UNIVERSITÉ DE LORRAINE | BIBLIOTHÈQUES UNIVERSITAIRES

AVERTISSEMENT
DROIT D'AUTEUR

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document. Toute contrefaçon, plagiat ou reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact bibliothèque : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr
(Cette adresse ne permet pas de contacter les auteurs)

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

UNIVERSITÉ DE LORRAINE
34 COURS LÉOPOLD — CS 25233
54052 NANCY CEDEX
TÉL : 03 54 50 54 00
CONTACT@UNIV-LORRAINE.FR
WWW.UNIV-LORRAINE.FR

École Doctorale SIMPPE - ED 608
(Sciences et Ingénierie des Molécules, des Produits, des Procédés et de l'Énergie)

Laboratoire de Recherche LERMAB - USC 1445
(Laboratoire d'Études et de Recherche sur le MAtériau Bois)

Thèse

Présentée et soutenue publiquement pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE l'UNIVERSITE DE LORRAINE

Mention : « Sciences du bois et des fibres »

Odran LEMAITRE

Développement d'outils interactifs d'aide à la décision pour le réemploi et la réutilisation des matériaux Bois et associés issus de la déconstruction de bâtiments : diagnostic-ressources, aptitudes d'usage et qualité environnementale

---

Le 3 juin 2026

Membres du jury :

Rapporteurs :	**Jean-Luc COUREAU**	Maître de conférences (HDR), I2M-Université de Bordeaux
	Emeline CURIEN	Maître de conférences (HDR), LHAC-ENSA Nancy
Examinateurs :		
Président :	**Laurent BLÉRON**	Professeur, LERMAB-Université de Lorraine, Épinal
	Mahdia HATTAB	Professeure, LEM3-Université de Lorraine, Metz
	Clémence LEPOURRY-NICOLLET	Cheffe de projet R&D, INGÉNOVA, Rennes
Directeur de thèse :	**Pierre-Jean MÉAUSOONE**	Professeur, LERMAB-Université de Lorraine, Épinal
Membres invités :		
Co-directrice :	**Caroline SIMON**	Maître de conférences, LERMAB-Université de Lorraine, Épinal
	Julien MEYER	Maître de conférences, MAP-CRAI-ENSA Nancy

Le déchet n'existe pas, seul existe notre regard étroit et discipliné sur les choses matérielles.

Jean-Marc Huygen

Remerciements

Ce mémoire a été élaboré de manière progressive et méthodique. Ce travail n'aurait pu aboutir sans l'assistance de plusieurs personnes à qui je tiens à rendre hommage.

En premier lieu, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadrement, à savoir Pierre-Jean Méausoone, mon directeur de thèse, et Caroline Simon, ma co-directrice de thèse, pour m'avoir offert l'opportunité de me consacrer à cette thématique et d'intégrer cette équipe. Je les remercie pour leur sympathie et leur disponibilité, qui ont favorisé mon épanouissement personnel et professionnel. Au cours de la période s'étendant sur quatre années, une osmose constante a prévalu. Dans le cadre de nos relations de travail, le soutien indéfectible et la bienveillance manifestés ont représenté un pilier de confiance essentiel pour mener à terme ces travaux.

En deuxième lieu, il convient de remercier le jury de thèse dans son ensemble, en commençant par mes rapporteurs, Jean-Luc Coureau et Emeline Curien, d'avoir accepté de lire et d'évaluer ce travail. Je remercie de plus Mahdia Hattab, Clémence Lepourry-Nicollet, Julien Meyer et Laurent Bléron, qui complètent ce jury, qui ont contribué à la richesse des débats lors de la soutenance de thèse. Je remercie plus particulièrement Laurent Bléron pour son soutien, marquée par son expertise et sa perspicacité, qui se sont avérées déterminantes dans l'élaboration de la section relative au classement en résistance des bois de réemploi.

Mes remerciements vont bien évidemment à Fabrice Barbe, directeur général de l'entreprise Vosgelis, sans qui mon intégration au sein de cette organisation n'aurait pas été possible.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui m'ont accompagné et soutenu au cours de ces quatre années. Je pense tout particulièrement à :

Mes collègues de Vosgelis. Je suis reconnaissant envers Véronique Thiery, ma tutrice en entreprise, qui m'a accueilli à bras ouverts et avec qui j'ai pris plaisir à partager des Irish coffee en fin de repas. Merci à David Thouvenel pour nos différents échanges au sujet des chantiers de déconstruction, son expérience dans ce domaine a été plus que précieuse. Merci à Florence Clause pour son soutien sans faille dans le dédale des procédures administratives des marchés publics. Merci à Arnaud Sartori pour m'avoir pleinement intégré dans son équipe et pour nos échanges sur la domination du FC Barcelone dans le football. Je remercie également Thierry Dubrocas avec qui j'ai été ravi de partager mon regard et ma jeune expérience sur les secteurs de la construction et du réemploi. Enfin, je remercie l'ensemble du personnel de Vosgelis avec qui j'ai pu échanger au cours de ces trois années passées en entreprise.

Mes collègues doctorants. Merci Martin Pilon pour les différents échanges scientifiques et les débats autour des vacances des reviewers. Merci à Eliot Gauthey-Franet pour sa chaleur dans le morne hiver spinalien. Merci à Alexandre Suarez pour les pauses fraîcheurs et les débats politiques qui les accompagnent. Merci à Peter Badu pour les discussions footballistiques et les résumés des matchs manqués. Merci à Antoine Stéphan pour les bons moments partagés lors des pauses café du vendredi matin. Merci également à Adrien Magne pour m'avoir partagé sa vision du monde qui m'a fait avancer personnellement. Et de manière générale, je remercie l'ensemble des doctorants et stagiaires avec qui j'ai pu partager un moment ou une discussion.

Je remercie l'ensemble du personnel du campus bois d'Epinal pour leur accueil et leur sympathie, dont les équipes du LERMAB, aux côtés de qui j'ai pris plaisir à m'initier à l'enseignement. Je tiens également à remercier les équipes du CRITT Bois, en particulier l'équipe Méca, qui a toujours répondu présente dès que je la sollicitais.

Merci à mes trois groupes de PFE de l'ENSTIB pour m'avoir assisté sur ce travail de recherche. Manon, Axelle, Gaspard, Fanny et Ambre votre aide fut extrêmement précieuse. Je souhaite aussi remercier les étudiants du campus, qui, à leur manière, ont contribué à rendre cette expérience si enrichissante.

Mes derniers mots de remerciement sont consacrés à mes proches :

Ma belle-famille pour leurs mots d'encouragement et les bons moments passés ensembles. Merci tout particulièrement mon beau-père pour les anecdotes du monde de la recherche.

Ma petite famille spinalienne pour le bonheur qu'elle me procure au quotidien. Merci à Benoit pour la plénitude et la sérénité qu'il apporte et qui permettent d'oublier les tracas du quotidien. Merci à Foué pour son sens inégalé de la répartie et pour les discussions endiablées menées au Division, au Sulky ou au Phonographe. Et finalement, mes plus grands remerciements vont à Claire Béchemin qui a soutenu mes choix, supporté mes doutes et mes angoisses, et qui m'apporte joie et bonheur au quotidien.

Je finirai par remercier les membres de ma famille pour leur soutien inconditionnel. Je tiens tout particulièrement à remercier mes parents qui m'ont soutenu et m'ont permis d'accomplir ce parcours académique. Les mots me manquent pour exprimer à quel point je vous suis reconnaissant… Je vous dédie ce travail.

Glossaire

ACV : Analyse de Cycle de Vie

ADEME : Agence De l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie

AMI : Activités Multiples d'Insertion

CIRAD : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

CNDB : Comité National pour le Développement du Bois

CRITT : Centre Régional d'Innovation et de Transfert de Technologie

CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

CTICM : Centre Technique Industriel de la Construction Métallique

FCBA : Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement

FCRBE : Facilitating the Circulation of Reclaimed Building Elements

FDES : Fiche Déclarative Environnementale et Sanitaire

IFPEB : Institut Français pour la PErformance du Bâtiment

REP PMCB : Responsabilité Élargie du Producteur pour les Produits et Matériaux de Construction du Bâtiment

RE 2020 : Réglementation Environnementale 2020

Table des matières

Remerciements ---- 5
Glossaire ---- 8
Table des matières ---- 9
1- Introduction générale ---- 15
1.1- Contexte général ---- 15
1.2- Présentation de l'étude ---- 19
1.2.1- Contexte de l'entreprise ---- 19
1.2.2- Contexte de l'étude ---- 20
2- Etat de l'art ---- 22
2.1- Présentation de l'état de l'art ---- 22
2.2- Le matériau bois dans le contexte du réemploi ---- 22
2.2.1- Climat associé à la croissance des bois de réemploi ---- 22
2.2.2- Caractéristiques physiques des bois de réemploi ---- 23
2.2.2.1- Humidité et hygroscopicité ---- 23
2.2.2.2- La masse volumique ---- 25
2.2.3- Aspect mécanique ---- 28
2.3.3.1- Usage des bois ---- 28
2.3.3.2- Eurocode ---- 29
2.3.3.2.1- Aspect général ---- 29
2.3.3.2.2- Classement d'un lot de bois ---- 30
2.3.3.3- Aspect lié au réemploi ---- 32
2.3.3.3.1- Méthode visuelle ---- 32
2.3.3.3.2- Méthode machine ---- 33
2.3.3.3.2.1- Méthode acoustique ---- 33
2.3.3.3.2.2- Méthode par l'utilisation de la fréquence propre ---- 34
2.2.4- Bois neufs / Bois anciens ---- 35
2.2.4.1- Cycle de retrait/gonflements ---- 35
2.2.4.2- Le phénomène de fluage ---- 36
2.2.4.3- La présence d'éléments métalliques ---- 36
2.2.4.4- La présence de traitements chimiques ---- 37
2.3- Analyse de cycle de vie ---- 39
2.3.1- Aspects généraux de l'analyse de cycle de vie ---- 39
2.3.1.1- Principes d'une analyse de cycle de vie ---- 39
2.3.1.2- Méthodologie d'une analyse de cycle de vie ---- 40

2.3.1.2.1- Objectifs ---- 40
2.3.1.2.2- Unité fonctionnelle ---- 40
2.3.1.2.3- Cycle de vie ---- 41
2.3.1.2.4- Périmètre de l'étude ---- 42
2.3.1.2.5- Inventaire de cycle de vie ---- 44
2.3.1.2.6- Evaluation des impacts ---- 44
2.3.1.2.7- Interprétation et revue critique de l'étude ---- 46
2.3.1.3- Fiches de déclaration environnementale et sanitaire ---- 47
2.3.2- Le réemploi dans le cas de l'analyse de cycle de vie ---- 49
2.3.2.1- Scénario du réemploi ---- 49
2.3.2.2- Carbone biogénique ---- 51
2.3.2.3- Paramètres d'influences ---- 53
2.3.2.4- Fiches déclaratives, environnementales et sanitaires propres au réemploi ---- 54
2.4- Etat des lieux de la filière du réemploi ---- 55
2.4.1- Etat des lieux réglementaires ---- 55
2.4.1.1- Code de l'environnement ---- 55
2.4.1.2- Loi anti-gaspillage économie circulaire ---- 56
2.4.1.3- Réglementation environnementale 2020 ---- 57
2.4.1.4- La Responsabilité Elargie du Producteur des Produits et Matériaux de Construction du Bâtiment ---- 61
2.4.1.5- Le diagnostic Produits, Equipements, Matériaux et Déchets ---- 63
2.4.2- Etat des lieux des acteurs ---- 66
2.4.2.1- Présentation des acteurs ---- 66
2.4.2.1.1- Bureau d'étude réemploi ---- 66
2.4.2.1.2- Producteur de matériaux ---- 67
2.4.2.1.3- Entreprises d'insertion ---- 68
2.4.2.1.4- Associations ---- 69
2.4.2.2- Synergies entre acteurs ---- 70
2.4.2.3- Une pratique différente de la réglementation ? ---- 71
2.4.2.4- Une industrialisation de la pratique ? ---- 73
3- Matériels et Méthodes ---- 75
3.1- Introduction générale ---- 75
3.2- Sondages et diagnostic ressources ---- 75
3.2.1- Sondage du complexe structurel ---- 75
3.2.2- Diagnostic ressources ---- 77
3.2.2.1- Travail autour des plans ---- 77

3.2.2.2- Création d'un outil ---- 79
3.2.2.3- Réalisation du diagnostic ressources ---- 81
3.3- Tests et dépose sélective des éléments bois ---- 82
3.3.1- Tests de dépose sélective ---- 82
3.3.2- Dépose sélective ---- 85
3.3.2.1- Méthodologie de dépose sélective ---- 85
3.3.2.2- Points d'attention ---- 89
3.3.2.2.1- Traçabilité ---- 90
3.3.2.2.2- Retrait des éléments métalliques ---- 91
3.3.2.2.3- Stockage des éléments bois ---- 93
3.4- Caractérisation mécanique des bois ---- 94
3.4.1- Aspects normatifs ---- 94
3.4.1.1- Flexion 4 points ---- 94
3.4.1.2- Humidité ---- 94
3.4.1.3- Masse volumique ---- 95
3.4.1.4- Longueur utile ---- 95
3.4.1.5- Section utile ---- 95
3.4.2- Outils portatifs ---- 96
3.4.2.1- Sylvatest® ---- 96
3.4.2.2- Technologies vibratoires ---- 98
3.4.2.2.1- Vibratoire transverse ---- 98
3.4.2.2.2- BING ---- 100
3.4.3- Méthode en laboratoire ---- 101
3.4.3.1- Choix technologique ---- 101
3.4.3.2- Utilisation banc d'essais portatif ---- 103
3.4.3.3- Démarche de classement en résistance ---- 104
3.4.3.4- Problématiques liées au réemploi ---- 104
3.4.4- Méthode sur chantier ---- 105
3.4.4.1- Mise en place sur chantier ---- 105
3.4.4.2- Démarche de classement en résistance ---- 106
3.5- Orientation des éléments bois de seconde main ---- 108
3.5.1- Orientation vers entreprise de charpente bois ---- 108
3.5.2- Orientation vers le CRITT Bois ---- 110
3.5.3- Orientation vers les associations ---- 111
3.6- Analyse de Cycle de Vie ---- 112
3.6.1- Aspects normatifs ---- 112

3.6.1.1- Méthodologie selon norme NF EN 15804+A2/CN ---------- 112
3.6.2- Outil de modélisation ---------- 112
3.6.3- Méthodologie de modélisation ---------- 113
3.6.3.1- Récolte des données ---------- 113
3.6.3.2- Unité fonctionnelle ---------- 113
3.6.3.3- Base de données Eco-Invent ---------- 113
3.6.3.4- Méthode de calcul ---------- 114
3.6.3.6- Interprétation ---------- 114
4- Résultats et discussions ---------- 115
4.1- Déconstruction sélective ---------- 115
4.1.1- Diagnostic ressources ---------- 115
4.1.2- Dépose sélective ---------- 117
4.2- Classement en résistance ---------- 119
4.2.1- Travaux en laboratoire ---------- 119
4.2.1.1- Détermination de la méthode non-destructive à utiliser ---------- 119
4.2.1.2- Démonstration de l'utilisation d'un banc d'essai portatif ---------- 128
4.2.1.3- Classement en résistance du lot ---------- 133
4.2.2- Essai sur site ---------- 134
4.2.3- Essais au Critt Bois ---------- 138
4.2.3- Etude comparative sur la méthode non-destructive à utiliser ---------- 141
4.3- Analyse de cycle de vie ---------- 152
4.3.1- Scénarios de réemploi ---------- 152
4.3.1.1- Les étapes nécessaires au calcul du coût carbone pour les matériaux de réemploi - 152
4.3.1.1.1- La phase A1 ---------- 152
4.3.1.1.2- La phase A2 ---------- 154
4.3.1.1.3- La phase A3 ---------- 155
4.3.1.1.4- La phase A4 ---------- 157
4.3.1.1.5- Le module D ---------- 157
4.3.1.2- Les limitations liées aux FDES ---------- 161
4.3.2- Inventaire des données ---------- 163
4.3.2.1- Collecte des données ---------- 163
4.3.2.1.1- Phase A1 ---------- 163
4.3.2.1.2- Phase A2 ---------- 164
4.3.2.1.3- Phase A3 ---------- 164
4.3.2.1.4- Phase A4 ---------- 164
4.3.2.2- Intérêt des données collectées ---------- 164

4.3.3- Calculateur carbone ---------- 165
4.3.3.1- Intérêt de l'utilisation d'un calculateur carbone ---------- 165
4.3.3.2- Fondement du calculateur ---------- 166
4.3.3.2.1- Les étapes du processus de réemploi ---------- 166
4.3.3.2.2- Les données nécessaires pour le calcul du coût carbone ---------- 169
4.3.3.2.3- Intégration des bases de données sous Excel ---------- 170
4.3.3.2.4- Remplissage des bases de données ---------- 172
4.3.3.2.5- Détail des calculs du calculateur carbone ---------- 173
4.3.3.2.5.1-Calcul des émissions de $CO_{2,eq}$ pour le transport ---------- 174
4.3.3.2.5.2- Calcul des émissions de $CO_{2,eq}$ pour l'utilisation d'une machine ---------- 174
4.3.3.2.5.2.1- Cas des machines électriques ---------- 174
4.3.3.2.5.2.2- Cas des machines ou appareils thermiques ---------- 175
4.3.3.2.5.2.2.1- Cas des moteurs diesel non défini ---------- 175
4.3.3.2.5.2.2.2- Cas des moteurs essence non défini ---------- 175
4.3.3.2.5.2.2.3- Cas des moteurs 4 temps - essence sans plomb ---------- 176
4.3.3.2.5.2.2.4- Cas des moteurs 2 temps – essence/huile ---------- 176
4.3.3.2.5.3- Calcul des émissions de $CO_{2,eq}$ pour les produits ---------- 177
4.3.3.2.5.4- Calcul des émissions de $CO_{2,eq}$ totales pour le processus de réemploi de la poutre ---------- 177
4.3.3.3- Elaboration de l'interface du calculateur ---------- 177
4.3.3.4- Présentation de l'interface du calculateur et de son usage ---------- 178
4.3.3.4.1- La page d'accueil ---------- 179
4.3.3.4.2- Les pages « Tutoriels » ---------- 180
4.3.3.4.3- Les pages « Rentrer votre parc machine » ---------- 181
4.3.3.4.4- Les pages « Consulter Parc existant » ---------- 183
4.3.3.4.5- Les pages « Importer des données de SimaPro » ---------- 184
4.3.3.4.6- Les pages « Catalogue SimaPro » ---------- 185
4.3.3.4.7- Les pages « Données poutre » ---------- 186
4.3.3.4.8- Les pages « Données calcul » ---------- 187
4.3.3.4.9- Les pages « Résultat des émissions de $CO_{2,eq}$ » ---------- 188
4.3.3.5- Utilisation du calculateur dans le cadre d'une solive issue du chantier de Remiremont ---------- 190
4.3.3.5.1- Importation du parc machine de l'entreprise de charpente ---------- 190
4.3.3.5.1.1- Importation des données relatives à la tronçonneuse ---------- 190
4.3.3.5.1.2- Importation des données relatives à la scie de débit ---------- 191
4.3.3.5.2- Calculer le coût carbone relatif à une solive bois ---------- 191

4.3.3.5.3- Interprétation des résultats et Comparaison à une solive neuve manufacturée équivalente ---------- 195

5- Conclusions et perspectives ---------- 204

Bibliographie ---------- 212

Liste des figures ---------- 228

Liste des tableaux ---------- 232

Annexe 1 : Régressions simples linéaires pour les résineux et régressions simples puissances pour les feuillus où les constantes élastiques sont en fonction de la masse volumique, d'après les travaux de D. Guitard. ---------- 233

Annexe 2 : Liste des différents indicateurs environnementaux utilisés accompagnée de leur unité relative et d'une brève description. ---------- 234

Annexe 3 : Vue de la modélisation 3D sous forme filaire des bâtiments liés à l'opération de Remiremont, réalisée avec le logiciel SketchUp ---------- 236

Annexe 4 : Description et explication du modèle 3D du banc d'essai mobile ---------- 237

Annexe 5 : Annexe J du règlement du programme INIES relative aux règles spécifiques ---------- 240

Annexe 6 : Fiche de déclaration environnementale et sanitaire du produit « Bloc porte gamme réemploi » de l'entreprise COMEC ---------- 254

Annexe 7 : Fiche de déclaration environnementale et sanitaire du produit « Façade sanitaire gamme réemploi » de l'entreprise COMEC ---------- 277

Annexe 8 : Fiche de déclaration environnementale et sanitaire du produit « Élément porteur résineux en bois de France (poteaux, poutres, solives…) » de la part de la Fédération Nationale du Bois ----- 300

Résumé ---------- 327

Abstract ---------- 328

1- Introduction générale

1.1- Contexte général

En France, le secteur du bâtiment et des travaux publics contribue de manière significative aux impacts environnementaux malgré un renforcement des mesures et des normes par l'Etat au cours de ces dernières années. Ainsi, environ 18 % des émissions totales françaises de CO_2 en 2022 sont dues au secteur du bâtiment [Ministère de la transition énergétique. 2023]. Au niveau mondial, c'est près de 21% des émissions de CO_2 qui sont générées par ce secteur, où une part importante est attribuée à la production des matériaux de construction. En incluant l'exploitation des bâtiments à la phase construction, près de 40 % des émissions mondiales de CO_2 liées à l'énergie proviennent de ce domaine [United Nations Environment Programme and Global Alliance for Buildings and Construction 2024]. Au-delà du coût carbone lié à la production de matériaux neufs, c'est également l'utilisation toujours plus accrue de ressources naturelles qui questionne. Le sable, constituant essentiel du béton, est la ressource naturelle la plus exploitée dans le monde derrière l'eau, elle-même entrant dans l'élaboration du béton. Alors que la part d'extraction du sable dépasse la part de renouvellement de cette même ressource [John 2009], force est de constater que son exploitation est toujours croissante.

En parallèle, la part des déchets produits par le secteur du bâtiment et des travaux publics est toujours significative puisque les chiffres de 2023 indiquent une production de 213 millions de tonnes de déchets pour la seule année 2020 en France [ADEME 2023-1]. Concernant le secteur du bâtiment uniquement, c'est 46 millions de tonnes de déchets par an qui sont produites selon les chiffres de 2020 de l'Etat français, représentant environ 15% de l'ensemble des déchets générés dans le pays. La répartition des déchets au sein du secteur du bâtiment est organisée de la manière suivante : 49 % proviennent de la démolition, 38 % de la réhabilitation et 13 % de la construction neuve [Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires.2020].

Le taux de valorisation des déchets du bâtiment est quant à lui très variable selon l'activité - 60 à 80 % pour la démolition, 10 à 30 % pour la réhabilitation, 40 à 60 % pour la construction neuve - et le type de déchets - 60 à 70 % pour les déchets inertes, 30 à 50 % pour les déchets non dangereux non inertes [Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires.2020]. On remarque que le taux de valorisation des déchets varie fortement selon la source [Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires.2020] [ADEME 2023-1] car les hypothèses prises ne sont pas identiques d'une étude à une autre. Il est également important de comprendre que la valorisation des déchets comprend une hiérarchisation bien établie [Directive européenne 2008/98/CE], comme le montre la (Figure 1).

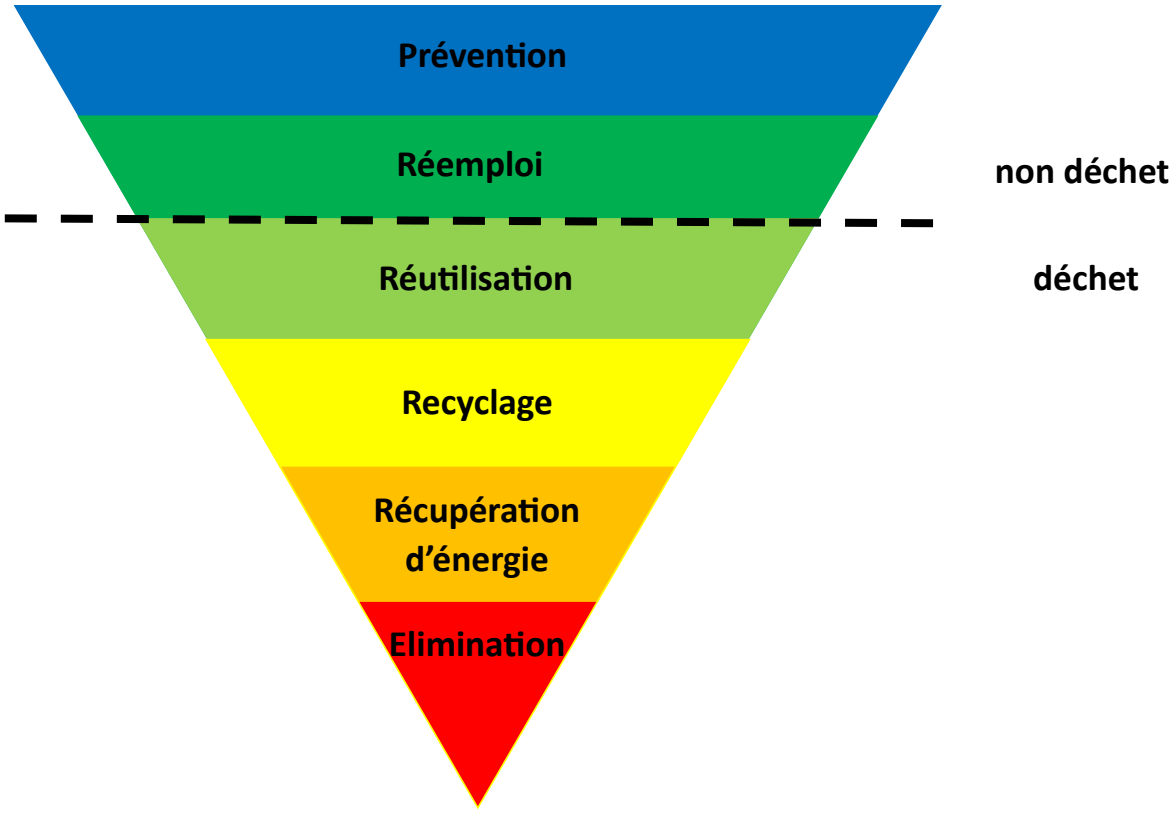


Figure 1 - Hiérarchie de valorisations des déchets selon la directive cadre européenne 2008/98/CE

La (Figure 1) met en exergue la priorisation de la prévention qui donne lieu à une non-production de déchet et qui doit rester une priorité puisque le meilleur déchet est celui que l'on ne produit pas. Le réemploi et la réutilisation, établies au même niveau de valorisation, sont à privilégier en comparaison avec d'autres valorisations plus classiques comme le recyclage et la récupération d'énergie. On peut voir cette hiérarchie comme une priorisation de la valorisation de l'objet. On cherche à favoriser dans un premier temps l'objet bâti par la prévention en cherchant à augmenter sa durée de vie puis on valorise l'objet dans un deuxième temps par le réemploi et la réutilisation. Ces deux valorisations, bien qu'indivisibles au niveau de la pratique, se distinguent au niveau juridique par le passage de la ressource considérée au statut de déchet dans le cas de la réutilisation. Le recyclage permet une valorisation uniquement de la matière qui compose l'objet en la considérant comme une matière première récupérée pour la fabrication d'un nouvel objet. Enfin, la récupération d'énergie permet de valoriser énergétiquement la matière qui compose l'objet souvent sous forme de cogénération. L'élimination quant à elle reste à éviter puisqu'elle n'est pas une valorisation mais bien une preuve de l'échec de l'Homme à valoriser un objet qu'il a lui-même créé.

Les taux de valorisation présentés précédemment comprennent l'ensemble des différentes valorisations des déchets cependant il existe une grande disparité entre ceux-ci. Le réemploi et la réutilisation des matériaux de construction, se trouvant au sommet de la hiérarchie des moyens de valorisation, semblent être des solutions prometteuses pour décarboner le secteur du bâtiment.

Cependant, en 2020 le réemploi ne représentait seulement qu'1% des voies de valorisation adoptées pour la gestion des éléments en fin de vie dans le secteur de la construction [FCRBE 2020]. Ce chiffre souligne la nécessité de changer de pratique dans le secteur du bâtiment et de passer à un modèle plus ancré dans l'économie circulaire afin de réduire l'impact environnemental toujours plus grandissant de ce secteur.

Le matériau bois, malgré son rôle clé dans ce changement de paradigme aspirant à une construction plus durable, est soumis aux conséquences du dérèglement climatique en perpétuelle évolution [IPCC 2022]. Certaines essences de bois voient leur peuplement dépérir, touchées par des sécheresses de plus en plus fréquentes et accentuées par un risque hydrique de plus en plus important [Bouvet 2020] [Bréda 2004]. Malgré des travaux de recherche menés sur l'implantation d'essences moins sujettes à ces risques ou sur l'adaptation de l'écosystème forestier aux contraintes à venir, la problématique reste actuelle. L'Office National des Forêts s'efforce de conduire des actions qui vont en ce sens mais leur aboutissement ne s'observe que de nombreuses années après. En parallèle, on a pu remarquer une propagation rapide des atteintes biotiques des bois. En France, le scolyte cause des ravages importants sur les essences résineuses même si cette tendance tend à se stabiliser [Gilles 2023]. La ressource bois qui semble donc de plus en plus menacée, demeure néanmoins un composant essentiel pour l'atténuation du changement climatique.

Le matériau bois permet de nombreux leviers d'action sur la modération du changement climatique. La séquestration de carbone en forêt, la séquestration de carbone dans les produits en bois, ou encore la substitution de bois à d'autres matériaux davantage consommateurs d'énergies fossiles en sont les principaux [ADEME 2021]. Par ailleurs, le secteur du bâtiment ambitionne de poursuivre sa décarbonation par une utilisation toujours plus accrue du matériau bois [CARBONE 4 2023]. Cependant, cette idée met en concurrence le principe de séquestration de carbone en forêt et l'utilisation du matériau bois. Dans ce contexte, la ressource bois, déjà présente dans les bâtiments et qui joue de fait un rôle de puits de carbone, semble intéressante à conserver à travers le temps. Cette représentation est développée à travers le principe de « Cascading wood » [Sakaguchi 2014]. Le bois de structure est d'autant plus intéressant dans ce système, puisqu'on peut lui appliquer différents usages après sa première utilisation, et ainsi favoriser le stockage du carbone à travers le temps, à l'image de la (Figure 2). Le réemploi est alors une solution pertinente pour une conservation de la ressource forestière et de la continuité de stockage de carbone. En France, les projets de lois promouvant le réemploi du bois et le réemploi de manière générale sont de plus en plus nombreux [Loi n°2018-1021] [Loi n°2020-105] [Décret n°2021-821]. Cependant, malgré ces avancées positives, le réemploi du bois structurel en France reste en marge des pratiques constructives, les normes et réglementations actuelles n'étant pas toujours adaptées pour encourager efficacement la pratique. Les

chantiers tests restent à la marge [Le Moniteur 2021] [Giaume 2024] ce qui empêche d'avoir des retours d'expérience et le recul nécessaire pour une intégration systématique du réemploi sur les chantiers.

Les marchés publics semblent être une bonne plateforme pour favoriser le recours au réemploi systématique sur les chantiers de construction. Les contraintes réglementaires et administratives imposent un encadrement de la pratique plus actif que pour les marchés privés où les degrés de liberté sont notables. C'est par ce cadre que la filière de réemploi va pouvoir se structurer et former un secteur

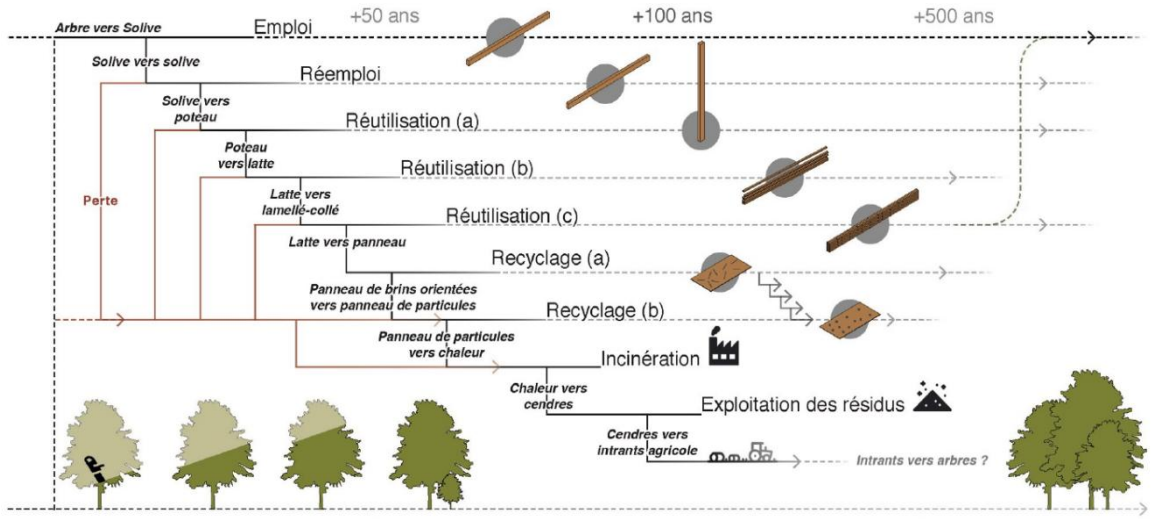


Figure 2 - Schéma d'après la thèse de master de D. Sakaguchi, Potential for cascading wood from building, Université Aalto, 2014

à part entière du bâtiment. Cependant, parallèlement, c'est aussi par ces fortes contraintes que le réemploi peine à émerger au niveau de la construction, notamment le réemploi de bois structurel. Les normes et réglementations ne sont pas des plus adaptées à cette pratique et causent une appréhension au recours du réemploi sur les chantiers de la part des assureurs. Cette inquiétude se traduit par des surcoûts sur les assurances. Cependant, ces surcoûts ne peuvent pas être assumés de manière systématique par les acteurs de la construction, que ce soient les entreprises de travaux, les maîtres d'ouvrage ou les maîtrises d'œuvre. Malgré l'existence de guides pour l'intégration du réemploi dans les marchés publics, la pratique reste relativement faible [FCRBE – Reuse toolkit – 2021].

1.2- Présentation de l'étude

1.2.1- Contexte de l'entreprise

C'est dans ce contexte général que ce sujet de thèse prend place, il doit permettre de répondre aux besoins du bailleur social VOSGELIS, qui souhaite intégrer le réemploi dans ses pratiques courantes. VOSGELIS est un bailleur social vosgien, le plus important de Lorraine. L'entreprise accueille plus de 200 collaborateurs répartis entre les 5 agences locatives et le siège social. L'entité gère un parc locatif de plus de 16 500 logements implantés dans le secteur des Vosges et en Alsace depuis peu. Ce bailleur construit en moyenne plus d'une cinquantaine de logements par an pour le double en déconstruction. Le bénéfice du réemploi semble alors intéressant pour cette entreprise puisqu'elle dispose à la fois de la ressource, par ses chantiers de déconstruction, et de la demande, par ses chantiers de construction.

Cette thèse se base sur une recherche/action en ingénierie menée lors d'un chantier de déconstruction/reconstruction situé dans la ville de Remiremont, au Sud-Est des Vosges. Ce projet comprend la déconstruction de quatre bâtiments, datant du début du 20ème siècle et comptabilisant au total 22 logements, et la construction de deux nouveaux bâtiments dénombrant 24 nouveaux logements et comprenant un local commercial pour la nouvelle agence locative de la ville. La (Figure 3) montre la typologie des bâtiments faisant l'objet d'une déconstruction. Les bâtiments n'ont pas été conservés car ils étaient inadaptés pour des logements dédiés aux seniors, a contrario des nouveaux logements qui seront labellisés Habitat Senior Service (HSS). La nouvelle résidence sera également labellisée « Haute Qualité Environnementale » sur le profil « économie circulaire ».



Figure 3 - Un des bâtiments sujets à la déconstruction et présentant la typologie des bâtiments présents sur le site

1.2.2- Contexte de l'étude

Les acteurs ayant œuvré pour le réemploi de ce chantier sont nombreux et présentent des statuts différents et complémentaires. Cependant, il est essentiel de retenir que les acteurs se sont coordonnés afin que le réemploi soit le plus effectif lors du chantier. La maîtrise d'œuvre et le contrôleur technique ont reçu des missions précises de la part du maître d'ouvrage VOSGELIS dans lesquelles la démarche de réemploi était amplement explicitée. Ainsi, la maîtrise d'œuvre s'est attachée à prendre en considération le réemploi dès la phase esquisse et a explicité et détaillé son intégration au fur et à mesure de l'avancée du projet. Le contrôleur technique, quant à lui, a pleinement embrassé son rôle de conseiller afin de promouvoir le réemploi. Il a parfaitement énoncé les points prioritaires afin que la démarche de réemploi puisse être validée du point de vue technique.

Les entreprises du chantier ont quant à elles dû répondre à un cahier des charges précis établi entre les différents acteurs que sont la maîtrise d'ouvrage, la maîtrise d'œuvre, le contrôleur technique et les assureurs. Ce cahier des charges, élaboré à la suite des nombreuses réunions regroupant l'ensemble de ces acteurs, a alors pu être intégré dans les marchés de travaux des entreprises concernées. Ce cahier des charges se décompose en 4 lignes directrices qui doivent permettre de pérenniser l'acte de réemploi à travers la démarche mise en place lors du chantier : la traçabilité, la dépose sélective, le stockage et la phase de caractérisation.

La traçabilité est essentielle puisqu'elle permet de prouver que les éléments bois considérés ne passent pas par le statut de déchet lors des différentes phases rencontrées sur le chantier, de la dépose sélective jusqu'à la remise en œuvre des éléments. La dépose sélective, réalisée par l'entreprise de déconstruction, est une phase capitale puisqu'elle conditionne l'état dans lequel les éléments bois vont être restitués à l'entreprise de charpente pour leur remise en œuvre. Un stockage adapté des éléments bois est indispensable puisqu'il conditionne également l'état général des matériaux une fois leur dépose sélective réalisée. Cet acte doit être réalisé selon les règles de l'art suivantes : mise hors d'eau des éléments bois, surélévation des éléments bois par rapport au sol, instauration d'une ventilation conséquente entre chaque rangée d'éléments bois. La phase de caractérisation est la plus importante puisqu'elle permet d'authentifier que l'élément bois a toutes les caractéristiques requises pour sa remise en œuvre. A la suite de cette phase, il doit être prouvé que l'élément bois considéré répond aux mêmes exigences que son équivalent neuf manufacturé.

L'objectif principal de ce chantier est la montée en compétences des acteurs impliqués dans la démarche de réemploi mais également une continuité de la pratique du réemploi par la suite. L'acte de réemploi établi lors de ce chantier doit constituer une base de travail propice au développement des pratiques vertueuses spécifiques à chacun des acteurs. Par exemple, l'entreprise de déconstruction ayant œuvré sur ce chantier souhaite désormais étendre sa pratique de dépose sélective sur l'ensemble de ses chantiers, même lorsque la maîtrise d'ouvrage ne le demande pas spécifiquement, dans le but de développer une plateforme de matériaux de réemploi. Ce chantier initial leur permet alors d'identifier les exigences relatives à la dépose sélective et les moyens nécessaires à la bonne mise en œuvre de cette pratique sur chantier.

2- Etat de l'art

2.1- Présentation de l'état de l'art

Au sein de cette bibliographie, différentes notions en lien avec le sujet vont être abordées :

- L'aspect climatique fera l'objet de deux parties : une première traitant du contexte de croissance des bois de déconstruction et une seconde se rapportant au contexte climatique actuel permettant d'argumenter l'intérêt du recours au réemploi ;
- Les caractéristiques physiques des bois de réemploi où l'on abordera notamment la densité et l'humidité qui sont deux paramètres influençant la résistance mécanique du bois ;
- L'aspect mécanique des bois de réemploi qui intègrera l'usage des bois de réemploi à considérer dans le contexte de la thèse, la notion d'Eurocode et la comparaison que l'on peut mener entre des bois neufs manufacturés et des bois de réemploi issus de déconstructions ;
- L'état de l'art réglementaire sur le réemploi notamment à travers le Code de l'Environnement, les textes relatifs à la responsabilité du producteur et la réglementation environnementale 2020 ;
- L'état des lieux des différents acteurs qui œuvrent dans ce domaine ;
- La notion d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) dans le contexte du réemploi sera évoquée : on s'attachera à observer et identifier les scénarios de réemploi considérés ainsi que la prise en compte du carbone biogénique dans la modélisation. Une partie portera également sur l'intégration du réemploi dans les Fiches Déclaratives Environnementales et Sanitaires (FDES).

2.2- Le matériau bois dans le contexte du réemploi

2.2.1- Climat associé à la croissance des bois de réemploi

Les bois issus de déconstruction ont poussé dans un contexte climatique différent de celui rencontré actuellement. Pour partie, la croissance de ces bois était différente de celle de ces dernières années, à l'image des études portées sur l'évolution de la croissance des bois lors du 20ème siècle [Bosela 2018]. Ce phénomène implique des conséquences sur les caractéristiques intrinsèques propres à une même essence de bois [Silvestro 2023]. Les différentes caractéristiques peuvent donc différer de celles prises pour référence dans le contexte actuel [Dupont 1875] [CIRAD 2015]. Dans le même temps, les règles de sylviculture étaient différentes de celles communément employées de nos jours. Le choix des arbres pour l'abattage n'était pas le même, les arbres ainsi identifiés respectaient des règles toutes autres [Corvol 2019]. Les bois présentant des singularités, comme leur forme ou leur courbure, étaient

justement retenus pour ces spécificités pour un usage adapté [Matthew 1831]. Les sections et longueurs définies de l'époque ne sont également pas les mêmes que celles rencontrées actuellement. Jadis, l'industrialisation de la filière bois n'était bien évidemment pas autant développée qu'actuellement et la normalisation inexistante.

2.2.2- Caractéristiques physiques des bois de réemploi

2.2.2.1- Humidité et hygroscopicité

Le bois a la capacité d'absorber ou de rejeter de l'eau en fonction des conditions de température et d'humidité relative de l'air ambiant. Au sein du bois, l'eau se trouve sous deux formes :

- **Liée** : c'est l'eau qui est liée chimiquement aux composés de la paroi cellulaire.
- **Libre** : c'est l'eau qui est sous état liquide ou gazeux et qui se situe dans les lumens, la partie vide des cellules.

La (Figure 4) permet la visualisation de la présence de l'eau libre et de l'eau liée au niveau microscopique sur la structure d'un bois résineux.

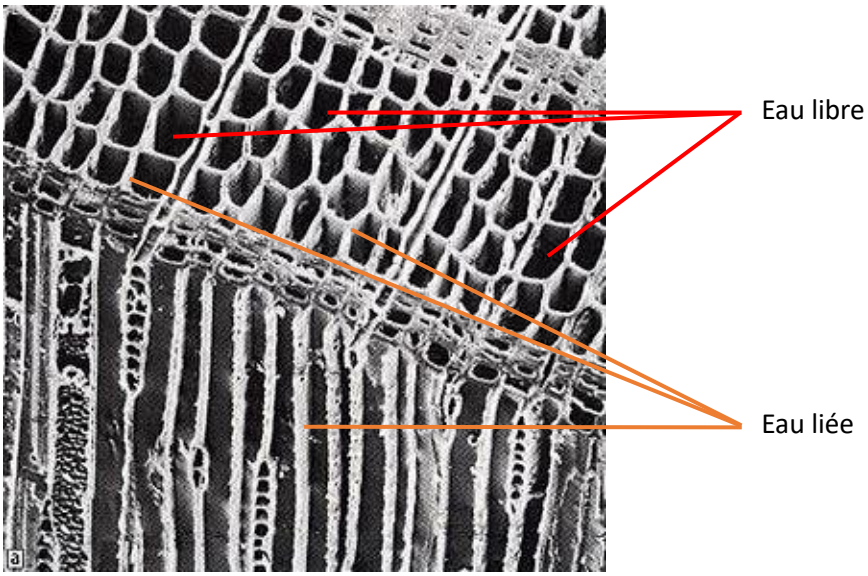


Figure 4 - Visualisation de la présence de l'eau libre et de l'eau lié à l'échelle microscopique sur un bois résineux

Dans le cas de l'eau liée, on atteint un seuil, appelé point de saturation des fibres, qui en moyenne correspond à un taux de 30% d'humidité. Le taux d'humidité est défini comme la quantité d'eau présente dans le bois, exprimée en pourcentage de son poids à l'état anhydre (1). Ainsi, lors du séchage, l'eau libre s'évacuera progressivement par évaporation et ce sans qu'il n'y ait aucun phénomène de retrait ou de déformation. C'est ce que l'on nomme couramment la phase de « ressuyage ». A contrario, l'eau liée entraîne forcément des phénomènes de retrait ou de déformation puisqu'elle est intimement liée aux composés des parois cellulaires.

$$H\% = 100 . \frac{M_H - M_{Anhydre}}{M_{Anhydre}} \quad (1)$$

Avec :

- H% : le taux d'humidité du bois exprimée en pourcentage.
- M_H : la masse du bois humide exprimée en gramme.
- $M_{Anhydre}$: la masse du bois anhydre exprimée en gramme.

L'humidité du bois affecte les propriétés mécaniques lorsque l'on se situe en dessous de la limite de saturation des fibres [Gerhards 1982]. Des études expérimentales ont donc permis de déterminer des formules quantifiant l'influence du taux hydrique sur les propriétés mécaniques du bois. Ces formules sont des relations linéaires entre une propriété mécanique donnée et l'humidité. En Europe, le bois est défini comme sec lorsque son taux d'humidité est inférieur à 18 % mais la valeur de référence pour les propriétés mécaniques est définie à 12% [NF EN 1995-1] [NF EN 1995-2].

Dans le contexte du réemploi, l'humidité est un facteur déterminant pour la mécanique des bois. Les bois issus de déconstruction, lorsqu'ils ont été mis en œuvre, ne devaient pas respecter les mêmes obligations de pose. La plupart des règles et normes constructives sont apparues durant la seconde moitié du 20ème siècle. L'humidité était ainsi un facteur considéré mais pas dans les mêmes dispositions qu'aujourd'hui. Ces bois ont alors pu résister à plusieurs décennies de cycles répétés de retrait et gonflement, dus à des variations importantes d'humidité. Ils ont en outre pu subir des dégradations, du fait d'un taux d'humidité suffisant pour entraîner des attaques fongiques. Les bois peuvent aussi subir des dégradations a posteriori de leur déconstruction notamment lors des phases de stockage et de transport.

2.2.2.2- La masse volumique

La masse volumique d'un élément est définie comme le rapport de la masse de l'élément sur le volume de ce même élément (2). Elle exerce une forte influence sur les propriétés mécaniques. En effet, des relations ont été établies [Guitard 1987] entre la masse volumique et les modules d'élasticité. Ces relations ne sont valables que lorsque le bois est considéré comme sec, soit un taux d'humidité considéré au maximum à 12 %. La première relation (3) est celle pour les résineux, la seconde est celle pour les feuillus (4).

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad (2)$$

Avec :

- ρ : la masse volumique exprimée en kg/m³.
- m : la masse exprimée en kg.
- V : le volume exprimé en m³.

$$s_{ij}^{-1} = s_{ij}^{0-1} + C \,.\, (\rho - \rho_0) \qquad (3)$$

$$s_{ij}^{-1} = s_{ij}^{0-1} \,.\, \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^C \qquad (4)$$

Avec :

- s_{ij}^{-1} : la complaisance élastique de l'échantillon considéré en N/m².
- s_{ij}^{0-1} : la complaisance élastique de référence pour une masse volumique ρ_0 de référence en N/m².
- ρ : la masse volumique de l'échantillon en kg/m^3.
- ρ_0 : la masse volumique de référence, c'est-à-dire 450 kg/m³ pour les résineux et 650 kg/m³ pour les feuillus.
- C : des constantes obtenues selon des essais empiriques et relatives à chacun des paramètres s_{ij}^{-1} . L'{Annexe 1} permet la visualisation des constantes à travers les différentes régressions relatives aux bois feuillus et aux bois résineux.

A partir de ces relations, on peut montrer que l'augmentation de la masse volumique améliore les modules d'élasticité et ce pour les trois directions privilégiées du bois : longitudinale, radiale et

tangentielle. Cette conclusion peut être portée pour les résineux comme pour les feuillus. Cependant, les relations entre la masse volumique et les propriétés élastiques sont plus fortes dans le cas des feuillus.

En outre, il existe des variations de masse volumique de différentes natures :

- **Au sein d'une essence** : la masse volumique n'est pas forcément la même d'un individu à un autre pour une même essence. Cela est dû aux phénomènes qui influent sur la croissance de l'arbre : climat, nature du sol, … La (Figure 5) permet de montrer l'influence du type de station forestière sur la masse volumique moyenne du bois de chênes pédonculés, à âge et largeur de cerne fixés [Ackermann 1995].
- **Au sein d'un individu** : la masse volumique au sein d'un individu est différente d'une partie à une autre. La (Figure 6) permet de visualiser les changements de masse volumique des différentes parties d'un arbre dans le cas du sapin pectiné [Billard 2019].
- **Au sein d'un cerne de croissance** : la masse volumique entre le bois initial et le bois final n'est pas la même. Le (Tableau 1) permet de visualiser les variations de masse volumique au sein d'une cerne de croissance dans le cadre du chêne sessile [Guilleyinsta 2003].

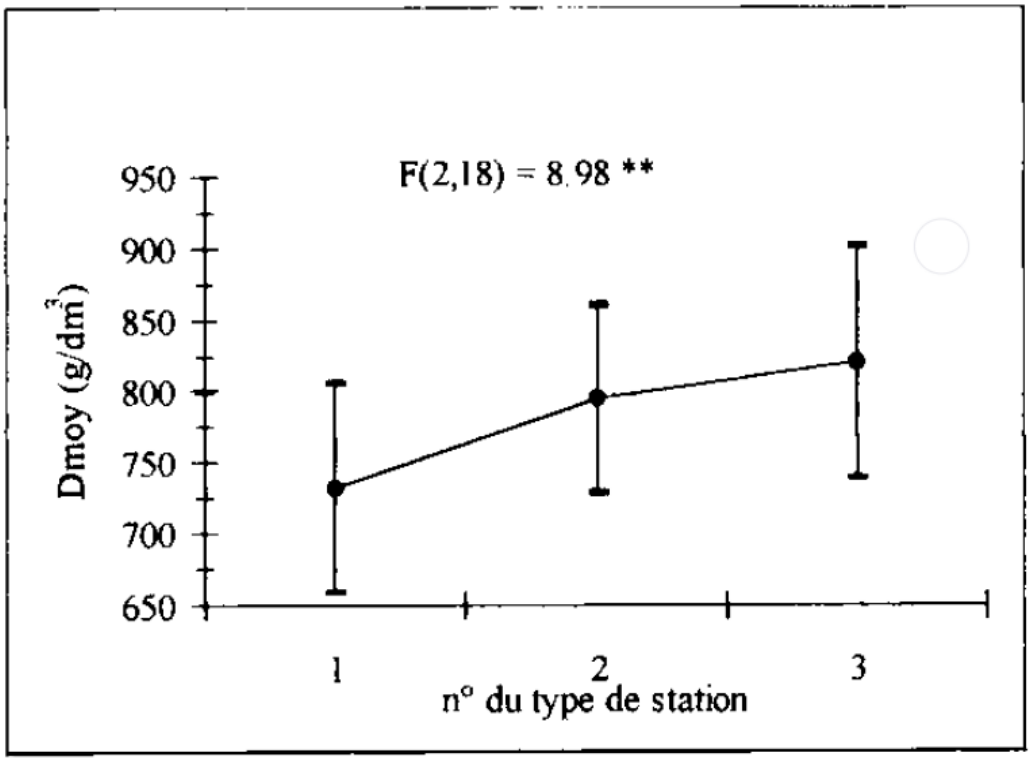


Figure 5 - Influence du type de station forestière sur la masse volumique moyenne du bois de chênes pédonculés à âge et largeur de cerne fixée, d'après une étude de F. Ackermann

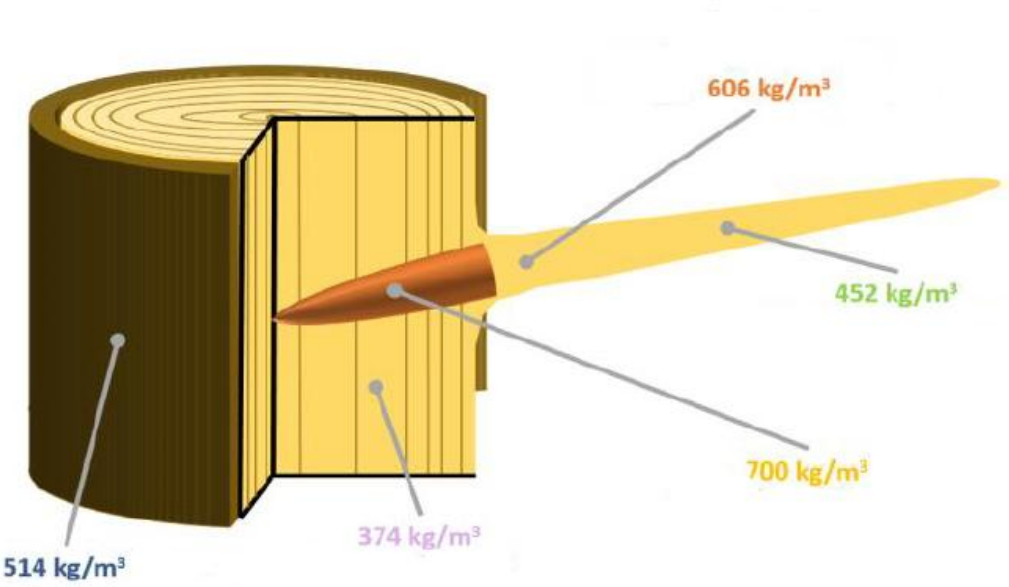


Figure 6 - Masse volumique des différentes parties d'un arbre pour Albies alba, d'après une étude de A Billard

Caractéristiques anatomiques		Moyenne	Écart-type	Coefficient de variation (%)
Masse volumique des tissus (kg/m³)	Gros vaisseaux	100	62	62
	Parenchyme axial du bois initial	635	60	9
	Parenchyme axial du bois final	626	67	11
	Fibres du bois initial	998	90	9
	Fibres du bois final	1051	72	7
	Gros rayons ligneux du bois initial	1012	145	14
	Gros rayons ligneux du bois final	1047	138	13
Masse volumique moyenne du cerne (kg/m³)		755	76	10

Tableau 1 - Variations des masses volumiques des différents tissus constitutif d'un cerne de croissance dans le cadre du chêne sessile, d'après les travaux de E Guilleyinsta

Dans le contexte du réemploi, la masse volumique est un facteur notable puisqu'elle conditionne l'usinage des bois. Les bois présentant une masse volumique importante, à l'instar de nombreux feuillus, n'utilisent pas les mêmes paramètres d'usinage ni les mêmes outils de coupe que les bois à plus faible masse volumique comme les résineux. En ce sens, les règles d'usinage usuelles pour une

essence donnée ne sont donc pas forcément adaptées pour un bois de cette même essence issu d'une déconstruction. Il faut alors prévoir un temps de calibrage afin de trouver les paramètres optimaux lors de l'usinage, ce qui représente un coût non négligeable dans le cadre d'une entreprise.

