture en bac acier	Acier	0	m ²

Annexe 6.2 Flux pouvant être issus du réemploi en Seine-Saint-Denis en 2050 selon le scénario

« *Génération frugale* »

Ces quantités ont été estimées en multipliant les sorties de BTP-flux, qui représentent le stock bâti en Seine-Saint-Denis par produits, avec les taux de déconstruction considérés dans le scénario « *Génération frugale* » de l'ADEME et les taux de réemploi définis lors du chapitre 5.

Macro-composant	Composant	Famille de matériau	Quantité pouvant être issue du réemploi (UF)	UF
Bloc baie	Bloc baie double	Acier	267.76	m ²
Bloc baie	Bloc baie double	Aluminium	439.39	m ²
Bloc baie	Bloc baie double	Bois	3043.77	m ²
Bloc baie	Bloc baie double	Bois-aluminium	198.33	m ²
Bloc baie	Bloc baie double	PVC	3826.38	m ²
Bloc baie	Bloc baie simple	Aluminium	0.00	m ²
Bloc baie	Bloc baie simple	Bois	0.00	m ²
Bloc baie	Bloc baie simple	Bois-aluminium	0.00	m ²
Bloc baie	Bloc baie simple	PVC	0.00	m ²
Bloc baie	Bloc baie triple	Bois	67.99	m ²
Bloc baie	Bloc baie triple	Bois-aluminium	113.87	m ²
Cloison	Cloison vitrée	Acier	557.39	m ²
Cloison	Cloison vitrée	Aluminium	2606.90	m ²
Cloison	Cloison vitrée	Bois	6509.54	m ²

Cloison	Cloison vitrée	Bois-aluminium	577.80	m ²
Cloison	Cloison vitrée	PVC	9785.10	m ²
Element de structure	Poutrelle	Acier	677.65	m
Element de structure	Poutrelle	Béton précontraint	3573.11	m
Element de structure	Béton de structure courante	Béton	0.00	m3
Element de structure	Armature métallique	Acier	0.00	kg
Escalier	Escalier droit	Aluminium	40.47	m
Escalier	Escalier droit	Béton armé	90.73	m
Escalier	Escalier droit	Pierre naturelle	274.70	m
Escalier	Escalier hélicoïdal	Béton armé	394.37	m
Fenêtre	Fenêtre double	PVC	4700.69	m ²
Fenêtre	Fenêtre double	acier	267.76	m ²
Fenêtre	Fenêtre double	aluminium	1089.20	m ²
Fenêtre	Fenêtre double	bois	3026.68	m ²
Fenêtre	Fenêtre double	bois-aluminium	326.26	m ²
Fenêtre	Fenêtre simple	bois	0.00	m ²
Fenêtre	Fenêtre triple	bois	41.15	m ²
Fenêtre	Fenêtre triple	bois-aluminium	82.52	m ²
Fondation	Béton de propreté	Béton	0.00	m3
Fondation	Béton de semelle	Béton	0.00	m3
Isolant	Isolant intérieur	laine de roche	13640.89	m ²
Isolant	Isolant intérieur	laine de verre	39069.74	m ²
Mur	Mur extérieur, Mur intérieur	Béton	141072.29	m ²
Mur	Mur extérieur, Mur intérieur	Pierre de taille	854.58	m ²
Mur	Mur extérieur, Mur intérieur	Pierre moellon	917.04	m ²