2.2.3- Aspect mécanique

2.3.3.1- Usage des bois

Les bois issus de déconstruction considérés dans ce sujet sont des bois structurels. Les bois de structure sont utilisés dans la construction de bâtiments ou d'ouvrages d'art. Ils ont la capacité d'assurer la stabilité et la portance de l'édifice. On peut trouver des usages différents pour les bois structurels. Ces usages induisent des sollicitations différentes. Par exemple, un poteau sera sollicité en compression, une solive de plancher sera sollicitée en flexion, et un bois présent dans un plancher collaborant bois/béton sera sollicité en traction. La (Figure 7) permet de visualiser les efforts dans une poutre bi-appuyée sous une charge descendante verticale et qui équivaut au processus se déployant au sein d'un plancher mixte bois/béton.

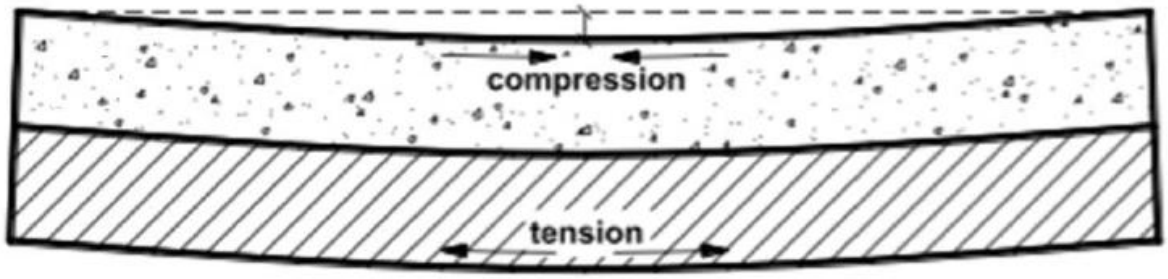


Figure 7 - Efforts dans une poutre bi-appuyée sous une charge descendantes verticale

Les bois à usage structurel et issus de déconstruction ont un fort intérêt pour le secteur du réemploi et par la même occasion de la construction. Par leur nature, ils stockent du carbone qui ne va alors pas contribuer aux gaz à effet de serre si ce stock est conservé dans le temps. Ces bois doivent voir leur durée de vie prolongée dans le temps par une succession de cycles de vie, où chaque cycle de vie est un usage spécifique de l'élément [Yishu 2021] [Sakaguchi 2014]. En parallèle du prolongement du cycle de vie de l'élément bois, la forêt dont il est issu se régénère. On contribue de cette manière au maintien et à l'augmentation du puits de carbone associé aux produits bois tout en préservant le puits de carbone et l'action des forêts dans l'atténuation du changement climatique [ADEME 2021].

Le prélèvement de ressources manufacturées en zone urbaine est souvent rapporté au concept d'exploitation minière urbaine. Cette approche conceptualise les zones urbaines comme des gisements de ressources à ciel ouvert, où l'extraction peut être effectuée selon des modalités similaires à celles des ressources naturelles. Un concept qui doit être fortement allié à une stratégie d'économie circulaire

[Cossu 2015]. Ce concept peut être appliqué à certaines ressources telles que les équipements électriques ou bien encore les matériaux. Dans le cas des matériaux de construction, on rencontre toute sorte de catégories : bois, métal, caoutchouc, verre, carton, plâtre, … [Arora 2020] On peut également lier à ce concept les différents déchets industriels ou erreurs de production qui offrent des opportunités intéressantes de récupération de ressources. Chaque matériau demande alors des méthodes spécifiques de dépose, de stockage, de transport et de conditionnement. C'est pour cette raison qu'un suivi adéquat doit être affecté aux matériaux une fois la dépose sélective réalisée afin de garantir le maintien des caractéristiques intrinsèques de celui-ci tout au long du processus de réemploi. Pour le matériau bois, le stockage et le conditionnement sont deux étapes déterminantes puisqu'elles vont conditionner l'état sanitaire du bois et ses caractéristiques physico-mécaniques. Ces deux phases doivent être réalisées selon les règles usuelles, c'est-à-dire une mise hors d'eau des bois ainsi que l'apport d'une ventilation suffisante afin d'éviter toute attaque biologique.

2.3.3.2- Eurocode

2.3.3.2.1- Aspect général

Pour qu'une structure soit construite il faut la dessiner et surtout la dimensionner. Ce dimensionnement doit assurer l'intégrité de l'ouvrage sur toute sa durée de vie et par la même occasion la sécurité des personnes intervenant dans l'ouvrage. Le dimensionnement d'une structure se réalise selon des règles bien établies, c'est ce que l'on nomme les Eurocodes. Les Eurocodes se déclinent en différentes versions selon la nature des éléments structurels considérés. Dans le cadre de l'utilisation du matériau bois, on parle de l'Eurocode 5 [NF EN 1995-1] [NF EN 1995-2]. Bien entendu, l'Eurocode 5 n'est pas auto-suffisant pour conduire un calcul de structure en bois. Certaines données nécessaires aux calculs sont établies à travers d'autres normes. Par exemple, les propriétés mécaniques des bois sont données via la norme NF EN 338 [NF EN 338]. Il est vrai qu'à l'inverse d'autres matériaux de construction, le matériau bois possède une forte variabilité qui peut conduire à une méconnaissance de ses propriétés mécaniques. Ainsi, lorsqu'on utilise du bois en usage structurel, la réglementation impose au préalable que le bois soit classé.

2.3.3.2.2- Classement d'un lot de bois

Le classement mécanique doit établir l'ensemble des valeurs des propriétés mécaniques d'un élément. On considère ainsi différentes classes mécaniques caractérisées par des propriétés mécaniques qui leur sont propres. Les bois résineux et feuillus possèdent deux classements distincts, tout comme les bois lamellés-collés. Le (Tableau 2) présente le tableau de l'ensemble des classes mécaniques pour les bois résineux.

	Classe	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Propriétés de résistance en N/mm²													
Flexion	$f_{m,0,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Traction axiale	$f_{t,0,k}$	7,2	8,5	10	11,5	13	14,5	16,5	19	22,5	26	30	33,5
Traction transversale	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compression axiale	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	24	25	27	29	30
Compression transversale	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,5	2,7	2,7	2,8	2,9	3,0
Cisaillement	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Propriétés de rigidité en kN/mm²													
Module d'élasticité moyen en flexion axiale	$E_{m,0,mean}$	7,0	8,0	9,0	9,5	10,0	11,0	11,5	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0
Module d'élasticité caractéristique à 5% d'exclusion en flexion axiale	$E_{m,0,k}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,1	10,7
Module d'élasticité transversal moyen	$E_{m,90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
Module de cisaillement moyen	G_{mean}	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
Masse volumique en kg/m³													
Masse volumique caractéristique à 5% d'exclusion	ρ_k	290	310	320	330	340	350	360	380	390	400	410	430
Masse volumique moyenne	ρ_{mean}	350	370	380	400	410	420	430	460	470	480	490	520

Tableau 2 - Tableau des classes de résistance des bois résineux en fonction des essais de flexion sur chant selon la norme NF EN 338

Pour l'obtention d'une classe mécanique, on peut utiliser deux méthodes : le classement machine et le classement visuel [NF EN 14081] [NF B 52-001]. Le classement visuel se réalise selon des critères visuels de quatre types :

- Ceux liés à la **structure du bois** (les nœuds, les fentes, …) ;
- Ceux liés au **débit pratiqué** (les flaches) ;
- Ceux liés à des **potentielles altérations** (les piqûres, le bleuissement, …) ;
- Ceux liés à des **potentielles déformations** géométriques (le gauchissement, le tuilage, …).

Le classement visuel peut alors se porter sur un seul élément ou sur un lot d'éléments. Toutefois, le classement visuel via la norme NF B 52-001-1 ne permet pas d'obtenir directement une classe mécanique, mais uniquement une catégorie visuelle. Il est nécessaire de se référer aux différents tableaux de correspondance présents dans l'annexe A de la norme afin de déterminer la classe de

résistance correspondante. La (Tableau 3) permet de voir la correspondance existante entre classe visuelle et classe de résistance dans le cadre du Chêne.

Classe visuelle (NF B 52-001-1)	Classe de résistance (NF EN 338)
1	D 30
2	D 24
3	D 18

Tableau 3 - Tableau de correspondance entre les catégories visuelles et les classes de résistance mécanique du Chêne pour tous type section selon la norme NF B 52 001

Le classement visuel peut néanmoins être remis en cause par ses critères très contraignants. Les bois classés selon cette méthode ont tendance à être sous-estimés, c'est-à-dire que la classe attribuée au bois est inférieure à sa classe réelle [Lanvin 2012]. Les bois sous-classés sont alors utilisés dans des complexes constructifs à des taux de travail faibles, gâchant leur plein potentiel mécanique.

Le classement machine quant à lui est nécessairement réalisé pour un lot de bois. Il s'appuie sur une méthodologie précise, décrite dans la norme NF EN 14081-2+A1, et qui se base sur la mesure d'une ou de plusieurs propriétés du bois [NF EN 14081]. En théorie, pour l'obtention d'une classe mécanique, on s'intéresse à trois paramètres : la résistance à la flexion axiale, le module d'élasticité axial et la masse volumique. Afin de prendre en compte la variabilité des propriétés, le classement est établi sur la base de valeurs caractéristiques, fractile à 5%, et de valeurs moyennes qui se calculent selon la norme NF EN 14358 [NF EN 14358]. C'est alors le paramètre, parmi ces trois, présentant la valeur la plus faible qui va déterminer la classe mécanique retenue. Cependant, l'obtention de la valeur de la résistance à la flexion axiale induit dans la majorité des cas une destruction de l'élément bois étudié. C'est la raison pour laquelle on vient en pratique mesurer d'autres paramètres permettant par cumul de s'approcher au plus près du classement optimal du bois [Faydi 2017] [Viguier 2015].

Le classement machine exige également dans de nombreux cas l'homologation d'une machine de classement qui se fait selon une méthodologie bien précise [NF EN 14081]. Cette machine nécessite alors un ensemble de réglages qui demande le passage d'un lot de bois de référence, représentant précisément la typologie des bois qui seront classés. Le réglage est ainsi établi pour des bois issus d'un même pays, d'une même région et d'un même bassin forestier. Le lot de référence requiert un nombre important de bois, plus de 700 échantillons sont nécessaires pour une première homologation. Ces bois sont alors classés par la machine puis subissent des tests destructifs pour valider ou invalider le classement réalisé par la machine. Cette contrainte réglementaire contribue en partie au faible développement du réemploi du bois pour un usage structurel. Une fois cette contrainte levée, le nombre de projets intégrant des bois structurels issus du réemploi devrait être plus conséquent, à l'instar de la filière métal [CTICM 2024].

2.3.3.3- Aspect lié au réemploi

2.3.3.3.1- Méthode visuelle

Dans le cadre du réemploi, il n'existe à l'heure actuelle aucune réglementation ou dispositif pour le classement de cette typologie de bois. Il est cependant nécessaire de requalifier ces bois pour pouvoir les réemployer dans de nouvelles constructions dans la mesure où un élément de réemploi doit satisfaire aux mêmes exigences qu'un matériau neuf manufacturé. Une partie des acteurs du réemploi priorise l'utilisation de la norme visuelle pour le classement. Mais, au vu des contraintes et des paramètres inscrits dans la norme visuelle, elle ne paraît que peu adaptée dans le cadre de la pratique du réemploi. Les bois issus de déconstruction présentent, selon la norme visuelle, des défauts importants (nœuds, fentes, …) synonymes de sous-classement dans la majeure partie des cas. Toutefois, certains programmes de recherche expérimentent de nouvelles solutions portant sur l'aspect visuel des bois de réemploi [InFutUReWood 2022] [Rebhi 2024]. L'intégration de nouveaux paramètres dans les critères visuels pour les bois neufs peut également être appliquée aux bois issus des déconstructions [Viguier 2018] [Roblot 2010]. Ces nouveaux paramètres deviennent un standard dans le classement des bois neufs car ils permettent une meilleure intégration des singularités dans le classement des bois. L'intégration sur les lignes de production d'outils dotés de rayons X ou de laser 3D permet la mesure de ces paramètres. Par exemple, l'entreprise Microtec propose différents outils permettant le classement mécanique des bois à l'image du Goldeneye 702 et du Viscan présentés en (Figure 8).



Goldeneye 702 Viscan

Figure 8 - Le Goldeneye 702 et le Viscan, deux outils permettant le classement mécanique des bois, proposés par l'entreprise Microtech

L'optimisation des coupes réalisées à travers ces outils et des logiciels intégrant l'intelligence artificielle permet un gain économique non négligeable. Par leur fonctionnement, ces outils peuvent également être adaptés aux bois issus de déconstruction. Il reste néanmoins des tests et adaptations à mener sur cette typologie de bois afin de considérer correctement les paramètres.

2.3.3.3.2- Méthode machine

L'utilisation de méthodes non-destructives est une autre voie pour la caractérisation des bois de réemploi. Ces méthodologies utilisent différentes technologies pour la caractérisation de paramètres intrinsèques aux pièces de bois testées, notamment le module longitudinal d'élasticité.

2.3.3.3.2.1- Méthode acoustique

La méthode acoustique utilise les ondes sonores pour la détermination du module longitudinal d'élasticité. Pour ce faire, l'hypothèse de départ est de considérer le bois comme un matériau présentant une symétrie orthotropique [Bodig 1993]. La matrice de rigidité qui lui est liée contient alors 9 coefficients élastiques indépendants. L'inverse d'une matrice de rigidité est une matrice de souplesse [Bucur 2006], ce qui entraîne alors une relation entre les constantes d'ingénierie et les termes de la matrice de rigidité. D'après la première hypothèse, si on applique des ondes sonores le long des axes orthotropes sous différents angles à un échantillon de bois préparé en conséquence, les vitesses obtenues après les mesures vont permettre le calcul de ces différents paramètres à l'image de ce qui a déjà été démontré à de nombreuses reprises [Attar-Hassan 1976] [Noguchi 2011] [Nier 1994] [Baron 2009] [Wang 2008] [Faggiano 2011]. Cependant, on peut se permettre une simplification dans la démarche (5).

$$E_l = {v_l}^2 . \rho \qquad (5)$$

Avec :

- E_l : module d'Young longitudinal [Pa].
- v_l : vitesse des ondes sonores dans le sens longitudinal [m/s].
- ρ : masse volumique de l'essence considérée prise à 20°C et 65% HR [kg/m3].

Plusieurs outils sont disponibles sur le marché pour la mise en pratique de cette méthodologie. Dans le cadre de cette étude c'est le Sylvatest®, visualisable en (Figure 9) qui a été utilisé. Cet outil est développé par l'entreprise Concept Bois Technology [Sandoz 1990] [Sandoz 2007].

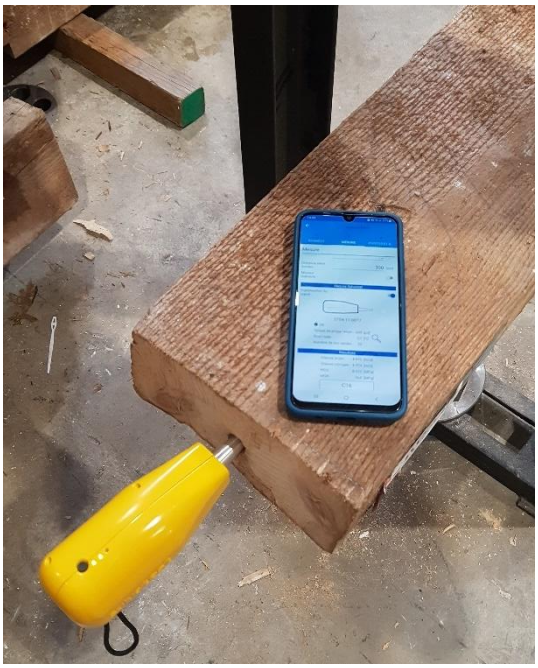


Figure 9 - Une des sondes du Sylvatest® 4 accompagnée de son logiciel Sylvia® disponible sur téléphone

2.3.3.3.2.2- Méthode par l'utilisation de la fréquence propre

La fréquence propre d'un échantillon de bois peut être utilisée pour déterminer le module d'Young de celui-ci et ce de manière non destructive [Noguchi 2011], [Görlacher 1984], [Brancheriau 2002], [Faydi 2017], [Sonderegger 2008]. La fréquence propre peut se mesurer à l'aide d'accéléromètres qui sont placés respectivement à la moitié et aux trois quarts de la longueur d'un échantillon bois afin de quantifier différents modes de fréquence, notamment le premier mode. La vibration est induite manuellement à l'aide d'une impulsion qui est donnée à l'échantillon à l'aide par exemple d'un maillet de charpentier. Le module d'Young d'un échantillon peut être déterminé selon la formule suivante (6) [Faydi 2017].

$$E_l = \frac{4\pi^2 . \rho . S . L^4 {f_{mode\ n}}^2}{I . X_n} \qquad (6)$$

Avec :

- E_l : module d'Young longitudinal [Pa].
- ρ : masse volumique de l'échantillon considéré [kg/m^3].
- S : section moyenne de l'échantillon considéré [m²].
- L : longueur de l'échantillon [m].
- $f_{mode\ n}$: fréquence relative au ième mode issu des vibrations transversales [Hz].

- $I = \frac{bh^3}{12}$: moment quadratique pour une poutre de section rectangulaire [m^4].

  Avec :

  - b : la largeur de la poutre [m].
  - h : l'épaisseur de poutre [m].

- $X_n = \left((2n+1).\frac{\pi}{2}\right)^4$: scalaire relatif au mode étudié.

  Avec :

  - n : le numéro du mode étudié.

Les différents modes de vibration peuvent être étudiés mais le premier mode suffit à lui seul pour étudier et calculer le module d'élasticité longitudinal.

2.2.4- Bois neufs / Bois anciens

2.2.4.1- Cycle de retrait/gonflements

Les bois issus de déconstruction ont pour particularité d'avoir subi des cycles successifs de retraits et gonflements, de changements dimensionnels, au cours de leur durée de mise en œuvre. Ces cycles sont dus aux variations de sa teneur en humidité au cours du temps. En dessous du point de saturation des fibres, le bois perd ou absorbe de l'humidité jusqu'à ce que la teneur en humidité soit en équilibre avec celle de l'air ambiant. Les dimensions du bois vont alors varier en fonction des variations d'humidité ambiante. Lorsque l'humidité ambiante décroît, le bois va se rétracter, c'est ce que l'on nomme retrait. A l'inverse, lorsque l'humidité ambiante augmente, le bois va se gonfler, c'est le gonflement. La (Figure 10) permet la visualisation de ce phénomène. Sur cette même figure on observe également l'incidence du type de débit sur ce mécanisme.

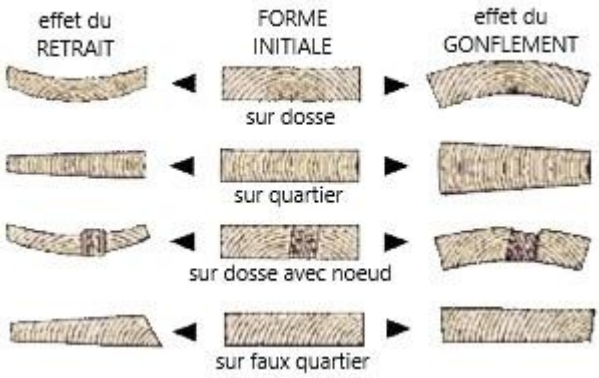


Figure 10 - Visualisation du phénomène de retrait et de gonflement sur différents types de débit de bois de section rectangulaire [CNDB 2022]

La norme NF DTU 31.1 dans sa partie 1-1 exige que la teneur en humidité des éléments d'ossature en bois n'excède pas 18% au moment de leur mise en œuvre afin d'éviter un cycle de retrait/gonflement trop important [NF DTU 31.1].

Dans le cadre des bois issus de déconstruction, ces standards n'étaient pas forcément appliqués puisqu'ils n'ont vu leur création que lors de la seconde moitié du 20ème siècle [Labrunye 2018]. L'expérience des poseurs veut que ces règles de l'art aient été respectées malgré leur absence à l'époque de la mise en œuvre des éléments bois. Le phénomène de retrait/gonflement est responsable des changements de forme, tel que le gauchissement, et des contraintes internes qui résulteront en gerces ou en fentes. L'eau migrant toujours de l'intérieur vers l'extérieur, on définit un gradient d'humidité correspondant à la différence entre l'humidité au centre de la pièce et l'humidité à la surface de celle-ci. Ce gradient doit rester suffisamment faible pour éviter que l'effort de traction perpendiculaire au fil ne soit supérieur à la résistance du bois. Pour anticiper les problèmes liés à ce mécanisme, il est fortement conseillé d'éviter tout changement sévère des conditions ambiantes des bois, et d'éviter notamment l'assèchement rapide de la surface du bois qui créerait une forte contrainte interne. Ainsi, la phase de stockage pour les bois issus de déconstruction est essentielle car elle ne doit en aucun cas accentuer les contraintes internes déjà présentes ni les changements de forme. Il faut alors se référer aux règles de l'art portant sur le stockage de bois.

2.2.4.2- Le phénomène de fluage

Les bois issus de déconstruction ont subi au cours de leurs années de mise en œuvre un phénomène de fluage lié aux propriétés élastoplastiques du matériau bois. Ce processus se manifeste par l'augmentation de la déformation de l'élément considéré sous charge constante et permanente sur une longue durée. La poutre qui subit le fluage se déforme ainsi avec le temps. La déformation résultante exerce une influence directe sur les capacités mécaniques du matériau bois. Les charges susceptibles d'être supportées sont réduites et la capacité à subir des chargements successifs est diminuée. Ce phénomène est amplifié par les variations d'humidité et de température [Toratti 1995]. Or, dans le cadre des bois de réemploi, les variations peuvent être importantes. Il faut donc prendre en considération le fluage des bois issus de déconstruction afin de prévenir tout risque d'accident après leur réemploi.

2.2.4.3- La présence d'éléments métalliques

Les bois issus de déconstruction présentent, pour certains, une présence d'éléments métalliques en leur sein. Les éléments métalliques ainsi retrouvés peuvent avoir différentes origines selon les assemblages, les usages, … et illustrent alors la vie en service de l'élément bois. Cependant, les éléments métalliques sont une problématique majeure dans le cadre du matériau bois et ce pour

différentes raisons. D'une part, la manutention et le stockage peuvent s'avérer complexes lorsque l'élément bois présente une présence importante d'éléments métalliques. D'autre part, la présence d'éléments métalliques compromet considérablement le réusinage. Les éléments métalliques, présents dans le bois, vont détériorer les outils des machines bois et ainsi rendre l'usinage complexe [Snyder 2020] [FCRBE - Bois massif de structure à section rectangulaire – 2021]. La troisième raison concerne la diminution des caractéristiques mécaniques du bois due au phénomène d'oxydation engendré par la présence d'éléments métalliques [Marian 1960]. Cette problématique ne se rencontre que dans le cadre de certains métaux tel que le fer. En outre, l'intensité de ce phénomène est relative à l'essence de bois.

2.2.4.4- La présence de traitements chimiques

Le traitement chimique des bois est une pratique courante et réglementée visant à améliorer leur durabilité et leur résistance aux agents de dégradation biologique tels que les insectes xylophages et les champignons [NF EN 15228]. Les premiers traitements chimiques sont apparus dès le 19ème siècle et ont pris de plus en plus d'ampleur au cours du 20ème siècle notamment à travers l'utilisation de sels métalliques comme le cuivre, le chrome et l'arsenic (CCA) [Aldrich 2006] [Schultz 2007]. Certains traitements ont prouvé leurs impacts directs sur la santé humaine et ont fait alors l'objet de réglementation ou d'interdiction notamment à travers la réglementation européenne Registration Evaluation Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH) [Parlement Européen 2006] [Decker 2002] [Subra 1999]. Le traitement chimique des bois entraîne alors des conséquences significatives sur le matériau en particulier au niveau de l'usinage et de la dépose.

Lors de l'usinage de bois traité chimiquement, l'opérateur peut être exposé à des substances toxiques. Ces substances peuvent entraîner des risques pour la santé humaine, voir entrainer la mort en cas d'exposition chronique à forte concentration. Par ailleurs, les bois de réemploi peuvent générer des composés organiques volatils (COV) issus des traitements mais également des produits de finition utilisés. Ces substances peuvent elles aussi provoquer des risques sanitaires. Enfin, l'usinage de bois peut engendrer des poussières de bois sous forme de particules fines mises en cause dans des cancers naso-sinusiens par le centre international de recherche sur le cancer (CIRC) [Wilbourn 1995] [Simon 2022] également appelés cancer du menuisier. De fait, des mesures de protection spécifiques pour les travailleurs doivent être mise en œuvre. Cependant, ces recommandations sont souvent très peu appliquées par les entreprises pour des raisons économiques ou par ignorance du sujet [Dupuis 2024] [Herin 2016].

La dépose des bois traités nécessite également une attention particulière. Les produits chimiques utilisés, au-delà d'être dangereux pour la santé humaine, le sont également pour l'environnement. Ils

peuvent contaminer les sols et les eaux environnantes, rendant nécessaire une gestion rigoureuse sur site. Un stockage adapté des bois traités sur site doit être strictement mis en œuvre. C'est en ce sens que cette ressource est souvent classée comme déchets dangereux et doit respecter un certain nombre d'exigences en termes de stockage, de manipulation et de traçabilité [Ministères aménagement du territoire transition écologique 2022]. Ce processus est cependant contestable puisqu'il complique les pratiques de réemploi, de réutilisation et de recyclage de cette ressource qui peut encore être utilisée après un traitement adapté.

La caractérisation chimique des bois issus de déconstruction est ainsi essentielle pour évaluer leur potentielle dangerosité. Différentes techniques existent pour déterminer la nature du traitement telles que la chromatographie en phase gazeuse ou la spectrométrie de fluorescence. Ces techniques sont toutefois souvent coûteuses et demandent un investissement important de la part des entreprises. Elles sont donc rarement pratiquées par les entreprises œuvrant dans le secteur du réemploi. Néanmoins, certaines substances peuvent facilement être détectées à l'instar des CCA avec un test colorimétrique comme présenté en (Figure 11). Ce test a par ailleurs l'avantage d'être relativement peu coûteux par rapport aux autres tests. Certaines entreprises se basent également sur la date du bâtiment déconstruit afin de déterminer si une caractérisation chimique est pertinente au vu des produits en vigueur au moment de la construction. Cette pratique est tout de même risquée puisqu'il est possible de trouver des traitements à des dates postérieures de leur interdiction sur le marché.

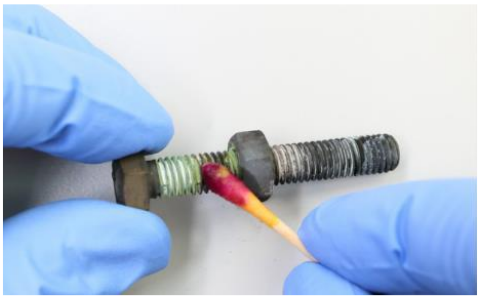


Figure 11 - Identification de métaux lourds par colorimétrie, d'après une photographie de l'entreprise Mat inspired

2.3- Analyse de cycle de vie

2.3.1- Aspects généraux de l'analyse de cycle de vie

2.3.1.1- Principes d'une analyse de cycle de vie

L'analyse de cycle de vie (ACV) est un outil d'aide à la décision qui a pris de l'ampleur à la fin du 20ème siècle avec l'apparition du marketing « vert ». C'est un outil qui doit permettre de mesurer l'impact environnemental d'un produit. La norme NF EN ISO 14040 est relative à cet outil, on peut la décomposer en deux grandes parties [NF EN ISO 14040] :

- La première qui traite des principes et des cadres de l'analyse de cycle de vie ;
- La seconde qui traite des exigences et des lignes directrices relatives à la réalisation d'une analyse de cycle vie.

Une analyse de cycle de vie est intéressante car elle permet de combiner différentes approches :

- Une **approche multi-étape** : elle s'intéresse aux différentes étapes qui composent la vie d'un produit ;
- Une approche **multi-composant** : elle ne s'intéresse pas uniquement au produit considéré mais à l'ensemble des éléments qui lui sont associés tel que les consommables ou bien le système d'emballage.
- Une approche **multi-indicateurs** : le résultat que l'on obtient à l'issue de l'étude permet de visualiser l'impact général du produit sur l'environnement par l'intermédiaire d'indicateurs de différentes natures.

L'ACV est un outil d'évaluation incontournable au déploiement d'une démarche d'éco-conception du produit ou du service évalué, permettant d'identifier précisément les impacts environnementaux majeurs et les étapes du cycle de vie ou les flux les plus impactants. Une démarche d'éco-conception a pour objectif de rechercher l'éco-efficience d'un produit ou d'un service, en agissant sur le ratio service rendu/impact sur l'environnement tout en évitant au maximum les transferts de pollution. L'ACV comporte tout de même quelques limites dans son approche et dans sa réalisation que ce soit au niveau économique ou scientifique. Les données utilisées pour sa réalisation peuvent être confidentielles ce qui amène une certaine opacité dans les résultats. L'exploitation des résultats est par ailleurs complexe car elle peut être utilisée à différentes fins directement liées aux objectifs initiaux de l'étude. Une étude ACV amène également de nombreuses incertitudes dans le choix des données ce

qui conduit à l'obtention de résultats très « quantifiés ». Enfin, certains impacts sur l'environnement ne sont que peu pris en compte tel que celui portant sur la biodiversité.

2.3.1.2- Méthodologie d'une analyse de cycle de vie

2.3.1.2.1- Objectifs

La définition des objectifs d'une étude ACV est importante car ce sont ces objectifs qui vont définir la méthodologie à adopter. Les objectifs sont de différentes natures, certains portent directement sur le produit visé tandis que d'autres sont d'ordre général. La plupart des objectifs se définissent par la réponse à un ensemble de questions qui va guider l'étude ACV. A titre d'exemple, voici quelques questions auxquelles on est amené à se poser :

- S'agit-il d'une évaluation simple ou comparative ?
- Quel est précisément le produit étudié ? Sa fonction principale ?
- Quel sont les étapes du cycle de vie du produit ? Les frontières du système ?
- Quels sont les publics visés ?

Une fois cette première approche réalisée et les grandes lignes directrices définies, on peut passer à la réalisation de l'étude en tant que telle.

2.3.1.2.2- Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle selon la norme NF EN ISO 14040 a pour définition la « performance quantifiée d'un système de produits destinée à être utilisée comme unité de référence » [NF EN ISO 14040]. L'unité fonctionnelle lorsqu'elle est définie doit donc permettre de décrire précisément la fonction du produit mais également une unité de référence permettant de quantifier sa fonction. Par exemple, dans le cadre d'une solive en bois de résineux l'unité fonctionnelle pourrait être définie comme telle : supporter des éléments de plancher pour 1 m^3 de solive en bois de résineux, fabriquée et mise en œuvre selon les règles de l'art, sur la durée de vie de référence, soit 100 ans. Cette unité fonctionnelle décrit parfaitement la fonction du produit, à savoir « supporter des éléments de plancher », mais également l'unité de référence quantifiant son usage à savoir « 1 m^3 » et indiquer une durée de vie de référence (DVR). Une définition précise de l'unité fonctionnelle est obligatoire car elle va permettre de comparer des produits offrant un service comparable. La comparaison de différents produits portera ainsi sur l'analyse de cycle de vie modélisée pour une unité fonctionnelle unique et non modifiable même s'il peut y avoir plusieurs unités fonctionnelles possibles pour un même produit en fonction des objectifs de l'étude ACV.

2.3.1.2.3- Cycle de vie

Le cycle de vie d'un produit est défini selon la norme NF EN ISO 14040 comme les « phases consécutives et liées d'un système de produits, de l'acquisition des matières premières ou de la génération des ressources naturelles à l'élimination finale » [NF EN ISO 14040]. Dans le cadre d'un produit de la construction et de manière plus générale d'un bâtiment, le cycle de vie est porté sur son ensemble, c'est-à-dire de l'extraction des matières premières nécessaires à sa constitution ou production jusqu'à la gestion de sa fin de vie. De manière réglementaire l'ensemble du cycle de vie se défini en différentes étapes :

- La **fabrication** : relative aux étapes A1 à A3 ;
- La **mise en œuvre** : relative aux étapes A4 et A5 ;
- La **vie en œuvre** : relative aux étapes B1 à B7 ;
- La **fin de vie** : relative aux étapes C1 à C4.

La (Figure 12) met en évidence les différentes étapes du cycle de vie d'un produit ou d'un équipement du secteur de la construction.

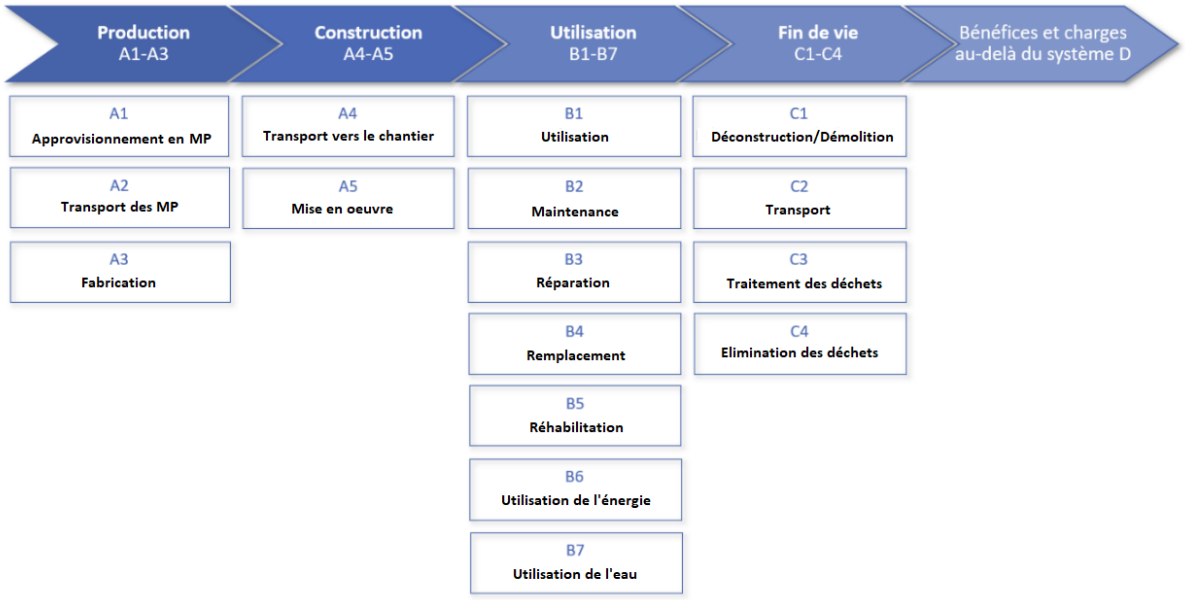


Figure 12 - Les étapes du cycle de vie d'un produit de construction ou d'un équipement

La (Figure 12) met également en évidence l'existence d'une cinquième phase du cycle de vie définie comme le module D. Cette dernière phase doit permettre la représentation des bénéfices et charges qui se situent au-delà des frontières du système. C'est-à-dire que ce module permet de mettre en évidence l'intérêt de la valorisation du produit en fin de vie en envisageant sa réutilisation, son recyclage et la récupération des produits issus du bâtiment dès lors que la valeur de ce module D est

négative. Il retranscrit les bénéfices du produit dans d'autres cycles de vie que celui étudié. On le décompose en quatre flux sortant des frontières du système :

- Les matières secondaires ;
- Les combustibles secondaires ;
- L'énergie à la suite de l'incinération de déchets ;
- L'énergie à la suite de la mise en décharge.

Il est intéressant de noter que l'ensemble des constituants du système est comptabilisé dans le module D à l'exception des co-produits qui suivront leur propre cycle de vie en autonomie, cas que l'on retrouve presque systématiquement au niveau du matériau bois. Le remplacement et la quantité de produits sont également pris en compte dans le calcul du module D. Dans le secteur de la construction, les maîtrises d'œuvres engagées utilisent le module D comme un outil par lequel elles peuvent compenser une partie des impacts sur le réchauffement climatique du bâtiment conçu. L'utilisation de composants avec des bénéfices élevés tels que les matériaux bois augmentera le module D et bénéficiera à la réduction du coût carbone du bâtiment.

2.3.1.2.4- Périmètre de l'étude

Le périmètre de l'étude dans le cadre générale d'une analyse de cycle de vie est important à définir car il va permettre de préciser quels éléments font partie du système. De manière plus général, on parle de deux grandes possibilités pour une étude ACV :

- « **Cradle-to-gate** » : littéralement du « berceau à la porte », ce périmètre d'étude ne s'intéresse qu'à l'étape de fabrication du cycle de vie du produit, il ne concerne ainsi que les étapes A1, A2 et A3. Cette démarche est utilisée en écoconception et permet de se concentrer sur les étapes de vie maîtrisées par le fabricant.

- « **Cradle-to-grave** » : littéralement du « berceau à la tombe », ce périmètre d'étude s'intéresse à l'ensemble du cycle de vie du produit, il concerne ainsi l'entièreté des étapes.

De manière plus spécifiques, on distingue trois niveaux :

- Premier niveau : production de matériaux et d'énergie ;
- Deuxième niveau : procédés, transports et éléments associés ;
- Troisième niveau : les biens d'investissement.

Le deuxième niveau englobe le premier niveau et le troisième niveau englobe le deuxième niveau et le premier niveau comme le représente la (Figure 13).

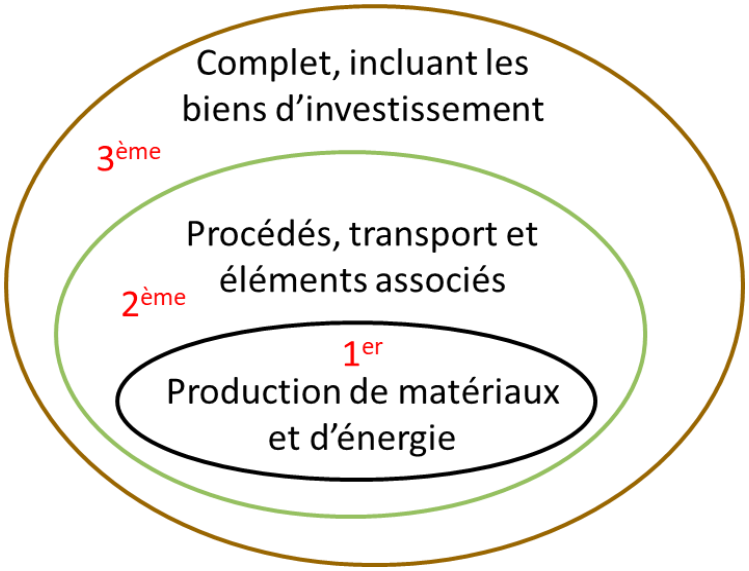


Figure 13 - Les différents périmètres existant pour une étude ACV

Les biens d'investissement peuvent correspondre à des machines-outils ou bien encore des infrastructures tel qu'un barrage ou les locaux d'un site industriel. Il faut alors connaitre ou estimer l'importance de leur impact sur l'environnement. On peut par exemple réaliser un bilan massique de l'infrastructure considérée rapportée à l'unité fonctionnelle de notre étude. Si la part massique ainsi obtenue est inférieure à une certaine valeur-seuil alors l'infrastructure pourra être négligée dans l'étude. Il existe d'autres critères d'inclusion ou d'exclusion du système suivant la part du coût ou du revenu ou bien encore la part de contribution aux aspects environnementaux.

Dans le cas d'un procédé qui génère des produits multiples ou des co-produits, il faut attribuer respectivement à chacun des différents produits les consommations et les rejets qui leur sont relatifs. Pour se faire, il faut essayer de subdiviser le processus à imputer en sous-processus relatifs à chacun des produits. On peut également étendre le système du produit étudié pour inclure les fonctions supplémentaires liées aux différents co-produits. Il existe également la possibilité d'attribuer tout le processus à un seul co-produit pour maximiser les impacts. Lorsque ces différentes méthodes ne peuvent être utilisées il faut passer par une imputation, c'est-à-dire que l'on donne une affectation en pourcentage du procédé au produits et co-produits. Pour se faire, il faut essayer d'identifier les relations physiques sous-jacentes entre les coproduits et affecter aux produits des pondérations reflétant ces relations physiques, selon le principe d'allocation. Si une relation physique ne peut être établie ou utilisée, on doit utiliser d'autres relations entre les différents produits tel que l'aspect économique.

2.3.1.2.5- Inventaire de cycle de vie

L'inventaire du cycle de vie correspond à l'identification et la quantification de l'ensemble des flux de matière, d'énergie, de pollutions et de déchets entrant et sortant du périmètre de l'étude [NF EN ISO 14040]. Pour se faire, on procède à la collecte de nombreuses données qui peuvent provenir de différentes sources : auprès d'experts, auprès d'industriels, des fournisseurs, sur des bases de données d'inventaire de cycle de vie, … L'étendue et la qualité des données d'inventaire à collecter dépendent elles aussi des objectifs initiaux de l'ACV. Les moyens dont dispose l'évaluateur ne sont pas les mêmes d'un budget à un autre ou bien de l'utilisation d'un logiciel vis-à-vis d'un autre. De manière plus générale, pour la réalisation d'un inventaire de cycle de vie on doit respecter trois exigences toutes relatives à notre étude :

- Une **représentativité géographique** : les données sélectionnées doivent correspondre à la zone géographique relative à notre produit ou correspondre aux pratiques en vigueur dans cette zone géographique ;

- Une **représentativité temporelle** : les données adoptées doivent être représentatives de la situation actuelle ou pour certains cas de la situation prospective ;

- Une **représentativité technologique** : les données utilisées doivent être représentatives de la meilleure technologie utilisée ou a minima de la technologie moyenne utilisée pour le produit étudié.

Les données collectées à travers l'inventaire de cycle de vie vont donc directement impacter les résultats de notre étude ACV. S'il y a une erreur dans la collecte, elle ne pourra pas être directement visible, il faudra une étude approfondie pour l'identifier.

2.3.1.2.6- Evaluation des impacts

L'Inventaire de Cycle de Vie (ICV) précédemment défini est traduit en divers impacts environnementaux grâce à des méthodes de calculs choisies : réchauffement climatique, réduction de la couche d'ozone, acidification, eutrophisation … Les flux recensés lors de l'inventaire de cycle de vie impactent l'environnement sous différentes formes. Ainsi, un même flux peut engendrer plusieurs impacts mais également plusieurs flux peuvent contribuer au même impact. Pour évaluer l'ensemble des impacts sur l'environnement, on utilise communément un jeu d'indicateurs. Ces indicateurs sont répartis en trois grandes catégories :

- Les **indicateurs d'impact** : on comptabilise 19 indicateurs d'impact. Ce sont des indicateurs qui établissent les différents impacts sur l'environnement. L'{Annexe 2} permet de visualiser l'ensemble de ces indicateurs.

- Les **indicateurs de flux entrants** : on comptabilise 10 indicateurs de flux entrants. Ce sont des indicateurs qui sont relatifs aux ressources énergétiques utilisées, aux ressources secondaires utilisées et également à la consommation en eau douce. L'{Annexe 2} permet de visualiser l'ensemble de ces indicateurs.

- Les **indicateurs de flux sortants** : on comptabilise 7 indicateurs de flux sortants. Ce sont des indicateurs qui sont relatifs aux différents types de déchets produits mais aussi à production de déchets secondaires. L'{Annexe 2} permet de visualiser l'ensemble de ces indicateurs.

Les résultats de l'inventaire du cycle de vie définissent un ensemble de substances ou de flux qu'il faut rapporter en unité commune à chaque indicateur. Pour ce faire, il est utilisé un ensemble de facteurs de pondération permettant de convertir chaque substance ou flux ayant une incidence sur l'indicateur concerné dans l'unité imposée par l'indicateur. Ce facteur de conversion tient compte du danger (par exemple pouvoir de réchauffement global) et de l'exposition (par exemple temps de séjour dans l'atmosphère) de chaque substance influant l'impact. Ainsi, l'indicateur réchauffement climatique est défini en kg équivalent CO_2 par Unité Fonctionnelle ce qui signifie que chaque substance et flux de l'ICV ayant un pouvoir de réchauffement climatique est converti en équivalent CO_2 grâce à une méthode d'évaluation choisie.

Le choix de la méthode d'évaluation repose sur la considération de paramètres tels que :

- La politique interne et les priorités de l'entreprise cliente ;

- La localisation de l'entreprise cliente ;

- Les parties prenantes de l'entreprise cliente ;

- Les priorités institutionnelles et réglementaires relatives à l'étude : on peut penser à la RE 2020 ;

- La complexité recherchée pour l'étude.

De façon plus générale, les méthodes souvent utilisées sont des méthodes qui font intervenir des indicateurs environnementaux consensuels comme l'indicateur de réchauffement climatique ou bien celui de la consommation en eau douce. Les méthodes qui font intervenir des indicateurs

environnementaux discutables, touchant à l'écotoxicité ou à la toxicité humaine sont peu utilisées car souvent de nature multifactorielle.

2.3.1.2.7- Interprétation et revue critique de l'étude

L'interprétation et l'analyse des résultats d'une étude ACV sont basées sur la considération de grands principes directeurs :

- Déterminer les principaux contributeurs de l'impact sur l'environnement (analyse de gravité) ;
- Déterminer les phases de cycle de vie les plus impactantes (analyse de gravité) ;
- Identifier les marges de manœuvre permettant de réduire les impacts ;
- Proposer des nouvelles options pour le produit ou équipement étudié telle qu'une nouvelle conception ou un nouveau schéma logistique ;
- Identifier les limites de la modélisation telles que le choix du cycle de vie ou bien les données utilisées lors de l'inventaire de cycle de vie.

L'interprétation des résultats doit amener de manière la plus transparente possible à l'obtention de recommandations claires. L'analyse de gravité est généralement complétée par une analyse de sensibilité et une revue critique. L'analyse de sensibilité permet de s'assurer de la cohérence des choix établis lors de l'étude. Par exemple, le (Tableau 4) permet de visualiser une partie d'une analyse de sensibilité réalisée sur le recyclage des emballages en acier. Cela permet de distinguer les paramètres significatifs sensibles dont le changement de donnée appelé variante influe de manière importante sur le résultat de ceux dont la modification n'a pas d'incidence significative sur la quantification de l'indicateur concerné.

	Paramètre	Indicateurs sensibles
Paramètres influents	Type de recyclage : après collecte sélective ou post incinération	Émissions de métaux (air, eau) / émissions de COV
	Fréquence de collecte (en cas de collecte sélective)	Effet de serre / émissions de COV / émissions de particules
	Spécificités nationales (composition kwh électrique)	Émissions de métaux (eau), déchets de classe 1 (indus. spéc.)
Paramètres peu influents	Distance de transport vers le site de recyclage	aucun
incertitude	Transports évités (MP)	?
	Variabilité inter-sites	

Tableau 4 - Analyse de sensibilité sur le cas du recyclage des emballages en acier (source : ADEME)

La revue critique est définie comme le « processus destiné à s'assurer de la cohérence entre une ACV et les principes et exigences spécifiés par les normes internationales traitant de l'ACV » d'après la NF EN ISO 14040 [NF EN ISO 14040]. En d'autres mots, elle permet de garantir la conformité de l'étude aux normes en vigueur régissant l'ACV. On doit en particulier vérifier les points suivants :

- La cohérence des méthodes vis-à-vis des normes en vigueur ;
- La validité scientifique et technique des méthodes utilisées ;
- La cohérence des données utilisées par rapport aux objectifs de l'étude ;
- La validité de l'interprétation des résultats ;
- La pertinence du rapport d'étude appelé rapport d'accompagnement

La revue critique peut renforcer la crédibilité d'une étude ACV. Elle est obligatoire dans le cadre d'une communication des résultats d'une étude ACV au grand public. Deux types d'entités sont valables pour la réalisation d'une revue critique :

- Un expert indépendant accrédité dans le cas d'une ACV non comparative : c'est en particulier le cas des fiches de déclaration environnementales et sanitaires ;
- Un comité de parties intéressées composé de trois experts externes et indépendants dans le cas d'une ACV comparative.

2.3.1.3- Fiches de déclaration environnementale et sanitaire

Les Fiches de déclaration environnementale et sanitaire (FDES) sont essentielles pour la réalisation d'une étude ACV qui porte sur les matériaux qui composent un bâtiment. Leur utilisation permet d'avoir

une nature précise du coût carbone lié à la construction d'un bâtiment. Ces fiches sont issues de la réflexion initiée par le Plan National Santé Environnement en 2010 dont l'objectif était de limiter l'utilisation de produit dangereux pour la santé humaine dans le cadre de la construction [Lafon 2009]. Il existe également un équivalent de ces fiches pour les équipements électriques, électroniques et de génie climatique, ce sont les Profils Environnementaux Produits (PEP). L'accessibilité de ces deux composants est gratuite et se réalise via la base de données nationale INIES où les industriels déposent eux-mêmes la FDES ou le PEP relatif à leur produit via le processus de vérification par revue critique préalable à la mise en ligne. Il existe plusieurs types de fiches :

- Une **fiche individuelle** qui est propre à une référence produit d'une entreprise sur un site de production ;
- **Une fiche individuelle de gamme** qui est représentative d'une gamme d'un industriel (plusieurs références et/ou plusieurs sites de production) ;
- Une **fiche collective** qui est propre à un groupement d'entreprises ou une fédération. A noter que certaines fiches collectives sont paramétrables en ligne afin de définir des produits plus spécifiques en particulier à des dimensions ou performances d'usage ;
- Une **fiche de données environnementales par défaut ou DED, établie par le Ministère de la Transition Ecologique,** qui est mise à disposition lorsqu'il n'existe aucune fiche pour le produit visé. Cette fiche représentative d'une catégorie de produits présente des impacts environnementaux majorés de 30 à 100 % par rapport aux FDES existantes, qu'elles soient de type individuel ou collectif.

Les fiches sont réalisées selon une méthodologie précise décrite à travers la norme NF EN 15804+A2/CN par des organismes agréés tels que l'Institut technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement ou le cabinet de conseil EVEA pour les produits bois [NF EN 15804+A2/CN] [FCBA 2025] [EVEA 2025]. Les FDES et les PEP sont des éléments d'aide à la décision à différents niveaux :

- La **conception d'un bâtiment** : le choix des produits et des matériaux utilisés dans un bâtiment se réalise en partie à l'aide des FDES et des PEP afin de répondre à un objectif carbone à atteindre, en particulier dans le cas de l'application de la RE 2020 ;
- La **politique industrielle** : dans une démarche d'écoconception, l'amélioration des performances environnementales d'un produit va se faire selon les choix liés à son processus de fabrication et à sa conception ;

- La **politique publique** : les politiques publiques doivent inciter au changement en incitant l'utilisation de produits respectueux pour l'environnement à travers l'utilisation d'écolabels relatifs aux produits ou aux bâtiments.

L'évolution des normes oblige donc les industriels à adopter l'utilisation et l'élaboration de FDES et de PEP par peur de voir la vente de leur produit évoluer à la baisse. De la même manière, ils sont tenus de proposer des processus de fabrication limitant l'impact environnemental de leur produit. La validité d'une FDES ou d'un PEP a une durée de 5 ans. A la fin de cette durée, l'industriel sera dans l'obligation de faire réviser les documents et de refaire le calcul environnemental de son produit [NF EN 15804+A2/CN] s'il souhaite que la fiche soit toujours disponible en ligne.

2.3.2- Le réemploi dans le cas de l'analyse de cycle de vie

2.3.2.1- Scénario du réemploi

Afin de comprendre l'engouement qui entoure la pratique du réemploi dans le secteur de la construction, il faut de fait s'intéresser à l'impact environnemental de la construction d'un nouveau bâtiment. La phase construction, sur base d'estimation, représente 60% de l'empreinte carbone d'un bâtiment neuf, le reste étant principalement lié à son exploitation [Ministère de la transition écologique 2021]. Plus précisément, une étude établie sur l'analyse de 200 bâtiments de manufacture récente de différentes typologies, indique un coût carbone moyen au m² compris entre 150 et 600 kg_{eqCO2} [De Wolf 2017]. On comprend au vu de ces chiffres tout l'intérêt environnemental que peut représenter les matériaux issus de la filière du réemploi. Cependant, certains matériaux sont à privilégier, pour des raisons économiques, environnementales et techniques, selon les acteurs du secteur du réemploi [CSTB 2024]. Les catégories à haut potentiel de réemploi sont les suivantes :

- Les éléments de voiries et d'aménagements extérieurs ;
- Les éléments de clos couverts de type menuiseries extérieures, briques, … ;
- Les éléments de second œuvre ;
- Les équipements.

On remarque qu'il n'est nullement fait mention des éléments de structure qui pourtant représentent une part significative du coût carbone d'un bâtiment et que cette typologie d'éléments, notamment les éléments de structure en bois, fait partie du focus actuel pour une valorisation [CSTB 2024]. Par ailleurs, les éléments de structure représentent une durée de vie bien plus importante que d'autres éléments, à l'instar de ce que montre la (Figure 14) issue d'une étude portant sur le potentiel de réemploi des infrastructures [Iacovidou 2016] .

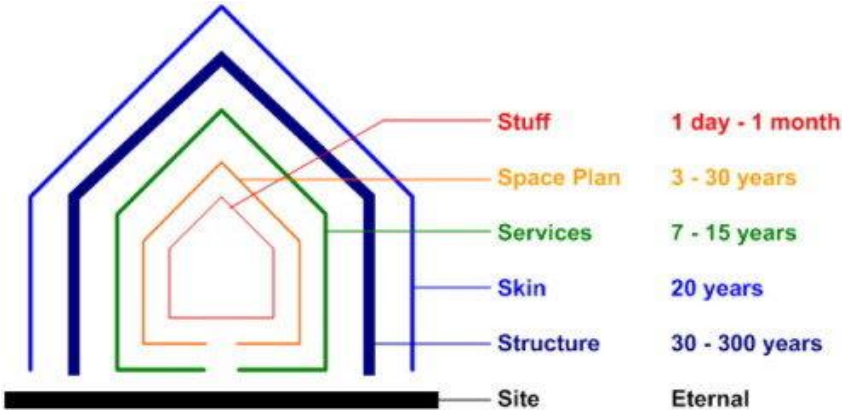


Figure 14 - Représentation de la durée de vie des éléments constitutifs d'un bâtiment d'après une étude de Iacovidou E.

Une fois le contexte établi, on comprend que les éléments de réemploi sont valorisés dans la méthode de calcul de la RE2020 par un impact carbone considéré comme nul [Arrêté du 4 août 2021] [Arrêté du 6 avril 2022]. L'Etat français veut impulser une dynamique dans ce secteur afin qu'il puisse contribuer aux objectifs ambitieux de la filière BTP. L'étude ACV réalisée à travers la RE2020 doit établir un scénario de réemploi précis et détaillé dans le cadre des bois de réemploi. La norme NF EN 15804/CN qui propose un scénario référence pour la fin de vie des éléments en bois apporte une partie de la réponse concernant le sujet [NF EN 15804+A2/CN]. Ce scénario se base sur une étude menée par l'institut technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement (FCBA) et portée par le Comité Professionnel de Développement des Industries Françaises de l'Ameublement et du Bois (CODIFAB) et l'interprofession de la filière forêt-bois française [FCBA 2022]. La première phase de cette étude s'attache à évaluer les taux de valorisation du matériau bois en fin de vie et propose les chiffres suivants :

- Réutilisation/Réemploi : 2,5% ;
- Recyclage : 42% ;
- Valorisation énergétique : 48% ;
- Enfouissement : 7,5%.

De manière plus globale, le taux de valorisation du matériau bois est évalué à 44,5% à travers cette étude. La seconde phase, quant à elle, s'est attachée à proposer des méthodologies détaillées et des données concrètes pour la modélisation du scénario de fin de vie des déchets bois, en accord avec la norme NF EN 15804+A2/CN [NF EN 15804+A2/CN]. Cette phase a alors permis l'obtention de valeurs d'impacts pouvant être utilisées dans l'élaboration de FDES de produits bois, réalisées selon la norme NF EN 15804+A2/CN. Ces valeurs d'impacts, réalisées dans le cadre d'une ACV dynamique, sont corrélées à l'aspect biosourcé du matériau bois qui lui confère un coût carbone bien plus bénéfique que d'autres matériaux. Le scénario établi à travers cette étude et que l'on retrouve dans la norme NF EN 15804+A2/CN fait également écho à la REP PMCB, où le réemploi et la réutilisation sont les deux valorisations à privilégier. L'utilisation de ce scénario doit aider au développement de structures œuvrant pour le réemploi et la réutilisation du bois tel que des ressourceries ou des matériauthèques.

2.3.2.2- Carbone biogénique

Le carbone biogénique est relatif aux matériaux biosourcés comme indiqué dans le chapitre 3.1.3. Un végétal par son mécanisme de photosynthèse, représenté par la (Figure 15), crée du glucose de formule $CH_{12}O_6$ qui contribue à sa croissance.

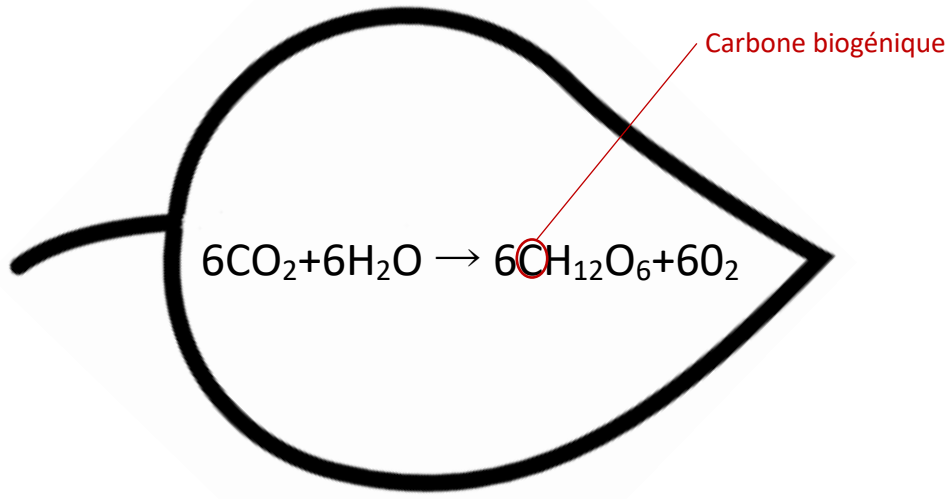


Figure 15 - Mécanisme de la photosynthèse chez les plantes permettant la visualisation du carbone biogénique.

Le carbone présent dans le glucose fait partie intégrante du végétal et on le nomme alors carbone biogénique. L'intérêt du carbone biogénique réside dans le mécanisme de la photosynthèse où le prélèvement de CO_2 dans l'atmosphère permet de contribuer à la diminution des gaz à effet de serre.

Les bois de structure sont remarquables dans cette interaction puisqu'ils permettent une séquestration pérenne du carbone à travers le temps, ils constituent un puits de carbone non négligeable avec l'ensemble des constructions et produits bois. Le phénomène peut alors être amplifié par la succession de cycles de vie notamment des cycles de réemploi et de réutilisation qui préservent l'intégrité de l'élément.

Le bénéfice lié aux matériaux biosourcés n'est cependant attesté que lorsque le matériau utilisé est géré durablement. Il faut un renouvellement de la matière prélevée, l'intervalle de temps pour le renouvellement pouvant différer d'un végétal à un autre. Dans le cadre du matériau bois, la séquestration de carbone ne peut être prise en compte que pour des bois en provenance de pays appliquant l'article 3.4 du protocole de Kyoto ou en provenance de forêts gérées durablement, relevant en particulier des labels « Forest Stewardship Council » (FSC) et « Programme for the Endorsement of Forest Certification » (PEFC) [Nation Unies 1998] [FSC 2025] [PEFC 2025].

L'intégration du carbone biogénique dans les études ACV n'est pas toujours évidente car les logiciels utilisés pour le calcul ACV ne le prennent pas forcément en considération même si la réglementation l'incite fortement. Pour intégrer le carbone biogénique dans l'ACV, il faut dans un premier temps calculer la part de dioxyde de carbone séquestré dans le matériau biosourcé. Pour ce calcul, on utilise la relation (7) présente dans la norme NF EN 16449 [NF EN 16449] :

$$m(CO_2) = \frac{m_{humide}.P_c.M(CO_2)}{1+\frac{H}{100}.100.M(C)} \quad (7)$$

Avec :

- m_{humide} : masse de matière humide (kg) ;
- P_c : teneur en carbone de la matière sèche (%) ;
- $M(CO_2) = 44$ g.mol^{-1} : masse molaire du dioxyde de carbone ;
- $M(C) = 12$ g.mol^{-1} : masse molaire du carbone ;
- H : teneur en humidité de la matière (%).

L'intégralité des composants de cette équation peuvent facilement être déterminés à l'exception de la teneur en carbone qui demande de réaliser des tests de caractérisation ou bien en calculant la teneur en carbone des différents composants de l'espèce végétale considérée. Une fois le carbone biogénique calculé, on peut l'intégrer au niveau de l'ACV selon la méthodologie décrite à travers la norme NF EN 15804+A2/CN [NF EN 15804+A2/CN].

2.3.2.3- Paramètres d'influences

La méthode de calcul de la RE2020 valorise les éléments de réemploi en considérant qu'ils ont un impact carbone nul [Arrêté du 4 août 2021] [Arrêté du 6 avril 2022]. L'Etat, par cette démarche, souhaite dynamiser la filière des matériaux de construction de réemploi. On peut néanmoins s'interroger quant à la pertinence de cette hypothèse qui ne reflète pas la réalité. De nombreux paramètres d'influence de l'ACV peuvent fluctuer et impacter les résultats obtenus. On distingue cinq paramètres d'influence, liés aux différentes étapes clés de l'ACV :

- Les **matières premières** : leur nature, leur quantité et leur provenance influencent directement les impacts environnementaux ;
- Les **procédés de fabrication** : les processus et technologies utilisés pour la fabrication du produit conditionnent les impacts environnementaux, la consommation d'énergie et d'eau mais également la production de déchets ;
- Le **transport** : les distances des transports utilisées au cours de l'ACV impactent forcément les résultats obtenus tout comme le mode de transport ;
- L'**utilisation** : la durée de vie du produit, son efficacité énergétique et son entretien ne sont encore que peu pris en compte dans l'ACV pourtant ils exercent une réelle influence sur les résultats ;
- La **fin de vie** : l'option choisie pour la modélisation de fin de vie influence fortement l'impact sur l'environnement.

En pratique, les deux derniers paramètres sont discutables quant à leur influence. La modélisation de fin de vie et le scénario qui en découle sont normés selon la typologie du matériau [NF EN 15804+A2/CN]. La grande majorité des FDES utilisent le même scénario de fin de vie, ce qui implique peu ou pas de différence entre les FDES pour cette étape. Quant à la phase d'utilisation, même si elle est obligatoire à travers la RE2020, elle est rarement caractérisée au vu des incertitudes qui l'entourent. Cette phase est difficile à estimer pour les utilisations futures du produit et de manière générale du bâtiment.

Le transport est un paramètre très intéressant dans le cadre d'une étude ACV et en particulier pour les éléments de réemploi. Lors de la réalisation d'une ACV sur un produit, les distances et la nature du transport utilisé sont des valeurs moyennes, calculées pour une année type choisie parmi les cinq années précédant la réalisation de la FDES et devant refléter la pratique de l'entreprise. Dans le cadre des éléments de réemploi, ce paramètre n'est pas comptabilisé puisque le coût carbone est considéré comme nul [Arrêté du 4 août 2021] [Arrêté du 6 avril 2022]. Le secteur du réemploi qui voit fleurir un

certain nombre de plateformes de vente en ligne, des « marketplaces », de matériaux de réemploi, perd de son sens environnemental [Minéka 2025] [Cycle-Up 2025]. Par exemple, ces plateformes peuvent permettre le réemploi d'un élément issu d'un chantier de déconstruction à Lille sur un chantier de construction situé à Marseille. Selon la réglementation, l'impact environnemental de l'élément sera considéré comme nul alors que dans la pratique il sera dans la majorité des cas positif. C'est pour cette même raison qu'il est essentiel de distinguer réemploi in-situ et réemploi ex-situ. Chacune de ces pratiques entraine des conséquences différentes pour l'environnement. De façon générale, un périmètre pour le réemploi des matériaux doit être défini et il faut qu'il soit relatif à la nature du produit considéré.

La nature de la matière constitutive d'un produit de réemploi joue un rôle prépondérant dans son ACV, les matériaux biosourcés en sont un bel exemple. Du fait de leur nature, ils stockent du carbone qui se comptabilise de manière négative au niveau de l'impact environnemental, plus précisément sur la phase A1, approvisionnement en matières premières. Cette comptabilisation ne se retranscrit pas au niveau de la pratique puisque leur impact est considéré comme nul. La phase relative aux procédés de fabrication, ou dans le cadre des matériaux de réemploi la phase de reconditionnement, conditionne également les résultats obtenus. Une étude précise et approfondie doit être réalisée afin d'identifier le processus de reconditionnement optimal pour un impact restreint sur l'environnement. Dans le cadre du matériau bois, les usinages réalisés sur l'élément de réemploi doivent être limités afin d'avoir la plus grande efficience sur le potentiel carbone du produit.

2.3.2.4- Fiches déclaratives, environnementales et sanitaires propres au réemploi

Dans le cadre des produits de réemploi, les FDES ou les PEP ne sont pas obligatoires puisque leur impact carbone est considéré comme nul. Pourtant, de plus en plus d'industriels du réemploi sont tentés de réaliser ces éléments afin de mieux valoriser leur produit de réemploi telle que l'entreprise MOBIUS ou bien l'entreprise ORAK [AppInies s.d. - 1] [AppInies s.d. - 2]. Les différents industriels s'inscrivant dans cette démarche sont en anticipation des futures réglementations environnementales pour lesquelles les produits de réemploi ne seraient plus comptabilisés avec un impact carbone neutre. Cette démarche permet de montrer la pertinence de l'utilisation de produit issus du réemploi et tend à uniformiser la démarche de l'utilisation des FDES et des PEP sur l'ensemble de la filière construction.

2.4- Etat des lieux de la filière du réemploi

2.4.1- Etat des lieux réglementaires

2.4.1.1- Code de l'environnement

En premier lieu, avant de s'intéresser au terme de réemploi, il faut s'attarder sur la notion de déchet. Cette notion est importante car c'est elle qui va guider la distinction qu'il existe entre « réemploi » et « réutilisation » au niveau légal. Conformément à l'article 541-1-1 du Code de l'Environnement, un déchet au regard de la loi est « toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire » [Code de l'Environnement 2020]. Cette définition permet de comprendre que tout élément matériel peut être un déchet à partir du moment où son détenteur a l'intention ou l'obligation de s'en débarrasser. Pour le cas d'une obligation, on peut par exemple citer des déchets amiantés ou déchets toxiques qui doivent être envoyés vers des exutoires adaptés.

Les définitions de « réemploi » et de « réutilisation » sont également données par l'article 541-1-1 du Code de l'Environnement. Pour le réemploi, la définition correspondante est « toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui ne sont pas des déchets sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus » tandis que pour la réutilisation la définition est « toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui sont devenus des déchets sont utilisés de nouveau » [Code de l'environnement 2020]. On peut donc remarquer que ce qui distingue le réemploi de la réutilisation c'est le passage par le statut de déchet dans le cas d'une réutilisation. Le réemploi est donc la seule notion qui permet d'éviter le statut de déchet. Cependant, il est limité puisqu'il implique que l'usage du produit ou matériau doit être identique à celui pour lequel il avait été conçu. Ainsi, si l'on prend pour exemple une solive de plancher, on ne pourra parler de réemploi que si celle-ci est utilisée de nouveau en tant que solive alors qu'elle pourrait être également utilisée de nouveau en tant que poteau mais dans ce cas-là au sens de la loi on parlera de réutilisation. La réutilisation autorise et permet le détournement d'usage du déchet au sens de la loi. Ainsi, si l'on reprend l'exemple d'une solive bois, on parlera de réutilisation si celle-ci est utilisée de nouveau en poteau, comme cela a été mentionné auparavant, mais également si celle-ci subit un certain nombre d'opérations qui va conduire à une nouvelle utilisation comme en lames de bardage. La (Figure 16) permet de représenter visuellement la différence existante entre la notion de réemploi et la notion de réutilisation sur l'exemple d'une solive.

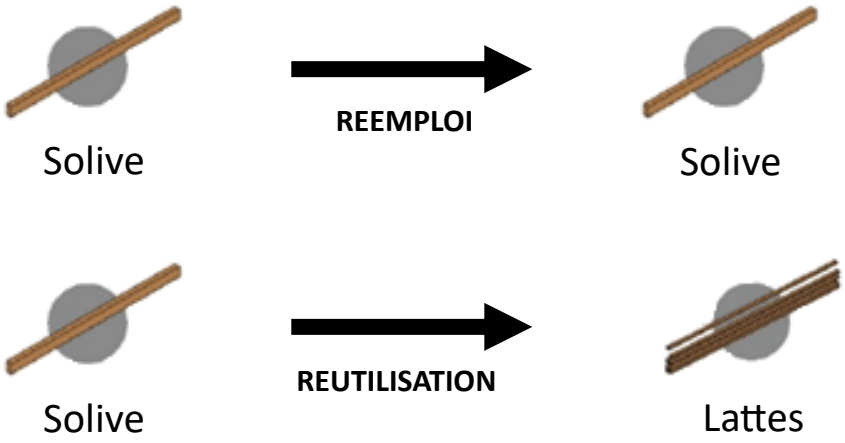


Figure 16 - Représentation visuelle de la différence entre la notion de réemploi et de réutilisation dans le cas d'une solive bois

2.4.1.2- Loi anti-gaspillage économie circulaire

La loi anti-gaspillage et économie circulaire, couramment désignée loi Agec, qui date du 10 février 2020 traite de nombreux sujets, le réemploi étant l'un d'eux. Il est explicitement fait mention du réemploi dans les « parties » 3 et 5 de cette loi [Loi n°2020-105].

La « partie » 3, qui traite de la lutte contre le gaspillage et du réemploi solidaire, doit permettre de favoriser le réemploi à travers des subventions. Des fonds spécifiques ont été créés dans ce cadre et ils sont dotés d'une enveloppe de 50 millions d'euros chaque année [Loi n°2020-105]. Dans le même temps, les filières relatives à la responsabilité élargie du producteur devront soutenir financièrement les acteurs du réemploi, qui majoritairement font de l'insertion par l'emploi, par la création de fonds pour le réemploi solidaire. Le développement de la filière du réemploi induit par cette démarche doit permettre la création d'emplois. Il est fait question ici du réemploi au sens large du terme et non spécifiquement au réemploi des matériaux de construction. Cependant, ceux-ci sont compris dans cette démarche. Il existe notamment des appels à projet annuels de la part de l'ADEME qui traitent du réemploi et ou de la réutilisation [ADEME 2023-2] ou bien directement de la part des éco-organismes [Ecominéro 2025].

La « partie » 5, qui est intitulée « mieux produire », traite du réemploi à travers différents axes. La transformation ou du moins le perfectionnement des filières pollueurs/payeurs est l'un de ces axes. Les éco-organismes en charge de la gestion des déchets des entreprises pourront maintenant être sanctionnés [Loi n°2020-105]. De plus, ils auront maintenant l'obligation d'atteindre des objectifs chiffrés en matière de réemploi, de réparation, de réutilisation et d'écoconception. L'entrée en vigueur de ce point était initialement prévue entre 2021 et 2023 selon les filières concernées. Ainsi, le secteur des produits et matériaux de construction du bâtiment est maintenant soumis à la responsabilité élargie des producteurs. Cette filière est entrée en vigueur au 1er janvier 2023. Les fabricants se sont

organisés afin d'assurer la seconde vie de leur produit. Les éco-organismes doivent s'occuper de la collecte jusqu'au traitement final des déchets. Ils doivent également assurer leur traçabilité et ce même si ces déchets quittent le territoire français [Loi n°2020-105]. A l'heure actuelle, les éco-organismes habilités par l'Etat pour cette filière sont Valobat, Ecominero, Eco-maison et Valdelia. Le dernier axe traite quant à lui de la collecte gratuite des déchets triés du bâtiment, il se décline en différents points : d'une part, la création de nouvelles déchetteries professionnelles qui doit permettre d'augmenter le maillage territorial existant ; d'autre part, la reprise des déchets en déchetteries lorsqu'ils sont triés. Les professionnels pourront utiliser les déchetteries dites "classiques" à condition que leurs déchets soient entièrement triés. On rappelle que le tri se fait selon 7 flux : les déchets métalliques, les déchets plastiques, les déchets de verre, les déchets bois, les déchets de fraction minérale, les déchets de plâtres et les déchets papiers et cartons. Ce tri 7 flux a évolué en 2025 afin de devenir un tri 9 flux prenant alors en compte en plus les déchets textiles et les biodéchets.

2.4.1.3- Réglementation environnementale 2020

La Réglementation Environnementale 2020 ou RE2020, n'est en vigueur que depuis le 1er janvier 2022 à la suite de son report dû à la crise Covid [Arrêté du 4 août 2021] [Arrêté du 6 avril 2022]. Tandis que la RT 2012 ne traitait que le volet Thermique, La RE2020 fait apparaître six nouveaux indicateurs liés à l'Environnement et plus spécifiquement au Carbone :

- $\mathbf{I_{C,\ construction}}$: exprimé en kg_{eqCO2/m^2} il représente l'impact sur le changement climatique des composants du bâtiment et de son chantier de construction (indice réglementé) ;
- $\mathbf{I_{C,\ énergie}}$: exprimé en kg_{eqCO2/m^2} il représente l'impact sur le changement climatique des consommations énergétiques que sont le chauffage, la production de froid, l'éclairage, les consommations auxiliaires et la consommation liée aux déplacements des personnes à l'intérieur du bâtiment (indice réglementé) ;
- $\mathbf{I_{C,\ bâtiment}}$: exprimé en kg_{eqCO2/m^2} il représente l'impact sur le changement climatique des composants du bâtiment, de son chantier de construction, des consommations énergétiques réglementaires et de l'utilisation de la ressource en eau ;
- $\mathbf{I_{C,\ projet}}$: exprimé en kg_{eqCO2/m^2} il rassemble l'impact sur le changement climatique lié au bâtiment, comme ci-dessus, mais également de la parcelle sur laquelle le bâtiment prend place ;
- **Indicateur d'usage des données par défaut** (UDD) : il représente le ratio de l'impact sur le changement climatique des données par défaut utilisées dans le calcul de l'impact total des composants ;

- **StockC** : il représente le stockage de carbone biogénique, le carbone stocké à travers les matériaux biosourcés, au sein du bâtiment.

La RE2020 introduit également des seuils évolutifs à travers le temps pour les indicateurs $I_{C,\ construction}$ et $I_{C,\ énergie}$. Les années retenues pour l'abaissement des seuils étant 2025, 2028 et 2031. On peut moduler l'indicateur $I_{C,\ construction}$ par différents paramètres :

- Les **fondations** et les **parties en sous-sol** ;
- La **voirie** et les **réseaux** ;
- L'**usage de données génériques** ;
- La **surface du bâtiment ;**
- La **zone climatique**.

L'indicateur $I_{C,\ énergie}$ est quant à lui modulé par trois paramètres :

- La s**urface du bâtiment** ;
- La **zone climatique** ;
- Les **contraintes d'exposition au bruit**, impliquant la fermeture des fenêtres même en période de chaleur et l'utilisation de système de refroidissement.

La (Figure 17) représente les seuils admis pour l'indicateur $I_{C,\ construction}$ tandis que la (Figure 18) représente les seuils admis pour l'indicateur $I_{C,\ énergie}$.

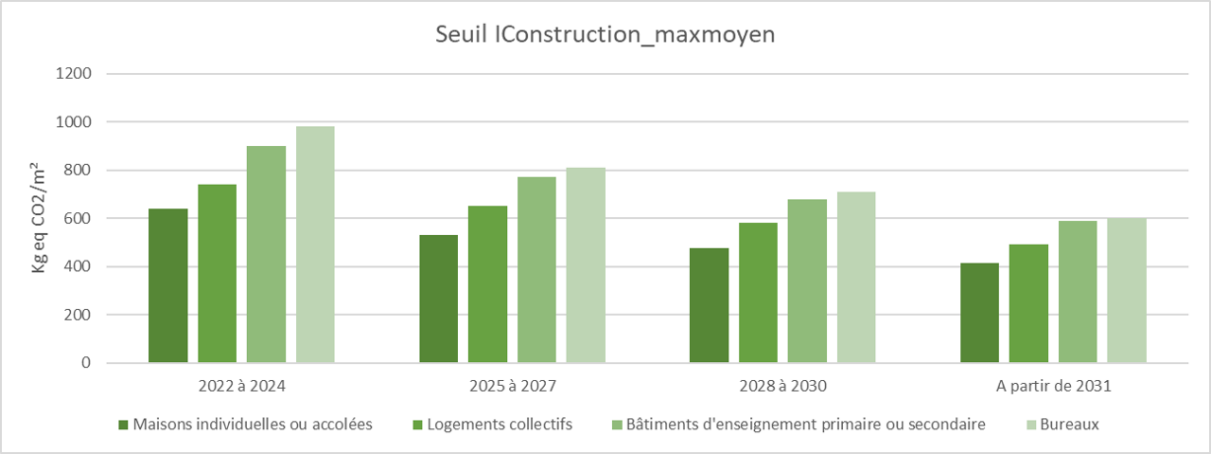


Figure 17 - Seuils admissibles au cours du temps pour l'indicateur IC, construction pour chaque typologie de construction

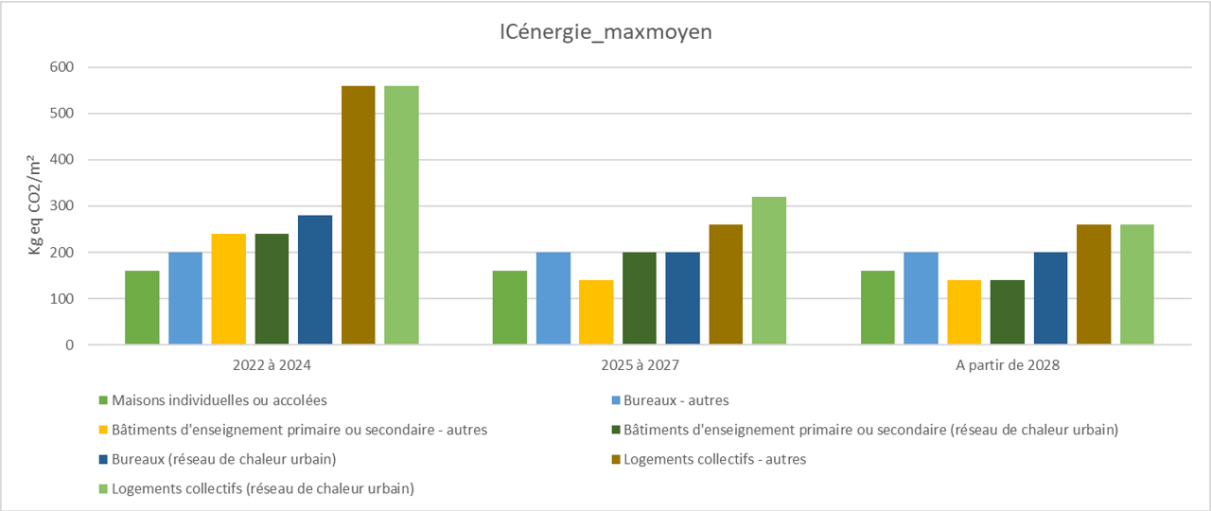


Figure 18 - Seuils admissibles au cours du temps pour l'indicateur IC, énergie pour chaque typologie de construction

Les seuils sont différents en fonction de la typologie de logement : collectif, individuel ou bâtiment tertiaire. Ces seuils, qui sont en baisse au cours du temps, doivent favoriser la réduction de l'impact carbone du secteur de la construction et tendre vers la neutralité carbone en 2050 en adéquation avec la loi Energie-Climat de 2019 [Loi n° 2019-1147]. En effet, le secteur du Bâtiment et des Travaux Publics est le deuxième secteur le plus émissif de Gaz à Effet de Serre avec 18% des émissions en 2022, après le secteur du transport avec près de 30% des émissions [Ministère de la transition énergétique. 2023].

Les différents indicateurs sont calculés à partir d'une Analyse de Cycle de Vie (ACV) dynamique sur une base de 50 ans. La norme NF EN 15804+A2/CN [NF EN 15804+A2/CN] fixant la méthodologie de réalisation des FDES permet de définir l'analyse de cycle de vie dite statique. On parle d'ACV dite dynamique car elle prend en compte la temporalité des émissions de dioxyde de carbone et les effets du stockage de carbone. Ainsi, des émissions ayant lieu plus tôt, auront un impact moindre que les émissions ayant lieu en fin de vie du bâtiment. La (Figure 19) présente les différentes valeurs prises par le coefficient de pondération à appliquer aux résultats obtenus en ACV statique en fonction de l'année d'émissions des gaz à effet de serre. Pour le calcul, les étapes A1 à A5 ont lieu à t=0, jusqu'à la livraison du bâtiment, les étapes d'utilisation du bâtiment, B1 à B7, ont lieu entre t=0 et t=50, 50 ans correspondant à la durée de vie de référence du bâtiment imposée dans la RE 2020. Enfin les étapes de fin de vie, C1 à C4, ont lieu à t=50.

Ainsi, il faudra considérer avec attention le traitement des matériaux de construction dont la durée de vie de référence est inférieure à 50 ans puisque plusieurs lots devront être affectés à des temporalités différentes pour couvrir la durée de vie du bâtiment de 50 ans. Dans le cas de matériaux dont la durée de vie de référence est supérieure à 50 ans, il conviendra de réduire la phase d'utilisation B pour envisager la fin de vie C à t=50 ans.

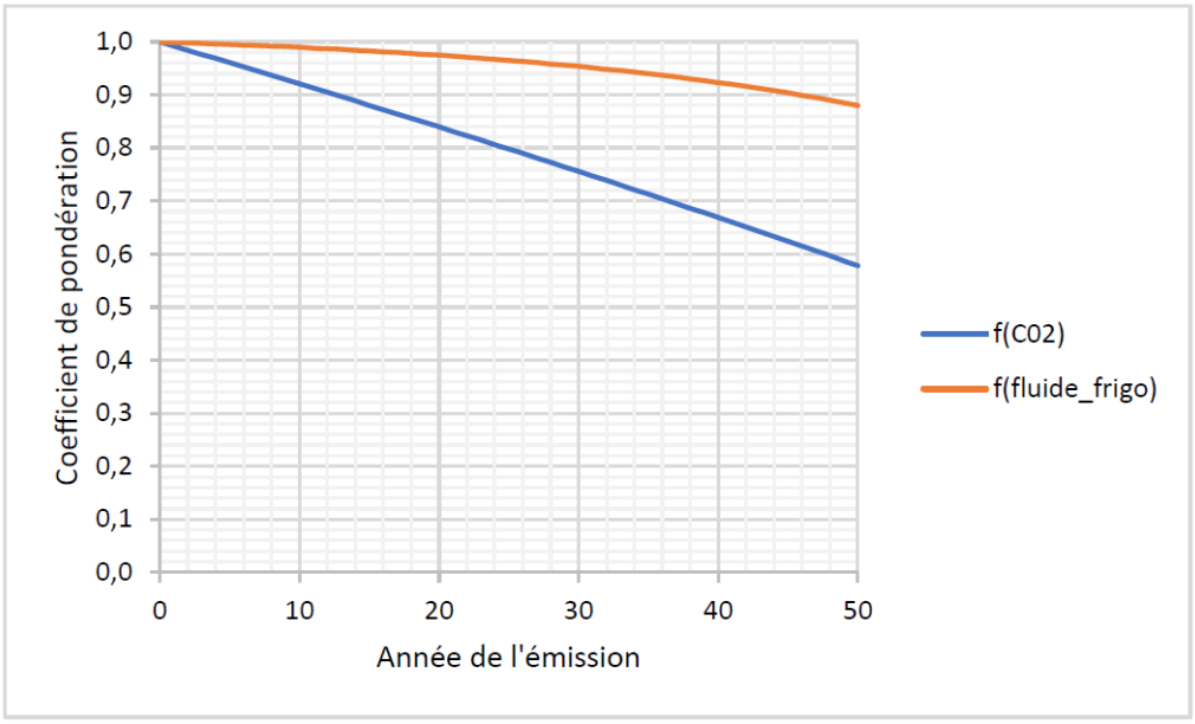


Figure 19 - Coefficient de pondération des émissions de gaz à effet de serre pour l'ACV dynamique (Source : Ministère de la transition écologique)

La (Figure 20) quant à elle permet la visualisation des différences de résultats obtenues entre une ACV dite statique et une ACV dite dynamique dans le cas fictif d'une poutre bois. Le matériau bois, ou plus généralement les matériaux biosourcés, captent du CO_2 pendant leur croissance, ce qui offre un bilan carbone très favorable, voire négatif au début du cycle de vie de notre exemple. Ce CO_2 est alors stocké dans le bâtiment pendant sa durée de vie, puis il est relargué dans l'environnement à la fin de vie du produit. Si l'on prend en compte la temporalité des émissions, l'impact sur le changement climatique de la poutre en bois apparaît bénéfique. Cependant, pour les composants dont les émissions principales ont lieu au début de leur vie, comme le béton ou tout autre composant fossile, l'approche dynamique donne un résultat très proche de l'approche statique.

▶ **Exemple fictif : Cas d'une poutre en bois**

Données environnementales statiques		ACV dynamique : application des coeff. de pondération	
Étapes d'ACV	**kg de CO_2 éq**		**kg de CO_2 éq**
Production	- 600	année 0, coeff 1 x - 600	- 600
Processus de construction	30	année 0, coeff = 1 x 30	30
Utilisation	0	année 1 à 49, coeff = 0,984 à 0,587 x 0	0
Fin de vie	700	année 50, coeff 0,578 x 700	**404,6**
Total cycle de vie	130		- 165,4

Figure 20 - Différence de résultat entre une ACV statique et une ACV dynamique dans le cas fictif d'une poutre en bois (Source : Ministère de la transition écologique)

Ce calcul favorise ainsi les matériaux biosourcés et notamment le bois qui libèrent en fin de vie le carbone stocké pendant sa phase de croissance, le carbone biogénique.

2.4.1.4- La Responsabilité Elargie du Producteur des Produits et Matériaux de Construction du Bâtiment

La Responsabilité Elargie du Producteur des Produits et Matériaux de Construction du Bâtiment ou REP PEMCB est entrée en vigueur le 1er janvier 2023 [Décret n°2021-1941] [Arrêté du 10 juin 2022] [Arrêté du 28 février 2023] [Arrêté du 17 février 2023]. La REP PMCB concerne tous les metteurs sur le marché français de produits et matériaux de construction du secteur du bâtiment, c'est-à-dire tous les fabricants de menuiseries, de vérandas, de façades, de cloisons, de garde-corps, … On peut rassembler la majorité de ces acteurs sous trois catégories :

- Les **industriels fabricants** dont l'activité est consacrée, au moins en partie, à la production industrielle ou artisanale de matériaux, de produits, de composants et d'équipements pour la construction des produits. Un fabricant poseur est metteur sur le marché, tandis qu'un poseur ne l'est pas ;
- Les **distributeurs** mettant à disposition des produits sous leur propre marque ;
- Les **importateurs sur le marché français** commercialisant des produits issus de l'étranger sont metteurs en marché même si ce n'est pas sous leur propre marque, de même pour les entreprises qui achètent des produits à l'étranger pour les installer directement dans des bâtiments français.

La démarche comporte tout de même quelques subtilités. Par exemple, le client final détermine si l'écocontribution doit être indiquée ou non sur l'élément considéré. On peut également remarquer que des composants faisant partie d'un élément de construction ne sont pas forcément assujettis à la REP PMCB, comme la poignée d'une menuiserie extérieure. La REP PMCB concerne l'ensemble des produits et matériaux fabriqués en vue d'être incorporés, assemblés, utilisés ou installés sur les chantiers. Ils ont été répartis en deux catégories principales, inertes et non inertes :

- **Catégorie 1** : Les produits et matériaux de construction constitués majoritairement en masse de **minéraux** ne contenant ni verre, ni laines minérales ou plâtre, c'est-à-dire les bétons, l'ardoise, la céramique, … ;
- **Catégorie 2** : Les autres produits et matériaux de construction, c'est-à-dire les produits et matériaux de construction constitués majoritairement en masse de **métal**, les produits et matériaux de construction constitués majoritairement en masse de **bois**, …

En outre, les produits et matériaux de construction destinés au secteur des travaux publics sont totalement exclus de l'obligation de la REP PMCB. Ainsi, chaque éco-organisme a une habilitation qui lui est propre :

- Catégorie 1 : Ecominero et Valobat ;
- Catégorie 2 : Eco-Maison, Valdelia et Valobat.

Une fois qu'un émetteur sur le marché a adhéré à un éco-organisme, il a un certain nombre d'obligations à tenir :

- Payer l'écocontribution à l'éco-organisme choisi ;
- Intégrer une clause dans ses Conditions Générales de Vente (CGV) indiquant que l'écocontribution sera répercutée à l'acheteur sans possibilité de réfaction dès le 1er janvier 2023 ;
- Répercuter l'écocontribution sur les factures aux clients professionnels directs ;
- Faire figurer le montant de l'écocontribution sur les factures, tout comme l'unité de produit, c'est-à-dire l'unité ou le mètre linéaire ou le poids, et le code produit associé ;

A noter que l'écocontribution est soumise à la TVA. La loi prévoit également la mise en place en association avec les éco-organismes d'un organisme coordonnateur. Il est chargé d'organiser et de financer un guichet unique d'accès simplifié aux services de la filière REP et de répartir les obligations des éco-organismes agréés pour la gestion des déchets issus de PMCB et la mise en place des nouveaux

points de maillage. Dans ce cadre, la société Organisme Coordonnateur Agréé Bâtiment (OCAB) a été agréée en tant qu'organisme coordonnateur jusqu'au 31 décembre 2027 par l'arrêté du 30 juillet 2025 [Arrêté du 30 juillet 2025].

La filière du réemploi et la REP sont complémentaires : la REP crée un cadre réglementaire et financier qui soutient et encourage les pratiques de réemploi, contribuant ainsi à une gestion plus durable des matériaux de construction. La transition vers une économie circulaire est encouragée par le dispositif de la REP, les matériaux sont utilisés de manière plus efficiente et durable. La REP incite les producteurs à concevoir des produits plus durables et facilement démontables facilitant alors la pratique du réemploi et de la réutilisation au travers de l'écoconception.

2.4.1.5- Le diagnostic Produits, Equipements, Matériaux et Déchets

L'ancien diagnostic réglementaire, dit diagnostic déchets, a été remplacé par un nouveau diagnostic réglementaire nommé diagnostic Produits, Equipements, Matériaux et Déchets (PEMD) qui est obligatoire depuis le 1er juillet 2023 [Loi n°2020-105] [Décret n° 2021-821] [Décret n°2021-822] [Arrêté du 26 mars 2023]. Selon l'arrêté du 26 mars 2023, ce diagnostic doit être réalisé pour toutes opérations de démolition ou de rénovation significative. Ainsi, on qualifie d'opération « significative » toute opération qui répond aux critères suivants :

- La **surface cumulée de planchers** de l'ensemble des bâtiments concernés est **supérieure à 1000 m²** ;
- Au moins un bâtiment de l'opération a accueilli une activité agricole, industrielle ou commerciale et a été le siège d'une utilisation, d'un stockage, d'une fabrication ou d'une distribution d'une ou plusieurs substances classées comme dangereuses.

On dénomme « démolition » toute opération consistant à détruire une partie majoritaire de structure d'un bâtiment. Une opération peut être qualifiée de rénovation significative lorsque celle-ci a pour principe de détruire ou de remplacer au moins 2 des éléments de second œuvre mentionnés dans la liste suivante :

- Planchers ne déterminant pas la résistance ou la rigidité de l'ouvrage ;
- Cloisons extérieures ne déterminant pas la résistance ou la rigidité de l'ouvrage ;
- Huisseries extérieures ;
- Cloisons intérieures ;
- Installations sanitaires et de plomberie ;

- Installations électriques ;
- Système de chauffage.

Cette opération n'est significative que si les travaux concernés conduisent à détruire ou remplacer une partie majoritaire de chacun de ces éléments, cette « partie majoritaire » étant définie comme plus de 50% d'un élément. Ainsi, on parlera de surface cumulée dans le cadre des planchers et des cloisons et d'ensemble pour les autres éléments de second-œuvre de la liste précédente.

Un diagnostic PEMD peut être réalisé par toute personne pouvant prouver ses compétences "en matière de prévention et de gestion des déchets ainsi qu'en matière de techniques du bâtiment ou d'économie de la construction". Concrètement les personnes voulant réaliser ce type de diagnostic ont 2 options :

- Apporter la preuve de ses compétences en matière de prévention et de gestions des déchets et apporter la preuve de ses compétences en techniques du bâtiment ;
- Apporter la preuve de ses compétences en matière de prévention et de gestions des déchets et apporter la preuve de ses compétences en matière d'économie de la construction.

Pour les personnes morales susceptibles de réaliser des diagnostics, il leur faudra prouver qu'au moins une personne physique de leur effectif satisfait aux critères précédemment cités.

Les diagnostics et formulaires de récolements devront être transmis au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). Le diagnostic devra être transmis préalablement à l'acceptation des devis ou à la passation des marchés relatifs aux travaux de démolition ou de rénovation significative tandis que les formulaires de récolements devront être transmis dans un délai de quatre-vingt-dix jours suivant l'achèvement des travaux de démolition ou de rénovation significative. Le CSTB aura la possibilité de publier les informations du diagnostic mais ceci uniquement après un accord écrit de la part du maître d'ouvrage. Un site est dédié au diagnostic Produits, Equipements, Matériaux et Déchets, où une carte interactive permet la visualisation de l'ensemble des diagnostics pour lesquels les maîtres d'ouvrages ont donné leur accord. Cette carte permet d'exprimer directement un intérêt au maitre d'ouvrage concerné [CSTB 2025-1].

Le contenu du diagnostic Produits, Equipements, Matériaux et Déchets doit permettre de renforcer la hiérarchie des modes de traitements, donc la priorité au réemploi, ainsi que la traçabilité. Si l'on se reporte au décret, le diagnostic est composé comme tel :

- Une première partie concernant **l'opération en tant que telle**, c'est-à-dire : son adresse, la date estimée du chantier, la typologie de l'opération, le nombre de bâtiments et la surface concernée, la typologie du ou des bâtiments, … ;

- Une seconde partie concernant **la maîtrise d'ouvrage mandataire de l'opération**, c'est-à-dire : la nature de la maîtrise d'ouvrage, le nom, le numéro de Siret ou Siren, l'adresse de localisation, … ;

- Une troisième partie concernant **le diagnostiqueur missionné sur l'opération**, c'est-à-dire : la nature du diagnostiqueur, le nom, le numéro de Siret ou Siren, l'adresse de localisation, le nom de la compagnie d'assurance souscrite, … ;

- Une quatrième partie concernant **le diagnostic en lui-même**, c'est-à-dire : la date de la dernière visite de l'opération, les bâtiments visités, les bâtiments non visités et la raison liée, un tableau concernant les Produits, Equipements et Matériaux de l'opération contenant notamment des indications d'identifications et d'orientations de ces éléments, des tableaux concernant chaque typologie de déchet de l'opération contenant notamment des indications d'identifications et d'orientations de ces éléments, …

Le contenu des formulaires de récolements, si l'on se reporte au décret n°2021-821 [Décret n° 2021-821], est le suivant

- Une première partie concernant **l'opération en tant que telle**, c'est-à-dire : son adresse, la date de début et de fin du chantier, la typologie de l'opération, le nombre de bâtiments et la surface concernée, la typologie du ou des bâtiments, … ;

- Une seconde partie concernant **la maîtrise d'ouvrage mandataire de l'opération**, c'est-à-dire : la nature de la maîtrise d'ouvrage, le nom, le numéro de Siret ou Siren, l'adresse de localisation, … ;

- Une troisième partie concernant **le recollement en lui-même**, c'est-à-dire : un tableau concernant les Produits, Equipements et Matériaux (PEM) de l'opération contenant notamment des indications d'identifications, de quantité et l'orientation définitive de ces éléments, des tableaux concernant chaque typologie de déchet de l'opération contenant notamment des indications d'identifications, de quantité et l'orientation définitive de ces éléments, …

Tous les acteurs concernés par cette mesure sont en train de monter en compétence notamment par des campagnes de formation autour de ce diagnostic Produits, Equipements, Matériaux et Déchets

ouvertes à la fois aux diagnostiqueurs mais également à des maîtrises d'ouvrages impliquées et des maîtrises d'œuvres alertes. De plus, différents acteurs de la construction proposent des modèles types pour la réalisation de ce diagnostic [Cycle-Up 2021] [BatiRIM 2019] [FCRBE-2 2021].

En complément de ce premier diagnostic, un diagnostic complémentaire, plus spécifique au réemploi et à la réutilisation, peut être réalisé, c'est un diagnostic ressources. Le diagnostic ressources est une étape cruciale dans la pratique du réemploi et de la réutilisation [FCRBE 2022]. Il doit permettre une évaluation quantitative et qualitative, plus poussée que ce que propose le diagnostic PEMD, visant à identifier précisément les matériaux et produits à fort potentiel de réemploi. Cette expertise inclut des visites sur site, des analyses documentaires, des sondages ainsi que des tests pour vérifier la dépose sélective des matériaux. Le diagnostic ressources représente un outil d'intérêt majeur pour le changement de paradigme du secteur de la construction. En diminuant les déchets de chantier et en réduisant l'empreinte carbone des projets de construction, il contribue à réduire l'impact environnemental du secteur. Il permet également de générer des économies significatives en réduisant les coûts d'achat de nouveaux matériaux mais également en diminuant les frais de gestion des déchets qui deviennent des ressources. En identifiant les matériaux réutilisables, le diagnostic ressources permet de leur donner une seconde vie et de favoriser ainsi le développement de filières locales de réemploi. Le diagnostic ressources est un outil indispensable car au-delà de maximiser les bénéfices environnementaux, économiques et sociaux il permet de stimuler l'innovation dans le secteur de la construction tout en garantissant une réponse aux réglementations en vigueur.

2.4.2- Etat des lieux des acteurs

2.4.2.1- Présentation des acteurs

2.4.2.1.1- Bureau d'étude réemploi

Les bureaux d'étude spécialisés dans le domaine du réemploi et de manière générale de l'économie circulaire jouent un rôle central dans le réemploi des matériaux de construction. Ces structures répondent souvent au besoin d'accompagnement des maîtrises d'ouvrage et maîtrises d'œuvre quant à la pratique et à la mise en place du réemploi pour un chantier [FCRBE 2024]. C'est d'ailleurs pour cette raison qu'ils prennent régulièrement l'aspect d'une assistance à maîtrise d'œuvre ou d'ouvrage sur les projets de construction. Du fait de leur statut, ils sont responsables de l'analyse, de la conception et de la planification des projets de réemploi. Leur expertise technique permet de réaliser des diagnostics ressources, de réaliser ou faire réaliser des tests de dépose sélective et de proposer des solutions liées au réemploi adaptées aux contraintes techniques, économiques et réglementaires. De façon générale, ils évaluent la faisabilité des projets intégrant une partie réemploi. Ils assurent

également un rôle crucial entre les acteurs du projet, celui de coordinateur. Cette stratégie permet de garantir une mise en œuvre efficace et réussie des initiatives de réemploi.

Au niveau de la région Grand-Est, plusieurs bureaux d'étude se distinguent par leur engagement dans la filière du réemploi des matériaux de construction et de l'économie circulaire. Par exemple, le bureau d'étude RE!NOUVEAU, basé à Nancy et fondé par des architectes, s'efforce d'accompagner les maîtrises d'ouvrages sur la pratique du réemploi à toutes les phases et échelles de projet [RE!NOUVEAU 2025]. Il est également impliqué dans la formation des acteurs du secteur de la construction pour les sensibiliser à cette pratique et à la démarche qui en découle. Les fondatrices de ce bureau d'étude sont également engagées dans la filière réemploi de la région Grand-Est au travers de l'association REMISE qui a été créée en parallèle de leur activité [Gasser s. d.]. Cette association a pour objectif de promouvoir et valoriser le réemploi des matériaux de construction. Une plateforme en ligne pour la mise en relation d'acteurs de la construction, uniquement de la région Grand-Est, et de vente de matériaux et d'équipements issus du réemploi a été lancée au cours de l'année de 2023 [REMISE 2025]. Cette initiative est intéressante et remarquable puisqu'elle s'intègre au niveau territorial et prend en considération l'aspect environnemental dans sa démarche. La plupart des plateformes similaires sont présentes généralement à l'échelle nationale et perdent de fait de leur intérêt en générant des coûts carbone significatifs dûs au transport [Bakacia s. d.] [Cycle up s. d.]. Basée à Strasbourg, l'association BOMA s'efforce également de réduire l'impact environnemental des matériaux de construction et de promouvoir des pratiques de construction plus résilientes [BOMA 2023]. Elle propose des services d'ingénierie pour le réemploi des matériaux mais également des formations à destination des acteurs du secteur de la construction. L'association met en avant l'économie circulaire comme levier pour réduire l'impact environnemental, en favorisant le réemploi et la réutilisation des matériaux déconstruits après un reconditionnement. Grâce à ces initiatives, BOMA contribue à la réduction des déchets de démolition et à la mise en œuvre de matériaux à faible impact environnemental, répondant ainsi aux objectifs carbones et aux contraintes réglementaires.

2.4.2.1.2- Producteur de matériaux

Les industriels sont essentiels dans le processus de création et d'émergence de la filière du réemploi. Ils vont permettre à la filière du réemploi de devenir mature et de s'assurer de la généralisation de la pratique. Les industriels fabricants, par leur cœur de métier, sont responsables de la production et de la transformation des matériaux de construction. Leur devoir, au vu des objectifs de la filière BTP [Gouvernement 2023-1], est d'intégrer des pratiques de réemploi dans leurs différents processus de fabrication mais également de développer des produits éco-conçus facilitant la démontabilité et in-fine la démarche de réemploi. Ils ont aussi l'obligation de collaborer avec les éco-

organismes en charge de la filière REP pour la gestion des produits en fin de vie. Les matériaux réemployés remis à la vente doivent répondre aux mêmes exigences de qualité et de sécurité que les produits neufs manufacturés. C'est en ce sens qu'ils collaborent régulièrement avec des laboratoires spécialisés pour la réalisation de tests et l'obtention de certification [CSTB 2025-2] [CRITT Bois 2025]. En adoptant des pratiques de réemploi et en proposant des matériaux de seconde vie, les industriels contribuent à la réduction de l'empreinte carbone du secteur de la construction et à la préservation des ressources naturelles.

A ce jour, le nombre d'industriels proposant des produits de réemploi ou de seconde vie en France reste restreint. Cependant, on voit se développer progressivement des entités se concentrant sur ce secteur d'activité. L'entreprise MOBIUS apparait comme un précurseur au niveau de l'industrialisation du processus de réemploi en France. Cette entreprise, qui a des cabinets de conseils dans différentes villes françaises, compte également une usine de production située à Bondy. Cette usine se concentre principalement sur le processus de réemploi associé aux dalles de faux-plancher technique. Son pôle conseil permet de traiter chaque phase du processus de réemploi du « sourcing » jusqu'à la proposition d'une garantie décennale et d'une fiche FDES propre aux matériaux. D'autres matériaux feront bientôt l'objet de la même démarche tel que des sanitaires ou bien encore des dalles de moquette [MOBIUS 2025]. L'entreprise Articonnex, implantée dans plusieurs villes de l'Ouest de la France, propose quant à elle différents sites de revente de matériaux de construction divers et variés. Cependant, sa dernière filiale Réemprod située à Grandchamp en Loire-Atlantique se spécialise dans le reconditionnement et la vente de bois et de matériaux associés. Ainsi, l'atelier comporte de nombreuses machines à bois permettant la reprise des éléments issus des déconstructions du secteur ou bien des rebuts d'usines de partenaires. L'entreprise s'inscrit pleinement dans le principe de « cascading wood » et contribue à son échelle à la décarbonation du secteur de la construction [Articonnex 2025].

2.4.2.1.3- Entreprises d'insertion

Les entreprises d'insertion sont capitales pour la mise en place d'une filière mature du réemploi des matériaux de construction. En offrant des opportunités d'emploi et de formation aux personnes éloignées du marché du travail, ces structures apportent une dimension sociale au réemploi. Elles contribuent à la lutte contre l'exclusion et permettent de renforcer le tissu économique local. Ces entités collaborent notamment avec des associations et des collectivités pour mettre en place des projets et des missions de réemploi à l'échelle du territoire. Par ce processus, les matériaux issus de déconstruction sont gérés de manière efficace et solidaire permettant ainsi le développement d'une économie circulaire au sein du secteur de la construction et de contribuer ainsi au plan bâtiment durable proposé par l'Etat [Gouvernement 2023-2]. Leur travail porte principalement sur la pratique

de déconstruction associant différentes missions telles que la dépose sélective ou bien encore le tri et la valorisation des matériaux et équipements. Ces entreprises restent un soutien de premier plan pour l'émergence d'une filière du réemploi puisque les contraintes financières qui pèsent sur elles ne sont pas les mêmes par rapport à une entreprise classique. Il faut donc promouvoir ce type de structure à l'échelle nationale afin de répondre aux différents objectifs que demande le secteur de la construction pour sa mutation en un secteur durable et adéquation avec l'environnement.