Mur	Mur extérieur, Mur intérieur	Terre cuite	249.91	m ²
Mur	Voile en béton	Béton armé	9082.57	m ²
Plafond, Cloison	Plaque	Plâtre	167161.80	m ²
Plafond, Cloison	Rail	Acier	8070788.98	m
Plancher	Chape	Béton	0.00	m ²
Plancher	Hourdis alvéolés	Terre cuite	32.75	m ²
Plancher	Dalle	Béton armé	0.00	m ²
Plancher	Béton de rives	Béton	0.00	m ³
Plancher	Treillis métallique	Acier	0.00	kg
Plancher	Chape flottante	Béton	0.00	m ²
Plancher	Entrevous	Béton	0.00	m ²
Porte	Porte extérieure	Bois	633.92	m ²
Porte	Porte extérieure	Verre, Bois	1193.71	m ²
Porte	Porte intérieure	Bois	43398.41	m ²
Revêtement	Sol	Béton	22683.14	m ²
Revêtement	Sol, Mur extérieur, Mur intérieur	Carreaux de céramique	16775.31	m ²
Revêtement	Sol, Mur extérieur, Mur intérieur	Mosaïque de céramique	2164.17	m ²
Revêtement	Sol, Mur extérieur, Mur intérieur	Pierre de taille	427.29	m ²
Revêtement	Sol, Mur extérieur, Mur intérieur	Pierre naturelle	15.26	m
Revêtement	Sol, Mur extérieur, Mur intérieur	Terre cuite	999.66	m ²
Revêtement	Sol, Mur extérieur, Mur intérieur, Toit	Ardoise	1917.80	m ²
Revêtement	Sol, Mur extérieur, Mur intérieur, Toit	Terre cuite	69969.57	m ²
Revêtement	Sol, Mur extérieur, Mur intérieur, Toit	Zinc	12143.24	m ²
Revêtement	Mortier	enduit minéral	0.00	m ²
Toit	Couverture en bac acier	Acier	6238.77	m ²

Annexe 6.3 La matrice de conversion

Les valeurs de la matrice de conversion M, les valeurs sont exprimées en kg/UF. Ici sont représentée seulement les lignes correspondant aux produits dont les besoins du projet n'ont pas pu être issus, partiellement ou intégralement, du réemploi.

Macro-composant	Composant	Famille de matériaux	Aluminium	Verre	Béton	Acier	Laine de verre	Laine de roche	Terre cuite	Plâtre	Céramique	Mortier
Bloc baie	Bloc baie double	Aluminium	2.52	8.5	0	0	0	0	0	0	0	0
Élément de structure	Poutrelle	Béton précontraint	0	0	21.56	0.5829	0	0	0	0	0	0
Élément de structure	Béton de structure courante	Béton	0	0	2300	0	0	0	0	0	0	0
Élément de structure	Armature métallique	Acier	0	0	0	87	0	0	0	0	0	0
Fenêtre	Fenêtre double	Bois-aluminium	1.35	8.015	0	0	0	0	0	0	0	0
Fondation	Béton de propreté	Béton	0	0	2300	0	0	0	0	0	0	0
Fondation	Béton de semelle	Béton	0	0	2300	0	0	0	0	0	0	0
Isolant	Isolant intérieur	Laine de roche	0	0	0	0	0	1.5288	0	0	0	0
Isolant	Isolant intérieur	Laine de verre	0	0	0	0	3.4775	0	0	0	0	0
Mur	Mur extérieur, Mur intérieur	Terre cuite	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Plafond, Cloison	Plaque	Plâtre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Plancher	Chape	Béton	0	0	116.8	0	0	0	0	0	0	0
Plancher	Dalle	Béton armé	0	0	117	0	0	0	0	0	0	0
Plancher	Béton de rives	Béton	0	0	2300	0	0	0	0	0	0	0
Plancher	Treillis métallique	Acier	0	0	0	0.87	0	0	0	0	0	0
Plancher	Chape flottante	Béton	0	0	116.8	0	0	0	0	0	0	0
Plancher	Entrevous	Béton	0	0	109.2	0	0	0	0	0	0	0
Revêtement	Sol	Béton	0	0	116.8	0	0	0	0	0	0	0
Revêtement	Sol, Mur extérieur, Mur intérieur	Carreaux de céramique	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Revêtement	Toit	Terre cuite	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Revêtement	Mortier	Enduit minéral	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0