Au niveau de la région Grand-Est, de nombreuses entreprises d'insertion ayant pour cœur de métier le réemploi voient le jour. Ces entreprises peuvent se permettre de répondre à des marchés auxquels des entreprises plus classiques ne pourraient répondre au vu des contraintes temporelles ou financières qui y sont associées. Au niveau du département des Vosges, c'est l'entreprise d'insertion Reval Prest qui s'implique pleinement dans cette pratique [REVAL PREST 2025]. Une branche entière de l'entreprise se consacre à la déconstruction et à la dépose sélective des matériaux. Elle est impliquée auprès des collectivités pour qui elle réalise des prestations de déconstruction et de dépose sélective de matériaux. Son intégration à l'écosystème local, voir régional au vu des zones d'interventions, s'opère par des partenariats avec différentes entités et de diverses manières [Vosges Matin 2021-1] [AMI 2025]. L'entreprise a réalisé plusieurs chantiers de référence au niveau du département des Vosges, où le curseur du réemploi était élevé [Vosges Matin 2021-2] [Vosges Matin 2022].

2.4.2.1.4- Associations

Tout comme les entreprises d'insertion, les associations sont des acteurs de premier plan pour la promotion du réemploi dans le secteur de la construction. Leur mission principale pour le développement du réemploi est la sensibilisation du grand public et des professionnels aux avantages environnementaux et économiques de la démarche. Ces structures organisent ainsi des ateliers, des formations ou mettent en place des plateformes de mise en relation entre les fournisseurs et les utilisateurs de matériaux de réemploi, à l'image de REMISE [REMISE 2025]. Elles peuvent également promouvoir le réemploi par le biais de ressourceries ou de matériauthèques propres aux produits de la construction. Les associations sont parfaitement impliquées au niveau du territoire. Leur plaidoirie auprès des pouvoirs publics encourage les politiques favorables au réemploi. Ces entités sont au cœur de l'écosystème du réemploi au niveau des territoires puisqu'elles travaillent en étroite collaboration avec les industriels, les bureaux d'études et les entreprises d'insertion pour développer des solutions innovantes et contribuer ainsi à la transition vers une économie circulaire.

Au niveau de la région Grand-Est, la Chambre Régionale de l'Économie Sociale et Solidaire (CRESS) est un bon exemple de ce qui est développé dans le milieu associatif pour le réemploi. La CRESS facilite l'insertion professionnelle de travailleurs en leur proposant des missions de travail auprès d'entreprises

de la construction souhaitant fortement développer la pratique du réemploi [CRESS 2025]. Sur la ville de Nancy, l'association RECIPROCITE propose une plateforme de réemploi de plus de 1900 m² où sont réalisés le stockage, le reconditionnement et la mise en vente de matériaux de réemploi issus du département [OPALIS 2024]. Cette association propose deux activités de services principalement tournées vers la pratique du réemploi : la médiation citoyenne et la réalisation de travaux techniques autour de l'économie circulaire [RECIPROCITE 2025]. L'association AMI, basée à Épinal, se consacre au reconditionnement et à la vente de matériaux et d'équipements du secteur vosgien de la construction. La revente de matériaux cible à la fois les particuliers et les professionnels de la construction tels que les artisans. AMI encourage et accorde des opportunités de formation et d'emploi aux personnes en difficulté, consolidant le tissu économique et social local [AMI 2025]. Dernière en date, l'association AITHEX, basée à Saint-Amé dans le département des Vosges, propose aussi une plateforme pour la récupération, le tri, le reconditionnement et la vente de matériaux de construction. C'est encore par l'insertion que cette structure se développe et consolide l'écosystème social local [AITHEX 2025].

2.4.2.2- Synergies entre acteurs

Les synergies existantes entre les différents acteurs, présentés dans le chapitre 3.2.1, sont de diverses natures mais elles ont toutes la même mission : le développement d'une filière de réemploi durable. Des objectifs sous-jacents tels que la réduction des déchets, la diminution de l'empreinte carbone des bâtiments ou encore la création d'emplois locaux permettent de promouvoir la pratique du réemploi. Les bureaux d'études, les industriels, les entreprises d'insertion, les associations, les maîtrises d'ouvrage, publiques comme privées, et les maîtrises d'œuvre collaborent afin d'optimiser la chaîne de valeur du réemploi. Cette collaboration doit permettre de faciliter l'identification des ressources, leur collecte, leur reconditionnement et leur remise en œuvre. Ces collaborations peuvent prendre la forme d'accord-cadre ou de partenariats stratégiques [FCRBE-1 2021].

Les bureaux d'études ont une position importante dans le processus de réemploi. Par leurs missions d'identification et de diagnostics techniques des ressources, ils évaluent la faisabilité du réemploi sur les projets pour le compte des maîtrises d'œuvre ou celui des maîtrises d'ouvrages. Leur veille technique leur permet également de proposer des solutions innovantes dans les projets de construction en intégrant des produits de réemploi proposés par les industriels du secteur [FCRBE-1 2021]. Les Industriels ne sont que force de proposition auprès des maîtrises d'œuvres et des maîtrises d'ouvrages. Ils apportent principalement des solutions pour le reconditionnement des matériaux et des équipements issus de la filière du réemploi. Les entreprises d'insertion et les associations sont quant à elles des facilitatrices du processus de réemploi et apportent une dimension sociale à travers celui-ci. Elles travaillent en étroite collaboration avec les autres acteurs afin d'assurer une collecte, un tri et une

valorisation optimale des matériaux de réemploi. Les entreprises d'insertion et les associations contribuent pleinement à la mise en place d'une économie circulaire au sein du secteur de la construction. Les maîtrises d'ouvrage et les maîtrises d'œuvre ne sont pas en reste dans le processus de réemploi puisqu'elles demeurent les forces de proposition privilégiées pour la mise en œuvre du réemploi sur les chantiers. C'est d'autant plus vrai pour les maîtrises d'ouvrages puisqu'elles peuvent imposer la pratique du réemploi dans les marchés de travaux [FCRBE 2024].

Au sein de la région Grand-Est, ces synergies prennent une dimension particulière grâce à des initiatives régionales mais également locales. Le Collectif Grand-Est est une plateforme collaborative où se rassemblent les acteurs de l'économie circulaire mais également les initiatives, les connaissances, les outils et les retours d'expérience qui en découlent [Collectif Grand-Est 2025]. Ce type d'initiative facilite les échanges et la mise en relation entre les acteurs du secteur, dans le but de diffuser les bonnes pratiques en matière de réemploi et d'économie circulaire. La plateforme Réemployez.fr va dans le même sens en proposant une mise en relation entre émetteurs et prospecteurs de matériaux de réemploi [REMISE 2025]. D'autres acteurs tels que l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) ou bien encore l'association Envirobat Grand Est, un réseau professionnel autour du bâtiment et de l'aménagement durable, proposent des rencontres territoriales qui permettent de partager des retours d'expérience de projets exemplaires [ADEME 2025] [Envirobat 2025]. A titre d'exemple, la communauté de communes du Bassin de Pompey en Meurthe-et-Moselle a établi un accord-cadre avec l'entreprise d'insertion Reval Prest et l'association REMISE. La première entité assure la déconstruction sélective de différents bâtiments appartenant aux collectivités et la seconde gère une matériauthèque, proposant les matériaux et équipements issus de ces chantiers, implantée sur le territoire [Pompey 2025]. Ces différentes initiatives contribuent à renforcer le tissu économique local et à prouver qu'il est possible de concilier performance économique, sociale et environnementale sur la gestion et la valorisation de ressources locales qui ne sont encore que peu exploitées.

2.4.2.3- Une pratique différente de la réglementation ?

Les limites induites par la loi et les règlementations au processus de réemploi et de réutilisation ne se retranscrivent pas forcément dans la pratique. De nombreuses personnes et entités travaillant ou contribuant à ce secteur d'activités donnent leur propre définition à ces termes. Ces définitions correspondent au rapport qu'ils ont avec la pratique du réemploi.

L'ADEME, bien qu'un organisme de l'Etat français, donne des définitions autres que celles promulguées par la loi française. En effet, la définition de l'ADEME pour le terme de réemploi est la suivante « Le réemploi est l'opération par laquelle un produit est donné ou vendu par son propriétaire initial à un tiers qui, a priori lui donnera une seconde vie. Le produit garde son statut de produit et ne devient à

aucun moment un déchet » [ADEME 2015]. Cette définition fait donc bien référence au fait qu'un élément de réemploi ne doit pas passer par le statut de déchet. Cependant, elle fait également mention d'une seconde vie pour un élément de réemploi ce qui permet d'ouvrir le champ des nouveaux usages pour ce dit élément, il n'y a plus l'obligation d'un usage identique. La définition donnée par l'ADEME au terme réutilisation est la suivante « La réutilisation est une opération qui s'amorce lorsqu'un propriétaire d'un bien usagé s'en défait sans le remettre directement à une structure dont l'objet est le réemploi. Il va déposer son bien usagé dans un endroit dédié et adapté (déchetterie, ...). Le bien usagé prend alors un statut de déchet. Il subit ensuite une opération de traitement des déchets appelée "préparation aux vues de la réutilisation" lui permettant de retrouver son statut de produit. Il peut alors bénéficier à un détenteur qui lui donnera une seconde vie » [ADEME 2015]. Cette définition rappelle donc que l'on peut parler de réutilisation à partir du moment où un élément prend le statut déchet et que celui-ci sera réutilisé après une phase de « préparation aux vues de la réutilisation ». Cette dernière expression est intéressante car si on se réfère de nouveau à l'article 541-1-1 du Code de l'Environnement, la définition donnée pour cette expression est la suivante « toute opération de contrôle, de nettoyage ou de réparation en vue de la valorisation par laquelle des substances, matières ou produits qui sont devenus des déchets sont préparés de manière à être réutilisés sans autre opération de prétraitement » [Code de l'Environnement 2020]. On peut alors se questionner quant à la légitimité de cette définition puisque ces opérations peuvent également intervenir dans le cadre d'un réemploi, seule l'apparition du terme déchet permet de rapprocher pleinement cette définition de la réutilisation.

Le collectif bruxellois ROTOR, une référence en termes de réemploi au niveau européen et œuvrant dans ce domaine depuis de nombreuses années, donne cette définition pour le réemploi « c'est le fait de récupérer des éléments constructifs lors de travaux de transformation ou de démolition et de leur trouver de nouveaux usages dans d'autres projets » [ROTOR 2018]. Cette définition restreint et élargit à la fois le terme de réemploi. On ne parle ici que d'éléments "constructifs" alors que tout peut être réemployé notamment des objets, c'est ce qui se fait déjà par des organismes tel que EMMAÜS ou VALDELIA [EMMAÜS 2025] [Valdelia 2025]. Il est aussi fait mention de « nouveaux usages », on a alors tendance à assimiler le réemploi à une nouvelle utilisation autre que la précédente ce qui de fait rapproche du terme réutilisation. Il y a aussi la notion « d'autres projets » qui est problématique car un réemploi peut être effectif sur un même projet par exemple dans le cadre d'une réhabilitation ou bien d'une opération de déconstruction/reconstruction. Enfin, si l'on veut aller jusqu'au bout de la démarche réflexive, il n'est fait mention que des « travaux de transformation ou de démolition » pour la récupération des éléments sujet au réemploi. Or, la récupération de tels éléments peut également

se faire sur des chantiers neufs ou dans des usines de production, notamment à travers les chutes de chantier ou des erreurs de série sur une gamme de produit.

La coopérative d'architecture parisienne Bellastock, à l'instar d'autres professionnels, élargit la notion de réemploi en englobant dans ce terme la notion de réutilisation. Cette définition coïncide avec celle de la directive cadre européenne 2008/98/CE et sa version modificative 2018/852/CE entrée en vigueur dans les pays de l'Union Européenne depuis le 5 juillet 2020 et qui ne fait aucune distinction entre le réemploi et la réutilisation [Parlement Européen 2008] [Parlement Européen 2018]. Cette directive crée un cadre pour la prévention et la gestion des déchets à travers le réemploi, le recyclage et la valorisation. Dans ce sens, l'objectif est ainsi « en priorité de prévenir et de réduire la production et la nocivité des déchets [...] en favorisant le réemploi ». Cette définition permet donc de rassembler pleinement les notions de réemploi et de réutilisation qui sont assimilables du fait de leur finalité. Un élément, qu'il ait un usage identique ou non, est considéré dans son ensemble a contrario du recyclage où l'on ne considère plus l'élément mais bien la matière le constituant. C'est la définition la plus adaptée et la plus juste au vu des pratiques et du microcosme actuel du secteur.

2.4.2.4- Une industrialisation de la pratique ?

L'industrialisation du réemploi et de la réutilisation pourrait être une avancée significative pour le changement du modèle sur lequel s'appuie le secteur de la construction. L'objectif majeur de la mise en place à grande échelle de cette pratique est la promotion d'une économie circulaire capable de répondre à la réduction des émissions de CO_2, à la préservation des ressources naturelles, à l'encouragement d'une culture de la durabilité des produits et à la stimulation de l'économie locale par la création d'emplois sur l'ensemble du territoire. Ainsi, cette pratique peut répondre aux demandes du secteur en termes environnemental, économique et social. C'est en ce sens que l'Etat français promulgue des lois qui contribuent à ce changement de paradigme, le tout soutenu par un certain nombre d'initiatives [Loi n°2020-105] [Arrêté du 4 août 2021] [Arrêté du 6 avril 2022] [FCRBE 2024] [ADEME 2022]. Cependant, des défis subsistent et endiguent l'industrialisation de la pratique, notamment en ce qui concerne le réemploi des bois structurels.

Le réemploi de bois structurel, qui s'inscrit pleinement dans la logique développée par l'Etat français, doit répondre à de nombreux freins avant d'envisager l'industrialisation de cette pratique. La requalification mécanique et chimique des bois de réemploi en est un bon exemple. Certaines initiatives tendent à donner une réponse claire sans pour autant conclure sur le sujet [FCRBE 2024] [CSTB 2024]. L'émergence de nouveaux outils et d'innovations technologiques permettent d'impulser la pratique du réemploi. Au niveau industriel, de belles initiatives voient le jour mais elles se cantonnent à des typologies précises de produit [Urban Machine 2025] [Ouest France 2023]. La standardisation

des processus et la réduction des coûts s'avèrent encore être un objectif lointain. D'autant que la sensibilisation des acteurs de la construction vis-à-vis de la pratique du réemploi n'est encore qu'à ses prémices, tout comme la collaboration étroite entre les acteurs de la filière.

La pertinence économique du recours aux matériaux de réemploi ne doit pas être sous-estimée non plus. Même si les matériaux de réemploi de manière générale restent plus chers que des matériaux neufs [IFPEB 2023-1] [IFPEB 2023-2], ils restent des ressources importantes encore sous-exploitées et dont l'intérêt économique ne peut que s'accroître. Ces ressources prennent un sens tout autre dans le contexte d'épuisement des ressources naturelles. La diminution des ressources naturelles entraine une augmentation des prix des matériaux de construction en cas de forte demande à la suite d'une pénurie, comme ce fut le cas à la suite de la crise sanitaire de 2020 [Kisi 2022].

3- Matériels et Méthodes

3.1- Introduction générale

Dans cette seconde partie, vont être présentés et détaillés les différentes méthodes et outils utilisés pour parvenir aux résultats obtenus. L'ordonnancement des différents chapitres permet de représenter le processus de réemploi des éléments bois, ce processus s'étendant du diagnostic de la ressource jusqu'à sa mise à disposition pour son futur réemploi.

3.2- Sondages et diagnostic ressources

Ce chapitre traite de la phase de diagnostic de la ressource bois. C'est-à-dire de l'identification des éléments bois, la première phase de leur caractérisation et leur implémentation dans le projet de déconstruction/reconstruction. Cette première phase a été conduite en étroite collaboration avec le laboratoire du MAP-CRAI, affilié à l'école d'architecture de Nancy, qui mène également des recherches approfondies sur cette thématique.

3.2.1- Sondage du complexe structurel

En amont du chantier de déconstruction, un premier diagnostic ressources a été réalisé par le groupement d'assistance à maitrise d'ouvrage missionné pour ce projet. Le diagnostic déchets était encore en vigueur, en ce sens aucun diagnostic PEMD n'a été réalisé sur cette opération. Ce diagnostic ressources, qui porte sur l'ensemble des quatre bâtiments existants, devait permettre d'identifier avec précision les matériaux et équipements pouvant faire l'objet d'un réemploi ou d'une réutilisation. Il s'est cependant avéré que ce premier diagnostic comportait de nombreux manquements. Le focus portant essentiellement sur des équipements et matériaux de second-œuvre, telles que les chaudières ou les menuiseries extérieures. Les seuls éléments bois qui avaient été mentionnés étaient les différentes pièces issues des charpentes et qui devaient être orientées vers la filière de recyclage. Les systèmes constructifs des planchers et des murs n'avaient pas été étudiés. Il y avait donc une non-connaissance des éléments constitutifs de ces structures et du potentiel de réemploi et de réutilisation lié à ces ressources. C'est dans cette optique que des sondages ont été réalisés sur les différents systèmes constructifs dans un deuxième temps.

Les sondages réalisés ont porté sur trois systèmes constructifs :

- Les murs de refend ;
- Les cloisons intérieures ;
- Les complexes de plancher.

L'ensemble des sondages ont été réalisés en adéquation avec les diagnostics amiante et plomb. Le sondage mené sur un mur de refend a permis d'identifier le potentiel de réutilisation lié aux moellons granite tandis que le sondage effectué sur une cloison intérieure a permis de confirmer que les carreaux brique utilisés ne pourront être orientés vers la filière du réemploi. Dans les deux cas, une problématique liée au plâtre a été mise en évidence démontrant toute l'attention particulière qu'il faudrait porter au traitement de ce matériau sur l'ensemble du chantier. La (Figure 21) permet de montrer les sondages réalisés sur ces deux premiers systèmes constructifs.



Figure 21 - Sondages réalisés sur un mur de refend et une cloison intérieure mettant en évidence les systèmes constructifs utilisés

Le sondage réalisé sur le complexe de plancher a permis de déterminer précisément son identification. Sa partie supérieure est un parquet posé à l'anglaise composé de lames de sapin et de quelques lames de mélèze. La section des lames de parquet est de 96x25 millimètres pour l'ensemble des étages à l'exception des greniers où la section est de 140x25 millimètres. Des solives en sapin de différentes sections avec un entraxe de 500 millimètres jouent le rôle structurel du complexe. La partie inférieure est formée d'un lattis bois et d'une couche de plâtre. La (Figure 22) permet de visualiser le complexe de plancher après le retrait des lames de parquet. Une fois les différents complexes constructifs connus, les ressources qui les composent peuvent être intégrées au diagnostic ressources.



Figure 22 - Visualisation du complexe de plancher après le retrait des lames de parquet

3.2.2- Diagnostic ressources

Une fois l'entièreté des ressources constituant les bâtiments identifiées et connues, on peut les intégrer à un nouveau diagnostic ressources qui a été réalisé sur la totalité du site. Les éléments extérieurs aux bâtiments mais présents sur la parcelle avaient été négligés lors du premier diagnostic. Pourtant, certains de ces éléments présentaient un potentiel de réemploi non négligeable tel que le gisement de bordures béton. Le nouveau diagnostic ressources a été établi selon une méthodologie précise appliquée à l'ensemble de la parcelle. Cette méthodologie se base sur les pratiques existantes et sur différents retours d'expériences. Le diagnostic ressources a été réalisé au travers de différentes étapes nécessaires à sa constitution, la première de ces étapes ayant été la réalisation des sondages.

3.2.2.1- Travail autour des plans

La deuxième étape correspond à un travail entourant les plans des bâtiments existants. Les plans existants n'étaient pas disponibles en totalité, à l'image de la (Figure 23).

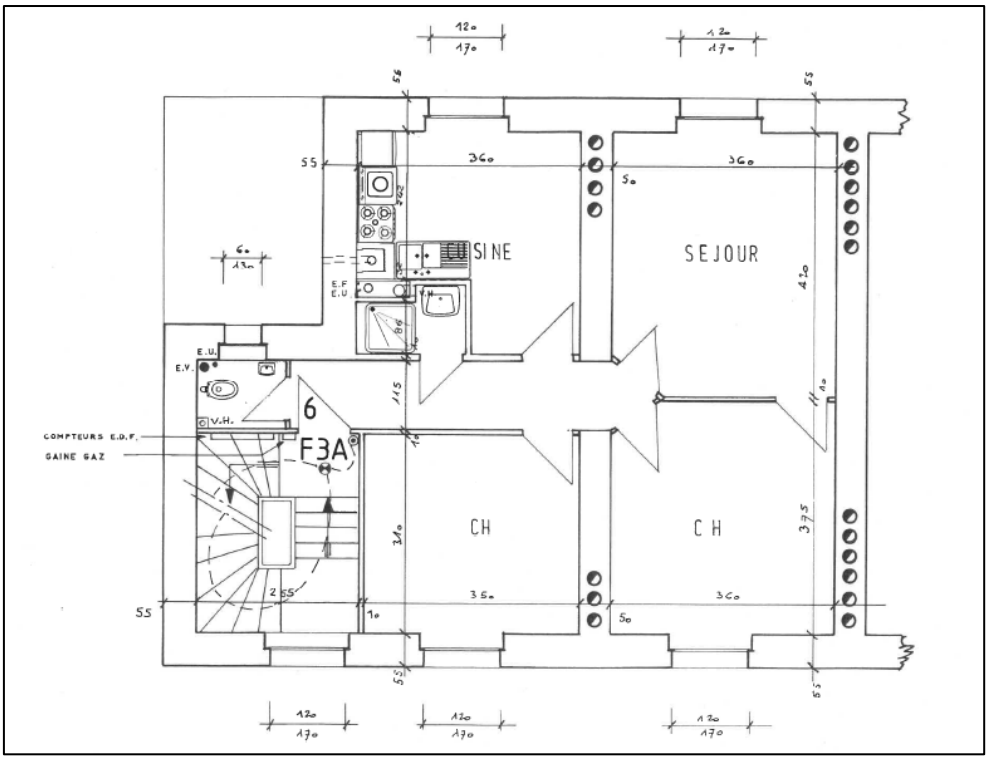


Figure 23 - Plan de l'aile gauche des bâtiments 1 et 3 après la réhabilitation de 1995

Afin d'avoir l'entièreté des plans, un travail de modélisation 3D des bâtiments a été mené sur le logiciel SketchUp. Une maquette numérique a été réalisée pour chacun des bâtiments. L'{Annexe 3} montre une vue de la modélisation 3D sous forme filaire des bâtiments, réalisée avec le logiciel SketchUp, sur les parcelles liées à l'opération de Remiremont. C'est à partir de ces maquettes numériques qu'ont pu être édités de nouveaux plans sur lesquels figure une hiérarchisation précise des espaces à l'instar de la (Figure 24). Cette hiérarchisation va permettre d'établir la localisation précise de chacun des matériaux et équipements au niveau du diagnostic ressources sur l'ensemble des bâtiments. Cette hiérarchisation sera également la base de travail du code unique associé à chaque solive pour leur traçabilité tout au long du processus de réemploi. Pour les éléments extérieurs aux bâtiments, ils seront localisés comme étant sur la parcelle.

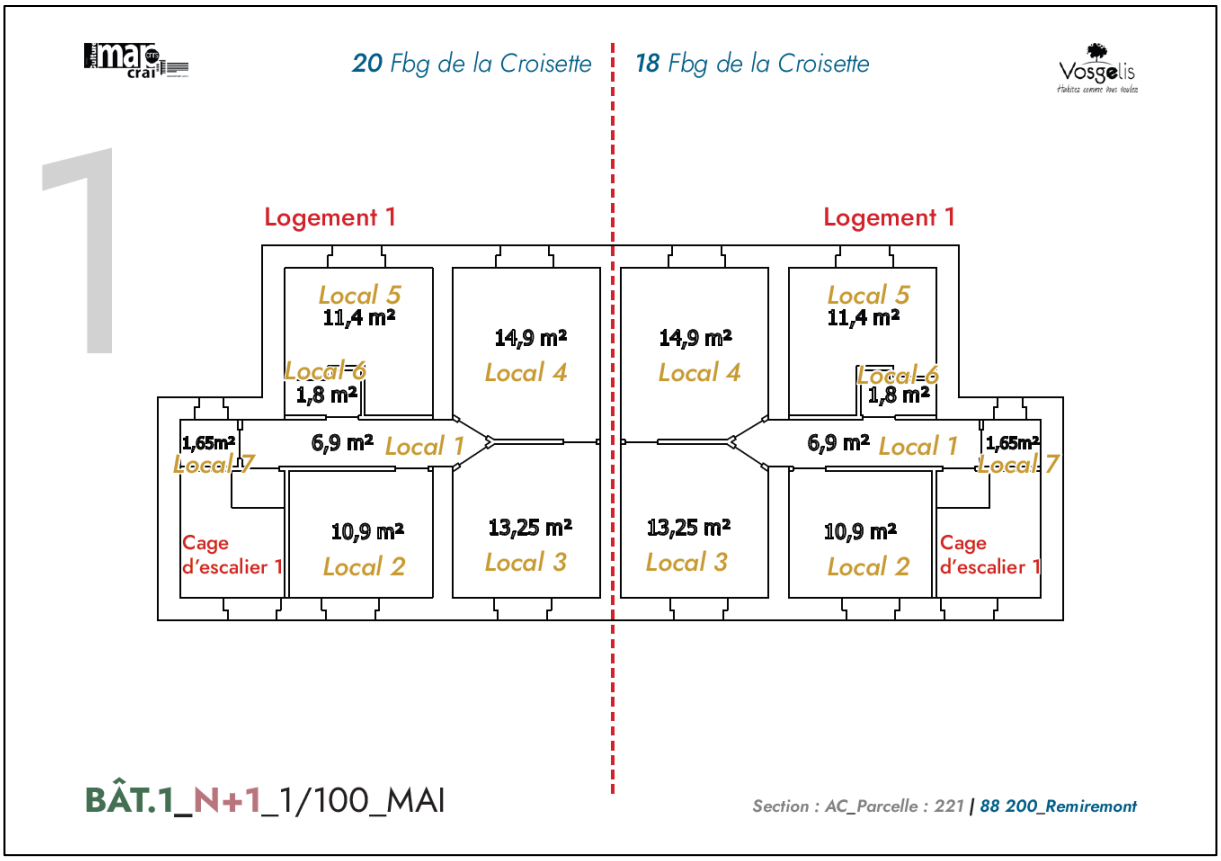


Figure 24 - Exemple de la hiérarchisation des espaces sur le premier étage du bâtiment 1 de l'opération de Remiremont

3.2.2.2- Création d'un outil

La troisième étape a consisté à la création d'un outil dédié à la réalisation du diagnostic ressources. Cet outil a été développé sous le logiciel Excel. Le choix de ce logiciel n'est pas anodin car l'outil doit dans l'idéal être utilisable par le plus grand nombre. C'est dans cette même logique qu'une notice d'utilisation est disponible pour chaque onglet. L'outil se décompose en trois onglets :

- Localisation ;
- Diagnostic ;
- Base de données.

L'onglet *localisation* permet de venir créer les références de localisation utilisées dans l'onglet *diagnostic*. Les références de localisation sont composées de six données qui rendent unique chaque combinaison sur l'ensemble du site. Les six données sont respectivement :

- L'adresse ;
- Le numéro de bâtiment ;

- L'étage ;
- Le segment correspondant au bâtiment : par exemple le logement, la cage d'escalier, les caves ;
- Les compartiments : ce sont les cellules des segments tels que des locaux ou des pièces ;
- La surface au sol.

De cette manière, chaque pièce de logement sur l'ensemble du site a une référence qui lui est propre ce qui permet de localiser avec précision les éléments que l'on va sourcer à travers le diagnostic. L'onglet *base de données* correspond à un thésaurus des termes de la construction permettant de venir désigner précisément l'élément ressourcé. La désignation précise de l'élément fonctionne sous forme d'arborescence, cette arborescence étant constituée de quatre niveaux qui sont respectivement :

- La **strate** : elle est relative à la désignation la plus générale possible. On peut prendre comme exemple le mot *enveloppe*.
- La **classe** : elle se réfère directement à la strate et vient apporter une précision. Par exemple, pour la strate *enveloppe* on peut avoir une classe de type *couverture*.
- La **sous-classe** : elle se rapporte à la classe. Par exemple, pour une classe *couverture* on peut avoir une sous-classe de type *tuile*.
- La **dénomination** : elle permet de désigner exactement l'élément diagnostiqué. Par exemple, pour une sous-classe *tuile,* on peut avoir une dénomination de type *tuile romane* ou bien *tuile ronde*.

Par ce procédé, on peut venir désigner précisément chaque élément diagnostiqué en apportant un premier niveau d'informations substantiel. Cette méthode permet également de regrouper les éléments issus d'une même strate, classe, sous-classe ou bien d'une même désignation mais qui aurait des références de localisation différentes. Par exemple, les radiateurs peuvent être regroupés dans un même ensemble bien qu'ils aient tous une référence de localisation qui leur est propre. L'onglet *diagnostic* permet quant à lui de venir réaliser le diagnostic ressources à proprement parler et de venir apporter des informations complémentaires relatives aux différentes ressources. On retrouve les informations suivantes :

- La **référence de localisation** : elle permet de donner avec précision la situation de l'objet sur le site.

- La **désignation** : elle permet de nommer correctement l'objet.

- La r**écurrence** : elle peut être numérique ou bien unitaire comme dans le cas des lames de parquet pour lesquelles on parlera de mètre carré.

- La **condition** : elle donne l'état global de la ressource – neuf, très bon, bon, occasion ou hors d'usage - avec une partie commentaire mais également l'orientation – réemploi, réutilisation, recyclage ou autre - visée pour cette ressource.

- La **composition** : elle apporte des renseignements sur la toxicité et les principaux matériaux qui composent la ressource.

- Les **dimensions** : elles sont nécessaires pour le stockage, le transport, la manutention, …

On peut donc réaliser le diagnostic pour chaque référence de localisation puis regrouper les différentes ressources de même nature entre elles afin d'avoir les lots globaux sur site pour chacune des ressources.

3.2.2.3- Réalisation du diagnostic ressources

Une fois l'outil créé, le nouveau diagnostic ressources a été établi selon une méthodologie précise appliquée à l'ensemble de la parcelle. Cette méthodologie se base sur la pratique existante et sur les retours d'expérience de différentes opérations. Elle a consisté dans un premier temps à la réalisation d'un reportage photo sur l'ensemble du site. Les photos concernent l'ensemble des équipements et



Figure 25 - Exemple de photos prises sur site pour la constitution du reportage photo de l'ensemble du site

des matériaux allant des menuiseries extérieures, en passant par les bordures béton jusqu'aux éléments bois des charpentes. La (Figure 25) donne un exemple de photos prises sur l'ensemble du site.

Ce reportage photo a alors servi comme base pour le remplissage de l'outil réalisé pour l'occasion. Le renseignement de l'outil peut alors être réalisé hors-site et permet de restreindre la présence sur site par rapport à d'autres outils de diagnostic. Cette démarche permet également d'avoir une photo associée à chacune des ressources et ainsi faciliter la perception des repreneurs potentiels des ressources orientées vers la filière du réemploi. In fine, l'outil complété permet l'édition d'une fiche produit associée à chaque typologie de ressources. Ces fiches peuvent alors être transmises sur différentes plateformes ou voies de communication afin de trouver des repreneurs potentiels pour les matériaux non visés en réemploi in-situ.

L'outil a également montré son utilité dans l'aide à la décision au réemploi et à la réutilisation d'une partie des ressources. Les ressources, notamment les solives bois, ont été identifiées en tant que ressources prioritaires vers un scénario de réemploi in-situ grâce à cet outil. La maitrise d'œuvre et la maitrise d'ouvrage associée à l'assistance à la maitrise d'ouvrage ont réalisé plusieurs réunions pour l'implémentation de ces ressources sur le chantier de construction neuf. Afin de finaliser et d'acter le réemploi des solives bois dans le projet de déconstruction, il reste une étape importante consistant à leur dépose sélective.

3.3- Tests et dépose sélective des éléments bois

Ce chapitre traite de la phase de dépose sélective de la ressource bois. C'est-à-dire de la déconstruction du complexe de plancher, de la dépose sélective des solives bois et de la mise à disposition des solives bois pour leur réemploi.

3.3.1- Tests de dépose sélective

En amont du chantier de déconstruction, des tests de dépose sélective menés sur les solives bois ont été réalisés. L'objectif de ces tests est de confirmer le potentiel de réemploi des solives et d'acter leur réemploi dans le projet de construction neuf. Ces tests doivent également permettre d'identifier le mode de dépose adéquat et optimal des solives afin de garantir leur intégrité pour la suite. Le pôle déconstruction sélective de l'entreprise d'insertion Reval Prest a réalisé l'ensemble des tests de dépose suivant une méthodologie de déconstruction et de dépose précise des solives. La méthodologie proposée se base sur les pratiques courantes en matière de déconstruction et sur des retours d'expérience ayant déjà pris place sur des complexes similaires.

Les planchers à déposer n'ont pas été choisis au hasard. Les planchers à déconstruire ont été identifiés en amont et ils devaient être représentatifs de l'ensemble des planchers sur site. De plus, les sondages réalisés ont été menés en accord avec les diagnostics réglementaires, amiante et plomb, afin de ne pas mettre en péril la santé des personnes mobilisées. Les planchers déconstruits sont les suivants :

- Bâtiment 1, aile gauche, 3ème étage, local 3 ;
- Bâtiment 1, aile gauche, 2ème étage, local 5 ;
- Bâtiment 2, aile gauche, 3ème étage, local 2 ;
- Bâtiment 2, aile droite, 1er étage, local 3 ;
- Bâtiment 3, aile gauche, 1er étage, local 5 ;

Les différentes étapes constitutives de la méthode mise en place lors de ces tests ont été les suivantes :

- Le **curage** : cette phase consiste à la dépose des plinthes bois, des goulottes électriques, du revêtement de sol et de la couche de ragréage présente pour une partie des planchers.
- La **dépose soignée des lames de parquet** : les lames de parquet ont été déposées soigneusement puisqu'elles doivent faire l'objet d'une réutilisation in-situ.
- La **dépose du lattis bois** : le lattis bois constitue la partie inférieure du complexe de plancher. Sa dépose est tout aussi importante car le plâtre doit être orienté vers la bonne filière de valorisation.
- La **dépose soignée des solives** : les solives bois doivent être déposées proprement afin de garantir leur intégrité structurelle pour leur futur réemploi.

La (Figure 26) permet de visualiser le processus de dépose mis en place lors de ces tests.



Figure 26 - Processus des tests de dépose sélective menés sur le site de l'opération

La dépose du lattis bois a été réalisé par le dessus en venant le percuter. Cette méthode cause cependant différentes problématiques comme la gestion de l'empoussièrement occasionné ou bien la gestion des déchets ainsi créés. La dépose sélective des solives est également réalisée par le dessus. Lors de leur tronçonnage, les solives sont sanglées afin de les maintenir en place et de leur éviter de chuter à l'étage inférieur. Pour chacune de ces étapes, des outils spécifiques ont été utilisés (pied de biche, arrache clou, masse, tronçonneuse). En ce qui concerne la dépose soignée des solives bois, une tronçonneuse a été utilisée par l'entreprise pour tronçonner au plus près des murs les éléments. Pour chacun des planchers, seules trois solives ont été déposées pour des raisons structurelles. Le lot de quinze solives ainsi établi a alors pu être acheminé au laboratoire afin de réaliser une campagne d'essais qui a pour objectif la caractérisation mécanique des éléments. Cette campagne d'essais a également permis d'identifier les différents temps relatifs à chacune des étapes rentrant dans le processus de dépose sélective. Ces temps sont importants car ils doivent permettre de mieux appréhender le planning lié au chantier de déconstruction et en particulier le temps relatif à la dépose sélective. Une meilleure anticipation et connaissance des tâches doit donner lieu à des marges de manœuvre plus importantes pour le temps consacré à cette phase lors du chantier de déconstruction. De manière générale, les tests de dépose ont pu confirmer le potentiel de réemploi des solives bois et d'acter l'intégration de leur processus de réemploi dans le projet.

3.3.2- Dépose sélective

3.3.2.1- Méthodologie de dépose sélective

Lors du chantier de déconstruction, la méthode identifiée lors des tests de dépose a été adaptée et enrichie de l'expérience de l'entreprise de déconstruction retenue pour le projet, l'entreprise Hollinger Démolition. L'adaptation de la méthode a principalement porté sur la dépose du lattis bois et de la dépose soignée des solives.

L'étape de curage a été réalisée selon les pratiques usuelles, les équipements de second œuvre ont été retirés proprement afin de les orienter vers la filière locale du réemploi. Les réseaux électriques et de plomberies ont également été déposés afin de les orienter vers leur filière de recyclage respective. Les revêtements de sols ainsi que les cloisons intérieures ont été ôtés afin de travailler directement sur les ensembles de logement et non pas pièce par pièce. En amont de leur retrait, une phase de désamiantage et déplombage a eu lieu afin que les ouvriers de l'entreprise de déconstruction puissent travailler sans aucun risque.

La déconstruction des planchers a alors pu prendre place par la suite. Elle a été organisée de telle manière à déconstruire à l'inverse de l'édification du bâtiment. La déconstruction se réalise ainsi de bas en haut, on déconstruit le plancher supérieur avant d'entamer la déconstruction du précédent. La dépose soignée des lames de parquets a été réalisée dans un premier temps avant que la dépose du lattis bois soit accomplie. La (Figure 27) permet de visualiser le complexe de plancher à la suite de cette dépose.



Figure 27 - Un complexe de plancher à la suite de la dépose des lames de parquet et du lattis bois

La dépose de ce second composant est réalisée par le dessous à contrario de ce qui avait été effectué lors des tests de dépose. Des échafaudages roulants ont été utilisés par les intervenants afin de travailler à hauteur et les équipements de protection individuelle obligatoires ont été complétés par l'utilisation de masque FFP2 et de lunettes de protection pour pallier les risques liés à la génération de poussières. Une fois le lattis déposé, les solives ont été déposées soigneusement à l'aide d'une scie sabre permettant de les tronçonner au plus près du mur. Une fois encore, l'utilisation d'échafaudages roulants permet de travailler en hauteur. La (Figure 28) permet de voir la mise en place de cette dépose à l'échelle d'une solive.



Figure 28 - Dépose sélective d'une solive par deux ouvriers de l'entreprise de déconstruction

Il est intéressant de remarquer que l'ensemble des solives n'a pas été retiré à l'échelle d'un bâtiment comme le montre la (Figure 29). Cette démarche doit permettre de diminuer les risques d'effondrement de l'édifice avant sa démolition.



Figure 29 - Les solives laissées en place permettent d'assurer un effet diaphragme nécessaire au maintien du bâtiment

Une fois les solives déposées, elles peuvent être acheminées au niveau de la zone d'espace tampon mise en place sur site par l'entreprise de déconstruction. Cette zone doit permettre le stockage temporaire des éléments orientés vers la filière de réemploi, notamment les solives bois. Afin de remédier aux problématiques liées au intempéries, un chapiteau est installé sur l'intégralité de cette zone comme le montre la (Figure 30). C'est également au niveau de cette zone qu'à lieu le retrait des éléments métalliques et la caractérisation mécanique des solives bois. Lorsque les solives sortent de cette zone de stockage, elles deviennent propriété du charpentier bois ou des associations œuvrant pour le réemploi à l'échelle du territoire vosgien.



Figure 30 - Situation du chapiteau mis en place par l'entreprise Hollinger ainsi qu'une vue de l'intérieur de celui-ci

3.3.2.2- Points d'attention

La mise en place de la dépose sélective sur le chantier de déconstruction comprend des points cruciaux à respecter et à anticiper afin que le réemploi in-situ des solives puisse avoir lieu et être efficient.

3.3.2.2.1- Traçabilité

La traçabilité des ressources dans le cadre du processus de réemploi est essentielle. C'est elle qui conditionne le passage ou non au statut de déchet de la ressource. Si la chaîne de traçabilité est rompue au cours du processus de réemploi, la ressource devient un déchet et le réemploi est alors plus complexe à mettre en place. C'est pour cette raison que lors du chantier de déconstruction et de la dépose sélective des solives, un protocole bien établi a été appliqué aux solives. La traçabilité est assurée par l'attribution à chaque solive d'un code unique. Le code reprend une partie des informations contenues des différentes références de localisation présentes dans le diagnostic ressources. Il est ainsi constitué des informations suivantes :

- Le **numéro de bâtiment** : 1,2,3 ou 4 ;
- L'**aile du bâtiment** : droite ou gauche ;
- L'**étage du bâtiment** : 1, 2 ou 3 ;
- Le **numéro de la pièce** d'où est issue la solive : 1, 2, 3, 4, 5, 6, ou 7 ;
- L'**ordre de dépose** : 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 ou 10.

L'ordre de dépose correspond à la situation de la solive dans la pièce considérée. Le numéro un correspondant à la solive située le plus près du mur extérieur. L'attribution du code à la solive est réalisée dans un premier temps par l'utilisation d'un marqueur et d'un morceau de scotch au moment de la dépose sélective. Puis, une fois amenée à la zone de stockage tampon, la solive se voit affecter une étiquette reprenant les informations comprises sur le scotch. La (Figure 31) permet la visualisation d'étiquettes sur des solives lors du chantier de déconstruction. Les opérateurs de l'entreprise de déconstruction réalisent eux-mêmes le marquage des différentes solives. Il est important de remarquer que le sens de pose initiale de la solive a également été identifié. L'étiquette est toujours placée sur le chant supérieur de la solive, là où se trouvait les lames de parquet auparavant.



Figure 31 - Etiquettes mises en place sur chacune des solives pour leur identification et leur traçabilité tout au long du processus de réemploi

3.3.2.2.2- Retrait des éléments métalliques

Le retrait des éléments métalliques dans les éléments bois est crucial pour leur réemploi. Le retrait des éléments métalliques est encore une fois réalisé par le personnel de l'entreprise de déconstruction. Il s'effectue sur les solives bois mais également sur les lames de parquet. La (Figure 32) permet de visualiser le retrait d'éléments métalliques d'éléments bois par deux employés de l'entreprise Hollinger Démolition.



Figure 32 - Retrait des éléments métalliques sur des solives par les intervenants de l'entreprise de déconstruction à la suite de leur dépose sélective

Le retrait s'effectue à l'aide de trois outils :

- Une paire de **tenaille** : elle est utilisée dans le cadre des petits éléments métalliques telles que les pointes utilisées pour la fixation du lattis bois sur le chant inférieur de la solive.

- Un **marteau de charpentier** : il est utilisé dans le cadre d'éléments intermédiaires tels que les clous utilisés pour la fixation des lames de parquet sur le chant supérieur de la solive.

- Un **pied-de-biche** : il est utilisé dans le cadre d'éléments importants telles que des broches qui peuvent être parfois situées aux extrémités des solives.

Le retrait des éléments métalliques est essentiel pour trois raisons. D'une part, la manutention et le stockage sont deux opérations grandement facilitées s'il n'y a plus aucun élément métallique. C'est d'autant plus vrai pour la manutention qui se réalise pour partie manuellement par les différents opérateurs de l'entreprise de déconstruction. D'autre part, la phase de caractérisation et plus particulièrement la mise en place de la solive sur le banc d'essai : s'il reste des éléments métalliques lors de la phase de caractérisation, ceux-ci vont être problématique pour la mise en place de la solive sur le banc d'essai et ils peuvent causer des erreurs au niveau de la mesure qui est réalisée. Enfin, la phase de reconditionnement de la solive : le reconditionnement des solives passe en partie par une

phase d'usinage qui s'avère plus problématique en présence d'éléments métalliques. Les fers et les lames des machines qui peuvent être utilisés pour l'usinage des bois sont sensibles aux éléments métalliques puisqu'ils ne sont pas forcément adaptés à cette nature de matériau.

3.3.2.2.3- Stockage des éléments bois

Le stockage des éléments bois issus de la déconstruction est essentiel puisqu'il conditionne pour partie leur état sanitaire après la dépose. C'est d'autant plus vrai pour les solives de plancher qui, une fois sorties des bâtiments, se retrouvent dans des conditions hydriques et thermiques peu rencontrées au cours de leur vie dans le bâtiment. Ce changement brutal d'atmosphère, s'il est couplé à une exposition aux intempéries, peut causer des dommages et désordres irréversibles sur les éléments bois. C'est dans cette optique que le stockage doit être réalisé en respectant les règles usuelles liées au stockage des bois. Les solives sont mises hors d'eau grâce au chapiteau mis en place au niveau de la zone d'espace tampon. Des palettes en plastique sont utilisées pour que les solives n'aient aucun contact avec le sol afin d'éviter le phénomène de remontée capillaire. Ce phénomène est amplifié sur une typologie de sol telle que celle rencontrée lors du chantier de déconstruction. Pour finir, chaque rang de solives est espacé par l'utilisation de palettes plastique ou de pièces de bois afin de laisser circuler l'air entre chaque rang. L'air qui circule ainsi permet d'éviter ou de limiter les désordres que l'on pourrait rencontrer dans une telle atmosphère. La (Figure 33) présente le stockage d'une partie des solives au niveau de la zone d'espace tampon.



Figure 33 - Stockage des solives au niveau de la zone d'espace tampon en vue de leur caractérisation

3.4- Caractérisation mécanique des bois

Ce chapitre traite de la phase de caractérisation de la résistance de la ressource bois. C'est-à-dire des différents essais menés en laboratoire, de l'estimation de la classe de résistance mécanique et de la mise en œuvre de la caractérisation sur site.

3.4.1- Aspects normatifs

Une partie des essais menés en laboratoire nécessite une utilisation de différentes méthodes d'essais normés.

3.4.1.1- Flexion 4 points

Un test de flexion 4 points est réalisé sur les échantillons afin d'obtenir leur résistance à la flexion et leur module d'élasticité. L'essai et les calculs sont réalisés conformément à la norme NF EN 408+A1 [NF EN 408+A1]. Les échantillons ont été testés dans leur intégralité sur une dalle d'essais à l'aide d'un vérin hydraulique de marque Thema Concept. Les mesures ont été effectuées dans un climat identique aux précédents, à savoir à une température de 20 °C et une humidité relative de 10 %. Le choix de la méthode 4 points n'est pas anodine, elle permet d'éviter les efforts de cisaillement susceptibles de parasiter la mesure et les résultats.

3.4.1.2- Humidité

La teneur en humidité a été mesurée lors de chacun des essais pour chacun des échantillons de bois. Sa mesure exerce une influence sur les propriétés mécaniques mesurées et permet également de donner une indication sur la potentielle présence d'attaques biologiques. À cette fin, deux méthodes ont été utilisées. La méthode développée dans la norme NF EN 13183-1 [NF EN 13183-1] permet de caractériser la teneur en humidité des échantillons lors des essais de résistance réalisés sur une dalle d'essais. Ainsi, à l'issue des différents essais de résistance, un échantillon de bois a été séché à travers l'utilisation d'une enceinte climatique portée à une température constante de 103 °C. La teneur en humidité a ensuite été calculée selon la formule (1) décrite au chapitre 2.2.2.1.

La méthode développée dans la norme NF EN 13183-2 [NF EN 13183-2] a permis de caractériser les essais non destructifs. Un humidimètre à pointe, un modèle Testo 606-1, est utilisé pour mesurer la teneur en humidité. Cet humidimètre à résistance utilise des électrodes que l'on insère perpendiculairement au sens des fibres des échantillons. En moyenne, la température ambiante et l'humidité relative du laboratoire étaient respectivement de 20 °C et 10 %.

3.4.1.3- Masse volumique

La masse volumique est calculée pour l'ensemble des échantillons. On utilise l'équation (2) décrite au chapitre 2.2.2.2. Dans le cas du matériau bois, la masse volumique doit être rapportée à la teneur en humidité du bois. On rappelle également que le climat normal est défini à 20 °C et 65 % d'humidité relative. Le calcul se réalise conformément à la norme NF EN 384+A2 [NF EN 384+A2], selon l'équation (8) :

$$\rho_u = \rho \left(1 - 0{,}005\left(u - u_{ref}\right)\right) \quad (8)$$

Avec :

ρ : la masse volumique [kg/m³]

u : la teneur en humidité au moment de l'essai (8 % $\leqslant$ u $\leqslant$ 18 %)

u_{ref} : la teneur en humidité de référence prise à 12 %

3.4.1.4- Longueur utile

La longueur de chaque échantillon a été mesurée conformément aux directives de la norme NF EN 1309-1, à l'aide d'un mètre ruban. La longueur utile a été déterminée en mesurant le plus grand parallélépipède rectangle possible contenu dans l'échantillon, en excluant les zones présentant des dommages critiques et des défauts de section. Par exemple, si un échantillon mesure 350 cm de long mais qu'à ses deux extrémités des défauts de section liés à la mise en œuvre sont présent sur 10 cm, la longueur utile de l'échantillon est de 320 cm.

3.4.1.5- Section utile

La hauteur et la largeur des échantillons se mesurent conformément à la norme NF EN 336. Pour la mesure de la hauteur, au moins trois zones propres et exemptes de défauts ont été sélectionnées et les mesures ont été prises perpendiculairement à la face. Les mesures ont été prises à au moins 15 cm de chaque extrémité et la plus petite des mesures a été retenue. Pour la mesure de la largeur, au moins trois zones propres et exemptes de défauts ont été sélectionnées et les mesures ont été prises perpendiculairement à l'axe longitudinal de l'échantillon. Les mesures ont été prises à au moins 15 cm de chaque extrémité et la plus petite des mesures a été retenue.

3.4.2- Outils portatifs

Une partie des essais menés en laboratoire nécessite une utilisation de différentes technologies non-destructives pour l'obtention du module dynamique d'élasticité.

3.4.2.1- Sylvatest®

Le module d'élasticité dynamique d'un échantillon de bois peut être déterminé grâce à l'utilisation d'ondes sonores. Dans notre cas, le module dynamique a été estimé selon l'équation (9) :

$$E_{dyn,l} = {v_l}^2 . \rho \qquad (9)$$

Avec :

$E_{dyn,l}$: le module d'élasticité dynamique [Pa]

v_l : la vitesse des ondes sonores dans le sens longitudinal [m/s]

ρ : la masse volumique de l'essence considérée, mesurée à 20 °C et 65 % HR [kg/m³]

Les essais réalisés sur les échantillons ont nécessité l'utilisation du Sylvatest® Duo, outil développé par l'entreprise Concept Bois Technology. Il est composé de deux sondes que l'on place aux deux extrémités de chaque échantillon. On se place dans le cas d'une mesure directe c'est-à-dire longitudinale, perpendiculaire à deux côtés opposés. Les extrémités ont été percées (Figure 34), au centre de la section de chaque échantillon, à l'aide d'un outil fourni avec le Sylvatest® Duo.



Figure 34 - Perçage au niveau de l'une des extrémités d'une solive pour la mise en place du Sylvatest® Duo

Grâce à ce protocole, les sondes placées seront garanties d'avoir un bon contact avec le matériau pour une transmission acoustique optimale. Après avoir saisi l'espèce, la longueur et le taux d'humidité de l'échantillon dans l'appareil, l'essai est terminé. Une vitesse ultrasonore de référence est déterminée pour une humidité de référence de 12 %, une vitesse ultrasonore sans tenir compte de l'humidité de l'échantillon et une valeur du module d'élasticité dynamique. Pour l'expérience, les essais ont été réalisés à une température de 20 °C et une humidité relative d'environ 50 %.

Afin d'étudier la variation due à la masse volumique moyenne prise comme référence pour chaque échantillon d'une espèce donnée, le module d'élasticité dynamique a été recalculé selon l'équation (9) en utilisant la masse volumique réelle de chaque échantillon et la vitesse ultrasonore en tenant en compte l'humidité de l'échantillon. En effet, le Sylvatest® Duo ne permettant pas la saisie décimale de l'humidité, il a été nécessaire d'utiliser la relation (10) pour le calcul de la vitesse ultrasonore corrigée :

$$v_{12\%} = v_{relevée} + 33.(\omega - 12) \qquad (10)$$

Avec :

$v_{12\%}$: la vitesse de référence de l'onde sonore mesurée à 12 % [m/s]

$v_{relevée}$: la vitesse de l'onde sonore enregistrée sur l'appareil [m/s]

ω : la teneur en humidité de l'échantillon [%]

Dans le cadre des bois de réemploi, l'utilisation du Sylvatest® est intéressant car il est facile d'utilisation mais également facile à mettre en place. D'autant que dans notre cas les bois ont été étudiés par une mesure directe, c'est-à-dire où les sondes sont placées aux extrémités. Cependant, il est possible de sonder les bois par une mesure indirecte, c'est-à-dire en mettant en place les sondes au niveau de l'une des faces avec un angle d'inclinaison qui ne peut excéder 30°. De ce fait, il est possible de l'utiliser comme indicateur préliminaire pour détecter les éléments bois à fort potentiel de réemploi en amont d'une opération de déconstruction et planifier les opérations de dépose sélective en conséquence. Il convient de préciser que cet outil ne saurait à lui seul constituer un dispositif de certification.

3.4.2.2- Technologies vibratoires

Le module d'élasticité dynamique d'un échantillon de bois peut être déterminé grâce à l'utilisation de la fréquence propre de celui-ci. Pour la mise en œuvre de cette méthode, il existe un certain nombre d'appareils susceptibles de convenir. Cependant, dans chacun des cas, la méthode reste identique :

- Mise en place de l'échantillon bois sur un banc d'essai ;
- Mise en place des ou du capteur.s sur l'élément bois en fonction de la technologie utilisée ;
- Mise en vibration de l'échantillon bois par l'utilisation d'un maillet ;
- Récolte et analyse des données obtenues.

Les différents outils utilisés pour la mise en œuvre de la méthode par fréquence propre sont présentés par la suite.

3.4.2.2.1- Vibratoire transverse

La méthode transverse implique l'excitation transversale de l'échantillon bois étudié suivie de l'enregistrement de la fréquence fondamentale de résonance. Le module d'élasticité dynamique longitudinal est alors calculé à partir de la relation (11) :

$$E_{dyn,l} = \frac{4\pi^2.\rho.S.L^4.f_{mode\ i}^2}{I.X_i} \quad (11)$$

Avec :

$E_{dyn,l}$: le module d'élasticité dynamique longitudinal [Pa]

$f^2_{mode\ i}$: la fréquence relative au mode i [Hz]

L : la longueur de l'échantillon [m]

S : la section de l'échantillon [m²]

ρ : la masse volumique de l'échantillon [kg/m³]

I^4 : le moment d'inertie [m⁴]

X_i : le scalaire relatif au mode étudié avec i le numéro du mode étudié que l'on calcule avec la formule suivante : $\mathrm{Xi} = ((2\mathrm{n}+1).\pi/2)^4$

Dans notre cas, seul le premier mode de vibration est étudié. Les essais réalisés sur les échantillons ont nécessité l'utilisation de deux accéléromètres B12/500 de la marque HBM, l'un placé au milieu de la longueur de l'échantillon et l'autre placé aux trois quarts de la longueur de l'échantillon. Ces positions permettent de mesurer spécifiquement le premier mode de vibration de l'échantillon. Une fois les accéléromètres placés, on peut passer à la mesure. Pour ce faire, il faut exciter l'échantillon à l'aide d'un maillet en bois. On vient alors frapper l'une des deux extrémités de l'échantillon. L'échantillon rentre alors en résonance, les accéléromètres mesurent alors l'accélération de l'élément. Par la suite, un logiciel dédié utilisant la méthode des transformées de Fourier permet d'obtenir la fréquence de vibration de l'élément. La fréquence peut alors être utilisée dans l'équation (11). Pour l'expérience, les essais ont été réalisés à une température de 20 °C et une humidité relative d'environ 50 %.

Cette approche méthodologique présente une sensibilité particulière à la variabilité interne du bois, notamment en ce qui concerne la présence de singularités telles que les nœuds, les fissures ou les variations locales de densité.

Il est aussi nécessaire d'utiliser la relation (12) pour le calcul du module d'élasticité dynamique longitudinal corrigée par rapport à l'humidité :

$$E_{dyn,l} = E_{dyn,l,w} \,.\left(1 + 0{,}01\,.\,(\omega - \omega_{ref}\right) \qquad (12)$$

Avec :

$E_{dyn,l}$: le module d'élasticité dynamique longitudinal calculé à 12 % [Pa]

$E_{dyn,l,w}$: le module d'élasticité dynamique longitudinal calculé à la teneur en humidité w au moment de l'essai [Pa]

ω : la teneur en humidité au moment de l'essai [%] avec 8 % ≤ ω ≤ 18 %

ω_{ref} : la teneur en humidité de référence [%], habituellement ω_{ref} = 12 %

3.4.2.2.2- BING

La méthode BING s'articule, tout comme la méthode transverse, autour des deux principes fondamentaux que sont l'excitation longitudinale de l'échantillon et la mesure de la fréquence de résonance associée à la vibration axiale. Le module d'élasticité dynamique longitudinal est alors déterminé selon l'équation (13) :

$$E_{dyn,l} = 4.L^2.f^2.\rho \qquad (13)$$

Avec :

$E_{dyn,l}$: le module d'élasticité dynamique longitudinal [Pa]

L : la longueur de l'échantillon [m]

f : la fréquence fondamentale de vibration longitudinale [Hz]

ρ : la masse volumique du bois [kg/m³]

Dans notre cas, seule la fréquence fondamentale est étudiée et elle correspond au premier mode de vibration de l'élément étudié. Les essais réalisés sur les échantillons ont nécessité l'utilisation d'un accéléromètre relatif au matériel BING développé par le CIRAD. Cet accéléromètre est placé au centre de la section, au niveau de la fibre neutre, sur l'une des extrémités de l'échantillon. Une fois l'accéléromètre placé, il faut exciter l'échantillon à l'aide d'un maillet en bois. On vient alors frapper l'autre extrémité de l'échantillon. L'échantillon rentre alors en résonance, l'accéléromètre mesure alors l'accélération de l'élément. Par la suite, un logiciel dédié à la méthode BING utilisant la méthode des transformées de Fourier permet d'obtenir directement le module d'élasticité dynamique longitudinal selon l'équation (13). Pour l'expérience, les essais ont été réalisés à une température de 20 °C et une humidité relative d'environ 50 %.

Cette approche méthodologique s'avère particulièrement pertinente pour l'évaluation du bois selon sa direction fibrillaire, là où les propriétés mécaniques atteignent leur maximum et où l'homogénéité des propriétés est la plus marquée. Cette approche présente l'avantage notable d'être moins sensible aux imperfections transversales, permettant ainsi des mesures rapides et reproductibles.

Il est là aussi nécessaire d'utiliser la relation (12) décrite au chapitre 3.4.2.2.1 pour le calcul du module d'élasticité dynamique longitudinal corrigée par rapport à l'humidité.

3.4.3- Méthode en laboratoire

Cette partie a pour vocation de décrire la démarche mise en place au laboratoire qui a conduit à la méthodologie de caractérisation des solives mise en œuvre lors du chantier de déconstruction.

3.4.3.1- Choix technologique

L'objectif de caractériser mécaniquement des bois issus de chantiers de déconstruction a dans un premier temps soulevé la question du choix technologique pour cette caractérisation. Il est vrai que le passage de l'ensemble des bois sur une dalle d'essais est impossible d'une part financièrement mais également pour des raisons logistiques de transport et de stockage lourdes à mettre en œuvre. Une orientation vers une technologie non destructive et facile d'utilisation sur chantier a donc été envisagée. Pour ce faire deux technologies ont été étudiées :

- La technologie sonore par l'utilisation d'un Sylvatest® Duo.
- La technologie vibratoire par l'utilisation d'accéléromètres.

L'objectif de ces deux technologies est la même l'obtention d'un module d'élasticité dynamique propre à un élément bois qui doit alors permettre de statuer sur la classe de résistance du bois après la mise en œuvre d'une démarche de caractérisation. Les deux technologies ont donc été mises en œuvre sur deux lots de bois en provenance de deux chantiers de déconstruction :

- Le premier lot est constitué des solives issues de l'opération de Remiremont et plus particulièrement des tests de déposes sélectives présentés précédemment ;
- Le second lot est quant à lui constitué de chevrons et de solives issues d'une opération de déconstruction ayant pris place sur la ville d'Epinal.

Pour chacun des échantillons bois, différentes caractéristiques nécessaires aux calculs des modules d'élasticités dynamiques ont été déterminées :

- La longueur utile par l'utilisation ;

- La section utile par l'utilisation d'un mètre ;
- La masse volumique par l'utilisation d'une balance ;
- L'humidité par l'utilisation d'un humidimètre à pointe.

Les deux technologies ont alors été mises en œuvre sur un banc fixe installé sur une dalle d'essais. La (Figure 35) permet la visualisation de l'un des deux supports composant le banc d'essais.



Figure 35 - Un des deux supports constitutifs du banc d'essais fixe mis en œuvre sur une dalle d'essai

La problématique qui s'en suit est alors la comparaison des résultats obtenus par les deux technologies sur chacun des éléments. En comparaison, le choix s'est porté sur la réalisation de tests de flexion 4 points menés sur une dalle d'essais pour chacun des bois constitutifs des deux lots. De cette manière, on peut obtenir le module d'élasticité statique pour chacun des échantillons, qui représente le module d'élasticité réel de chacun des échantillons, et le comparer aux différents modules d'élasticité dynamiques précédemment obtenus. D'autant que les tests de flexion 4 points permettent également l'obtention de la résistance à la flexion pour chacun des échantillons qui sera alors utile lors de démarche de caractérisation ultérieurement. Cependant, ces tests de flexion 4 points sont destructifs puisque les différents éléments bois ont été amenés à rupture. C'est par l'intermédiaire des tests de flexion 4 points que l'on peut statuer sur la technologie à adopter pour la caractérisation des bois issus de chantier de déconstruction.

3.4.3.2- Utilisation banc d'essais portatif

En parallèle du choix technologique, il a également fallu concevoir un banc portatif ayant la capacité d'être utilisé sur site lors d'une opération de déconstruction. Pour ce faire, une étude conjointement menée avec le laboratoire du MAP-CRAI, a été menée sur des technologies déjà existantes et pouvant répondre aux deux principales contraintes que sont :

- La bonne mise en œuvre des technologies non-destructives sur site, notamment de la technologie vibratoire.
- La bonne transportabilité du banc qui induit un poids réduit et un encombrement minimal.

Une conception du banc a alors été lancée et a conduit à un prototype 3D. L'{Annexe 4} détaille le modèle 3D du banc d'essai mobile. Ce prototype a alors été conçu dans le cadre d'un partenariat avec l'entreprise spécialisée dans les ouvrages métalliques spéciaux Viry situé à Eloyes dans les Vosges. Cette entreprise a été approchée car elle est elle-même intéressé par le domaine du réemploi notamment le réemploi structurel d'acier. La (Figure 36) permet de visualiser l'un des deux supports constitutifs du banc d'essais portatif.



Figure 36 - Un des deux supports constitutifs du banc d'essai portatif

Une fois le banc portatif fabriqué, il a fallu l'éprouver aux technologies non destructives notamment la technologie vibratoire. Ainsi, une campagne d'essais a été menée sur le banc portatif afin de déterminer la validité des résultats obtenu sur celui-ci. Les résultats ainsi obtenus ont alors pu être

comparés aux résultats obtenus sur le banc d'essais fixe mis en place sur la dalle d'essais afin de conclure quant à la validité de l'utilisation du banc portatif utilisé sur site.

3.4.3.3- Démarche de classement en résistance

La démarche de classement en résistance a uniquement porté sur le lot constitué des éléments en provenance de l'opération de Remiremont. L'autre lot n'a pas été concerné car il n'y avait pas de besoin. L'obtention d'une classe de résistance sur le lot concerné est presque directe. On connait l'ensemble des paramètres pour chacun des bois intervenant dans la méthode de classement du lot, à savoir :

- La résistance à la flexion ;
- Le module d'élasticité statique ;
- La masse volumique ;
- Le module d'élasticité dynamique obtenu par les essais vibratoires.

L'ensemble des paramètres doivent être ajustés en fonction de l'humidité mais également de la typologie des échantillons. Pour ce faire, il faut se référer à la norme NF EN 384+A2. Il faut également utiliser la norme NF EN 14358 pour la détermination des valeurs caractéristiques dans le cadre de la résistance à la flexion et de la masse volumique et des valeurs moyennes dans le cadre du module d'élasticité statique. Ces valeurs sont essentielles dans la démarche de caractérisation du lot de bois.

Pour le classement du lot de bois, on utilise la méthode dite de la « propriété indicatrice » décrite à travers la norme NF EN 14081. Dans notre cas, la propriété indicatrice qui sert au classement est le module d'élasticité dynamique obtenu par les essais vibratoires. La procédure de classement est réalisée comme indiqué à travers la démarche dans la norme avec une exception sur le nombre d'échantillons utilisé qui doit être de 40 tandis que dans notre cas il est de 14. Le choix d'un nombre faible d'échantillons est justifié par la contrainte du réemploi où l'on essaie d'optimiser la ressource mise à notre disposition. Toujours selon la norme NF EN 14081, on vient vérifier le classement du lot de bois à travers l'utilisation de la méthode de la « matrice coût global ». Le calcul de cette matrice permet de valider le classement réalisé et de valider la procédure de caractérisation.

3.4.3.4- Problématiques liées au réemploi

Le réemploi et plus précisément les bois issus de déconstruction entrainent des problématiques sur l'utilisation des normes qui sont relatives aux bois neufs. Comme mentionné au paragraphe 3.4.3.3 le nombre d'échantillons utilisés pour le classement du lot est peu important dans notre cas. Selon la norme NF EN 14081, pour la vérification des réglages d'une machine de classement le nombre

d'échantillons doit être au minimum supérieure ou égal à 40 échantillons. Néanmoins le réemploi a pour objectif premier la préservation de la ressource ce qui requiert une utilisation minutieuse et raisonnée de la ressource disponible lors de la phase de caractérisation. Si cette phase n'est pas établie avec vigilance, la perte induite sur le gisement ne fera que diminuer l'efficience du réemploi.

Le nombre d'échantillons n'est pas le seul problème que l'on rencontre à travers l'utilisation de la norme NF EN 14081 pour le classement des bois neufs. Cette norme spécifie que le classement réalisé est relatif à une zone de réglage donnée. Une zone de réglage correspond à une zone géographique précise pour laquelle les réglages d'une machine de classement sont établis par des essais. Cette zone géographique peut alors être étendue à une zone normalisée telles que la zone des Alpes ou la zone du Benelux, ou bien à un pays. Dans le cadre des bois de réemploi, la problématique que l'on rencontre est la non-connaissance de la provenance des bois. Le réglage machine est alors compliqué à mettre en place puisqu'il doit être réalisé dès lors qu'un nouveau lot de bois se présente, peu importe si l'essence est identique par rapport au réglage précédent.

3.4.4- Méthode sur chantier

Cette partie a pour vocation de décrire la démarche mise en place au cours du chantier de déconstruction qui a conduit à la caractérisation de l'ensemble des solives du site.

3.4.4.1- Mise en place sur chantier

La caractérisation des solives du site lors du chantier de déconstruction s'est déroulée au niveau du chapiteau, zone de stockage tampon, mis en place par l'entreprise de déconstruction. C'est au sein de cette zone qu'un espace a été aménagé pour la réalisation des essais sur site. Cet espace se compose d'une plateforme en bois créée spécifiquement pour l'occasion à partir de matériaux issus du chantier de déconstruction. L'objectif de cette plateforme est d'obtenir une zone de travail de bonne efficience pour la mise en place du banc portatif et de la balance de précision. La (Figure 37) permet de visualiser la zone de travail.



Figure 37 - Zone de travail pour la caractérisation des bois lors du chantier de déconstruction

Un point de vigilance doit être porté sur la mise en place du banc d'essai sur site. L'ensemble du matériel utilisé lors des tests est listé ci-dessous :

- Une balance d'une capacité de 100 kg et d'une précision à 10 g près ;
- Un accéléromètre relatif à la méthode BING qui permet la mesure ;
- Un marteau en bois pour faire vibrer les poutres ;
- Un mètre pour mesurer les dimensions des poutres ;
- Un humidimètre pour mesurer l'humidité des poutres.

Ce matériel est également complété de deux ordinateurs permettant la mesure en directe du module d'élasticité dynamique longitudinal et des résultats dans un tableur.

3.4.4.2- Démarche de classement en résistance

Une fois le matériel décrit la méthode de classement en résistance des solives peut être détaillée. La première étape du diagnostic des solives consiste en une évaluation visuelle de leur état général. Cette inspection vise à détecter d'éventuelles altérations biologiques susceptibles de compromettre leur intégrité structurelle. Trois types principaux d'agents de dégradation biologique sont considérés :

- **Les insectes à larves xylophages**, tels que les capricornes, les vrillettes ou le lyctus, dont les préférences varient selon les essences de bois ;

- **Les champignons**, qui peuvent être soit lignivores (provoquant une perte de résistance mécanique) comme la mérule ou les pourritures fibreuses, soit chromogènes (altérant uniquement l'aspect visuel), comme les champignons de bleuissement ;

- **Les termites**, bien que non présents dans le département des Vosges à ce jour, sont également pris en compte en tant que risque.

Outre les altérations biologiques, les déformations géométriques des solives sont également examinées. Ces dernières résultent principalement des cycles d'humidification et de séchage, et peuvent prendre plusieurs formes :

- **Flèche de face** : gauchissement longitudinal de la pièce ;

- **Flèche de chant** : courbure latérale rendant une rive convexe et l'autre concave ;

- **Tuilage** : distorsion longitudinale affectant la planéité des rives ;

- **Torsion** : déformation hélicoïdale de la pièce ;

- **Coude** : déviation localisée, souvent induite par la présence d'un nœud.

Ces déformations peuvent compromettre la remise en œuvre des solives, notamment leur insertion dans des sabots métalliques. Il est donc impératif de s'assurer que les tolérances dimensionnelles restent compatibles avec les exigences du projet. Par ailleurs, les dimensions globales (longueur, largeur, hauteur) doivent être vérifiées afin de garantir leur conformité aux spécifications du futur bâtiment. Les solives ne respectant pas ces critères sont réorientées vers un réemploi hors site.

Une fois les vérifications préliminaires effectuées, les solives sont soumises à un test vibratoire visant à déterminer leur module d'élasticité longitudinal. Ce test repose sur la méthode BING qui permet une estimation du module d'élasticité dynamique longitudinal. Le protocole de mesure est identique pour chaque solive et se décompose comme suit :

1. **Mesure des dimensions** : relevé de la longueur, de la largeur et de la hauteur à l'aide d'un mètre ruban ;

2. **Mesure de l'humidité** : réalisée à l'aide d'un humidimètre à pointes, les valeurs étant consignées dans un fichier annexe ;

3. **Mesure vibratoire** : mise en place du capteur, stabilisation du signal, percussion, puis acquisition et traitement des données.

Une valeur-seuil est recherchée, cette valeur ayant été déterminée en amont lors des tests en laboratoire. D'après le respect ou non de cette valeur-seuil, les éléments sont orientés en conséquence.

3.5- Orientation des éléments bois de seconde main

Une fois les bois caractérisés sur site, il faut les orienter vers leurs différentes voies de valorisation en fonction des résultats obtenus pour chacun d'eux.

3.5.1- Orientation vers entreprise de charpente bois

Les bois qui ont validé le protocole de caractérisation sur site sont directement orientés et stockés vers une remorque couverte mise à disposition par l'entreprise de charpente, Passiv'Home, sur le site de l'opération. Le stockage des solives est effectué de la manière suivante :

- Conditionnement des solives en lot de 10 où chaque lot est cerclé afin de maintenir les solives entre elles au cours du transport et de la manutention ;

- Mise en place de liteaux au niveau du sol et entre chaque lot de solives afin de laisser une circulation d'air conséquente ;

- Conditionnement des lots de solives en 5 rangées dans la mesure du possible et où ce nouveau lot est de nouveau cerclé.

Au total, ce sont 230 solives qui ont été acheminées au niveau de l'entreprise de charpente bois situé à seulement quelques kilomètres de l'opération pour leur stockage en vue de leur réusinage et de leur remise en œuvre sur le site de construction neuve. Les informations liées à cette phase de remise en état des solives sont essentielles pour alimenter l'inventaire des données nécessaire à la modélisation

ACV. La (Figure 38) permet de visualiser le stockage des solives au niveau de la remorque au cours de l'opération mais également au niveau de l'entreprise de charpente.



Figure 38 - Stockage des solives au niveau de la remorque mise à disposition par le charpentier bois et au niveau de la zone de stockage de l'entreprise de charpente bois

3.5.2- Orientation vers le CRITT Bois

Au cours du stockage des bois ayant validé le protocole de caractérisation, certains d'entre eux ont été pris au hasard et ont été stockés ensemble afin de constituer un lot de 50 solives. Ce lot a été stocké de la même manière et au même endroit que les bois à destination de l'entreprise de charpente bois. Cependant, leur destination est le Centre Régional d'Innovation et de Transfert de Technologie pour les industries du bois (CRITT Bois) situé à Epinal à 30 kilomètres de l'opération. Une fois les bois stockés dans la remorque, l'entreprise de charpente bois devient responsable du stockage et du transport des éléments jusqu'au CRITT Bois. Par ce processus, si toute détérioration est constatée à la réception des bois par la dernière entité, l'entreprise de charpente bois sera mise en cause et non Vosgelis. L'objectif de ce transport est de s'assurer que la méthodologie de caractérisation mise en place sur chantier pour les solives est bien conforme. Le CRITT Bois, viendra vérifier les caractéristiques mécaniques de chacune des solives par la réalisation de tests de résistance sur une dalle d'essais conformément à la norme NF EN 408+A1. La (Figure 39) permet de visualiser le montage d'essai tandis que la (Figure 40) permet de voir le résultat obtenu après l'essai d'une des solives bois. Le classement du lot sera ensuite réalisé conformément à la norme NF EN 14081. L'organisme pourra alors certifier la validité de la démarche de caractérisation mise en œuvre sur l'opération en fonction des résultats obtenus. Cette dernière vérification permet de rassurer à la fois le charpentier bois engagé sur l'opération mais également le contrôleur technique et les différents assureurs des parties engagées.



Figure 39 - Montage d'essai pour les solives orientées vers le CRITT Bois



Figure 40 - Résultat après l'essai de résistance d'une solive acheminée au CRITT Bois

3.5.3- Orientation vers les associations

Les bois qui n'ont pas validé le protocole de caractérisation sur site sont laissés en stockage dans la zone d'espace tampon du chapiteau. Ces bois, malgré leur non-conformité vis-à-vis du chantier de construction neuve, peuvent néanmoins faire l'objet d'un réemploi ou d'une réutilisation. Il ne faut donc pas les orienter vers une filière de recyclage classique mais bien les orienter vers une filière de réemploi ou de réutilisation afin d'optimiser le plus efficacement possible l'ensemble du stock de carbone qu'elles représentent. Il faut que les solives s'inscrivent pleinement dans une logique de « cascading wood ». C'est en ce sens que l'ensemble de ces solives ont été orientées vers des associations qui contribuent au secteur du réemploi au niveau du territoire. Pour ce faire des conventions de dons ont été éditées et passées avec les deux associations retenues et Vosgelis. L'association AMI qui gère une matériauthèque sur la ville d'Epinal a récupéré la majeure partie du lot de solives restantes sur l'opération. Ces solives pourront alors être reproposées à des particuliers ou des professionnels au niveau de la matériauthèque et ainsi entamer un nouveau cycle de vie. L'association néocastrienne d'Un Toit pour toi, présente sur la ville de Neufchâteau, a récupéré une partie du lot de solives restantes sur l'opération. Ces solives vont alors être réemployées ou réutilisées dans les structures de type « tiny houses » réalisées entièrement en matériaux de réemploi par l'association. Une fois encore cette orientation permettra la poursuite du stockage du carbone biogénique présente dans les solives.

3.6- Analyse de Cycle de Vie

3.6.1- Aspects normatifs

3.6.1.1- Méthodologie selon norme NF EN 15804+A2/CN

La modélisation de l'analyse du cycle de vie doit être réalisée conformément à la norme NF EN 15804+A2/CN, qui définissent les règles et la méthodologie applicables aux produits de construction. Cette norme impose une structuration modulaire, modules de A1 à D, de l'ACV selon les phases du cycle de vie. Il doit y être explicité les impacts environnementaux liés à la production, la mise en œuvre, l'usage, la fin de vie et les bénéfices au-delà du système correspondant au module D. Dans le cadre spécifique des éléments bois de réemploi, la norme requiert une attention particulière à la traçabilité des flux de matière, à l'allocation des impacts entre cycles de vie successifs, et à la prise en compte des bénéfices environnementaux associés à l'évitement de la production de matériaux neufs.

Conformément aux exigences du complément national, les impacts sont calculés à l'aide des indicateurs environnementaux harmonisés avec la méthode RE2020 qui inclut notamment le changement climatique, l'épuisement des ressources ou encore les flux de déchets. L'approche adoptée pour les bois de réemploi repose sur une modélisation multifonctionnelle avec allocation, conformément aux recommandations de la norme, permettant de refléter les bénéfices nets du réemploi dans le module D. Le calcul des indicateurs environnementaux nécessite une modélisation détaillée des étapes de dépose, de reconditionnement et de remise en œuvre. Les données d'inventaire ont été collectées selon les principes de représentativité temporelle, géographique et technologique, et modélisées à l'aide du logiciel SimaPro, en s'appuyant sur des FDES conformes à la norme et validées par un vérificateur agréé. La méthodologie employée dans le cadre de cette étude a pour objectif de refléter de manière plus fidèle l'impact climatique des matériaux au fil du temps. En outre, elle promeut les pratiques de réemploi dans le secteur de la construction, contribuant ainsi à une gestion durable des ressources et à une réduction de l'empreinte environnementale du secteur.

3.6.2- Outil de modélisation

Le logiciel SimaPro, développé par la société néerlandaise PRé Sustainability, est l'un des outils de référence pour la réalisation d'analyses du cycle de vie. Cet outil a été conçu dans le but de modéliser les impacts environnementaux de produits, procédés ou services tout au long de leur cycle de vie. SimaPro facilite une structuration modulaire des systèmes analysés, tout en intégrant des bases de données internationales mises à jour tous les ans telles qu'Ecoinvent. Les méthodologies d'évaluation des impacts offrent la possibilité d'effectuer une analyse multicritère des flux environnementaux. Dans le contexte de la réglementation environnementale française RE2020, SimaPro est un outil

couramment employé pour la modélisation des Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire des produits de construction, conformément à la norme NF EN 15804+A2/CN. En outre, la flexibilité du modèle permet l'intégration de scénarios spécifiques, tels que le réemploi de matériaux, par le biais de la modélisation des modules A à D et de l'application de règles d'allocation ou de substitution adaptées. L'interface du logiciel, malgré sa nature technique, autorise une visualisation détaillée des chaînes de processus et une analyse approfondie des contributions environnementales.

3.6.3- Méthodologie de modélisation

3.6.3.1- Récolte des données

La collecte des données primaires est réalisée au fur et à mesure de l'avancement du processus de réemploi des solives. Les données sont en lien direct avec les étapes de dépose sélective, de tri, de reconditionnement et de transports. Les données ont donc été collectées auprès des acteurs concernés c'est-à-dire de l'entreprise, Hollinger, de déconstruction et de l'entreprise de charpente bois, Passiv Home. Les données primaires sont complétées par des données secondaires issues de la base de données Ecoinvent version 3.10, présente sur le logiciel SIMAPRO et imposée par le règlement RE2020.

3.6.3.2- Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle retenue est en lien direct avec le projet mais également en lien avec les fiches existantes pour les matériaux neufs. Le choix de l'unité fonctionnelle est primordial puisqu'elle doit permettre la comparaison entre un élément bois issu du réemploi avec un élément bois neuf manufacturé. L'unité fonctionnelle retenue est donc la suivante :

« Constituer 1 m^3 d'élément porteur en bois de réemploi dans le bâtiment sur la durée de vie de référence de 100 ans ».

3.6.3.3- Base de données Eco-Invent

La base de données Ecoinvent version 3.10, intégrée à Simapro, a été utilisée pour modéliser le processus établi du réemploi d'un élément structurel en bois. Les données dites « Allocation, cut-off by classification » sont privilégiées conformément aux recommandations de la norme NF EN 15804 + A2/CN et en particulier pour les matériaux de seconde vie. Cette typologie de données permet de ne pas attribuer les impacts de la première vie du produit bois à son nouveau cycle de vie matérialisé par le réemploi : dans ce modèle, les déchets relèvent de la responsabilité du producteur ("pollueur-payeur") et il existe une incitation à utiliser des produits de seconde vie, qui sont disponibles sans charge (cut-off).

3.6.3.4- Méthode de calcul

L'évaluation des impacts environnementaux, en particulier du coût carbone, nécessite le choix d'une méthode de calcul dans le logiciel SIMAPRO. D'une méthode de calcul à une autre, les indicateurs environnementaux considérés seront différents et les facteurs de pondération utilisés pour le calcul de chaque indicateur varient selon la méthode d'analyse des risques retenue. Afin de satisfaire aux exigences de la règlementation environnementale, c'est la méthode « EN 15804 + A2 (adapted) V1.01 » qui a été choisie. Cette méthode permet une analyse multicritère mais c'est bien l'indicateur lié au changement climatique qui est obligatoire au travers la règlementation environnementale.

3.6.3.6- Interprétation

L'interprétation des résultats obtenus a mis l'accent sur l'identification des contributions dominantes dans le processus de réemploi conformément à la norme NF EN ISO 14044 [NF EN ISO 14044]. Dans le cas des éléments structurels en bois de réemploi, la variabilité des données d'inventaire est très importante. Ce fait est dû à la versatilité entre les procédés de dépose, de reconditionnement ou encore de transport, du moins les distances parcourues. C'est pour cette raison que seul le cas des solives bois relatif au chantier de Remiremont a été considéré. Une étude comparative a été menée entre les solives bois de réemploi de l'opération de Remiremont et l'équivalent en produit neuf manufacturé issu d'une fiche FDES de la base INIES. L'objectif de cette comparaison est de quantifier les potentiels bénéfices environnementaux nets du réemploi. Ces bénéfices rentrant en cohérence avec les objectifs de circularité et de réduction des impacts carbone du secteur de la construction.

4- Résultats et discussions

4.1- Déconstruction sélective

4.1.1- Diagnostic ressources

D'après l'expérience acquise au travers du projet de Remiremont et également lors d'échanges avec des acteurs de la filière, le diagnostic ressources s'avère être une phase clé d'un projet de réemploi. C'est un outil qui se révèle être un outil d'aide à la décision pour les maitrises d'œuvre et les maitrises d'ouvrage. Il constitue l'étape d'amorce de la démarche du réemploi. Au travers de l'expérience acquise sur l'opération de Remiremont, différents enseignements peuvent être tirés.

Comme énoncé au chapitre 3.2.1, la première étape nécessaire à la réalisation du diagnostic ressource est la réalisation de sondage. Ces sondages sont essentiels pour l'intégration des éléments structurels dans le diagnostic ressources. Cependant, le chantier d'expérimentation de Remiremont a montré que cette étape n'est pas ancrée dans les pratiques courantes des acteurs du réemploi. Un premier diagnostic ressources avait été réalisé par le groupement d'assistance à maitrise d'ouvrage sans l'intégration des éléments structurels constitutifs des planchers. C'est dans le cadre de ce manquement qu'un second diagnostic ressources a été réalisé et que les sondages réalisés ont permis l'intégration des éléments structurels en son sein.

Comme énoncé au chapitre 3.2.2.1, l'élaboration du diagnostic ressources demande un travail rigoureux autour des plans des bâtiments. Dans le cadre de l'opération de Remiremont, la modélisation 3D des bâtiments concernés par l'opération s'est avérée essentielle. C'est par le modèle 3D des bâtiments ainsi constitués que l'on a pu situer et comptabiliser les quantités ou a minima les volumes des bois présents dans les complexes de plancher. Le travail de localisation demeure également la base pour l'édification des codes uniques des éléments bois. Il est toutefois intéressant de signaler que la dissociation des espaces à mal été appréhendée ce qui a entrainé des complexités et des erreurs dans l'établissement des codes uniques relatifs aux solives lors de la phase de déconstruction. L'étape préliminaire de curage, lors de la phase de déconstruction, a conduit au retrait des cloisons intérieures présentent dans les logements. Or, la dissociation des espaces se basait sur ces cloisons intérieures. Il y a donc eu une perte d'information quant à la situation précise des solives au niveau des bâtiments. Le bâtiment, l'aile et l'étage ont correctement été identifiés mais ce n'est pas le cas pour la situation de la solive au sein de l'étage.

Cette expérience démontre qu'afin de préserver l'intégrité des données relatives à la position spécifique d'un élément bois au sein d'un niveau, il est impératif de mettre en œuvre une méthodologie

alternative à celle qui s'appuie sur une division par compartimentation des espaces internes. La résolution de cette problématique pourrait être atteinte par l'identification et le codage des éléments bois directement sur les plans issus du modèle 3D des bâtiments. Cette approche permettrait de consolider l'utilisation du modèle 3D des bâtiments à déconstruire. Dans le cadre de la planification des travaux de déconstruction, l'intégration du modèle 3D pourrait s'avérer pertinente dans le cadrage des travaux journaliers ou hebdomadaires à réaliser. Cette démarche s'inscrit dans le cadre de l'utilisation de la 4D Building Information Modeling et de la planification Lean pour une prise de décision collective et interactive lors des chantiers de déconstruction.

Comme énoncé au chapitre 3.2.2.2, le diagnostic ressource réalisé sur le chantier expérimental de Remiremont a nécessité la création d'un outil interactif dédié à sa réalisation. L'outil en question s'appuie sur deux sources principales pour son développement : les retours d'expériences issus des chantiers de déconstruction, et d'autre part, des outils déjà présents sur le marché. L'outil doit faire l'objet d'une révision qui doit permettre d'atteindre deux objectifs majeurs. En premier lieu, l'outil doit être rendu plus trivial en termes d'utilisation, ce qui le rendra plus accessible et plus intuitif pour les utilisateurs. En second lieu, il est impératif de renforcer la visibilité des éléments destinés au réemploi, afin de faciliter leur identification et leur gestion par les parties prenantes. L'amélioration de cette visibilité passe par une refonte de l'onglet « Localisation » afin d'optimiser la gestion de la localisation des éléments structurels, compte tenu des enjeux évoqués dans le paragraphe précédent. La désignation des éléments, qui s'est avérée compréhensible par l'ensemble des acteurs engagés sur l'opération, peut aussi faire l'objet d'une amélioration. Le thésaurus créé qui est le fondement de la méthodologie employée pour la désignation des éléments peut faire l'objet d'une révision afin de mieux correspondre à la classification européenne des familles de produits constitutifs d'un bâtiment.

Comme énoncé au chapitre 3.2.2.3, le diagnostic ressources a nécessité la réalisation d'un reportage photos sur site. Ce reportage photo s'est montré essentiel dans l'apport d'informations qu'il engendre sur les produits sourcés mais en parallèle il s'est montré très chronophage. Le temps sur site nécessaire à sa réalisation est important. La méthodologie employée lors de l'opération de Remiremont pour la réalisation du diagnostic ressource demande à être revue. Il est peut-être nécessaire d'axer le reportage photos uniquement sur les produits à fort potentiel de réemploi afin de limiter le temps sur site. Les familles de produits ne présentant pas un potentiel de réemploi avéré peuvent tout de même faire l'objet d'une unique photo pour améliorer leur identification sur site lors du chantier de déconstruction. Une identification précise est nécessaire même si les produits sont destinés à la filière de recyclage par exemple.

De manière plus générale, le diagnostic ressources mené sur l'opération de Remiremont s'est avéré être un outil essentiel pour les décisions prises concernant les éléments visés en réemploi. La maitrise d'œuvre et la maitrise d'ouvrage se sont appropriées cet outil et en ont fait un élément central dans la démarche de réemploi mise en œuvre sur l'opération. L'outil à été intégré dans les marchés de travaux des entreprises concernées afin qu'elles puissent mieux appréhender la démarche de réemploi que ce soit sur le plan technique, économique ou bien logistique.

4.1.2- Dépose sélective

La dépose sélective s'est montré comme une étape clé dans la chaîne de valeur du réemploi des bois structurels pour l'opération de Remiremont. Comme énoncé au chapitre 3.3, cette étape s'est construite en deux temps : la réalisation en amont du chantier de tests de dépose sélective et la dépose sélective des éléments bois lors du chantier de déconstruction. Différents enseignements peuvent être tirés de la méthodologie mise en œuvre lors de ce chantier expérimental.

Comme énoncé au chapitre 3.3.1, des tests de dépose sélective ont été menés sur les solives bois des planchers existant en amont de l'opération de déconstruction dans l'objectif de fiabiliser la méthodologie proposée pour leur dépose. Cette étape a présenté différentes problématiques malgré le fait qu'elle ait été réalisée par une entreprise d'insertion qui est pleinement ancrée dans la filière du réemploi. La première problématique relève de la rigueur de l'entreprise engagée sur l'opération. Cette dernière n'a pas suivi la méthodologie de dépose transmise en amont de l'intervention. En conséquence, la méthodologie de dépose n'a pas pu être parfaitement intégrée dans les marchés des entreprises. Le manque de sécurité de la part de l'entreprise lors des tests de dépose a également été problématique. Ce manquement étant à la fois relatif aux équipements de protection individuels absents pour une partie des intervenants qu'à la mise en danger de ces derniers par la méthodologie de dépose réalisée. Le manque de sécurité lors du tronçonnage des solives est montré en (Figure 26). La seconde problématique concerne le coût des tests de dépose sélective qui n'a pas été prévu lors de la phase amont du chantier. Cet oubli a entrainé des conséquences sur la gestion du coût global de l'opération et de manière générale sur le déroulé de l'opération.

Afin de mieux appréhender la déconstruction, la phase de préparation a été portée à deux mois, multipliant par deux le temps moyen alloué classiquement par la maitrise d'ouvrage. On peut remarquer que le temps établi pour le chantier de déconstruction est quoi qu'il en soit plus important que celui alloué à démolition dite classique. La déconstruction peut alors s'opérer conformément à une méthodologie établie en amont du chantier, comme énoncé au chapitre 3.3.2.1. La méthodologie définie en amont des tests de dépose sélective a été retenue par l'entreprise en charge de la déconstruction. Elle se base notamment par l'utilisation du diagnostic ressources précédemment établi

pour le repérage des éléments à déposer et des moyens à mettre en place pour ces déposes. Sur ce chantier, les bâtiments à déconstruire ont également été modélisés en 3D ce qui a permis d'établir des plans précis et d'identifier les éléments à déposer dans chaque pièce. Ces mêmes plans ont également permis d'identifier les zones comportant des éléments dangereux tel que les éléments amiantés ou les éléments plombés. Il y a tout de même eu une problématique liée au codage des solives déposée comme énoncé au chapitre 4.1.1. Cette problématique n'a pas eu de conséquence directe sur la dépose sélective mais a entrainée des erreurs dans le codage des éléments bois. Ces erreurs ont tout de même pu être en partie reprise par la suite au moment des tests mécaniques menés sur site mais la traçabilité n'a pas pu être menée parfaitement sur l'opération.

Comme énoncé au chapitre 3.3.2.2.1, les éléments bois une fois déposé ont dû subir une opération pour le retrait des éléments métalliques. Cette opération bien qu'essentielle dans la gestion de la ressource bois s'est avérée être d'une forte pénibilité. Le retrait de l'ensemble des éléments métalliques est une tâche fastidieuse et encline à une forte répétitivité. Il est alors essentiel que cette tâche soit soumise à un roulement entre le personnel engagé sur le lot déconstruction. Il s'avère tout aussi essentiel que l'entreprise attributaire du lot déconstruction mette l'accent sur la formation et l'accompagnement de ses équipes dans la démarche de réemploi. Les entreprises doivent insister sur l'utilisation d'outillage et de méthode adaptée au retrait des éléments métalliques sans quoi leur l'intégrité des bois serait mise en péril.

Comme énoncé au chapitre 3.3.2.2.3, la gestion des matériaux et équipements à destination du réemploi a nécessité une intégration d'un espace tampon sur le site de l'opération. Ce dispositif a engendré deux problématiques majeures, malgré une anticipation initiale lors de la phase préparatoire du chantier. La première problématique concerne le roulement au sein de la zone de stockage. Il y a eu par moment trop d'élément à stocker par rapport à la place qui leur était dédiée. Cette problématique est directement due au fait qu'il y a eu un retard dans la reprise des matériaux de la part des repreneurs engagés sur l'opération. Afin de limiter ce retard, il aurait été nécessaire de renforcer les contacts entre l'entreprise de déconstruction et les repreneurs des matériaux. La seconde problématique concerne la zone de stockage en elle-même. Comme énoncé au chapitre 3.3.2.2.3, un chapiteau a été mis en place pour la mise hors d'eau des éléments à destination du réemploi et en particulier des bois. Cependant, des problèmes d'humidité ont été observés dans cette zone. Ces problèmes sont attribuables à des remontées capillaires et à une forte condensation sous le chapiteau. Fort heureusement, l'intégrité des bois n'a pas été compromise en raison de leur période de stockage. Néanmoins, il s'avère essentiel d'anticiper, à l'avenir, d'éventuelles complications de cette nature.

D'ordre plus général, les entreprises de déconstruction doivent bien prendre en compte les potentielles pertes dues à la dépose des éléments. Dans le cadre de l'analyse financière d'un projet, il est essentiel d'anticiper les pertes potentielles afin de pouvoir les intégrer de manière appropriée dans le processus d'estimation des coûts. Une gestion proactive de ces pertes permet une meilleure prévision et une allocation plus efficace des ressources, ce qui se traduit par une réduction des risques et une optimisation des résultats.

4.2- Classement en résistance

Dans le cadre de ce chapitre, la méthodologie employée qui a mené à l'élaboration d'un classement mécanique des solives bois issues du chantier de Remiremont sera analysé en détail. Cette démarche de classement a abouti à leur réemploi dans le cadre d'un projet de construction neuf.

4.2.1- Travaux en laboratoire

Dans un premier temps, des travaux ont été menés au sein du laboratoire en amont du chantier de déconstruction. Les recherches effectuées ont porté sur un lot de 14 solives prélevées lors des tests de dépose sélective menés en amont du chantier de déconstruction comme énoncé au chapitre 3.3.1. Une analyse comparative entre différentes technologies non destructives, permettant l'évaluation du module d'élasticité longitudinal, a été menée sur ce lot. Parallèlement, une initiative en matière de recherche et développement a été entreprise afin d'évaluer l'efficacité de l'utilisation d'un banc d'essai mobile. Ce banc d'essai portatif a été conçu pour caractériser des matériaux, en conditions réelles, sur le site même du chantier de déconstruction [Lemaitre 2025]. À la suite de cette étude, une méthodologie de classement en résistance des solives a été développée. Cette méthodologie a ainsi permis d'établir une valeur seuil à respecter pour le classement sur site du lot de solives.

4.2.1.1- Détermination de la méthode non-destructive à utiliser

La première étape des expérimentations menées au sein du laboratoire a consisté à identifier la technologie non destructive la plus appropriée pour évaluer le module d'élasticité longitudinal des solives, comme énoncé au chapitre 3.4.3.1. Afin d'évaluer l'efficacité des différentes technologies non destructives employées, il est impératif de procéder à des essais destructifs. Un test destructif permet d'obtenir les valeurs précises des paramètres liés à la résistance d'un bois notamment le module d'élasticité longitudinal. Il convient de rappeler que, dans le cadre du réemploi, il est essentiel de limiter au maximum la perte de la ressource lors de la phase de caractérisation. Cette approche est l'une des justifications à la composition restreinte de notre lot de bois.

Dans le cadre de cette étude comparative, la première étape a consisté en une mesure exhaustive des caractéristiques élémentaires des solives, à savoir :

- La longueur utile comme énoncé au chapitre 3.4.1.4 ;
- La section utile comme énoncé au chapitre 3.4.1.5 ;
- L'essence qui s'avère être la même pour l'ensemble du lot à savoir du sapin blanc, *Abies alba* ;
- La masse dont on peut déduire la masse volumique comme énoncé au chapitre 3.4.1.3.

Les résultats ont été consignés dans le (Tableau 5).

N°	Localisation			Essence	Humidité (%)	Dimensions (mm)			Volume (m³)	Masse (kg)	Masse volumique (kg/m³)
	Bâtiment	Etage	Ordre de dépose			Longueur	Hauteur	Largeur			
1	2	1	3	Sapin	9,4	3100	188	75	0,044	20,7	473,6
2	2	C	1		11,7	3230	195	75	0,047	20,7	437,1
3	3	1	1		12	3155	192	77	0,047	22,2	476,0
4	2	C	3		12	3280	195	95	0,061	26,0	427,9
5	3	1	2		11,6	3515	195	95	0,065	33,0	506,0
6	1	C	3		12	3215	197	77	0,049	21,2	433,7
7	1	C	1		12,7	3075	195	80	0,048	21,3	444,0
8	1	2	3		11,8	3355	192	77	0,050	24,3	489,9
9	3	1	2		11,4	3705	199	80	0,059	26,8	453,5
10	1	C	2		12,6	3230	195	100	0,063	26,0	412,0
11	1	2	1		12,3	3180	205	73	0,048	20,8	436,0
12	1	2	2		11,7	3200	195	97	0,061	27,0	446,1
13	2	1	2		12,4	3140	190	95	0,057	25,0	441,1
14	2	1	1		12,3	3190	195	77	0,048	22,3	464,5
MOY	-	-	-	-	**11,9**	**3255**	**195**	**84**	**0,053**	**24,1**	**453,0**
ECART TYPE	-	-	-	-	**0,8**	**170**	**4**	**10**	**0,007**	**3,5**	**25,9**

Tableau 5 - Résultat des caractéristiques élémentaires des solives issues des tests de dépose

Une fois les caractéristiques élémentaires obtenues, il a été possible de procéder à la mesure du module d'élasticité longitudinal pour chacune des méthodes non destructives identifiées comme énoncé au chapitre 3.4.2. Les résultats bruts sont présentés dans le (Tableau 6).

N°	Test vibratoire - banc classique		Test Sylvatest - valeur relevée		Test Sylvatest - valeur calculée	
	Module d'Young axial : N/mm²	Humidité : %	Module d'Young axial : N/mm²	Humidité : %	Module d'Young axial : N/mm²	Humidité : %
1	9796	9,4	14432	9,4	15819	9,4
2	11068	11,7	16611	11,7	16637	11,7
3	10350	12	16431	12	18006	12
4	9495	12	13098	12	14134	12
5	12348	11,6	15463	11,6	18116	11,6
6	5807	12	11786	12	12698	12
7	8474	12,7	12308	12,7	13355	12,7
8	9296	11,8	12519	11,8	17176	11,8
9	10723	11,4	16183	11,4	17011	11,4
10	7431	12,6	11186	12,6	11583	12,6
11	8342	12,3	12719	12,3	13525	12,3
12	10378	11,7	15629	11,7	16128	11,7
13	7313	12,4	11790	12,4	12981	12,4
14	7777	12,3	11872	12,3	13719	12,3
MOY	**9185**	**11,9**	**13716**	**11,9**	**15063**	**11,9**
ECART TYPE	**1762**	**0,8**	**1982**	**0,8**	**2156**	**0,8**

Tableau 6 - Résultat des modules d'élasticité longitudinaux des solives issues des tests de dépose

Dans le cadre de la technologie vibratoire, le module d'élasticité longitudinal a été calculé selon l'équation (11) avec une prise en compte de l'humidité comme décrite au travers de l'équation (12), comme décrit au chapitre 3.4.2.2.1. Dans le cadre du Sylvatest®, le module d'élasticité longitudinal a été obtenue soit par lecture directe sur l'appareil (valeur relevée) soit par l'utilisation de l'équation (9) avec une prise en compte de l'humidité comme décrite au travers de l'équation (10) (valeur calculée), comme décrit au chapitre 3.4.2.1. Cette démarche permet une plus grande justesse dans les résultats obtenus et d'établir une analyse plus approfondie. La (Figure 41) permet de visualiser la dispersion des modules d'élasticités longitudinaux dans le cadre des différentes méthodes.

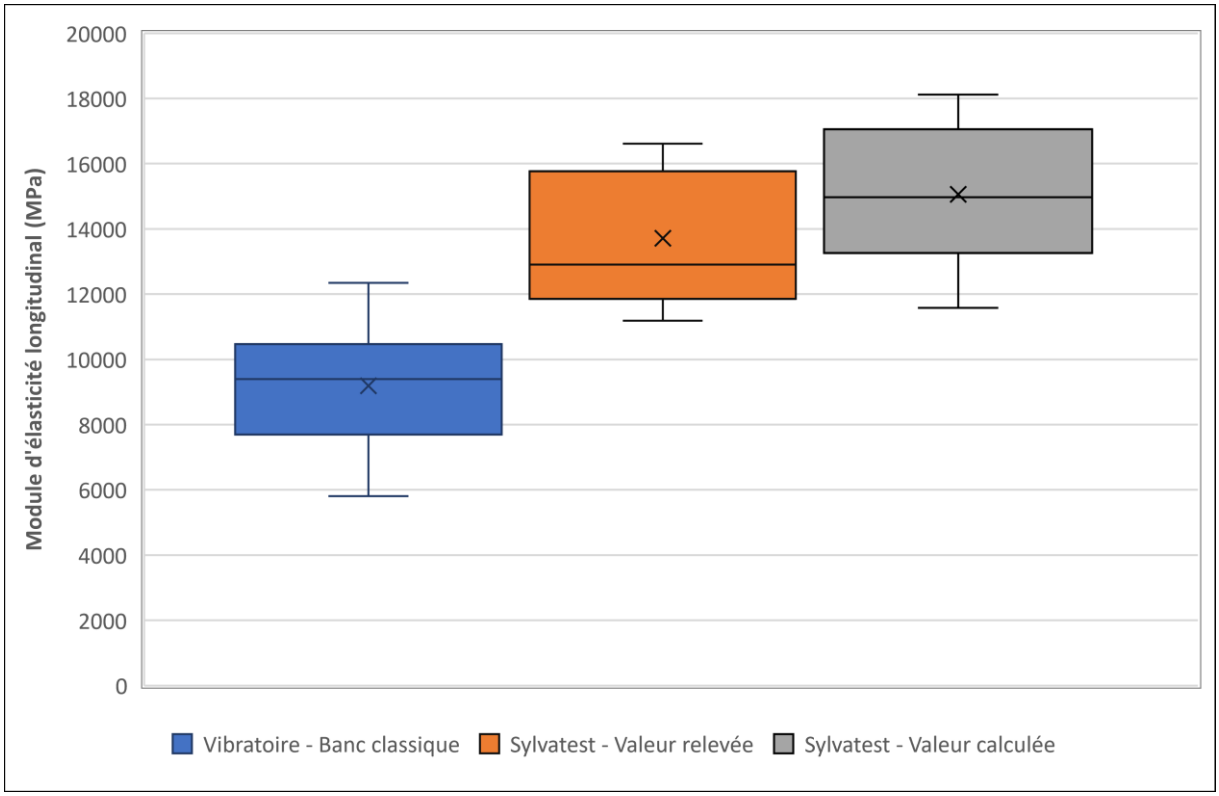


Figure 41 - Dispersion des modules d'élasticités longitudinaux pour les différentes méthodes dans le cadre du lot de solive issue des tests de dépose

À la lumière de ces premiers résultats, trois observations peuvent être formulées :

- Les méthodes nécessitant l'utilisation du Sylvatest® donnent des résultats de module d'élasticité longitudinal plus élevés que la méthode vibratoire.
- La méthode vibratoire semble être plus variables que les méthodes nécessitant l'utilisation du Sylvatest® mais elle est encline à une plus grande précision.
- Les méthodes nécessitant l'utilisation du Sylvatest® sont cohérentes entre elles. La méthode Sylvatest® – valeur relevée présente tout de même une distribution plus asymétrique dans le cadre de la méthode Sylvatest® – valeur calculée.

La première observation suggère que ces méthodes, bien que mesurant un phénomène identique, présentent des biais systématiques distincts. Cette observation semble cohérente, car ces méthodes ne sont pas fondées sur les mêmes principes et ne sont pas régies par les mêmes paramètres.

La seconde observation peut s'expliquer par les nombreux facteurs influençant la méthode vibratoire. Les facteurs relatifs au protocole d'essai, tels que la position d'excitation ou encore les réglages d'analyse, vont entrainer des variabilités dans les fréquences extraites et donc des modules d'élasticités. Les facteurs relatifs au bois et en particulier pour les bois de réemploi, tels que la non constance des sections, la présence d'un défaut près du point d'impact ou de mesure ou encore les

problématiques d'appui sur le banc d'essai dû aux défauts de géométrie, sont des sources de dispersions importantes.

La troisième affirmation est rassurante vis-à-vis des résultats donnés par l'appareil malgré leur légère différence vis-à-vis des résultats obtenus par le calcul. Cette différence peut s'expliquer notamment par le fait que l'appareil prend en considération la masse volumique moyenne de l'essence et non la masse volumique réelle de l'échantillon mesuré. Cette hypothèse est étayée par l'examen des échantillons numéros 1, 3, 5, 8 et 14, qui révèlent des valeurs de masse volumique supérieures à la masse volumique de référence prise pour le sapin, à savoir 450 kg/m^3. Cependant, ce n'est pas le cas pour les autres échantillons qui présentent des valeurs de masse volumique inférieures à la masse volumique de référence. Il est alors bon de rappeler que l'appareil prend en considération des paramètres qui ne peuvent pas être intégré à la formule littérale, tels que l'amortissement du signal sonore. Comme indiqué au chapitre 3.4.2.1, l'utilisation du Sylvatest® Duo ne permet pas la prise en compte de la décimale pour l'humidité. Cette limitation a elle aussi une incidence sur les résultats obtenus et explique en partie l'écart observé entre les deux méthodes.

Une fois les valeurs du module d'élasticité longitudinal obtenues pour chaque solive, il est possible de procéder aux tests destructifs. Ceux-ci permettent de déterminer avec précision le module d'élasticité longitudinal de chaque solive ainsi que la valeur de la résistance à la flexion. Les résultats bruts sont présentés dans le (Tableau 7).

N°	Test destructif		
	Résistance à la flexion : N/mm²	Module d'Young axial : N/mm²	Humidité : %
1	43,70	13160	10,8
2	42,16	14399	10,8
3	38,52	16688	11,5
4	32,22	12618	11,1
5	47,86	18446	12,4
6	13,35	3806	11,9
7	19,27	10043	12,2
8	29,97	8629	11,1
9	54,67	14486	10,7
10	20,21	7415	12,0
11	30,64	9397	11,2
12	37,75	14010	11,2
13	10,94	6511	10,7
14	21,29	7950	10,8
MOY	**31,61**	**11254**	**11,3**
ECART TYPE	**13,28**	**4207**	**0,6**

Tableau 7 - Résultat des tests destructifs pour les solives issues des tests de dépose

Les essais et les calculs sont réalisés conformément à la démarche décrite au travers du chapitre 3.4.1.1. Les résultats présentés prennent bien en considération l'humidité ainsi que le facteur k_l relatif à la hauteur des éléments, décrit au travers de la norme NF EN 384 [NF EN 384+A2]. La (Figure 42) permet de visualiser la dispersion des modules d'élasticités longitudinaux dans le cadre des différentes méthodes non destructives et de la méthode destructive.

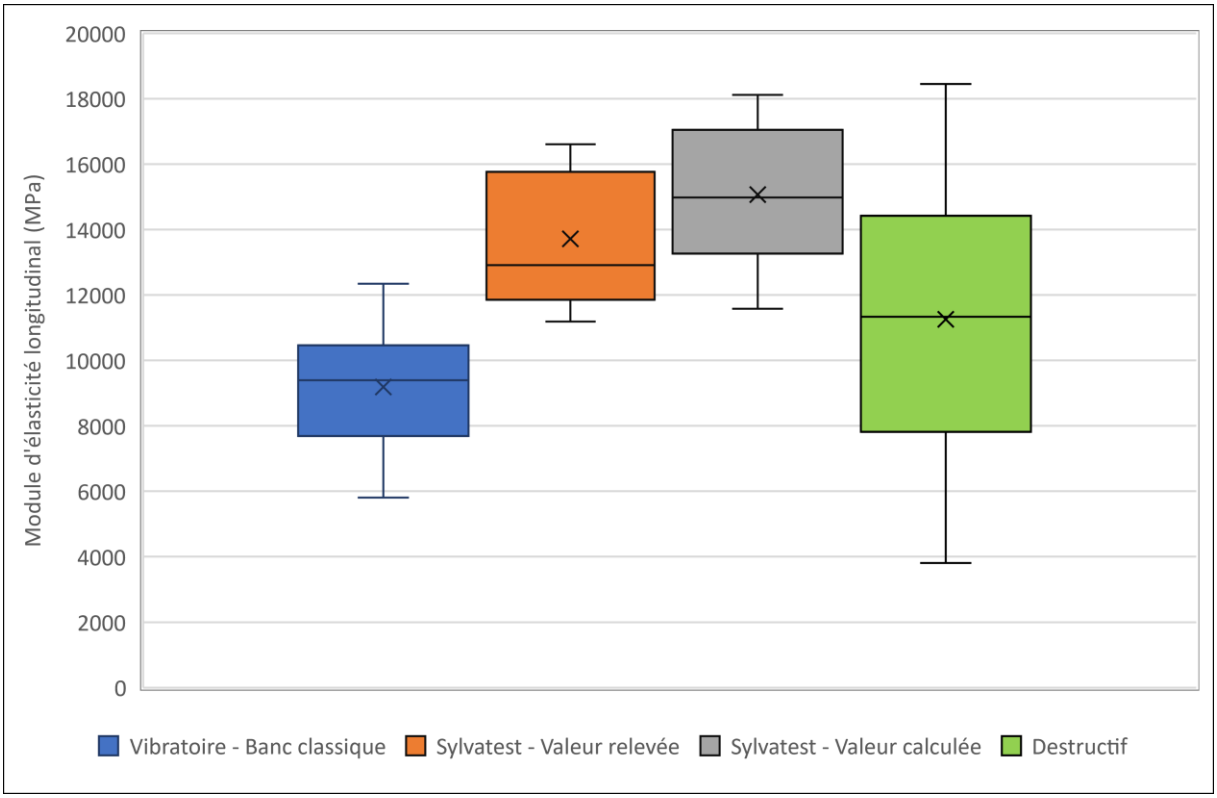


Figure 42 - Dispersion des modules d'élasticités longitudinaux pour les différentes méthodes non destructives et de la méthode destructive dans le cadre du lot de solive issue des tests de dépose

À la lumière de ces résultats, trois observations peuvent être formulées :

- Les résultats de l'essai de résistance à la flexion tendent à confirmer l'hypothèse selon laquelle il est possible de réemployer structurellement les solives de Remiremont. Les valeurs obtenues sont supérieures à 18 MPa, seuil de référence pour la classe de résistance C18. Toutefois, les échantillons 6 et 13 se révèlent être des exceptions à cette règle, les positionnant ainsi en dessous de la classe C18 et pouvant entrainer un sous classement du lot.
- Les résultats de module d'élasticité longitudinal montrent que les méthodes nécessitant l'utilisation du Sylvatest® ont tendance à surestimer le module d'élasticité longitudinal tandis que la méthode vibratoire à tendance à le sous-estimer.
- Les valeurs de résistance à la flexion et de module d'élasticité longitudinal obtenues dans le cadre des essais destructifs admettent une forte dispersion.

La première affirmation doit être nuancée. En effet, pour statuer sur l'éventuelle utilisation des bois, il est impératif de procéder au classement en résistance du lot, et non de se focaliser sur chaque échantillon isolément. C'est la démarche décrite au travers du chapitre 4.2.1.3.

La seconde information peut être appuyée par la comparaison des valeurs des médianes et des moyennes de module d'élasticité longitudinal relatif aux méthodes non destructives à la valeur de la

médiane et de la moyenne de module d'élasticité longitudinal relatif à la méthode destructive. L'intégralité des informations requises pour cette analyse est présentée dans le (Tableau 8).

Méthode	Ecart absolu avec la méthode destructive - Médiane : N/mm²	Ecart absolu avec la méthode destructive - Moyenne : N/mm²	Ecart relatif - Médiane : %	Ecart relatif - Moyenne : %
Vibratoire	-1936	-2069	-17,1	-18,4
Sylvatest - valeur relevée	1577	2462	13,9	21,9
Sylvatest - valeur calculée	3646	2809	32,2	25,0

Tableau 8 - Comparaison des méthodes non destructives à la méthode destructive par le calcul des écarts relatifs dans le cadre de la médiane et de la moyenne

Au travers du (Tableau 8), les deux approches convergent vers la même conclusion :

- La méthode vibratoire sous-estime systématiquement le module d'élasticité longitudinal.
- Les méthodes nécessitant l'utilisation du Sylvatest® surestime systématiquement le module d'élasticité longitudinal.

L'approche par la médiane montre une surestimation plus modérée pour la méthode Sylvatest® - valeur relevée (+13,9 %) que ne le suggère l'approche par la moyenne (+21,9 %). Cette différence s'explique par la forte dispersion des valeurs destructives, qui exercent une influence plus significative sur la moyenne que sur la médiane. De plus, ce phénomène est renforcé par le fait que la méthode Sylvatest® - valeur relevée présente une distribution des modules d'élasticité longitudinal plus asymétrique vis-à-vis des deux autres méthodes.

L'intégration de la masse volumique réelle, dans le cadre de la méthode Sylvatest® - valeur calculée, augmente la surestimation du module d'élasticité longitudinal. Cette prise en compte augmente la variabilité, qui est directement liée à la considération des singularités des éléments, mais n'améliore pas la justesse des résultats. On peut faire l'hypothèse que le manque de justesse peut être induit pas une mauvaise calibration de l'appareil ou bien par l'équation (9) qui surestime le module d'élasticité longitudinal. La relation entre la vitesse de propagation de l'onde sonore et le module d'élasticité longitudinal est adéquate lorsqu'on est en présence de bois parfait, sans défaut, ce qui n'arrive jamais dans la réalité [Sandoz 1990]. Ces résultats montrent l'importance de l'intégration au niveau de l'appareil de l'amortissement énergétique des ondes qui est directement corrélé aux singularités locales du bois.

La troisième affirmation est à mettre en lien direct avec les méthodes non destructives. Les méthodes non destructives présentent des dispersions plus faibles que la méthode destructive qui est l'unique méthode qui sert de référence dans l'évaluation du module d'élasticité longitudinal. Ces faibles dispersions indiquent que les méthodes non destructives sont plus précises mais pas nécessairement

plus justes. La forte dispersion rencontrée dans le cadre de la méthode destructive peut être imputée au lot de solive testé, qui d'un échantillon à un autre présente des différences intrinsèques importantes. De plus, la méthode Sylvatest® - valeur calculé qui présente une dispersion plus grande que celle de la méthode Sylvatest® - valeur relevée se révèle cohérent. La variabilité introduite par la prise en compte de la masse volumique réelle des éléments réintroduit également la variabilité due aux singularités du bois.

Une fois cette première comparaison réalisée, il faut s'intéresser à la corrélation entre les méthodes non destructives et la méthode destructive. Ce processus devant amener des éléments de réponse supplémentaires dans le choix de la méthode non-destructive à retenir dans le cadre de ce projet. Les corrélations entre les méthodes non destructives et la méthode destructive sont présentées via la (Figure 43).

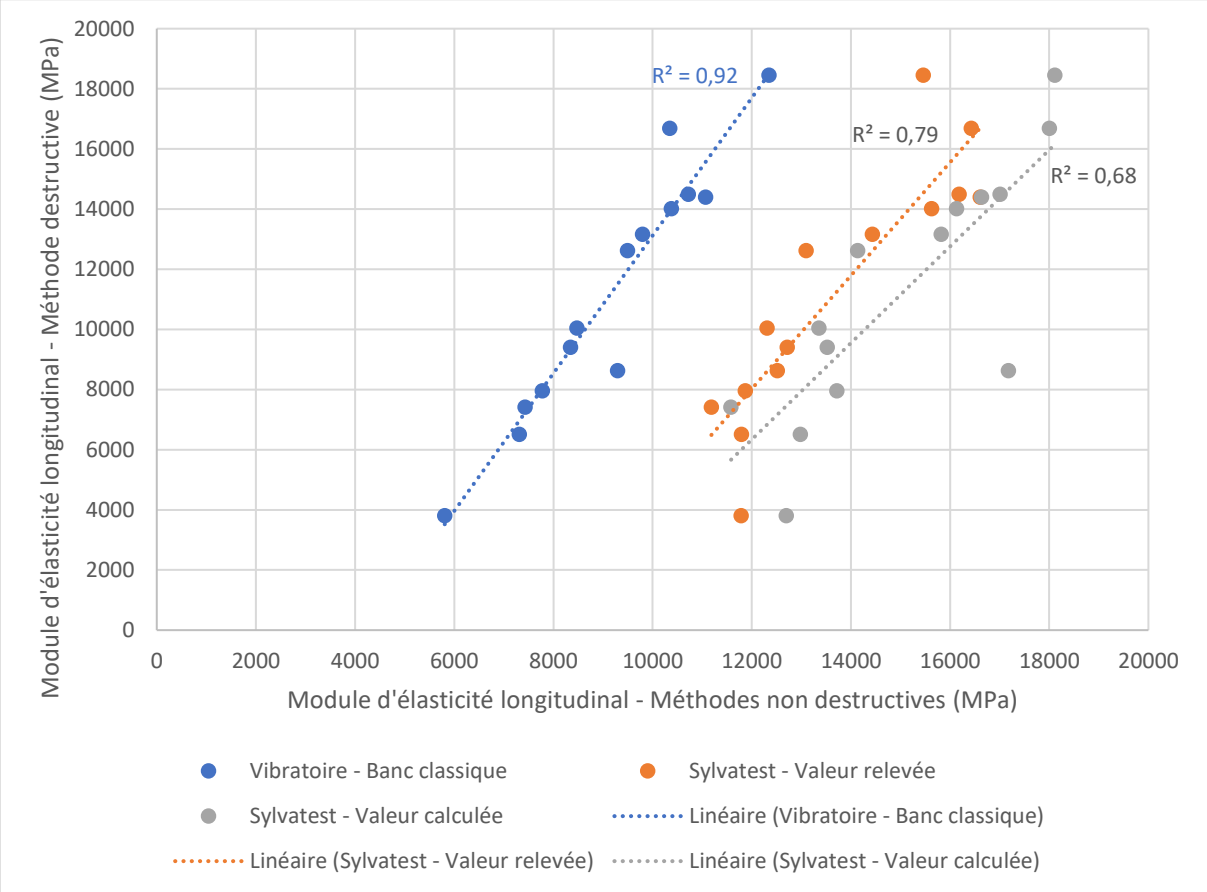


Figure 43 - Corrélation entre les méthodes non destructives et la méthode destructive pour le module d'élasticité longitudinal

Au travers de la (Figure 43), les trois nuages de points montrent une relation globalement linéaire entre les méthodes non destructives et la méthode destructive. La dispersion étant tout de même plus importante pour les méthodes nécessitant l'utilisation du Sylvatest® que la méthode vibratoire. En s'intéressant aux coefficients de détermination, qui indiquent la qualité des régressions, la méthode

vibratoire a tendance à mieux prédire le module d'élasticité longitudinal que les méthodes nécessitant l'utilisation du Sylvatest®.

Au travers des différents résultats présentés, pour le lot de solives issues de Remiremont, la méthode vibratoire semble être la plus fiable dans l'estimation du module d'élasticité longitudinal. Cette tendance est accentuée par le fait que la méthode vibratoire sous-estime le module d'élasticité longitudinal. La sous-estimation du module d'élasticité longitudinal amène une marge de sécurité supplémentaire dans l'optique d'un réemploi structurel des bois. L'utilisation du Sylvatest® semble, quant à elle, pertinente dans le cadre d'une estimation rapide du potentiel de réemploi de la ressource bois, notamment dans le cadre de bâtiment non déconstruit. Le Sylvatest® étant la seule technologie utilisable sur des bois encore en œuvre.

La méthode vibratoire est donc la méthode qui est choisie pour le classement en résistance. Cependant, avant de pouvoir établir ce classement, il faut déterminer si cette méthode peut être mise en œuvre sur un chantier de déconstruction par l'utilisation d'un banc d'essai mobile.

4.2.1.2- Démonstration de l'utilisation d'un banc d'essai portatif

Une fois la méthodologie vibratoire établie comme la plus pertinente pour l'évaluation du module d'élasticité longitudinale, il s'avère nécessaire d'évaluer sa faisabilité sur le terrain, c'est-à-dire sur le chantier expérimental, comme énoncé au chapitre 3.4.3.2. Pour ce faire, une campagne d'essais a été réalisée en parallèle de la première sur le même lot de 14 solives prélevées lors des tests de dépose sélective menés en amont du chantier de déconstruction comme énoncé au chapitre 3.3.1. Dans le cadre de ces essais, le module d'élasticité longitudinal pour la méthode vibratoire menée sur le banc d'essai portatif a été calculé selon l'équation (11) avec une prise en compte de l'humidité comme décrite au travers de l'équation (12), comme décrit au chapitre 3.4.2.2.1. Les résultats bruts sont présentés dans le (Tableau 9).

N°	Test vibratoire - banc portatif	
	Module d'Young axial : N/mm²	Humidité : %
1	10755	10,8
2	11938	10,8
3	11440	11,5
4	9789	11,1
5	12891	12,4
6	6523	11,9
7	9014	12,2
8	9706	11,1
9	11538	10,7
10	7914	12,0
11	9655	11,2
12	10775	11,2
13	7774	10,7
14	7840	10,8
MOY	**9825**	**11,3**
ECART TYPE	**1852**	**0,6**

Tableau 9 - Résultat des modules d'élasticité longitudinaux dans le cadre de la méthode vibratoire menée sur le banc d'essai mobile pour des solives issues des tests de dépose

La (Figure 44) permet de visualiser la dispersion des modules d'élasticités longitudinaux dans le cadre de la méthode vibratoire menée sur le banc d'essai fixe, de la méthode vibratoire menée sur le banc d'essai portatif et de la méthode destructive.

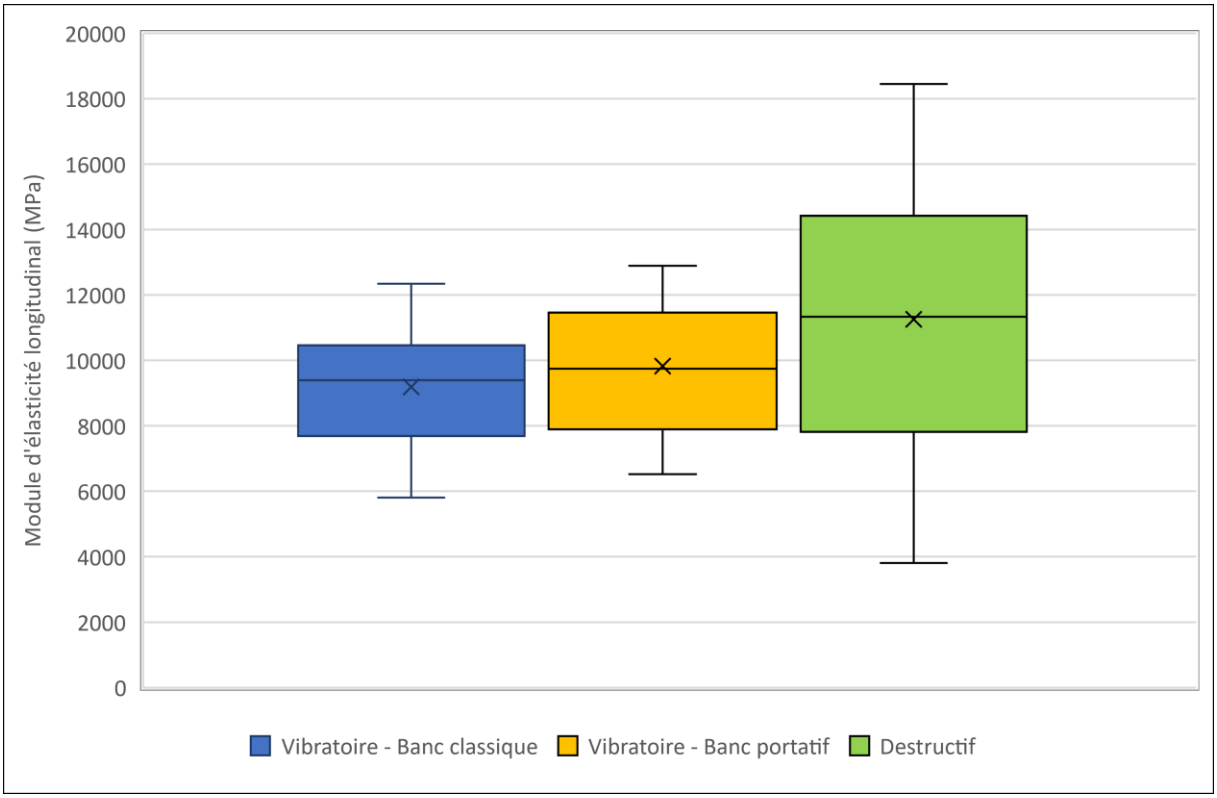


Figure 44 - Dispersion des modules d'élasticités longitudinaux pour les différentes méthodes vibratoire et de la méthode destructive dans le cadre du lot de solive issue des tests de dépose

À la lumière de ces premiers résultats, deux observations peuvent être formulées :

- La méthode vibratoire menée sur le banc d'essai portatif donne la même tendance vis-à-vis de la sous-estimation du module d'élasticité longitudinal que la méthode vibratoire menée sur le banc d'essai fixe.
- La méthode vibratoire menée sur le banc d'essai portatif admet une dispersion plus importante que la méthode vibratoire menée sur le banc d'essai fixe, en restant dans une marge raisonnable.

La première affirmation peut être appuyée par la comparaison des valeurs des médianes et des moyennes de module d'élasticité longitudinal relatif aux méthodes vibratoires à la valeur de la médiane et de la moyenne de module d'élasticité longitudinal relatif à la méthode destructive. L'intégralité des informations requises pour cette analyse est présentée dans le (Tableau 10).

Méthode	Ecart absolu avec la méthode destructive - Médiane : N/mm²	Ecart absolu avec la méthode destructive - Moyenne : N/mm²	Ecart relatif - Médiane : %	Ecart relatif - Moyenne : %
Vibratoire - Banc classique	-1936	-2069	-17,1	-18,4
Vibratoire - Banc portatif	-1038	-1429	-9,6	-12,7

Tableau 10 - Comparaison des méthodes vibratoires à la méthode destructive par le calcul des écarts relatifs dans le cadre de la médiane et de la moyenne

Au travers du (Tableau 10), les deux approches convergent vers la même conclusion :

- La méthode vibratoire, menée sur un banc d'essai fixe ou un banc d'essai portatif, sous-estime systématiquement le module d'élasticité longitudinal.

L'utilisation du banc d'essai portatif amène une sous-estimation plus modérée que dans le cadre de l'utilisation du banc d'essai fixe, et ce pour l'approche portant sur la médiane (-9,6 %) ou l'approche portant sur la moyenne (-12,7 %). On remarque encore une fois l'influence de la forte dispersion des valeurs destructives sur le résultat obtenu par l'approche portant sur la moyenne.

La deuxième affirmation qui concerne la dispersion plus grande rencontrée dans le cadre de la méthode vibratoire mise en œuvre sur le banc d'essai portatif est à mettre en lien direct avec le protocole de mesure mis en œuvre. Le protocole réalisé, bien qu'établie de manière rigoureuse, induit une variabilité plus importante que dans le cadre de l'évaluation menée sur le banc d'essai fixe. On peut émettre l'hypothèse que cette plus grande variabilité est liée à l'influence de la résonnance du banc d'essai portatif sur la résonnance de l'échantillon testé.

Une fois cette première analyse effectuée, il faut s'intéresser à la corrélation entre les méthodes vibratoires et la méthode destructive. Cette démarche devant amener des éléments de réponse supplémentaire dans la potentielle utilisation du banc d'essai portatif pour la mise en œuvre de la méthode vibratoire sur chantier. Les corrélations entre les méthodes vibratoires et la méthode destructive sont présentées via la (Figure 45).

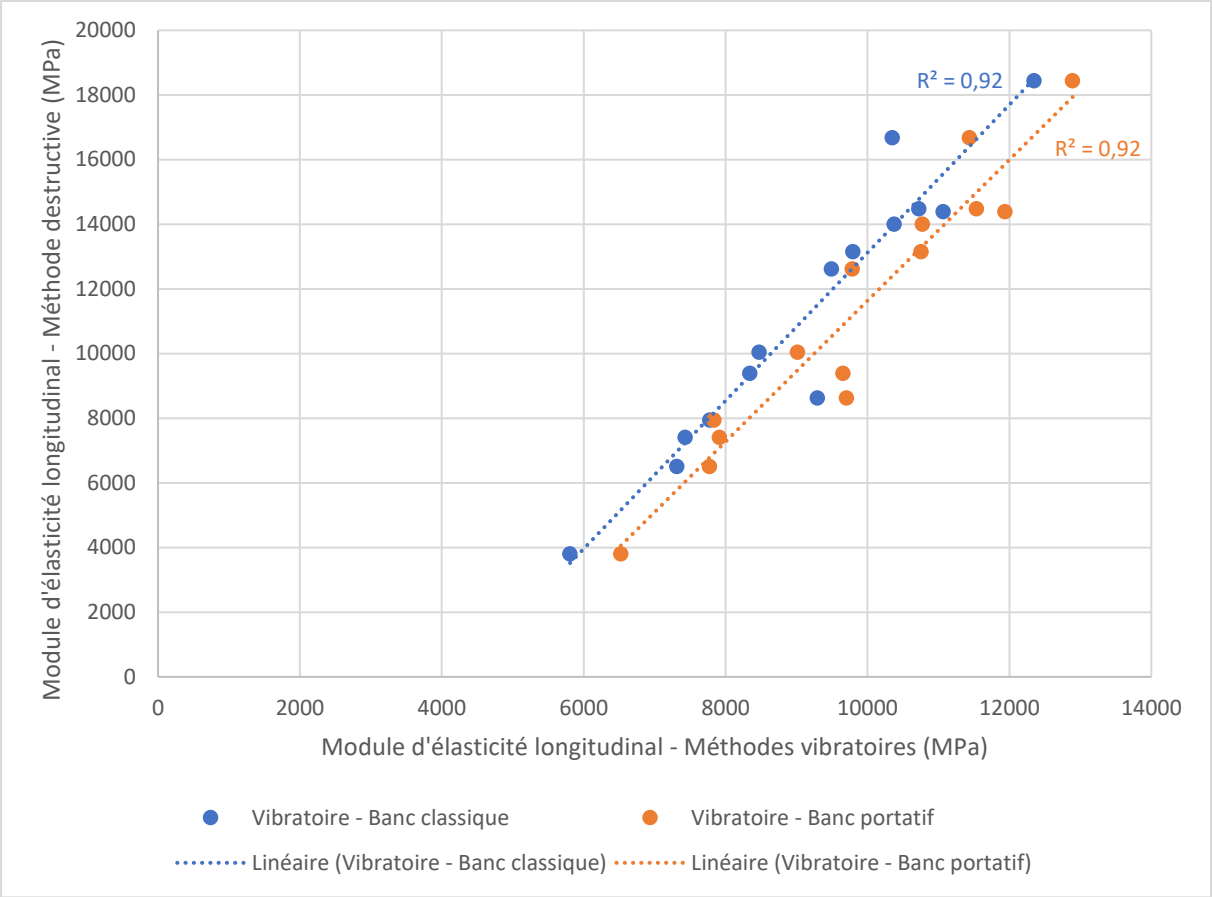


Figure 45 - Corrélation entre les méthodes vibratoires et la méthode destructive pour le module d'élasticité longitudinal

Au travers de la (Figure 45), on peut voir que le nuage de points relatif à la méthode vibratoire menée sur le banc d'essai portatif admet une relation globalement linéaire par rapport à la méthode destructive. Phénomène que l'on retrouvait déjà dans le cadre de la méthode vibratoire menée sur le banc d'essai fixe, ce qui amène une cohérence dans les résultats trouvés. En s'intéressant aux coefficients de détermination, la méthode vibratoire menée sur le banc d'essai portatif a tendance à prédire de la même manière le module d'élasticité longitudinal que la méthode vibratoire menée sur le banc d'essai fixe.

Au travers des différents résultats présentés, pour le lot testé issu de Remiremont, la mise en œuvre de la méthode vibratoire sur chantier semble possible par l'utilisation d'un banc d'essai portatif. On retrouve les mêmes tendances de résultats que rencontrées dans le cadre de la méthode vibratoire mise en œuvre sur un banc d'essai fixe. Cependant, avant de pouvoir établir le classement en résistance des bois sur site via la méthode vibratoire, il faut déterminer le classement en résistance de notre lot initial.

4.2.1.3- Classement en résistance du lot

Une fois la méthode vibratoire identifiée comme pouvant être mise en œuvre sur site, il est nécessaire d'établir le classement en résistance du lot initial de solives. Pour rappel, c'est le lot de 14 solives prélevées lors des tests de dépose sélective qui est assimilable à un échantillonnage du gisement total de solive. Le classement en résistance de ce lot initial va permettre d'établir une valeur seuil. Cette valeur seuil correspondant à la valeur minimum de module d'élasticité longitudinal à respecter pour qu'un bois encore présent sur site soit de la classe de résistance voulue. Dans le cadre du chantier expérimental, la classe de résistance sélectionnée est C18. Cette sélection n'est pas anodine, elle doit permettre la validation, pour leur réemploi structurel dans le projet in-situ, d'une plus grande partie du gisement de solives. Cette approche permet ainsi de réduire le risque de perte, plus important si une classe de résistance supérieure avait été choisie.

Une première analyse du classement en résistance de l'ensemble du lot initial révèle que les valeurs requises pour la classe C18 ne sont pas respectées, comme l'indique le (Tableau 11).

Valeur moyenne du module d'élasticité axiale pour le lot initial (N/mm²)	Valeur caractéristique de la masse volumique au 5 percentile pour le lot initial (kg/m^3)	Valeur caractéristique de la résistance à la flexion au 5 percentile pour le lot initial (N/mm²)
11028	400	10,9
Valeur moyenne du module d'élasticité axiale pour la classe de résistance C18 (N/mm²)	Valeur caractéristique de la masse volumique au 5 percentile pour la classe de résistance C18 (kg/m^3)	Valeur caractéristique de la résistance à la flexion au 5 percentile pour la classe de résistance C18 (N/mm²)
9000	320	18,0

Tableau 11 - Comparaison entre les résultats des valeurs du lot initial par rapport aux valeurs requises pour la classe de résistance C18

Il s'avère alors nécessaire de procéder au retrait d'un pourcentage d'échantillon du lot initial afin d'atteindre les valeurs requises pour la classe visée C18. La résistance à la flexion est le paramètre déterminant pour le classement du lot initial, car les valeurs relatives à la masse volumique et au module d'élasticité pour le lot initial respectent d'ores et déjà les critères requis pour être classé dans la classe C18. La procédure de classement du lot initial est réalisée comme indiqué au chapitre 3.4.3.3.

Dans le cadre du classement en résistance, 11 échantillons du lot initial ont été retenus pour la classe mécanique visée. Les échantillons restants, quant à eux, ont été considérés comme classe de rejet, c'est-à-dire inférieurs à la classe C18. La propriété indicatrice, ou valeur du module d'élasticité longitudinal obtenu par la méthode vibratoire sur le banc d'essai portatif, relative au dernier échantillon inclus dans le lot, correspond à la valeur seuil. Cette valeur seuille s'établie à 7914 N/mm². En outre, il s'avère impératif qu'une solive constitutive du gisement total sur site respecte la valeur seuil de 7914 N/mm² pour garantir son appartenance à la classe C18.

Une fois le classement du lot initial réalisé et la valeur seuil déterminée, il est impératif de vérifier la validité de la démarche. La vérification du classement ainsi établi est réalisée comme indiqué au chapitre 3.4.3.3. Dans le cadre de cette vérification, l'attention se porte exclusivement sur les pièces potentiellement surclassées. L'enjeu n'est pas d'optimiser l'utilisation des bois en évitant un sous classement des pièces, mais bien de garantir leur réemploi. À l'issue de la procédure de vérification, la matrice coût global est obtenue. Cette dernière permet de déterminer si le classement réalisé est valide ou non. Dans le cadre de notre étude, la matrice coût global est présentée au travers du (Tableau 12).

Classe optimale	Classe assignée	
	C18	Rejet
C18	0	X
Rejet	0,08	0

Tableau 12 - Matrice coût global obtenue dans le cadre de la vérification du classement en résistance du lot initial

Dans le cadre de la validation d'une procédure de classement, il est impératif que les valeurs situées en dessous de la diagonale de la matrice coût global, associées au sur-classement, soient inférieures à la valeur de 0,10. Dans le cadre du classement en résistance du lot initial, il est forcé de constater que la procédure est respectée puisque la valeur obtenue est de 0,08. Cette approche méthodique permet de conclure à la validité du classement établi sur le lot initial et de la valeur seuil obtenue. Le classement sur site du gisement peut alors être établi.

4.2.2- Essai sur site

Le classement sur site du gisement de solive est établi conformément au chapitre 3.4.4. L'ensemble des solives présentes sur les trois bâtiments a été testé, à l'exception des solives laissées en place dans les bâtiments pour assurer un effet diaphragme sur les bâtiments avant leur démolition, soit un total de 510 solives. La répartition entre bâtiments s'établit comme telle :

- Bâtiment 1 : 186 solives testées ;
- Bâtiment 2 : 145 solives testées ;
- Bâtiment 3 : 179 solives testées.

Sur l'ensemble du lot, 230 solives ont validé l'ensemble des critères constitutifs du cahier des charges à savoir :

- La section minimale requise pour leur remise en œuvre dans le futur bâtiment à savoir une section de 80 x 190 mm² ;
- La solive ne doit pas présenter de défauts géométriques trop prononcés, tels que le gauchissement ou le tuilage ;

- La solive ne doit pas comporter d'attaques biologiques, telles que des pourritures, des champignons ou des insectes ;
- La solive ne doit pas présenter de défaut de section ;
- La solive doit respecter la valeur de module d'élasticité d'au moins 7914 N/mm², mesuré par essai vibratoire, pour être considérée comme relevant de la classe de résistance C18.

Parmi les 230 solives ayant validées le cahier des charges, 180 ont été destinées au charpentier bois, tandis que 50 ont été acheminées vers le CRITT Bois afin de réaliser des essais complémentaires. Dans le cadre de l'opération, le contrôleur technique mandaté a émis des recommandations spécifiques. Ces dernières préconisent la réalisation d'essais complémentaires par un organisme tiers indépendant. Les essais complémentaires sont conçus pour aboutir à la validation de la méthodologie de classement en résistance du lot de 230 solives. Cette validation est conditionnée par la satisfaction du dernier critère constitutif du cahier des charges, à savoir la résistance structurelle. Les essais complémentaires doivent montrer que le lot de 50 solives prélevées de manière aléatoire parmi les 230 solives ayant satisfait aux exigences du cahier des charges est bien de classe C18. Le détail de cette validation est présenté au travers du chapitre 4.2.3.

De manière générale, l'exclusion des solives est principalement liée aux quatre premiers critères du cahier des charges. Une part importante des solives présentait des défauts de section liés au passage de gaine électrique en leur sein, ce qui a conduit à l'exclusion de nombreuses pièces, bien qu'elles présentent par ailleurs un module d'élasticité élevé et aucun défaut apparent. De même, sur l'ensemble des 510 solives seules 5 présentaient des attaques biologiques, lesquelles se sont révélées être de la pouriture fibreuse. Ces éléments ont vraisemblablement été exposés à un taux d'humidité élevé et prolongé, probablement en raison d'une fuite localisée au niveau de leur zone de prélèvement. La (Figure 46) présente l'ensemble des modules d'élasticités longitudinaux mesurés sur site.

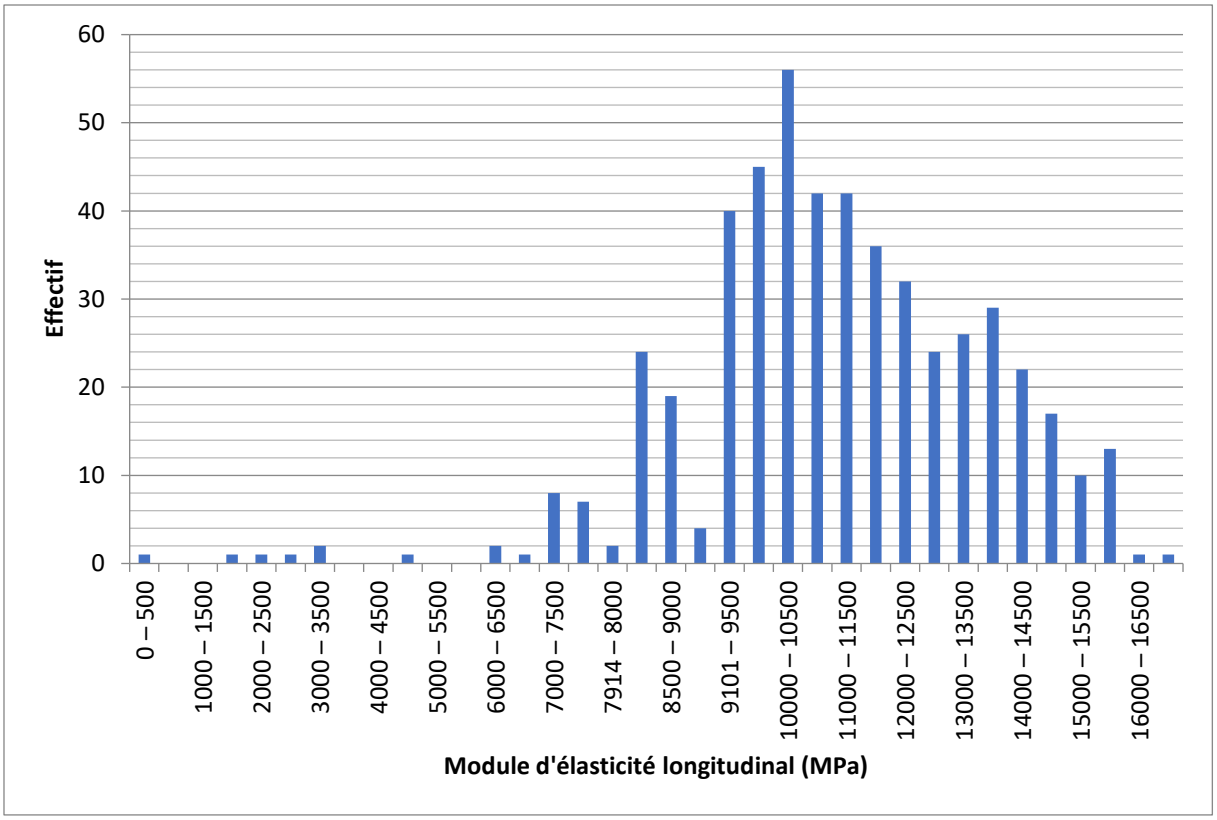


Figure 46 - Répartition des modules d'élasticités longitudinaux du gisement de solives du chantier de Remiremont en différentes classes

Pour le gisement de solive, la moyenne du module d'élasticité longitudinal s'établit à 11160 N/mm². Seules 25 solives ne respectent pas le seuil fixé à 7914 N/mm², soit environ 5 % du gisement. Ce résultat montre bien que l'exclusion des solives est principalement liée aux quatre premiers critères du cahier des charges et non à celui portant sur la résistance. Il est également intéressant de visualiser la distribution des modules d'élasticités longitudinaux pour les différents lots de solives issus du gisement de Remiremont, comme l'illustrent la (Figure 47) et la (Figure 48).

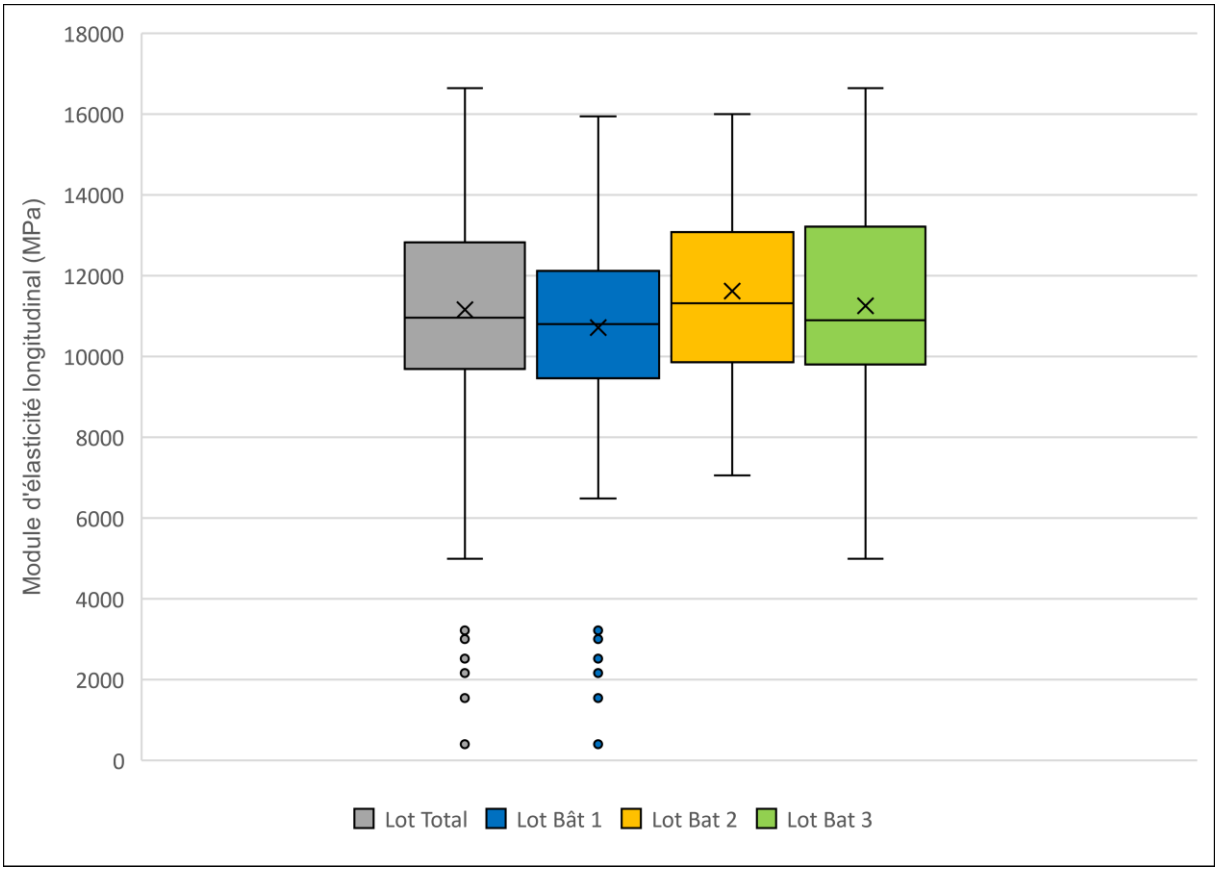


Figure 47 - Dispersion des modules d'élasticités longitudinaux par bâtiment pour le gisement de solives de Remiremont

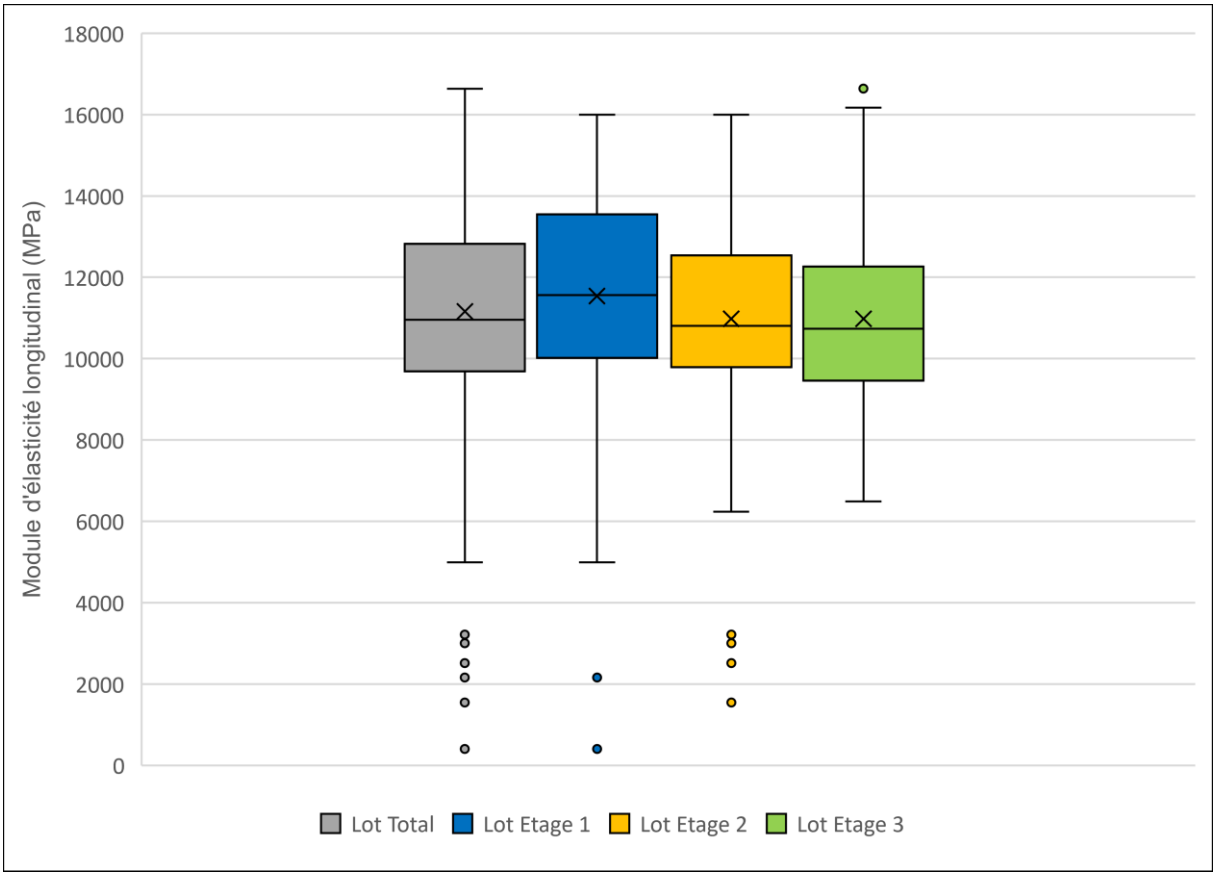


Figure 48 - Dispersion des modules d'élasticités longitudinaux par étage pour le gisement de solives de Remiremont

La (Figure 47) met en évidence une distribution des modules d'élasticités longitudinaux globalement cohérente entre les trois bâtiments, révélant une homogénéité du gisement. L'analyse des données révèle que le lot relatif au bâtiment 1 présente les modules d'élasticités longitudinaux les plus faibles, malgré une dispersion réduite. Les seules valeurs aberrantes identifiées ne l'ont été que pour ce lot. Elles correspondent à des solives présentant des défauts sévères ne respectant pas le cahier des charges établi. En ce qui concerne le bâtiment 2, les modules d'élasticité longitudinaux sont les plus élevés, avec une dispersion modérée. L'analyse met en évidence une forte hétérogénéité au sein du lot relatif au bâtiment 3, caractérisée par une grande variabilité des mesures. Néanmoins, cette hétérogénéité n'affecte pas la cohérence globale du gisement.

La (Figure 48) montre par ailleurs que la distribution des modules d'élasticité longitudinaux est également homogène à l'échelle des différents étages. L'analyse des données révèle que le lot relatif à l'étage 1 présente les modules d'élasticités longitudinaux les plus élevés, mais marqué par une distribution plus importante que le lot global. En ce qui concerne les lots relatifs à l'étage 2 et à l'étage 3, les modules d'élasticité longitudinaux sont équivalents mais restent inférieurs à ceux de l'étage 1, malgré des dispersions réduites.

De manière générale, les distributions examinées manifestent des propriétés similaires, sans que l'effet du bâtiment, de l'étage ou de l'aile de prélèvement ne soit significatif. Par conséquent, la campagne d'essais réalisée sur le site de Remiremont concernant les solives issues des bâtiments déconstruits présente une cohérence globale. Il conviendra néanmoins de vérifier si le lot de 230 solives répond bien au critère relatif à la résistance structurelle, au moyen des essais complémentaires menés au CRITT Bois.

4.2.3- Essais au Critt Bois

Dans le cadre des expérimentations menées au CRITT Bois, un échantillon de 50 solives, sélectionnées de manière aléatoire parmi l'ensemble de 230 solives ayant satisfait aux exigences du cahier des charges pour leur réemploi, a fait l'objet d'une étude approfondie. L'objectif de cette étude est de démontrer que la classe de résistance de ce lot de vérification satisfait au seuil C18. Si cette hypothèse venait à être confirmée, alors le lot constitué des 180 solives restantes serait également considéré comme de classe C18 et les solives pourraient alors être remise en œuvre.

Les essais et les calculs ont été réalisés conformément à la démarche décrite au travers du chapitre 3.4.1.1. Les résultats présentés prennent bien en considération l'humidité ainsi que le facteur k_l relatif à la hauteur des éléments, décrit au travers de la norme NF EN 384 [NF EN 384+A2]. La (Figure 49) et la (Figure 50) permettent de visualiser respectivement la dispersion des modules d'élasticités longitudinaux et la dispersion des résistances à la flexion dans le cadre des essais destructifs qui ont

été menés sur le lot de vérification et de les comparer aux dispersions obtenues à la suite des essais destructifs menés sur le lot initial.

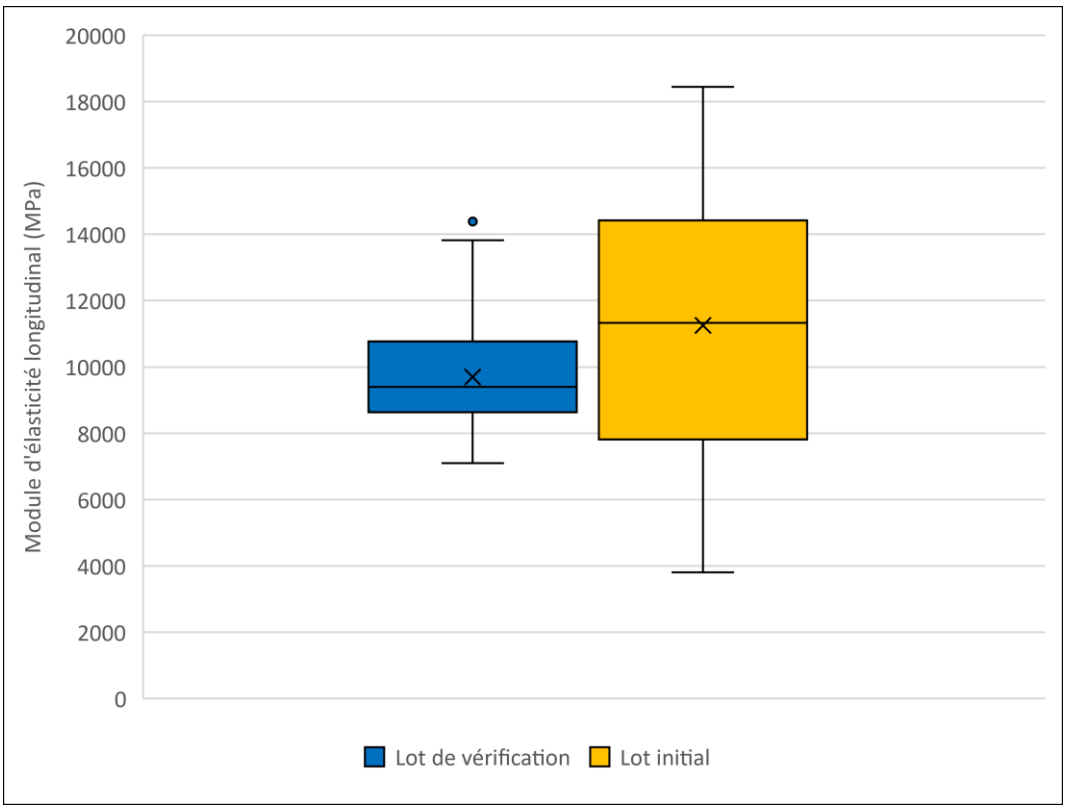


Figure 49 - Dispersion des modules d'élasticités longitudinaux pour le lot initial et le lot de vérification dans le cadre des essais destructifs

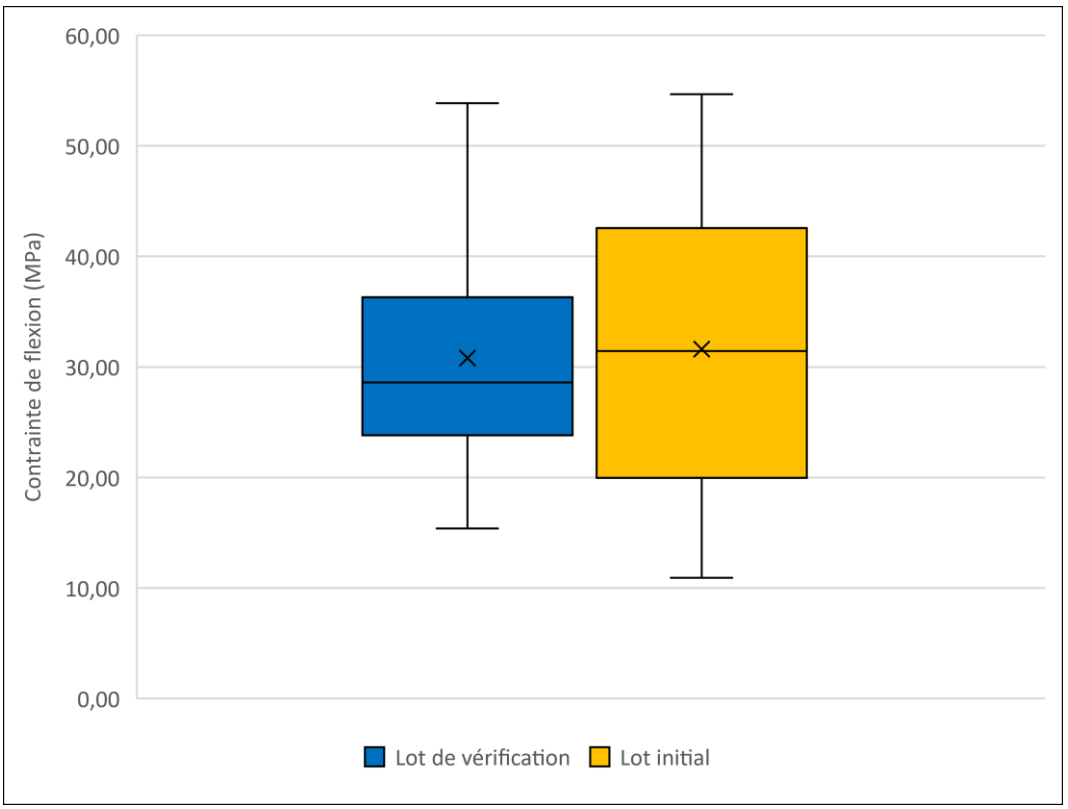


Figure 50 - Dispersion des résistances à la flexion pour le lot initial et le lot de vérification dans le cadre des essais destructifs

La (Figure 49) met en évidence que le lot de vérification admet des modules d'élasticités longitudinaux plus faibles que le lot initial mais pour une dispersion bien plus faible. Cette faible dispersion est justifiée par le fait que le lot de vérification est constitué d'éléments prétriés de part la méthodologie mise en œuvre. Les résultats obtenus révèlent que le module d'élasticité moyen du lot est de 9693 N/mm², avec un écart-type de 1566 N/mm². Pour ce qui concerne le classement en résistance du lot de vérification, la valeur caractéristique moyenne pour le module d'élasticité longitudinal s'établit à 9532 N/mm². Cette valeur est caractéristique d'un bois classé C20, conformément à la norme NF EN 338, qui définit les classes de résistance du bois.

La (Figure 50) met en évidence que le lot de vérification admet des résistances à la flexion plus faibles que le lot initial mais pour une dispersion plus faible. La faible dispersion étant relative à la méthodologie mise en œuvre. Les résultats obtenus pour les résistances à la flexion révèlent une variabilité significative des contraintes de rupture pour le lot de vérification. Les valeurs obtenues pour cette étude se situent dans une fourchette allant de 15,38 à 53,85 N/mm², indiquant un écart-type significatif de 9,84 N/mm². Cette observation suggère l'existence d'une variation notable au sein de la population étudiée. La moyenne observée sur le lot de vérification est de 30,30 N/mm². Pour ce qui concerne le classement en résistance du lot de vérification, la valeur caractéristique, calculée selon une loi log-normale avec un niveau de confiance de 75 %, est de 17,09 N/mm². Cette valeur est typique d'un bois classé C16, en accord avec la norme NF EN 338.

Pour ce qui concerne la masse volumique, la valeur caractéristique s'établit à 454 kg/m^3 pour le lot de vérification. Cette valeur est caractéristique d'un bois classé C27.

A la lumière de ces différents résultats, le lot de vérification peut être classé selon la résistance en flexion, la classe de résistance associée étant alors C16. Cependant, conformément à la norme NF EN 14081-3 et comme précisé au paragraphe suivant :

« Le classement est considéré comme vérifié sous condition lorsque les valeurs caractéristiques de résistance en flexion ou en traction, ainsi que la masse volumique, sont égales ou supérieures à 90 % des valeurs déclarées, et lorsque le module moyen d'élasticité en flexion ou en traction est égal ou supérieur à 95 % de la valeur déclarée. »

Ce paragraphe fait référence au fait que le lot de vérification ne constitue qu'un échantillon représentatif du lot de 230 solives ayant validé le cahier des charges. Le lot vérification ainsi testé peut dès lors être reclassé dans une classe de résistance supérieure, à savoir C18. Ce reclassement est rendu possible dans la mesure où les critères de tolérance définis par la norme sont respectés, à savoir des valeurs caractéristiques de résistance atteignant au minimum 90 % des valeurs déclarées et un module moyen d'élasticité atteignant au minimum 95 % de la valeur déclarée. En conséquence, l'ensemble des

solives ayant validé la procédure de classement sur site est considéré comme appartenant à la classe de résistance C18. Les bois peuvent alors être remis en œuvre dans le bâtiment neuf sans aucune contrainte supplémentaire.

Cette campagne d'essais met ainsi en exergue la faisabilité du réemploi du bois de construction, sous réserve d'une caractérisation rigoureuse et préalable. L'approche méthodologique adoptée dans le cadre de cette étude constitue une base solide pour le développement de filières de réemploi structurées et fiables. L'adaptation de la norme NF EN 14082-2 pourrait être considérée comme pertinente et transposable à des opérations similaires à celle de Remiremont. D'autant que si d'autres chantiers viennent à adopter cette méthodologie, les retours d'expériences seront multiples et permettront l'acceptation du recours à cette démarche de la part des contrôleurs techniques et des assureurs. Les essais menés au sein du CRITT Bois constitue un engagement supplémentaire de la part de la maîtrise d'ouvrage, à savoir Vosgelis, dans le cadre du processus de réemploi des solives. La validation effectuée par cette entité tierce garantit l'intégrité et la conformité de la méthodologie développée. A terme, cette campagne de validation complémentaire devrait être absente afin de réduire les coûts pesant sur la pratique du réemploi mais également de préserver une part plus conséquente de la ressource. Il reste à voir si les résultats obtenus sur le gisement de bois issu de l'opération de Remiremont peuvent être généralisé à des gisements issus d'autres opérations.

4.2.3- Etude comparative sur la méthode non-destructive à utiliser

Dans le cadre de l'étude expérimentale de Remiremont, une approche méthodique et rigoureuse a été suivie pour identifier la technologie non destructive la plus appropriée pour évaluer le module d'élasticité longitudinal des bois, comme décrit au chapitre 4.2.1.1. Cette même approche méthodique a été adoptée sur un gisement de solive et de chevron issu d'une opération de déconstruction menée à Épinal. L'objectif de cette seconde étude est de vérifier si le choix technologique appliqué dans le cadre de l'opération de Remiremont est également justifiable sur une autre opération.

Dans le cadre de cette seconde étude, la première étape a consisté en une mesure exhaustive des caractéristiques élémentaires des solives, à savoir :

- La longueur utile comme énoncé au chapitre 3.4.1.4 ;
- La section utile comme énoncé au chapitre 3.4.1.5 ;
- L'essence qui s'avère être la même pour l'ensemble du lot à savoir du sapin blanc, *Abies alba* ;
- La masse dont on peut déduire la masse volumique comme énoncé au chapitre 3.4.1.3.

Les résultats ont été consignés dans le (Tableau 13).

	N°	Essence	Humidité (%)	Dimensions (mm)			Volume (m^3)	Masse (kg)	Masse volumique (kg/m^3)
				Longueur	Hauteur	Largeur			
SOLIVES	1	Sapin	11,2	5070	260	130	0,171	75,5	440,6
	2		10,9		265	135	0,181	73,2	403,6
	3		10,5		255	130	0,168	80,5	479,0
	4		10,4		260	135	0,178	77,0	432,7
	5		10,7		255	130	0,168	81,1	482,5
	6		11,0		260	130	0,171	79,2	462,2
	7		10,5		260	135	0,178	82,7	464,7
	8		10,7		265	135	0,181	72,8	401,4
	9		10,6		255	135	0,175	78,5	449,8
	10		10,9		260	130	0,171	84,8	494,8
	MOY	-	**10,7**	**5070**	**260**	**133**	**0,174**	**78,5**	**451,1**
	ECART TYPE	-	**0,2**	**0**	**4**	**3**	**0,005**	**3,9**	**31,9**
CHEVRONS	1	Sapin	9,8	3930	150	100	0,059	24,5	415,6
	2		10,0	4000			0,060	25,9	431,7
	3		10,6	3840			0,058	26,8	465,3
	4		10,3	4060			0,061	27,9	458,1
	5		10,1	3940			0,059	23,6	399,3
	6		9,8	3950			0,059	25,0	421,9
	7		10,2	4000			0,060	27,4	456,7
	8		10,0	3980			0,060	22,9	383,6
	9		10,0	4000			0,060	26,9	448,3
	10		10,2	3980			0,060	21,3	356,8
	MOY	-	**10,1**	**3968**	**150**	**100**	**0,060**	**25,2**	**423,7**
	ECART TYPE	-	**0,3**	**58**	**0**	**0**	**0,001**	**2,2**	**35,6**

Tableau 13 - Résultat des caractéristiques élémentaires des bois issus de l'opération d'Epinal

Une fois les caractéristiques élémentaires obtenues, il a été possible de procéder à la mesure du module d'élasticité longitudinal pour chacune des méthodes non destructives identifiées comme énoncé au chapitre 3.4.2. Les résultats bruts sont présentés dans le (Tableau 14).

	N° d'échantillon	Test vibratoire - banc portatif		Test vibratoire - banc classique		Test Sylvatest - valeur relevée		Test Sylvatest - valeur calculée	
		Module d'Young axial : N/mm²	Humidité : %	Module d'Young axial : N/mm²	Humidité : %	Module d'Young axial : N/mm²	Humidité : %	Module d'Young axial : N/mm²	Humidité : %
Solives	1	12125	12,0	11471	12,0	15430	10,4	15815	10,4
	2	9105		7173		12150	11,3	12070	11,3
	3	12040		12952		13779	12	15536	12
	4	10332		11262		14968	10,6	14984	10,6
	5	11025		10456		12926	11,5	15092	11,5
	6	9612		9620		12357	12,2	13823	12,2
	7	12097		12095		13903	11,4	15179	11,4
	8	8810		8038		10229	12,4	10427	12,4
	9	11004		10921		12717	13,2	13572	13,2
	10	10968		11555		12019	12,1	14511	12,1
	MOY	**10712**	**12,0**	**10554**	**12,0**	**13048**	**11,7**	**14101**	**11,7**
	ECART TYPE	**1224**	**0,0**	**1803**	**0,0**	**1529**	**0,8**	**1702**	**0,8**
Chevrons	1	12394	12,0	15706	12,0	14711	11,0	14349	12,00
	2	10689		12469		12928		13503	
	3	8799		-		9838		12040	
	4	12189		17864		14819		15915	
	5	10902		13156		15148		14160	
	6	10730		13950		15125		14902	
	7	12480		15298		14923		15953	
	8	8532		14682		14462		13070	
	9	12244		17215		15429		16092	
	10	7948		10253		12555		10924	
	MOY	**10691**	**12,0**	**14510**	**12,0**	**13994**	**11,0**	**14091**	**12,0**
	ECART TYPE	**1718**	**0,0**	**2374**	**0,0**	**1746**	**0,0**	**1737**	**0,0**

Tableau 14 - Résultat des modules d'élasticité longitudinaux pour les bois issus de l'opération d'Epinal

Dans le cadre de la technologie vibratoire, le module d'élasticité longitudinal a été calculé selon l'équation (11) avec une prise en compte de l'humidité comme décrite au travers de l'équation (12), comme décrit au chapitre 3.4.2.2.1. Les mesures ont été réalisées soit sur un banc d'essai fixe soit sur le banc d'essai portatif décrit au travers du chapitre 3.4.3.2. Dans le cadre du Sylvatest®, le module d'élasticité longitudinal a été obtenu soit par lecture directe sur l'appareil (valeur relevée) soit par l'utilisation de l'équation (9) avec une prise en compte de l'humidité comme décrite au travers de l'équation (10) (valeur calculée), comme décrit au chapitre 3.4.2.1. La mesure vibratoire effectuée sur un banc d'essai fixe n'a pas pu être conduite dans le cadre du chevron numéro 3 de part sa faible longueur. Le chevron numéro 3 est exclu dans la suite de l'étude. La (Figure 52) permet de visualiser la dispersion des modules d'élasticités longitudinaux dans le cadre des différentes méthodes pour le lot de solive et la (Figure 51) permet de visualiser la dispersion des modules d'élasticités longitudinaux dans le cadre des différentes méthodes pour le lot de chevrons.

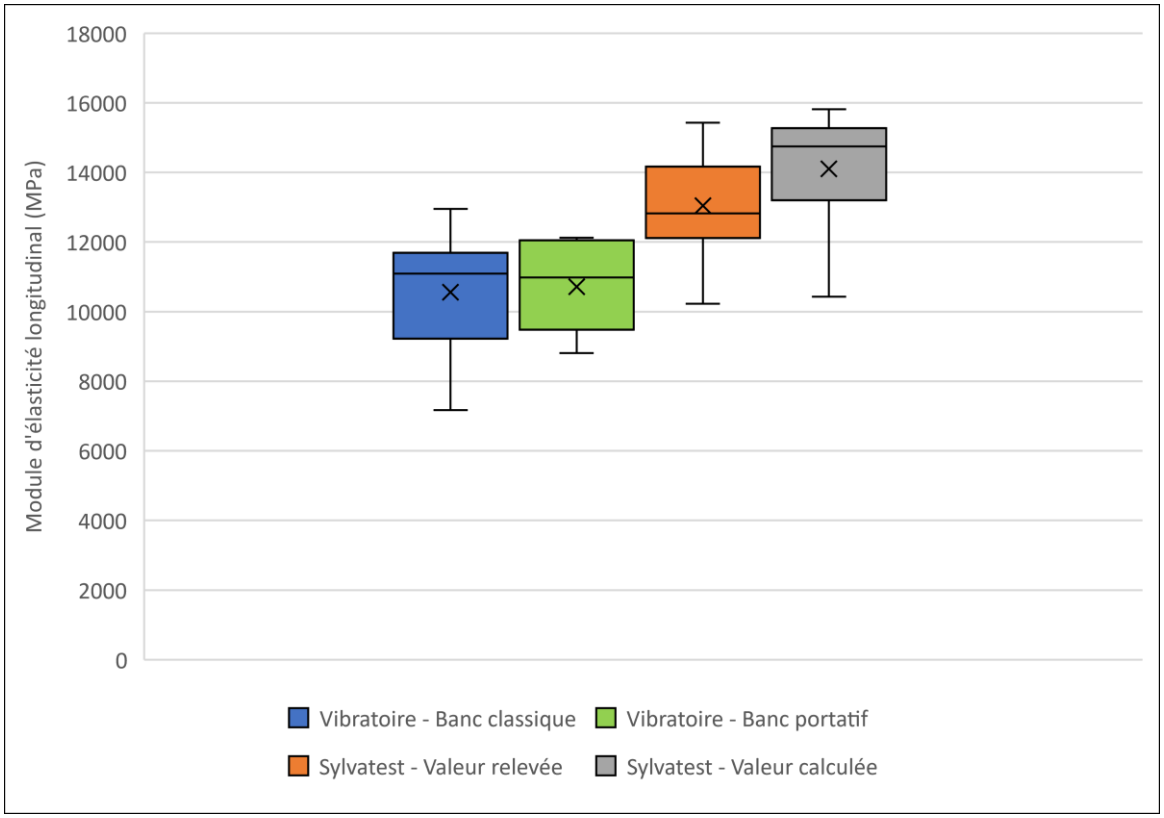


Figure 51 - Dispersion des modules d'élasticités longitudinaux pour les différentes méthodes dans le cadre des solives issues de l'opération d'Epinal

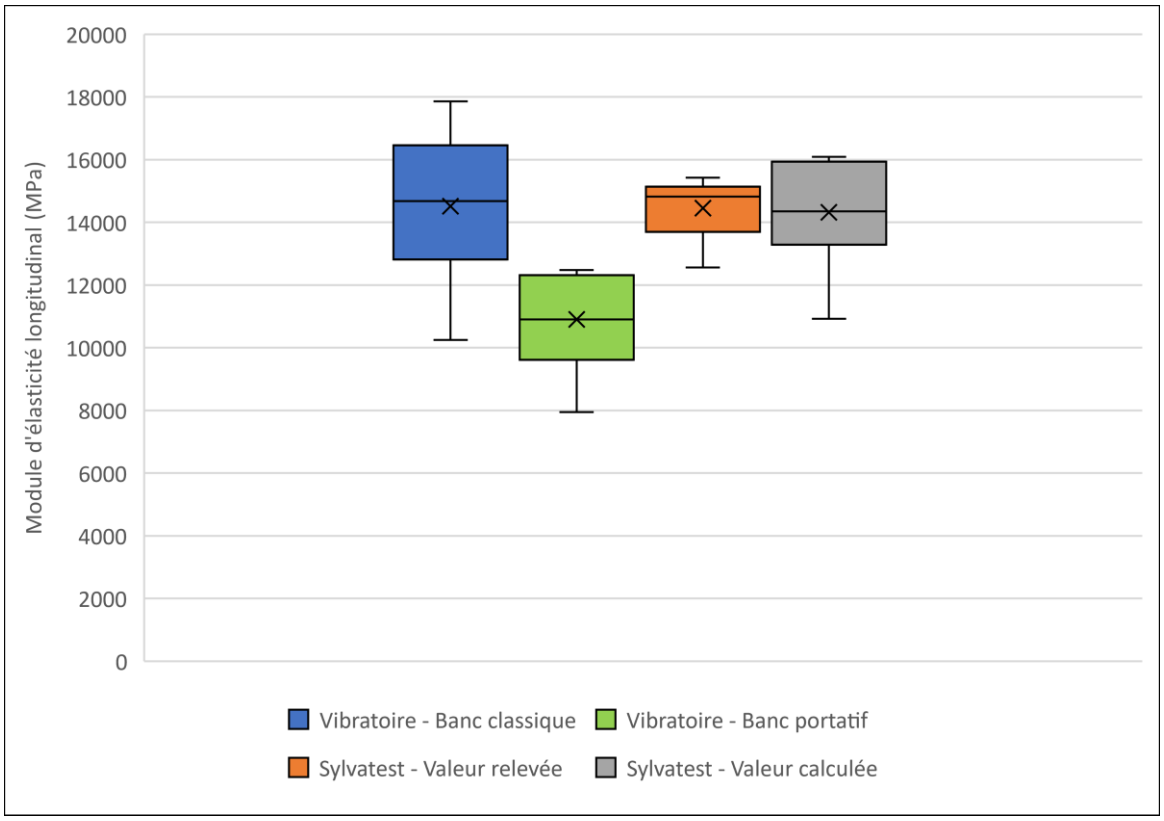


Figure 52 - Dispersion des modules d'élasticités longitudinaux pour les différentes méthodes dans le cadre des chevrons issus de l'opération d'Epinal

À la lumière de ces premiers résultats, trois observations peuvent être formulées :

- Les méthodes nécessitant l'utilisation du Sylvatest® donnent des résultats de module d'élasticité longitudinal plus élevés que la méthode vibratoire, à l'exception de la méthode vibratoire menée sur le banc d'essai fixe dans le cas des chevrons.
- La méthode vibratoire semble être encline à une plus grande dispersion que les méthodes nécessitant l'utilisation du Sylvatest®.
- Les méthodes nécessitant l'utilisation du Sylvatest® sont cohérentes entre elles.

La première observation permet de retrouver la tendance observée sur le gisement de bois issu de l'opération de Remiremont. La différence de résultat que l'on peut observer dans le cadre de la méthode vibratoire menée sur le banc d'essai fixe pour le lot de chevron peut être expliquée par la longueur utile de certains chevrons. La longueur minimale pour le banc d'essai fixe étant limitée à 4 mètres, certains chevrons ne peuvent être placés de manière optimale sur le banc d'essai fixe. Ce mauvais positionnement va alors entrainer des conséquences sur les résultats obtenus. Cette observation permet d'étayer l'hypothèse selon laquelle l'utilisation d'un banc portatif pour les mesures vibratoires est une pratique pertinente. Ce banc permettant la mesure de bois de longueur réduite.

La seconde observation peut s'expliquer par les nombreux facteurs influençant la méthode vibratoire, comme indiqué au chapitre 4.2.1.1.

La troisième affirmation est rassurante vis-à-vis des résultats donnés par l'appareil malgré leur légère différence vis-à-vis des résultats obtenus par le calcul, notamment dans le cadre du lot de solive. Cette différence peut s'expliquer par le fait que l'appareil prend en considération la masse volumique moyenne de l'essence et non la masse volumique réelle de l'échantillon mesuré mais également l'amortissement du signal sonore, comme indiqué au chapitre 4.2.1.1. Cette différence est moins marquée dans le cadre du lot de chevron car les masses volumiques relatives au chevron sont en majeure partie inférieure à la masse volumique de référence prise pour le sapin, à savoir 450 kg/m^3.

Une fois les valeurs du module d'élasticité longitudinal obtenues, il est possible de procéder aux tests destructifs. Ceux-ci permettent de déterminer avec précision le module d'élasticité longitudinal de chaque bois ainsi que la valeur de la résistance à la flexion. Les résultats bruts sont présentés dans le (Tableau 15).

	N°	Test destructif		
		Résistance à la flexion : N/mm²	Module d'Young axial : N/mm²	Humidité : %
SOLIVES	1	51,61	14714	11,2
	2	31,77	10868	10,9
	3	29,45	14853	10,5
	4	30,11	13353	10,4
	5	24,24	12532	10,7
	6	20,97	10770	11,0
	7	42,90	15229	10,5
	8	20,56	9291	10,7
	9	42,37	13031	10,6
	10	36,93	12580	10,9
	MOY	**33,09**	**12722**	**10,7**
	ECART TYPE	**10,25**	**1954**	**0,2**
CHEVRONS	1	35,60	14026	9,8
	2	21,69	9836	10,0
	4	41,67	12138	10,3
	5	22,36	9987	10,1
	6	35,67	11476	9,8
	7	44,58	12143	10,2
	8	20,51	7925	10,0
	9	47,08	12333	10,0
	10	23,88	7707	10,2
	MOY	**32,56**	**10841**	**10,0**
	ECART TYPE	**10,61**	**2128**	**0,2**

Tableau 15 - Résultat des tests destructifs pour les bois issus de l'opération d'Epinal

Les essais et les calculs sont réalisés conformément à la démarche décrite au travers du chapitre 3.4.1.1. Les résultats présentés prennent bien en considération l'humidité ainsi que le facteur k_l relatif à la hauteur des éléments, décrit au travers de la norme NF EN 384 [NF EN 384+A2]. La (Figure 53) permet de visualiser la dispersion des modules d'élasticités longitudinaux dans le cadre des différentes méthodes non destructives et de la méthode destructive pour le lot de solive et la (Figure 54) permet de visualiser la dispersion des modules d'élasticités longitudinaux dans le cadre des différentes méthodes non destructives et de la méthode destructive pour le lot de chevrons.

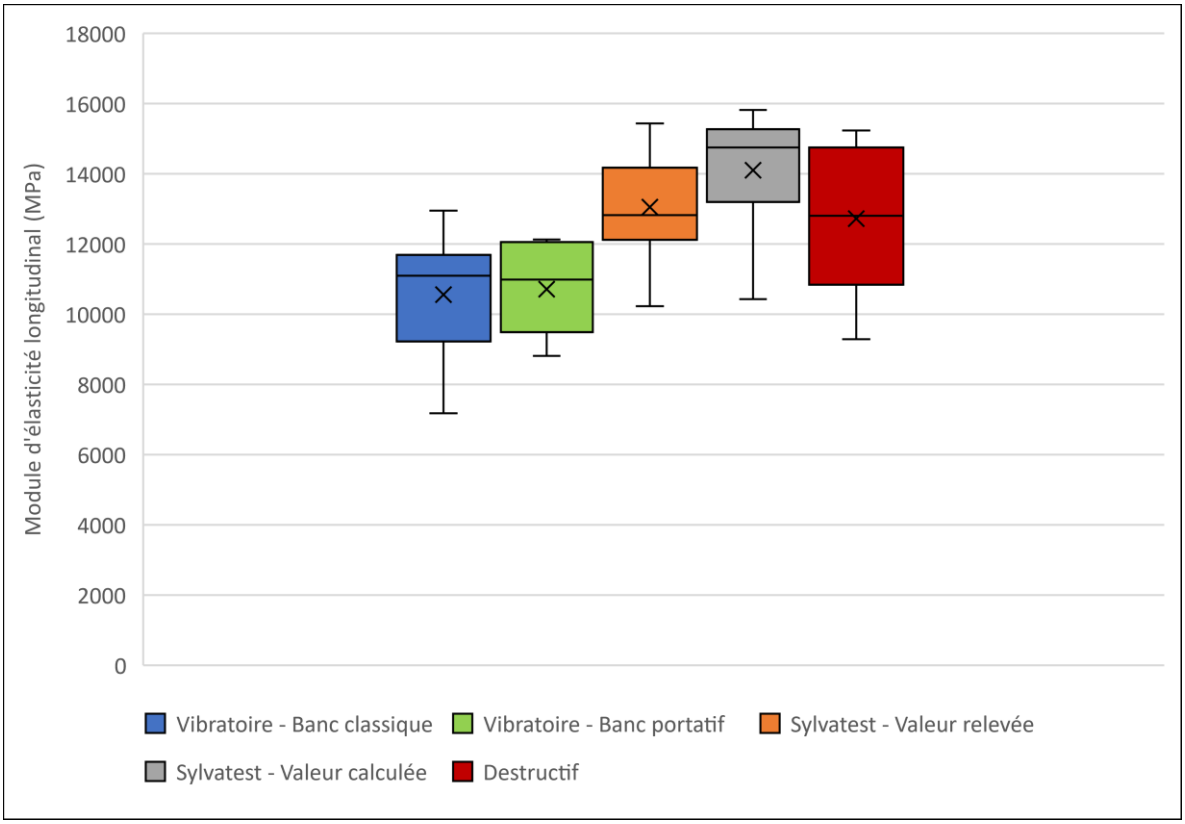


Figure 53 - Dispersion des modules d'élasticités longitudinaux pour les différentes méthodes non destructives et de la méthode destructive dans le cadre du lot de solive issu de l'opération d'Epinal

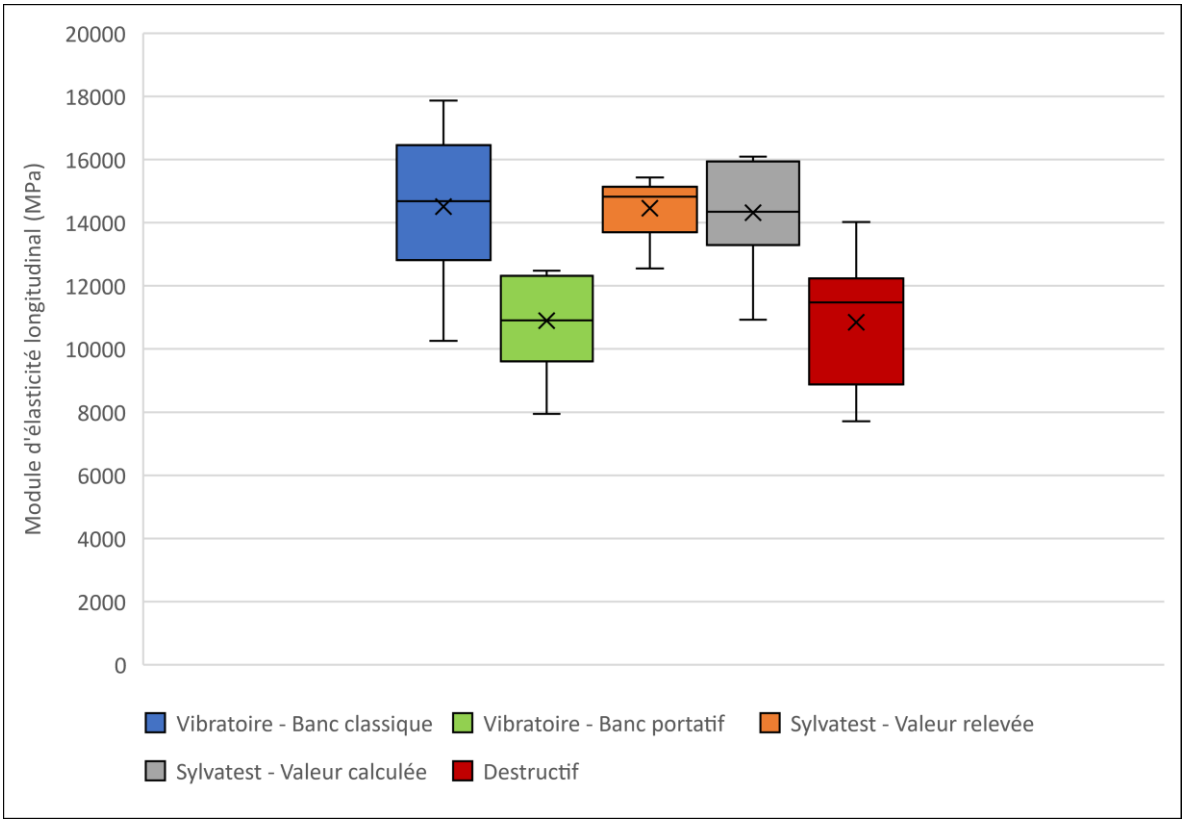


Figure 54 - Dispersion des modules d'élasticités longitudinaux pour les différentes méthodes non destructives et de la méthode destructive dans le cadre du lot de chevron issu de l'opération d'Epinal

À la lumière de ces résultats, deux observations peuvent être formulées :

- On retrouve la tendance de surestimation du module d'élasticité longitudinal par les méthodes nécessitant l'utilisation du Sylvatest® et la tendance à la sous-estimation par les méthodes vibratoires, observées dans le cadre de l'étude menée sur le gisement de bois de Remiremont.
- Les valeurs de résistance à la flexion valeurs de module d'élasticité longitudinal obtenues dans le cadre des essais destructifs admettent une forte dispersion, à l'instar de celles trouvées dans le cadre de l'opération de Remiremont.

La première affirmation est tout de même à nuancer. Pour son étude, il est intéressant d'analyser la comparaison des valeurs des médianes et des moyennes de module d'élasticité longitudinal relatif aux méthodes non destructives à la valeur de la médiane et de la moyenne de module d'élasticité longitudinal relatif à la méthode destructive. L'intégralité des informations requises pour cette analyse est présentée dans le (Tableau 16).

	Méthode	Ecart absolu avec la méthode destructive - Médiane : N/mm²	Ecart absolu avec la méthode destructive - Moyenne : N/mm²	Ecart relatif - Médiane : %	Ecart relatif - Moyenne : %
Solives	Vibratoire - Banc classique	-1713	-2168	-13,4	-17,0
	Vibratoire - Banc portatif	-1819	-2010	-14,2	-15,8
	Sylvatest - Valeur relevée	16	326	0,13	0,13
	Sylvatest - Valeur calculée	1942	1379	15,2	10,8
Chevrons	Vibratoire - Banc classique	3206	3669	27,9	33,8
	Vibratoire - Banc portatif	-574	60	-5,0	0,6
	Sylvatest - Valeur relevée	3343	3614	29,1	33,3
	Sylvatest - Valeur calculée	2873	3477	25,0	32,1

Tableau 16 - Comparaison des méthodes non destructives à la méthode destructive par le calcul des écarts relatifs dans le cadre de la médiane et de la moyenne pour les bois issus de l'opération d'Epinal

Les méthodes nécessitant l'utilisation du Sylvatest® surestime systématiquement le module d'élasticité longitudinal. Cette surestimation est plus modérée dans le cadre du lot de solive que dans le cadre du lot de chevron. Cette différence peut s'expliquer en partie par le fait que les chevrons présentent plus de singularités au niveau local que les solives. Ces singularités ont un impact direct sur les résultats destructifs, ce qui amène nécessairement une différence de résultats plus important dans le cadre du lot de chevron que dans le cadre du lot de solive.

Dans le cadre de la méthode vibratoire, on retrouve la tendance à la sous-estimation du module d'élasticité longitudinal pour le lot de solive. La mise en œuvre de la méthode vibratoire sur le banc d'essai portatif ne semble pas amener de problématique. Pour le lot de chevron, la tendance à la sous-estimation est moins marquée, bien au contraire. Les écarts relatifs positifs obtenus dans le cadre de la méthode vibratoire menée sur le banc d'essai fixe semblent bien indiquer qu'il y a eu une problématique dans sa mise en œuvre, à la vue des écarts relatifs obtenus dans le cadre de la méthode vibratoire menée sur le banc d'essai portatif. Dans le cadre de la méthode vibratoire menée sur le banc

portatif, l''approche par la médiane montre une sous-estimation plus modérée (-5,0 %) que dans le cadre du lot de solive. L'approche par la moyenne montre même une surestimation (+0,6 %). Ces résultats s'expliquent par la forte dispersion des valeurs destructives, qui exercent une influence plus significative sur la moyenne que sur la médiane mais également par l'état général des bois comme il l'a été mentionné auparavant. Dans le cadre du lot de chevron, les méthodes non destructives sont plus précises, car moins encline à l'influence des singularités des éléments, mais moins justes que la méthode destructive qui reste la méthode de référence dans l'évaluation du module d'élasticité longitudinal.

Une fois cette première analyse réalisée, il faut s'intéresser à la corrélation entre les méthodes non destructives et la méthode destructive. Les corrélations entre les méthodes non destructives et la méthode destructive dans le cadre du lot de solive sont présentées en (Figure 55) tandis que les corrélations entre les méthodes non destructives et la méthode destructive dans le cadre du lot de chevron sont présentées en (Figure 56).

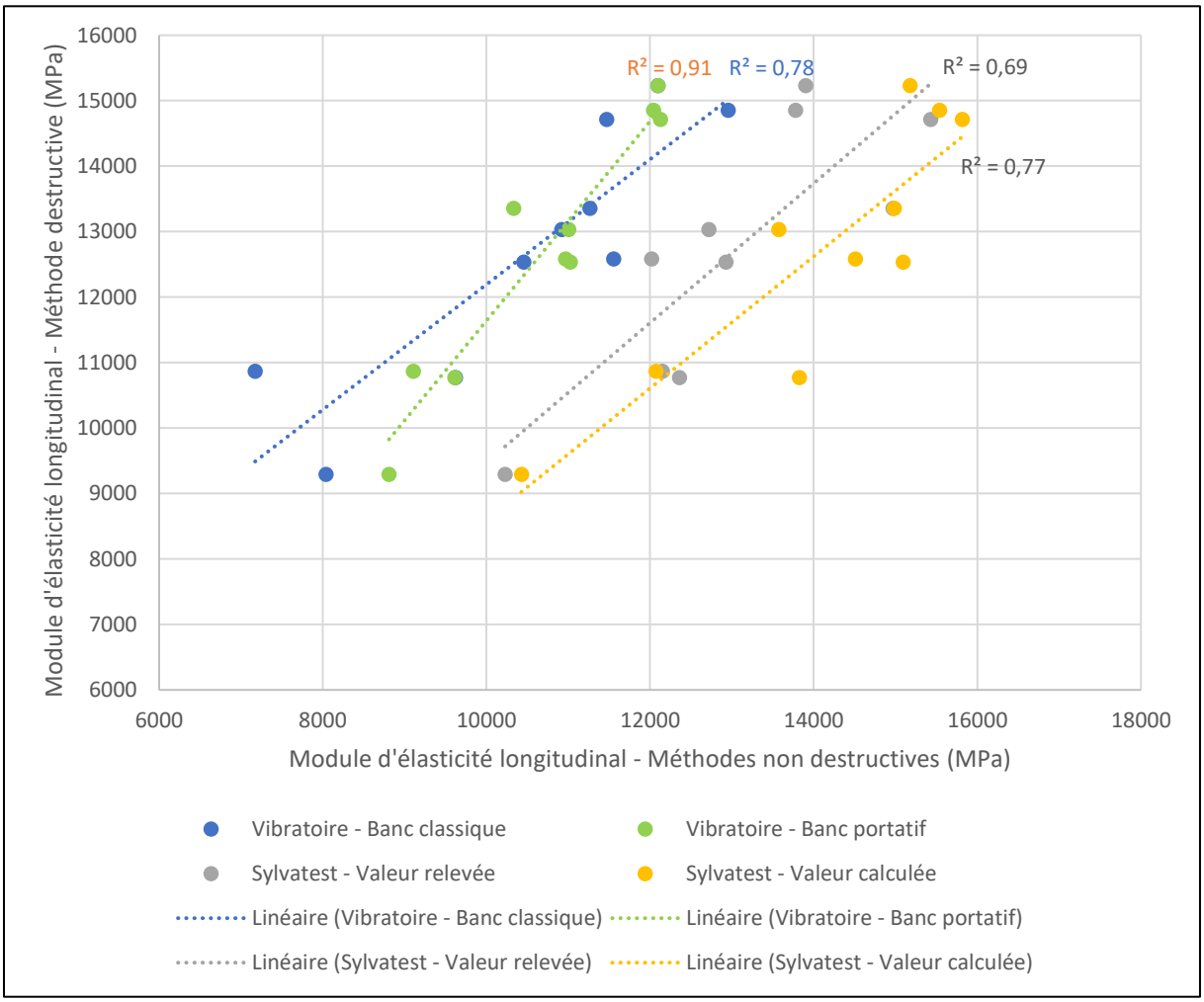


Figure 55 - Corrélation entre les méthodes non destructives et la méthode destructive pour le module d'élasticité longitudinal dans le cadre du lot de solive issu de l'opération d'Epinal

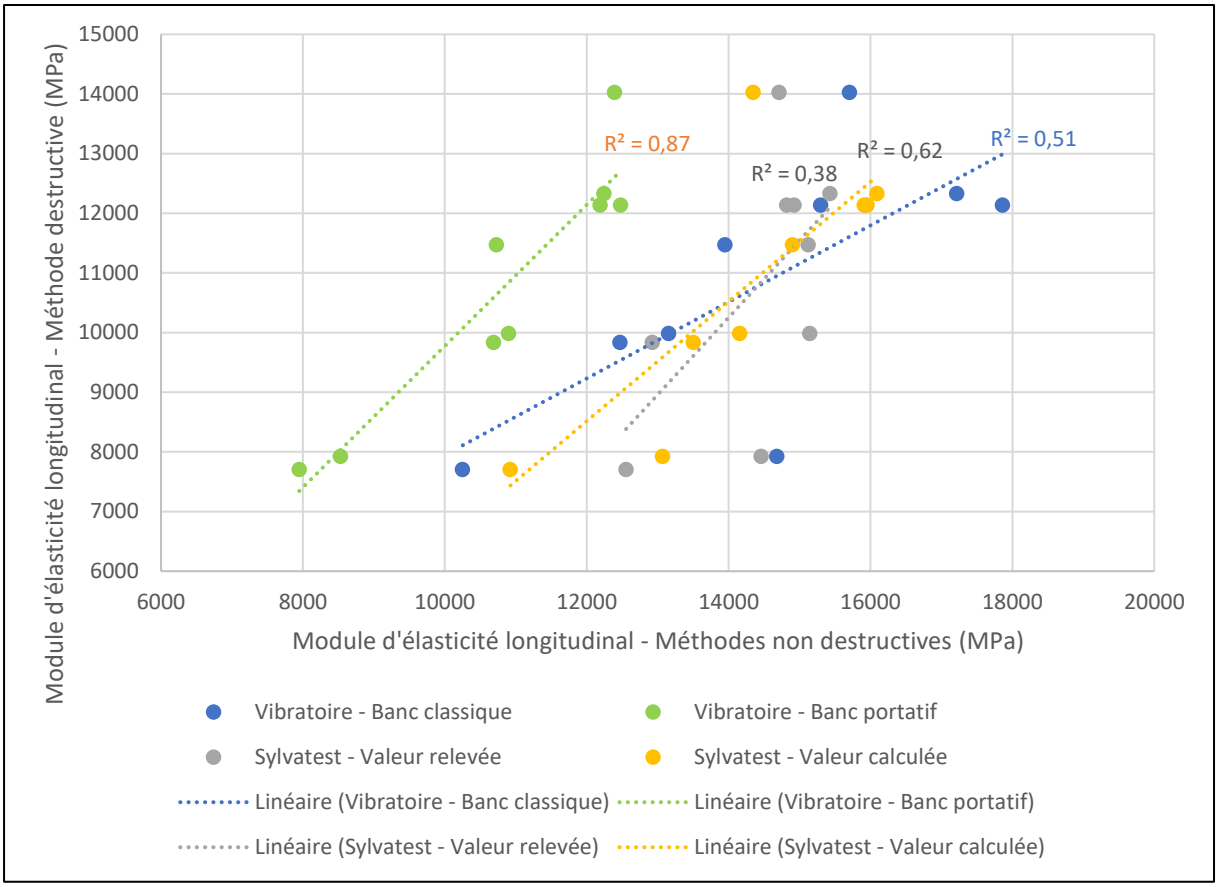


Figure 56 - Corrélation entre les méthodes non destructives et la méthode destructive pour le module d'élasticité longitudinal dans le cadre du lot de chevron issu de l'opération d'Epinal

Au travers de la (Figure 55), les quatre nuages de points montrent une relation globalement linéaire entre les méthodes non destructives et la méthode destructive. La dispersion est tout de même plus marquée dans le cadre de la méthode vibratoire menée sur le banc d'essai fixe et pour les méthodes nécessitant l'utilisation du Sylvatest®. En s'intéressant aux coefficients de détermination, qui indiquent la qualité des régressions, la méthode vibratoire menée sur le banc d'essai portatif a tendance à mieux prédire le module d'élasticité longitudinal que les autres méthodes.

Au travers de la (Figure 56), les méthodes vibratoires et la méthode Sylvatest® – Valeur calculée montrent une relation globalement linéaire par rapport à la méthode destructive. Pour la méthode Sylvatest® – Valeur relevée la relation linéaire est moins évidente. On peut rapporter ce fait à l'état général des chevrons qui va entrainer des conséquences dans la valeur donnée par l'appareil. Cette tendance est moins marquée dans le cadre de la méthode Sylvatest® – Valeur calculée car on réimplémente une partie des singularités de l'élément par la réintroduction de la masse volumique réelle de l'élément. En s'intéressant aux coefficients de détermination, la méthode vibratoire menée sur le banc d'essai portatif a encore une fois tendance à mieux prédire le module d'élasticité longitudinal que les autres méthodes.

Au travers des différents résultats présentés, pour le gisement de bois issu de l'opération d'Epinal, la méthode vibratoire semble être la plus fiable dans l'estimation du module d'élasticité longitudinal, notamment lorsqu'elle est menée sur le banc d'essai portatif. Cette tendance étant confortée par le fait que la méthode vibratoire sous-estime le module d'élasticité longitudinal.

Les résultats obtenus dans le cadre du gisement de bois de l'opération de Remiremont ont donc de nouveau été retrouvés sur un gisement de bois en provenance d'une autre opération. A la lumière de cette étude, la méthode vibratoire apparaît comme la plus pertinente pour la mesure non-destructive du module d'élasticité longitudinal des bois de réemploi. Elle présente en effet un caractère sécuritaire, en fournissant des valeurs généralement plus proches, et inférieurs aux valeurs réelles, a contrario de la méthode fondée sur l'utilisation des ondes ultrasonores. Cette affirmation doit néanmoins être nuancée au regard du nombre d'échantillons testés lors de cette étude comparative. D'autant que le lot de chevron, met en évidence le caractère hétérogène du matériau bois pour un lot issu d'une même provenance, voir au sein d'un même échantillon. Il est bon de rappeler que dans le cadre des bois de réemploi, chaque gisement n'a pas été mis en œuvre à la même période ou n'a pas subi la même vie en œuvre, autant de paramètres qui vont avoir une influence sur les propriétés physiques des bois. Il est donc essentiel de mener des études complémentaires avec d'autres gisements pour conclure quant à la pérennité de l'utilisation de la technologie vibratoire dans le cadre des bois de réemploi.

4.3- Analyse de cycle de vie

4.3.1- Scénarios de réemploi

A travers ce chapitre, il s'agit de définir la notion de scénario de réemploi et de montrer comment celui-ci peut être modélisé au moyen d'une analyse de cycle de vie.

4.3.1.1- Les étapes nécessaires au calcul du coût carbone pour les matériaux de réemploi

Tout d'abord, les scénarios de réemploi se distinguent des hypothèses retenues dans le cadre de la Réglementation Environnementale 2020. Pour les éléments issus du réemploi, seules les phases A1 à A4 du cycle de vie diffèrent de celles d'un produit neuf.

À partir de la phase A5, les hypothèses retenues sont en effet identiques à celles applicables à un matériau neuf manufacturé. Le matériau de réemploi présente les mêmes conditions de mise en œuvre qu'un produit neuf, dans la mesure où il doit en constituer l'équivalent fonctionnel.

Il est également associé aux mêmes scénarios d'utilisation et de fin de vie, conformément aux dispositions de la norme NF EN 15804+A2/CN. À titre de rappel, pour les matériaux structurels, la phase d'utilisation est considérée comme nulle, la durée de vie du produit étant assimilée à celle de l'ouvrage. Les scénarios de fin de vie pour un produit bois sont, eux aussi, identiques à ceux définis par cette même norme.

Ainsi, les phases comprises entre A5 et C4 sont équivalentes à celles d'un produit neuf manufacturé. Le module D fera, quant à lui, l'objet d'un traitement spécifique. Cette approche se justifie d'autant plus que, dans le cadre d'une analyse de cycle de vie dynamique appliquée à un matériau structurel — comme dans cette étude — ce sont principalement les phases amont du cycle de vie qui déterminent l'impact carbone du matériau.

Dans le cadre de la norme NF EN 15804+A2/CN, l'obligation relative au calcul de l'impact carbone associé à la production d'un matériau — correspondant aux phases A1 à A3 — porte uniquement sur la somme de ces trois phases. Toutefois, une analyse détaillée phase par phase apparaît plus pertinente, dans la mesure où elle permet de mener une analyse de gravité permettant d'identifier la contribution spécifique de chacune d'elles au résultat global, notamment dans le cas des matériaux issus du réemploi.

4.3.1.1.1- La phase A1

La phase A1, correspondant à l'approvisionnement en matière première dans le cas d'un produit neuf, est assimilée, pour un matériau de réemploi, à la phase d'approvisionnement en élément

récupéré. Toutefois, conformément à la méthodologie définie par la norme NF EN 15804+A2/CN, ainsi qu'aux précisions apportées en annexe J du règlement de la base INIES, voir l'{Annexe 5}, la phase A1 doit être considérée comme nulle dans le cas d'un matériau de réemploi.

En effet, bien que la logique intuitive conduise à imputer la dépose sélective à cette phase, cette opération est déjà intégrée dans le cycle de vie initial du produit, via la phase C1 correspondant à la déconstruction ou à la démolition. Il ne saurait donc y avoir de double comptabilisation. Dans le cas des matériaux biosourcés de réemploi, et notamment des éléments en bois, il convient néanmoins d'intégrer le carbone biogénique stocké. Cette prise en compte doit être réalisée conformément aux dispositions de la norme NF EN 16449 [NF EN 16449]. Selon cette norme, le calcul doit être effectué à l'aide de l'équation (14) :

$$P_{CO_2} = \frac{44}{12} . c_f . \frac{P_w . V_w}{1 + \frac{w}{100}} \qquad (14)$$

Avec :

P_{CO2} : carbone biogénique oxydé sous forme de dioxyde de carbone émis par le système de produits dans l'atmosphère (kg) ;

C_f : fraction carbonée de la biomasse ligneuse (masse anhydre), valeur par défaut 0,5 ;

w : teneur en humidité du produit (%) ;

P_w : masse volumique de la biomasse ligneuse du produit, à la teneur en humidité w (kg/m^3) ;

V_w : volume du produit en bois massif, à la teneur en humidité w (m^3).

Il convient de noter que, pour les produits dérivés du bois, tels que les panneaux OSB ou les panneaux contreplaqués, le volume de bois V_w correspond au produit du volume brut de l'élément considéré par le pourcentage de bois dans le produit comme l'illustre l'équation (15).

$$V_w = VP . P_b \qquad (15)$$

Avec :

V_w : la teneur volumique en bois (m^3) ;

VP : le volume brut du produit dérivé du bois (m^3) ;

P_b : le pourcentage de bois dans le produit (%).

La prise en compte du carbone biogénique est essentielle, dans la mesure où elle permet d'assurer la continuité du stockage du carbone contenu dans le matériau et, par conséquent, de refléter son intérêt

environnemental. En pratique, ce carbone doit être intégré de manière explicite dans les logiciels d'analyse de cycle de vie, aucune fonctionnalité dédiée n'étant actuellement prévue à cet effet, notamment dans le logiciel SimaPro qui a été utilisé pour modéliser.

Cette nécessité met en évidence une divergence avec la méthodologie définie par la norme NF EN 15804+A2/CN, qui considère cette phase comme présentant un impact carbone nul. Or, dans le cas des matériaux biosourcés, une telle hypothèse apparaît pénalisante, car elle ne reflète pas la réalité du stockage biogénique. Cette situation souligne ainsi les ajustements méthodologiques qui restent à opérer afin d'assurer une prise en compte plus juste des matériaux biosourcés et issus du réemploi dans les calculs d'ACV.

4.3.1.1.2- La phase A2

La phase A2, correspondant au transport des matières premières dans le cas d'un produit neuf, est assimilée, dans le cadre du réemploi, au transport des éléments récupérés. Cette phase dépend étroitement du maillage territorial du réemploi ainsi que de l'organisation logistique mise en place. Plusieurs configurations sont ainsi envisageables, conduisant à des impacts différenciés, comme le rappelle l'annexe J du règlement de la base INIES :

- Cas 1 : le site de stockage temporaire est distinct du site de reconditionnement. Dans cette configuration, seul le transport entre le site de stockage temporaire et le site de reconditionnement est pris en compte au titre de la phase A2. Le transport entre le chantier de déconstruction et le site de stockage temporaire est en effet attribué au premier cycle de vie du produit, via la phase C2, et ne doit donc pas être comptabilisé de nouveau.

- Cas 2 : le site de stockage temporaire et le site de reconditionnement sont confondus. Dans ce cas, la phase A2 est considérée comme nulle. Le transport entre le chantier de déconstruction et le site de reconditionnement relève du premier cycle de vie du produit, par l'intermédiaire de la phase C2, et ne saurait être imputé au second cycle.

- Cas 3 : le transport est réalisé directement entre un chantier de déconstruction et un chantier de construction. Dans cette situation, il convient de comptabiliser la distance moyenne entre les deux chantiers, dont est déduite la distance correspondant à la phase C2 du premier cycle de vie du matériau. Si cette opération conduit à une valeur négative, l'impact associé à la phase A2 est considéré comme nul.

Au regard de ces différents cas, il apparaît que le réemploi gagne à s'inscrire dans une logique d'ancrage territorial local, conformément aux objectifs portés par la REP PMCB. Toutefois, dans la pratique, cette territorialisation n'est pas systématiquement observée. De nombreuses plateformes numériques d'échange ont en effet émergé ces dernières années et sont mobilisées par des acteurs souhaitant réduire l'empreinte carbone de leurs opérations de construction neuve. Il convient néanmoins de veiller à ce que le développement de ces dispositifs ne conduise pas à la constitution d'un écosystème du réemploi générant des incohérences environnementales, parfois plus défavorables que celles associées à l'utilisation de matériaux neufs. Si la structuration de la filière doit s'envisager à l'échelle nationale, son fonctionnement opérationnel doit, quant à lui, s'appuyer sur des logiques locales afin de maximiser les bénéfices environnementaux, économiques et sociaux.

Afin d'évaluer de manière pertinente l'importance de l'impact carbone associé à la phase A2, il serait souhaitable de réaliser de manière systématique une analyse de gravité et une analyse de sensibilité, centrée sur cette phase A2. Une telle démarche permettrait d'apprécier l'influence des hypothèses de transport sur le résultat global de l'ACV. Toutefois, cette approche demeure exigeante, tant en termes d'expertise méthodologique que de moyens financiers, ce qui limite son accessibilité pour un certain nombre d'acteurs. Cette démarche n'est pourtant pas à la portée de tous les organismes car elle demande une réelle expertise sur le sujet et des coûts induits importants.

4.3.1.1.3- La phase A3

La phase A3, correspondant à l'étape de fabrication dans le cas d'un produit neuf, est assimilée, dans le cadre du réemploi, à la phase de reconditionnement. Le reconditionnement regroupe l'ensemble des opérations et traitements nécessaires pour permettre la remise en œuvre du matériau dans un second cycle de vie. Il peut s'agir d'actions de tri, de nettoyage, de découpe, d'usinage, de contrôle ou encore de requalification mécanique. Il convient également d'intégrer les éventuels emballages requis pour le transport ou le stockage du produit, ceux-ci participant aux impacts associés à cette phase. Dans le cas d'éléments structurels en bois, la (Figure 57) présente un arbre de conséquences relatif aux différentes opérations de reconditionnement du produit, permettant d'en structurer l'analyse.

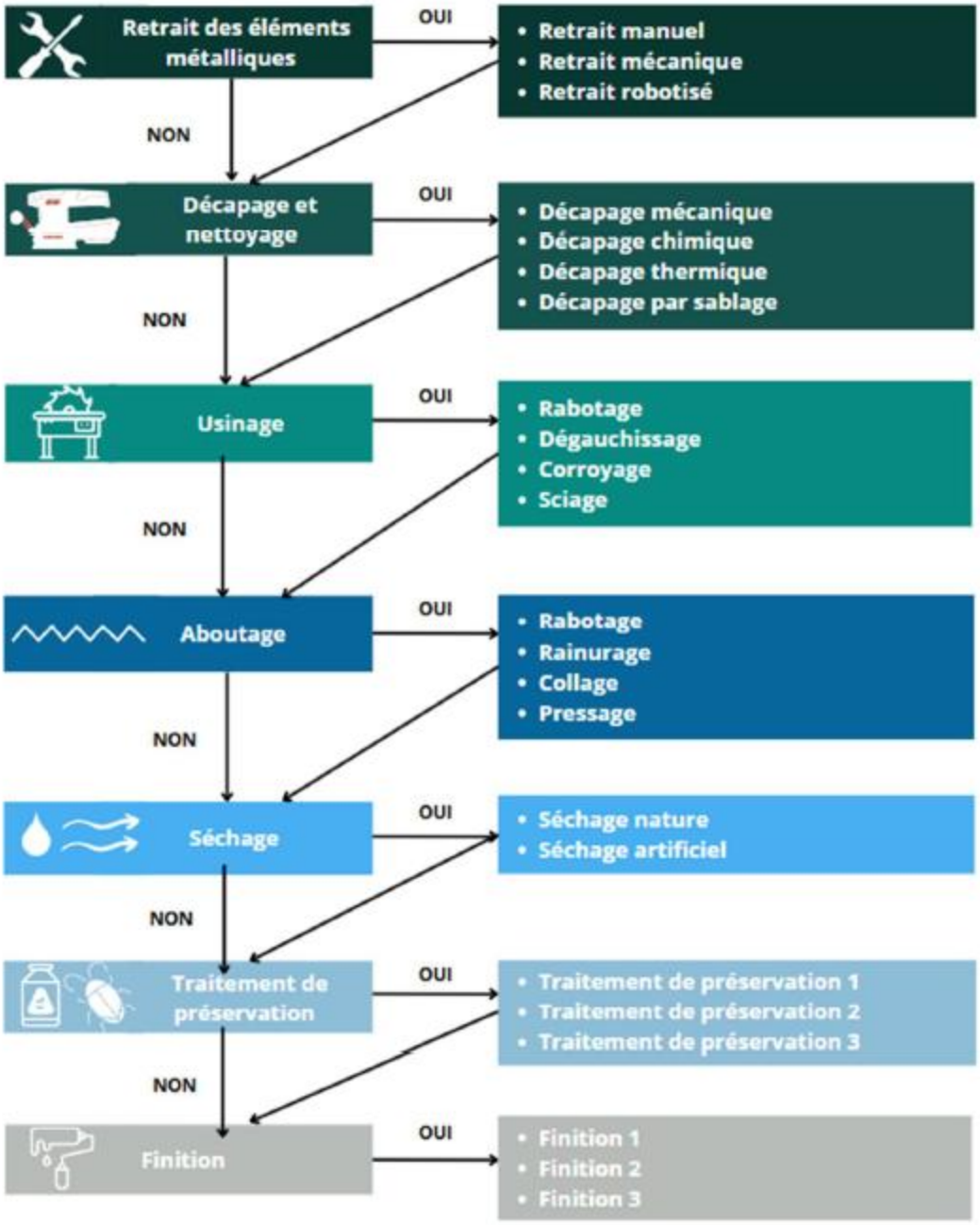


Figure 57 - Arbre de conséquences lié au reconditionnement d'un bois structurel pour son réemploi

L'objectif, à terme, de l'analyse de la phase A_3 est d'identifier le seuil à partir duquel le réemploi cesse d'être pertinent au regard des opérations de reconditionnement nécessaires. Autrement dit, il s'agit de déterminer le point d'équilibre au-delà duquel les impacts générés par les différentes étapes internes à cette phase compromettent l'intérêt environnemental du réemploi. Toutefois, cette évaluation ne saurait se limiter au seul indicateur carbone. Il convient d'intégrer une approche multicritère, en prenant en considération d'autres impacts environnementaux susceptibles d'être induits par les opérations de reconditionnement. À titre d'exemple, l'utilisation de substances potentiellement dangereuses pour l'environnement ou la santé humaine — notamment dans le cadre des opérations de finition, de collage ou d'aboutage — peut altérer significativement le bilan global.

Bien que ces indicateurs ne soient pas systématiquement obligatoires au sens de la norme NF EN 15804+A2/CN, ils constituent néanmoins des outils d'aide à la décision particulièrement pertinents dans une démarche globale d'évaluation environnementale.

4.3.1.1.4- La phase A4

La phase A_4, correspondant au transport du produit vers le site de construction dans le cas d'un matériau neuf, conserve la même fonction dans le cadre du réemploi. Elle modélise le transport de l'élément reconditionné — ou directement récupéré — jusqu'au chantier de construction. Comme pour la phase A2, l'impact associé dépend étroitement du maillage territorial du réemploi ainsi que de l'organisation logistique retenue. Deux configurations principales peuvent être distinguées :

- Cas 1 : présence d'un site de reconditionnement : le transport s'effectue entre le site de reconditionnement et le chantier de construction. L'impact carbone imputé à la phase A4 correspond alors à ce transport.
- Cas 2 : absence de site de reconditionnement : le transport est réalisé directement entre le chantier de déconstruction et le chantier de construction. Dans ce cas, l'impact carbone associé à la phase A4 est considéré comme nul, le transport ayant déjà été imputé à la phase A2 selon les règles d'allocation définies précédemment.

À l'instar de la phase A2, ces configurations illustrent l'importance d'un ancrage territorial local du réemploi. La maîtrise des distances parcourues conditionne directement l'ampleur de l'impact associé à la phase A4 au sein du cycle de vie du matériau.

4.3.1.1.5- Le module D

Le module D d'une ACV correspond aux bénéfices et charges potentiels au-delà du système étudié, c'est-à-dire au-delà du cycle de vie du produit considéré. Conformément à l'annexe J du règlement de la base INIES, le module D est calculé selon les mêmes principes que pour un produit neuf, en cohérence avec les scénarios retenus pour les modules C1 à C4. Toutefois, dans le cas des produits bois, les scénarios de fin de vie définis au travers des phases C1 à C4 ne prennent pas explicitement en compte une orientation vers le réemploi. Cette absence entre en tension avec le principe de valorisation en cascade des produits bois, dont l'objectif est précisément de maximiser les cycles de vie successifs, notamment par le recours au réemploi. Une évolution des scénarios de fin de vie proposés dans le cadre de la norme NF EN 15804+A2/CN apparaît ainsi nécessaire afin d'intégrer explicitement cette logique de prolongation d'usage. Dans cette perspective, le module D pourrait être calculé

conformément à l'équation (16), par analogie avec l'approche actuellement retenue pour les produits recyclés :

$$Module\ D = (Q_{r\ s} - Q_{r\ e}) . (ICV_{m\ r\ s} - A\ x\ ICV_{m\ v}) \quad (16)$$

Avec

$Q_{r,s}$: la quantité de matière réemployée sortante (kg) ;

$Q_{r,e}$: la quantité de matière réemployée entrante (kg) ;

$ICV_{m,r,s}$: l'inventaire de cycle de vie de la matière réemployée sortante ($kg_{CO2,eq}$) ;

$ICV_{m,v}$: l'inventaire de cycle de vie de la matière vierge substituée ($kg_{CO2,eq}$) ;

A : le facteur de qualité de la matière secondaire par rapport à la matière vierge substituée.

Dans le cadre du réemploi d'une solive ayant déjà connu un premier cycle de réemploi antérieur, les termes sont définis comme suit :

- $Q_{r,s}$: la masse de la solive sortante en bois de réemploi, c'est-à-dire la solive entamant son deuxième cycle de vie par réemploi. Ce paramètre est exprimé en kg.
- $Q_{r,e}$: la masse de la solive entrante en bois de réemploi, correspondant à la solive de réemploi entamant son premier cycle de vie par réemploi. Ce paramètre est exprimé en kg.
- $ICV_{m,r,s}$: l'inventaire du cycle de vie de la solive sortante en bois de réemploi, c'est-à-dire les impacts situés au-delà du système étudié. Dans ce cadre, est pris en considération l'impact carbone associé aux étapes éventuelles de reconditionnement et de transport. Pour le calcul du coût carbone du transport, il convient de se référer aux règles méthodologiques décrites au chapitre 4.3.1.1.2. Le carbone biogénique contenu dans la solive doit également être intégré, conformément aux modalités présentées au chapitre 4.3.1.1.1. Selon cette définition, ce terme peut être positif lorsque le coût carbone lié aux opérations de reconditionnement et de transport est supérieur au bénéfice associé au carbone biogénique stocké, ou négatif dans le cas inverse. Ce paramètre est exprimé en kg équivalent dioxyde de carbone ($kg_{CO2,eq}$).
- $ICV_{m,v}$: l'inventaire du cycle de vie de la matière vierge substituée, c'est-à-dire du bois brut non transformé. Dans ce cadre, sont pris en considération l'impact carbone associé à l'étape d'extraction du bois, ainsi que le carbone biogénique contenu dans ce matériau brut conformément aux modalités décrites au chapitre 4.3.1.1.1. Selon cette définition, ce terme peut être positif lorsque le coût carbone lié à l'extraction du bois est supérieur au bénéfice associé au carbone biogénique stocké, ou négatif dans le cas inverse. Ce paramètre est exprimé en $kg_{CO2,eq}$.

- A : le facteur de qualité de la solive de réemploi entamant son deuxième cycle de vie, rapporté à celui du bois brut non transformé substitué.

Dans le cadre de cette étude, le facteur A constitue un paramètre essentiel à considérer. Selon la définition communément admise, il permet d'évaluer la dépréciation qualitative du matériau brut par rapport au matériau de réemploi. Dans le cas d'éléments structurels en bois issus du réemploi, ce facteur renvoie notamment à la dégradation potentielle de la qualité mécanique du matériau ou à la présence d'éléments indésirables susceptibles d'altérer sa durabilité et son intégrité, telles que des attaques biologiques (insectes ou des champignons). Il peut également traduire la présence éventuelle de traitements ou de produits appliqués lors du premier cycle de vie – par exemple des produits de finition ou de préservation – susceptibles de limiter ou de contraindre le réemploi. Ce paramètre est ainsi directement lié au travail de caractérisation préalable du matériau.

Par ailleurs, le facteur $ICV_{m, r, s}$ présente certaines limites inhérentes à sa définition. En effet, l'expression actuelle de la formule ne prend pas en considération la question du maintien du carbone biogénique dans le temps. Plus précisément, elle n'intègre pas le principe de valorisation séquentielle des éléments en bois, ou principe de valorisation en cascade, qui vise à maximiser les cycles de vie successifs d'un même matériau. Dans le cadre de l'analyse des cycles de vie successifs d'un élément en bois, cette absence constitue une limite méthodologique. En effet, la formulation actuelle ne tient pas compte du nombre de cycles de vie antérieurs du matériau. Par ailleurs, la présence du facteur A dans l'équation conduit essentiellement à traduire la dépréciation qualitative du matériau transformé par rapport à la matière première vierge, sans valoriser explicitement la prolongation du stockage du carbone biogénique dans le temps. Afin de pallier cette limite, il serait pertinent d'introduire un nouveau paramètre, que l'on pourrait désigner comme un « facteur B », associé au terme $ICV_{m, r, s}$ et plus particulièrement à l'impact environnemental du carbone biogénique de l'élément bois. Ce facteur serait directement corrélé au nombre de cycles de vie antérieurs du produit bois et prendrait une valeur supérieure à 1, dans le but de valoriser le maintien du carbone biogénique sur une durée prolongée. Une investigation méthodologique approfondie serait toutefois nécessaire afin de définir précisément ce facteur ainsi que les valeurs susceptibles de lui être associées. Dans le cadre de la présente étude, le facteur B n'est donc pas pris en compte, en raison du manque de connaissances consolidées à ce jour sur cette question.

En appliquant cette formule au cas d'une poutre en bois de réemploi, on considère une poutre ayant déjà été utilisé lors d'un premier cycle de vie en réemploi — c'est-à-dire un élément ayant déjà connu un premier cycle de vie en réemploi et étant mobilisé dans un second cycle de vie en réemploi — il

apparaît que l'analyse de l'expression mathématique conduit à identifier huit configurations possibles pour la valeur du module D :

- Cas 1 : $Q_{r,s} = Q_{r,e}$. Le premier cas correspond à une situation dans laquelle aucune perte de matière n'est observée entre le passage du premier cycle de vie et le second. Dans cette configuration, le module D serait alors considéré comme nul, en vertu du premier terme de l'équation. Bien que cette approche soit conforme aux prescriptions normatives, sa pertinence environnementale peut être discutée. En effet, elle conduirait à considérer que le réemploi successif d'un produit bois n'engendre ni bénéfice ni désavantage environnemental. Une telle interprétation apparaît toutefois en décalage avec les principes de valorisation en cascade du bois. Par ailleurs, dans la pratique, les opérations de réemploi s'accompagnent quasi systématiquement de pertes de matière. Celles-ci peuvent survenir lors de la dépose sélective de la poutre en bois ou au cours des différentes étapes de reconditionnement. Dans ces conditions, le premier terme de la formule tend généralement à être négatif. Dès lors, la valeur du module D dépend principalement du second terme de l'équation, ce que mettent en évidence les cas analysés ci-après.

- Cas 2 : $ICV_{m,r,s} = A \cdot ICV_{m,v}$. Le deuxième cas présente une situation analogue au premier : le module D est considéré comme nul, ce qui signifie que le réemploi successif du produit bois n'apporte ni gain ni impact négatif du point de vue environnemental.

- Cas 3 : $ICV_{m,r,s} > 0$ et $ICV_{m,v} < 0$. Dans ce cas, le module D prend une valeur négative. Le second terme de l'équation étant positif, cela indique que le réemploi successif de l'élément bois contribue à un gain environnemental pour le système.

- Cas 4 : $ICV_{m,r,s} < 0$ et $ICV_{m,v} > 0$. Le quatrième cas conduit à un module D positif. Le second terme de la formule étant négatif dans ces conditions, le réemploi successif de l'élément bois représente une charge pour le système, ce qui limite l'intérêt pratique de l'opération.

- Cas 5 : $ICV_{m,r,s} > 0$ et $ICV_{m,v} > 0$ avec $A \cdot ICV_{m,v} > ICV_{m,r,s}$. Ici encore, le module D est positif. Le second terme de l'équation étant négatif, le réemploi successif constitue une charge pour le système, et la pratique n'est pas avantageuse sur le plan environnemental.

- Cas 6 : $ICV_{m,r,s} > 0$ et $ICV_{m,v} > 0$ avec $A \cdot ICV_{m,v} < ICV_{m,r,s}$. Dans ce sixième cas, le module D est négatif. Le second terme de la formule étant positif, le réemploi successif apporte un bénéfice au système, rendant la pratique pertinente et avantageuse.

- Cas 7 : $ICV_{m,r,s} < 0$ et $ICV_{m,v} < 0$ avec A . $ICV_{m,v} > ICV_{m,r,s}$. Le septième cas conduit à un module D négatif. Le second terme étant positif, le réemploi successif représente un gain environnemental, justifiant la pratique.

- Cas 8 : $ICV_{m,r,s} < 0$ et $ICV_{m,v} < 0$ avec A . $ICV_{m,v} < ICV_{m,r,s}$. Dans ce dernier cas, le module D est positif. Le second terme de la formule étant négatif, le réemploi successif constitue une charge pour le système et ne présente pas d'intérêt pratique.

L'hypothèse correspondant au cas 1 semble peu probable, comme le souligne l'argument avancé lors de sa justification. Dans ce contexte, le module D présente un équilibre entre probabilités d'issues positives et négatives.

Il convient néanmoins de noter que les cas 4, 5 et 6 semblent également moins plausibles. En effet, le terme $ICV_{m,v}$, représentant l'inventaire du cycle de vie du bois brut non transformé, est positif dans ces trois situations. Or, ce terme peut être rapproché de la phase A1 des produits bois neufs manufacturés, puisqu'il se rapporte à l'inventaire du cycle de vie lié à l'extraction de la matière première (le bois brut). Une analyse détaillée des données de la phase A1, telle que présentée dans les FDES pour les produits bois neufs manufacturés, montre que le coût carbone de cette phase est, dans la majorité des cas, négatif.

Par conséquent, seuls les cas 2, 3, 7 et 8 apparaissent comme présentant un certain degré de probabilité. À la lumière des résultats obtenus pour ces configurations, il ressort que le réemploi successif d'éléments en bois semble, dans la plupart des cas, apporter un avantage environnemental ou n'entraîner aucune conséquence notable, exception faite du cas 8, pour lequel le module D traduit une charge pour le système.

Ces observations soulignent la nécessité d'un approfondissement de la méthodologie relative au calcul du module D, telle que définie par la norme NF EN 15804+A2/CN, notamment dans le contexte des matériaux bois de réemploi et plus particulièrement pour ceux ayant déjà connu un cycle de vie en réemploi.

4.3.1.2- Les limitations liées aux FDES

Les FDES constituent un outil obligatoire dans le cadre de la réglementation environnementale. Toutefois, lorsqu'il s'agit d'évaluer le réemploi des matériaux, ces documents présentent certaines limites. La méthodologie employée pour leur élaboration s'avère en effet peu adaptée au processus de réemploi, pour plusieurs raisons.

D’une part, les FDES sont conçues spécifiquement pour les acteurs de la réglementation environnementale, tels que les architectes et les bureaux d'études en environnement. D’autre part, elles présentent peu d’intérêt direct pour la maîtrise d’ouvrage dans le cadre d’opérations de réemploi. En effet, produire des FDES pour des éléments de réemploi engendre des coûts importants, difficilement justifiables pour ce type d’organisme.

Les FDES font également fréquemment référence à une mise en œuvre à l'échelle nationale des produits considérés. Cette approche s’oppose directement à l'objectif du réemploi, qui, par nature, doit s'inscrire dans une perspective locale. En effet, comme le précise la REP PMCB, le réemploi doit être envisagé à l’échelle des territoires, en s’ancrant dans des dynamiques locales. Cette démarche implique l’intervention d’éco-organismes, responsables de la gestion en fin de vie des produits de construction, et acteurs du développement du tissu local du réemploi. Leur rôle consiste notamment à renforcer le maillage territorial des points de collecte des éléments réemployables. Cette extension passe non seulement par la création de déchèteries supplémentaires, mais également par le soutien à des structures de l’économie circulaire intervenant dans le secteur du réemploi au niveau local. Il est essentiel de souligner que l'augmentation de la part des matériaux réemployés et réutilisés ne peut se concevoir sans un travail rigoureux et systématique au niveau des territoires, afin d’assurer la cohérence et la faisabilité du réemploi.

Les FDES constituent un outil dont l'efficacité est limitée par une conception et une finalité trop restreinte. Une analyse approfondie des fiches relatives aux matériaux issus de la filière du réemploi, déjà intégrées à la base INIES, voir l’{Annexe 6} et l’{Annexe 7}, révèle plusieurs interrogations quant à leur constitution. Il apparaît que, pour l’ensemble de ces fiches, le module A3, correspondant à la phase de « reconditionnement », présente systématiquement une valeur négative en termes de carbone, malgré la présence de tâches dont l’impact carbone n’est pas nul. Dans cette démarche, les entreprises adoptent une approche méthodique et ingénieuse pour la modélisation, intégrant notamment des éléments biosourcés dans le processus de conditionnement des produits. Par exemple, dans le cas du conditionnement du bloc porte sanitaire et de la façade sanitaire en bois, les éléments utilisés sont en bois, tandis que pour les dalles de moquette, il s’agit de cartons. L’utilisation de ces matériaux biosourcés induit un impact négatif sur le calcul du coût carbone, en raison de l’intégration du carbone biogénique qui leur est associé. Cette observation souligne l’importance d’examiner avec précision les étapes du processus de modélisation et les éléments pris en compte lors de la comptabilisation des FDES. Il apparaît que l’indicateur carbone seul ne garantit pas la pertinence de l’analyse et ne reflète pas nécessairement la valeur relative de l’utilisation d’un produit par rapport à un autre. Il est donc essentiel de dépasser une approche strictement fondée sur le carbone pour adopter une perspective plus holistique, prenant en compte l’ensemble des ressources mobilisées. À titre d’illustration, les

bétons dits « décarbonés » présentent un coût carbone inférieur à celui des bétons traditionnels. Toutefois, une analyse approfondie des ressources nécessaires à leur fabrication révèle des disparités significatives, notamment en termes de consommation d'eau douce et de sable. Or, l'eau douce et le sable sont deux ressources naturelles essentielles actuellement menacées à l'échelle mondiale, ce qui constitue une source de préoccupation majeure.

4.3.2- Inventaire des données

Ce chapitre présente la méthodologie de collecte des données relatives au processus de réemploi des solives en bois, ainsi que leur intérêt pour l'analyse.

4.3.2.1- Collecte des données

Il est important de préciser que l'objectif de cette étude consiste à rassembler un maximum d'informations en vue du calcul du bilan carbone des bois de réemploi, et plus particulièrement pour le scénario de réemploi des bois issus du chantier de Remiremont. Les données collectées concernent les phases A1, A2, A3 et A4 du cycle de vie du produit

4.3.2.1.1- Phase A1

Dans le cadre de l'étude menée sur le projet de construction, la phase A1, correspondant à la dépose sélective des solives bois, a fait l'objet d'une collecte de données. Les informations recueillies sont les suivantes :

- Utilisation d'une scie sabre électrique de la marque MAKITA, modèle DJR187RTE, d'une puissance de 670 W, conçue pour une durée maximale d'utilisation de 4 minutes par solive.

- Utilisation d'un chariot télescopique à diesel, de la marque MANITOU, modèle MT 1335 H 100D, d'une puissance de 75 kW, utilisé pendant 1 minute par solive. Le site MANITOU indique également des émissions de 19 kg_{CO_2}/h et une conso de l'ordre de 7,04 L/h pour l'engin.

Conformément aux dispositions énoncées au paragraphe 4.3.1.1.1, l'étape de dépose sélective ne doit pas être comptabilisée dans la phase A_1. Il reste néanmoins pertinent d'évaluer le coût carbone associé à cette opération et de le comparer à la phase C1 d'un produit neuf manufacturé comparable. Cette approche permet de mettre en évidence les distinctions entre ces deux procédés, qui utilisent des outils et des méthodes différents, et de vérifier que le coût carbone de la dépose sélective est inférieur à celui d'une démolition ou d'une déconstruction « classique ». Cette démarche s'inscrit dans un processus d'amélioration des FDES pour les matériaux de réemploi, par une meilleure prise en compte du coût carbone lié à la dépose sélective.

4.3.2.1.2- Phase A2

Dans le cadre de l'étude menée sur le projet de construction, la phase A2, correspondant au transport des solives bois depuis le chantier de déconstruction jusqu'à l'atelier du charpentier, a fait l'objet d'une collecte de données. Les informations recueillies sont les suivantes :

- Utilisation d'un camion 32 tonnes, conforme à la norme Euro 3, pour un transport effectué sur une distance de 3 kilomètres.

4.3.2.1.3- Phase A3

Dans le cadre de l'étude menée sur le projet de construction, la phase A3, correspondant au reconditionnement des solives bois, et plus particulièrement à leur réusinage au sein de l'entreprise de charpente, a fait l'objet d'une collecte de données. Les informations recueillies sont les suivantes :

- Utilisation d'une tronçonneuse thermique de la marque HUSQVARNA, modèle 365, d'une puissance de 3,6 kW, pour une durée d'utilisation de 2 minutes par solive.

- Utilisation d'une scie de débit électrique de la marque Hundegger, modèle SC3-200, d'une puissance de 5,5 kW, pour une durée d'utilisation de 10 minutes par solive.

L'utilisation de la tronçonneuse permet de réaliser le pré-débit des solives. La scie de débit est ensuite employée pour le délignage d'une des faces de la solive, correspondant à la face de référence. La mise à longueur des éléments, ainsi que l'usinage des extrémités des solives nécessaires à leur mise en place dans les sabots, sont également réalisés à l'aide de cette scie de débit.

4.3.2.1.4- Phase A4

Dans le cadre de l'étude menée sur le projet de construction, la phase A4, correspondant au transport des solives bois de l'atelier du charpentier au chantier de construction du bâtiment neuf, a fait l'objet d'une collecte de données. Les informations recueillies sont identiques à la phase A2 :

- Utilisation d'un camion 32 tonnes, conforme à la norme Euro 3, pour un transport effectué sur une distance de 3 kilomètres.

4.3.2.2- Intérêt des données collectées

Dans le cadre de cette étude, l'analyse des données recueillies présente un intérêt majeur, dans la mesure où elle permet de modéliser avec précision les différentes phases du processus, de A1 à A4, appliquées aux solives de réemploi. Cette démarche rend également possible l'évaluation du coût carbone associé à chacune de ces étapes, constituant ainsi un élément essentiel pour appréhender les

enjeux environnementaux et économiques liés à la réutilisation des matériaux de construction. L'approche méthodologique adaptée permet ainsi d'estimer le coût carbone d'une solive en réemploi et de le comparer de manière rigoureuse à celui d'une solive neuve manufacturée équivalente. La comparaison est réalisée uniquement sur les phases A1 à A4, les phases A5 à C4 étant considérées comme identiques pour les deux typologies de solives. Il convient également d'intégrer le carbone biogénique associé à la solive bois de réemploi, notamment dans le cadre de la phase A1.

Afin d'optimiser cette démarche, il est possible de mobiliser des données issues de la base Ecoinvent, version 3.10, et plus particulièrement les jeux de données de type « cut-off », bibliothèque recommandée pour l'élaboration des FDES. Le recours à ces données, préalablement évaluées et quantifiées, contribue à renforcer la fiabilité et la robustesse des résultats obtenus dans le cadre de la modélisation.

4.3.3- Calculateur carbone

Ce chapitre est consacré à la présentation du calculateur carbone développé dans le cadre de cette étude pour l'évaluation des impacts environnementaux associés au réemploi d'éléments structurels en bois. L'objectif de cet outil est de structurer et de quantifier les contributions carbones des différentes étapes du processus de réemploi, en s'appuyant sur les phases du cycle de vie comprises entre A1 et A4**.** Une attention particulière est portée à l'arborescence du calculateur, qui permet d'identifier et d'organiser les différentes sources de données nécessaires au calcul du bilan carbone. Cette structuration vise à garantir la traçabilité des hypothèses retenues ainsi que la cohérence des résultats obtenus. Afin d'illustrer le fonctionnement de cet outil, une application est réalisée à partir du cas d'une solive issue du chantier de Remiremont. Cette étude de cas permet de mettre en évidence la manière dont les données collectées sont intégrées dans le calculateur et d'évaluer les impacts carbone associés à ce scénario de réemploi.

4.3.3.1- Intérêt de l'utilisation d'un calculateur carbone

Comme l'a mis en évidence le chapitre 4.3.1.2, les FDES constituent un outil dont l'usage demeure relativement spécifique. Ces fiches présentent en effet un intérêt limité pour les maîtrises d'ouvrage, en particulier lorsqu'il s'agit d'évaluer des matériaux issus de leur propre chantier dans une démarche de réemploi, notamment pour les produits structurels en bois. Cette limitation s'explique principalement par deux facteurs. D'une part, le coût associé à la production d'une FDES est particulièrement élevé. D'autre part, chaque fiche est établie pour une typologie de produit précise, qui n'est pas nécessairement amenée à être rencontrée dans d'autres opérations de construction. Dans ce contexte, l'évaluation du coût carbone d'un matériau de réemploi repose le plus souvent sur l'utilisation d'un calculateur carbone. Pour les produits bois issus du réemploi, certains outils existent

déjà, tels que le configurateur DE-Bois [DE BOIS 2025]. Toutefois, les résultats fournis par ces outils reposent généralement sur des données carbones issues de FDES de produits neufs équivalents. Or, comme indiqué au chapitre 4.3.1.1, les inventaires de cycle de vie d'un produit de réemploi et d'un produit neuf comparable présentent des différences significatives. Cette situation met en évidence un défi important pour le secteur de la construction : le manque d'outils réellement adaptés au calcul carbone des éléments bois en réemploi. Une telle lacune est d'autant plus problématique qu'une analyse comparative entre un produit de réemploi et un produit neuf manufacturé constitue un élément déterminant dans la prise de décision au sein d'un projet de construction. La mise en œuvre d'une stratégie de réemploi implique en effet un investissement financier et humain significatif, en particulier pour les maîtrises d'ouvrage.

Face à ce constat, une démarche méthodologique a été engagée afin de concevoir un calculateur carbone spécifiquement adapté aux éléments structurels en bois issus du réemploi. La conception de cet outil repose sur trois critères principaux : la simplicité d'utilisation, l'accompagnement de la démarche de calcul, et une accessibilité destinée au public le plus large possible. L'objectif de ce calculateur est de faciliter l'intégration des contraintes et des spécificités propres à chaque élément structurel en bois de réemploi. À cet égard, le processus de modélisation a été élaboré de manière à se rapprocher au plus près des pratiques de terrain, notamment pour l'étape d**e** reconditionnement des bois, dont la description et la prise en compte doivent être aussi exhaustives que possible.

4.3.3.2- Fondement du calculateur

4.3.3.2.1- Les étapes du processus de réemploi

Dans le cadre de l'élaboration du calculateur carbone, il a été nécessaire de détailler de manière aussi exhaustive que possible l'ensemble des étapes composant le processus de réemploi d'un élément structurel en bois. Cette démarche vise à garantir une représentation fidèle des opérations réellement mises en œuvre dans les filières de réemploi. Du point de vue logistique, ces différentes étapes s'inscrivent dans les phases du cycle de vie comprises entre A2, correspondant au transport vers le site de reconditionnement lorsque celui-ci est nécessaire, tel que défini au chapitre 4.3.1.1.2, et A4, qui correspond au transport vers le chantier de construction. Par ailleurs, le carbone biogénique associé à l'élément bois, rattaché à la phase A_1, doit également être pris en considération dans l'évaluation. L'identification de ces étapes repose sur une analyse documentaire ainsi que sur des échanges avec des acteurs de la filière du réemploi. L'étude s'est notamment appuyée sur les fiches matériaux disponibles sur la plateforme Opalis [FCRBE - Bois massif de structure à section rectangulaire – 2021] [FCRBE – Parquet en bois massif - 2021], qui constitue une ressource de référence pour la documentation des pratiques de réemploi dans le secteur de la construction. Cette analyse, complétée

par des retours d'expérience issus du terrain, a permis d'identifier neuf étapes principales associées au processus de réemploi d'un élément en bois. La (Figure 58) présente une représentation de ces différentes étapes sous la forme d'un arbre de conséquences, permettant de visualiser l'enchaînement des opérations et les différentes configurations possibles dans le cadre d'un scénario de réemploi. À chacune des étapes identifiées dans le processus de réemploi est associé un coût carbone spécifique. La détermination de ce dernier implique l'identification préalable des données nécessaires à son calcul.

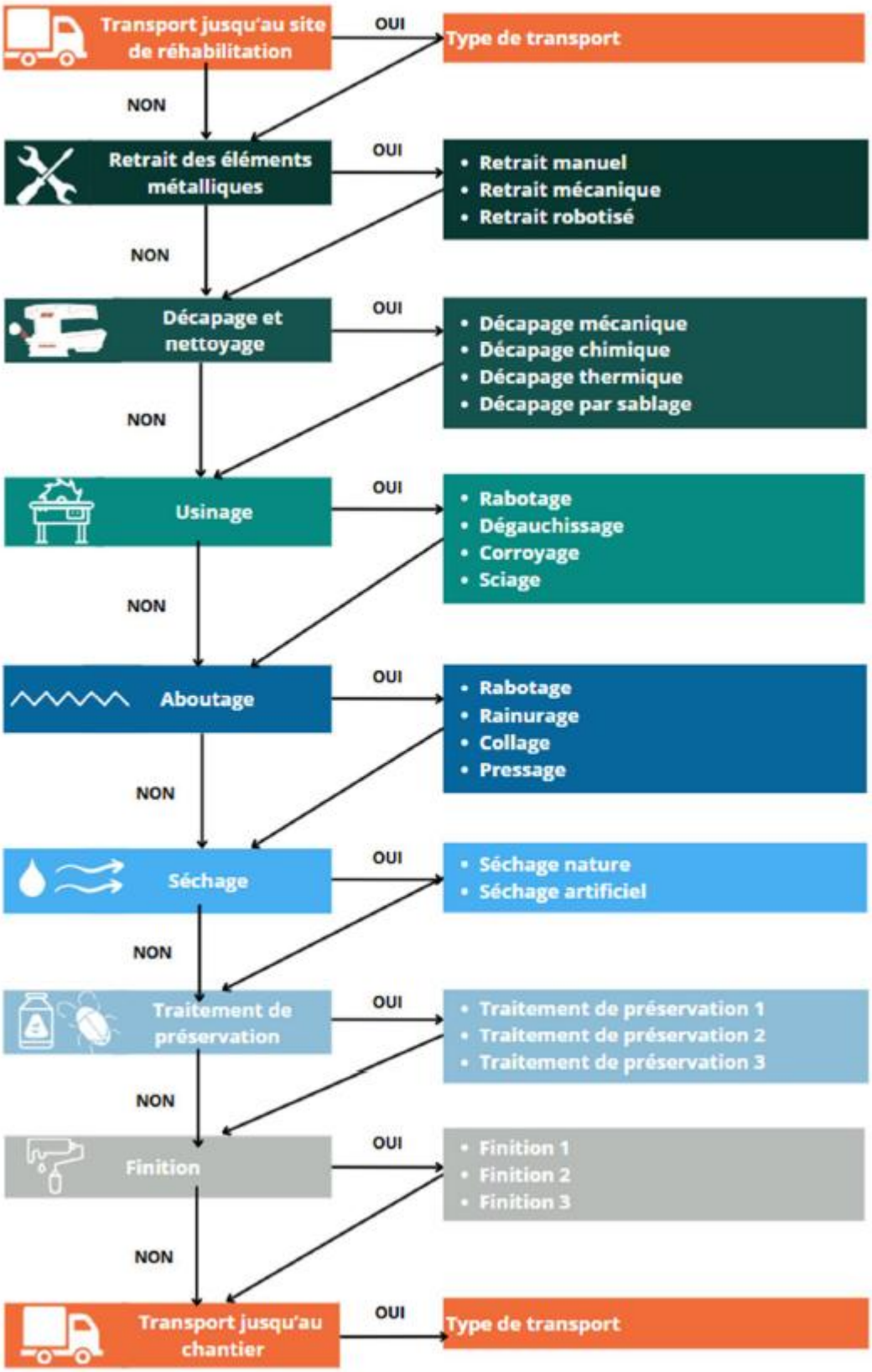


Figure 58 - Arbre de conséquence associé au processus de réemploi d'une poutre bois

4.3.3.2.2- Les données nécessaires pour le calcul du coût carbone

Afin de procéder au calcul de la quantité de dioxyde de carbone équivalent émise pour chacune des étapes précédemment identifiées, il est nécessaire de déterminer les données requises pour leur quantification. Dans une démarche de simplification, les émissions de carbone associées au processus de réemploi peuvent être regroupées en trois catégories principales :

- Les émissions liées au transport du produit ;
- Les émissions liées à la consommation énergétique des appareils et des machines mobilisées lors du reconditionnement du produit.
- Les émissions générées par l'utilisation de produits de traitement, de finition ou de collage.

Pour la quantification de chacune des typologies d'émissions différentes données spécifiques sont nécessaires :

- Emissions liées au transport :
    - Type de véhicule incluant le tonnage et la norme EURO applicable ;
    - Type d'énergie consommée par le moteur (essence ou diesel) ;
    - Consommation du véhicule (L/100km) ;
    - Impact carbone par kilogramme transporté sur un kilomètre ;
    - Distance parcourue (km) ;
    - Quantité transportée (kg).

- Emissions liées aux machines électriques :
    - Type de machine utilisée, par exemple une corroyeuse ou une scie à format ;
    - Puissance utile de la machine (kW) ;
    - Niveau de tension du système électrique (V) ;
    - Durée d'utilisation (min) ;
    - Utilisation éventuelle d'un système d'aspiration.

- Emissions liées aux machines thermiques :
    - Type de machines utilisée, par exemple une tronçonneuse ;
    - Puissance utile de la machine (kW) ;
    - Type de carburant utilisé (essence ou carburant 2T) ;
    - Durée d'utilisation (min) ;
    - Utilisation éventuelle d'un système d'aspiration.

- Emissions liées aux produits utilisés :
    - Type de produit utilisé, par exemple colle ou peinture ;
    - Emission de CO_2 associée à la fabrication d'1 kg de produit ;
    - Masse de produit utilisé (kg).

4.3.3.2.3- Intégration des bases de données sous Excel

Une fois les typologies de données nécessaires identifiées, il est possible de les centraliser au sein d'un fichier Excel, permettant de regrouper toutes les informations de manière structurée. Ce fichier comporte plusieurs onglets, chacun correspondant à une table de données spécifique :

- TDD_Poutre : Cet onglet regroupe la table de données relative aux poutres. Une partie des données provient du diagnostic ressource. Les informations suivantes y sont consignées :
    - Numéro d'étiquette de la poutre ;
    - Nom du chantier de démolition ;
    - Essence de la poutre ;
    - Masse de la poutre ;
    - Masse volumique de la poutre ;
    - Teneur en humidité de la poutre sur brut ;
    - Classe mécanique associée, issue de la caractérisation mécanique ;
    - Dimensions de la poutre avant et après reconditionnement.

  La (Figure 59) présente un extrait de l'onglet TDD_Poutre.

TDD_POUTRE_ETI	TDD_POUTRE_CHANTIER	TDD_POUTRE_ESSENCE	TDD_POUTRE_MASSE	TDD_POUTRE_LO	TDD_POUTRE_LA	TDD_POUTRE_H	TDD_POUTRE_RHO	TDD_POUTRE_HB	TDD_POUTRE_USAGE MECA	TDD_POUTRE_LOF	TDD_POUTRE_LAF	TDD_POUTRE_HF
75	Chantier test	Douglas	20	2000	150	100	450	15	Classe 4	1500	140	80
Numéro de l'étiquette	Nom du chantier	Essence	Masse [kg]	Longueur initiale[mm]	Largeur initiale [mm]	Hauteur initiale [mm]	Masse volumique [kg/m^3]	Humidité sur brut [%]	Usage mécanique issu du diagnostic ressource	Longueur finale [mm]	Largeur finale [mm]	Hauteur finale [mm]

Figure 59 - Extrait de l'onglet TDD_Poutre

- TDD_VAL : cet onglet regroupe la table de données relatives aux émissions de CO_2. Les informations proviennent de différentes sources, telles que la base de données Ecoinvent version 3.10 ou bien sont renseignées directement par l'utilisateur. Cet onglet inclut l'ensemble des données correspondant aux différentes étapes identifiées dans le processus de réemploi des poutres. Il contient également des informations plus spécifiques, comme les données relatives aux énergies utilisées ou encore un répertoire des masses volumiques de chaque essence de bois, issues de la base Tropix 7. La (Figure 60) présente un extrait de l'onglet TDD_VAL.

TDD_VAL_TRANSP1					
TDD_VAL_TRANSP1_TYPE	TDD_VAL_TRANSP1_UNI	TDD_VAL_TRANSP1_CO2	TDD_VAL_TRANSP1_ENER	TDD_VAL_TRANSP1_SOURCE	TDD_VAL_TRANSP1
Transport, fret, camion >32 tonnes, EURO3 {RER}	kgm	0,000108	Diesel	SIMAPRO- Ecoinvent 3 - allocation- cut-off by classification	0
Type de transport	**Unité prise en compte pour le calcul de la quantité de carbone émis**	**Quantité de carbone émise pour une unité donnée**	**Type d'énergie utilisée**	**Source de la donnée**	**0: Donnée ne provient pas du parc machine 1: Donnée provient du parc machine**

Figure 60 - Extrait de l'onglet TDD_VAL

La (Figure 60) illustre un exemple de transport de type « fret, camion >32 tonnes, EURO3 {RER} » utilisant du diesel et émettant 1,08 10^{-4} $kg_{CO2,eq}$ /kgkm. Cette donnée provient de la base SIMAPRO - Ecoinvent 3 – allocation- cut-off by classification. Elle est représentative d'un transport moyen en Europe et ne relève pas de la logistique spécifique au système étudié.

- TRAD : Cet onglet correspond à la table de traduction entre les intitulés en anglais issus de la base de données Ecoinvent version 3.10 et leur équivalent en français, afin de faciliter l'utilisation de l'outil. La (Figure 61) présente un extrait de l'onglet TRAD.

TRAD_TRANSP1	
TRAD_TRANSP1_ANG	TRAD_TRANSP1_FR
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER}| transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5	Transport, fret, camion 16-32 tonnes métriques, EURO5 {RER}
Formulation exacte de SimaPro du transport	**Traduction française du transport**

Figure 61 - Extrait de l'onglet TRAD

- TDD_PARC : Cet onglet correspond à la table de données relative au parc machines renseigné directement par l'utilisateur. Les informations qu'il contient proviennent donc de données saisies par l'utilisateur et non de la base de données Ecoinvent version 3.10. Il convient de noter qu'aucune étape liée au transport n'a été intégrée dans et onglet. En effet, es données issues de la base Ecoinvent 3.10 sont jugées plus qualitatives pour ce type de processus, dans la mesure où elles prennent en compte un ensemble plus large d'émissions de carbone associées au transport, telles que l'amortissement du camion, son entretien ou encore l'entretien des infrastructures routières. La (Figure 62) présente un extrait de l'onglet TDD_PARC.

TDD_PARC_USI			
TDD_PARC_USI_MODE	TDD_PARC_USI_TYPE	TDD_PARC_USI_PUI	TDD_PARC_USI_ENER
Sciage	Tronçonneuse HUSQVARNA modèle 365	3	Essence
Mode d'usinage	**Type de machine utilisée**	**Puissance utile (kW)**	**Type d'énergie utilisée**

Figure 62 - Extrait de l'onglet TDD_PARC

La (Figure 62) illustre un exemple du renseignement du parc machines, correspondant à une opération de sciage réalisée à m'aide d'une Tronçonneuse HUSQVARNA modèle 365, d'une puissance de 3 kW et fonctionnant à l'essence.

- TDD : Cet onglet regroupe l'ensemble des informations relatives aux différentes étapes considérées dans le processus de réemploi de la poutre, identifiées à partir de son numéro d'étiquette. C'est depuis cet onglet que le calcul du coût carbone associé à la poutre de réemploi est réalisé. La (Figure 63) présente un extrait de l'onglet TDD.

	TDD_TRANSP1		
TDD_NUM_ETI	TDD_TRANSP1_DET	TDD__TRANSP1_T	TDD_TRANSP1_CO2
75	Transport, fret, camion 16-32 tonnes métriques, EURO6 {RER}	55	0,01045
Numéro de l'étiquette	**Type de Transport utilisé**	**Nombre de km parcourus**	**Quantité de CO2 eq émis pour la distance saisie**

Figure 63 - Extrait de l'onglet TDD

La (Figure 63) illustre un exemple de transport entre le chantier et le site de réhabilitation pour la poutre portant l'étiquette 75. Ce transport est réalisé à l'aide d'un camion de 16 à 32 tonnes répondant à la norme EURO6, sur une distance de 55 km, ce qui correspond à une émission de 1,045 10^{-2} kg $_{CO2\ eq}$.

4.3.3.2.4- Remplissage des bases de données

Une fois les différentes bases de données constituées, il devient possible de renseigner les informations qui les composent. Pour ce faire, trois typologies de données ont été prises en considération :

- Des données d'ateliers : ces données correspondent à des informations collectées auprès d'entreprises du secteur ou issues de fiches techniques fournies par le fabricant industriel Felder Group.

- Des données SimaPro : ces données proviennent de la base Ecoinvent version 3.10, accessible via le logiciel SIMAPRO.

- Des données **r**elatives au parc machines de l'atelier de reconditionnement : ces informations sont directement renseignées par l'utilisateur et sont représentatives du parc machines spécifique à l'atelier de reconditionnement dans lequel transitent les éléments en bois.

Ces trois catégories permettent à l'opérateur de renseigner les différentes opérations associées à la poutre, même lorsqu'il ne dispose pas d'informations précises sur son propre parc machines. Il devient ainsi possible d'estimer le coût carbone associé à une poutre en bois de réemploi, de manière plus ou moins précise selon les données disponibles.

Il convient toutefois de souligner que la base de données utilisée pour le calculateur carbone présente certaines limites. En premier lieu, le niveau d'incertitude associé aux résultats dépend directement de la source des données mobilisées. Les données issues de SIMAPRO, intégrant la base Ecoinvent version 3.10, prennent en compte un ensemble de paramètres dans le calcul carbone, tels que l'amortissement des machines ou les consommables qui leur sont associés. Cette prise en compte systémique ne s'applique pas nécessairement aux données issues du parc machine spécifique à l'atelier de reconditionnement. Dans le cadre de l'utilisation du calculateur pour l'évaluation d'une poutre donnée, il est donc recommandé d'unifier les sources de données, c'est-à-dire de privilégier l'emploi d'une seule typologie de données afin de garantir la cohérence et la représentativité des résultats. Par ailleurs, dans le cadre d'une comparaison entre l'empreinte carbone d'une poutre de réemploi et celle d'une poutre neuve manufacturée, il est préférable d'utiliser des données issues de SIMAPRO. En effet, les données carbones présentes dans les FDES sont établies à partir des bases de données intégrées dans ce logiciel.

4.3.3.2.5- Détail des calculs du calculateur carbone

Une fois l'ensemble des bases de données constituées et renseignées avec les informations nécessaires, il devient possible de poursuivre le processus d'analyse. Cette étape consiste à détailler de manière exhaustive l'ensemble des calculs mobilisés afin d'évaluer l'impact carbone du processus de réemploi de la poutre. Dans un souci de clarté et de lisibilité, une légende est proposée afin de distinguer l'origine des différentes données utilisées dans les calculs :

- **Données issues de la base de données Ecoinvent version 3.10 de SimaPro**
- **Données provenant des entreprises**
- **Données complétées par l'opérateur**

4.3.3.2.5.1-Calcul des émissions de $CO_{2,eq}$ pour le transport

L'estimation des émissions carbone associées au transport est réalisé à l'aide de l'équation (17).

$$Emissions = Coût\ carbone\ du\ transport\ pour\ 1\ km\ .\ Distance\ .\ Masse\ de\ la\ poutre \quad (17)$$

Où :

Les émissions sont exprimées en kg $CO_{2,eq}$ / kgkm ;

Le Coût carbone du transport pour 1 kg transporté sur 1km est exprimé en kg $CO_{2,eq}$ / km ;

La distance est exprimée en km ;

La masse de la poutre est exprimé en kg.

4.3.3.2.5.2- Calcul des émissions de $CO_{2,eq}$ pour l'utilisation d'une machine

Différents cas sont distingués pour le calcul des émissions de $CO_{2,eq}$ associées à l'utilisation d'une machine.

4.3.3.2.5.2.1- Cas des machines électriques

Les émissions de CO_{2eq} résultant de l'usage d'une machine électrique sont déterminées selon l'équation (18).

$$Emissions = Puissance\ utile\ de\ la\ machine\ .\ Coût\ carbone\ de\ l'électricité\ .\ Temps\ d'utilisation \quad (18)$$

Où :

L'émission est exprimée en kg $CO_{2,eq}$;

La puissance utile de la machine est exprimée en kW ;

Le coût carbone de l'électricité est exprimé en kg $CO_{2,eq}$ / kWh ;

Le temps d'utilisation est exprimé en h.

Il convient de préciser que l'émission carbone associée à la production d'un kWh d'électricité varie en fonction du type de tension utilisé, qu'il s'agisse d'un réseau monophasé ou triphasé.

4.3.3.2.5.2.2- Cas des machines ou appareils thermiques

Les émissions de carbone associées à l'utilisation d'une machine ou d'un appareil thermique varient selon le type de moteur employé, ce qui conduit à distinguer plusieurs cas.

4.3.3.2.5.2.2.1- Cas des moteurs diesel non défini

Les émissions carbones liées à l'utilisation d'une machine ou d'un appareil équipé d'un moteur diesel indéterminé sont calculées selon l'équation (19).

$$Emissions = (Puissance\ utile\ de\ la\ machine/0{,}4)\ .\ Capacité\ calorifique\ .\ Equivalence\ entre\ CO_2\ et\ diesel\ .\ Temps\ d'utilisation \quad (19)$$

Où :

L'émission est exprimée en kg $CO_{2,eq}$;

La puissance utile de la machine est exprimée en kW ;

La capacité calorifique du diesel est exprimée en kWh/kg ;

L'équivalence entre CO_2 et diesel est exprimée en kg CO_2 . kg_{diesel} ;

Le temps d'utilisation est exprimé en h.

4.3.3.2.5.2.2.2- Cas des moteurs essence non défini

Les émissions carbones liées à l'utilisation d'une machine ou d'un appareil équipé d'un moteur essence indéterminé sont calculées selon l'équation (20).

$$Emissions = (Puissance\ utile\ de\ la\ machine/0{,}3)\ .\ Capacité\ calorifique\ .\ Equivalence\ entre\ CO_2\ et\ essence\ .\ Temps\ d'utilisation \quad (20)$$

Où :

L'émission est exprimée en kg $CO_{2,eq}$;

La puissance utile de la machine est exprimée en kW ;

La capacité calorifique de l'essence est exprimée en kWh/kg ;

L'équivalence entre CO_2 et essence est exprimée en kg CO_2 . $kg_{essence}$;

Le temps d'utilisation est exprimé en h.

4.3.3.2.5.2.2.3- Cas des moteurs 4 temps - essence sans plomb

Les émissions carbones liées à l'utilisation d'une machine ou d'un appareil équipé d'un moteur 4 temps avec de l'essence sans plomb sont calculées selon l'équation (21).

$$Emissions = Puissance\ utile\ de\ la\ machine\ .\ Consommation\ du\ moteur \\ .\ Masse\ volumique\ \ de\ l'essenc\ .\ Equivalence\ entre\ CO_2\ et\ essence \\ .\ Temps\ d'utilisation \qquad (21)$$

Où :

L'émission est exprimée en kg $CO_{2,eq}$;

La puissance utile de la machine est exprimée en kW ;

La consommation du moteur est considérée comme égale à 0,5 L/kWh pour le calcul ;

La masse volumique de l'essence est exprimée en kg/L ;

L'équivalence entre CO_2 et essence est exprimée en kg CO_2 . $kg_{essence}$;

Le temps d'utilisation est exprimé en h.

4.3.3.2.5.2.2.4- Cas des moteurs 2 temps – essence/huile

Les émissions carbones liées à l'utilisation d'une machine ou d'un appareil équipé d'un moteur 2 temps avec un mélange d'essence et d'huile sont calculées selon l'équation (22).

$$Emissions\ = Puissance\ utile\ de\ la\ machine\ .\ Consommation\ du\ moteur \\ .\ Masse\ volumique\ de\ l'essence\ .\ Equivalence\ entre\ CO_2\ et\ essence \\ .\ Temps\ d'utilisation \qquad (22)$$

Où :

L'émission est exprimée en kg $CO_{2,eq}$;

La puissance utile de la machine est exprimée en kW ;

La consommation du moteur est considérée comme égale à 0,8 L/kWh pour le calcul ;

La masse volumique de l'essence est exprimée en kg/L ;

L'équivalence entre CO_2 et essence est exprimée en kg CO_2 . $kg_{essence}$;

Le temps d'utilisation est exprimé en h.

La quantité d'huile est négligeable par rapport à celle de l'essence, la prise en compte de sa masse dans le calcul des émissions de carbone l'est également. De plus, son impact varie selon le type d'huile et la proportion du mélange, des paramètres que l'utilisateur n'est pas toujours en mesure de connaître.

4.3.3.2.5.3- Calcul des émissions de $CO_{2,eq}$ pour les produits

Le calcul des émissions carbone liées à l'utilisation de produit s'effectue conformément à l'équation (23).

$$Emissions = Masse\ de\ produit\ utilisé\ .\ Coût\ carbone\ pour\ 1\ kg\ de\ produit \quad (23)$$

Où :

L'émission est exprimée en kg $CO_{2,eq}$;

La masse de produit utilisé est exprimé en kg ;

Le coût carbone pour 1 kg de produit est exprimé en kg $CO_{2,eq}$ / $kg_{produit}$.

4.3.3.2.5.4- Calcul des émissions de $CO_{2,eq}$ totales pour le processus de réemploi de la poutre

Le calcul des émissions totales de carbone liées au processus de réemploi de la poutre s'effectue conformément à l'équation (24).

$$Emissions\ totales = \sum Emissions\ du\ processus\ de\ réemploi - carbone\ biogénique\ de\ la\ poutre \quad (24)$$

Le carbone biogénique est calculé conformément à l'équation (14) présentée au chapitre 4.3.1.1.1. Le calculateur carbone permet également d'estimer le temps total nécessaire au reconditionnement de la poutre. Ce résultat offre une meilleure intégration de cette opération dans le planning d'un chantier et facilite l'évaluation de son coût économique. Par ailleurs, le taux de perte associé au reconditionnement est calculé, ce qui permet de déterminer le rendement de l'opération et d'estimer la quantité de déchets bois générés par le processus.

4.3.3.3- Elaboration de l'interface du calculateur

Après définition des principes régissant le calculateur carbone, l'étape suivante a consisté en la conception de son interface utilisateur. Le langage de programmation Visual Basic a été choisi pour permettre l'automatisation des calculs du coût carbone d'une poutre de réemploi. L'analyse du codage de l'interface est présentée ici de manière descriptive, sans approfondissement technique supplémentaire, car le détail du code n'apporte pas d'informations nouvelles par rapport aux éléments

exposés au chapitre 4.3.3.2. Le processus de développement de l'interface a été structuré selon les étapes présentées dans la (Figure 64), garantissant la cohérence et la fonctionnalité du calculateur.



Figure 64 - Etapes nécessaire à l'élaboration de l'interface

La conception de l'interface du calculateur s'est appuyée sur l'élaboration préalable de maquettes papier, permettant de conceptualiser visuellement l'ensemble des éléments à intégrer ainsi que leur disposition au sein du calculateur carbone. Cette démarche a permis de structurer les principes fondamentaux régissant les interfaces utilisateur, notamment la page d'accueil et les écrans de visualisation des résultats carbone. Les objets interactifs, tels que les listes déroulantes et les cases de saisie, ont été définis à cette étape pour en préciser le rôle et l'emplacement. La phase suivante a consisté à créer les différentes interfaces et à insérer leurs objets respectifs. Le processus de nomination des objets a été réalisé de manière intuitive afin de faciliter et d'optimiser le codage ultérieur. Le codage du calculateur repose sur six fonctions principales :

- Assurer la liaison entre les différentes interfaces utilisateur ;
- Gérer l'affichage des objets au sein de chaque interface ;
- Remplir les listes déroulantes en fonction du type et la source des informations ;
- Enregistrer les données relatives au processus de réemploi de la poutre ;
- Calculer les émissions de CO_2 associées à la poutre ;
- Permettre à l'utilisateur d'enrichir la base de données en ajoutant de nouvelles informations.

Dans une perspective de fiabilité, la gestion des données a intégré des dispositifs de contrôle permettant de limiter les erreurs de saisie et les incohérences. Des messages d'erreur sont envoyés directement à l'utilisateur lorsqu'une information ne respecte pas les critères de validation prédéfinis ou lorsqu'une action interdite est détectée.

Le calculateur carbone a été conçu pour être exploité par les opérateurs travaillant dans les ateliers de reconditionnement. La démarche de conception a pris en compte des principes ergonomiques et de simplicité d'utilisation, visant à rendre l'outil intuitif. L'esthétisme, la lisibilité et la clarté des interfaces ont été soigneusement sélectionnés afin d'optimiser l'expérience utilisateur et de faciliter la réalisation des calculs carbone dans un contexte opérationnel.

4.3.3.4- Présentation de l'interface du calculateur et de son usage

La (Figure 65) propose une description complète de l'interface du calculateur, permettant de visualiser l'ensemble de la maquette élaborée. Cette illustration offre une vue d'ensemble de la

structuration des différentes pages et de l'organisation des éléments interactifs. Dans la suite de ce chapitre, chaque page de l'interface fera l'objet d'une présentation détaillée.

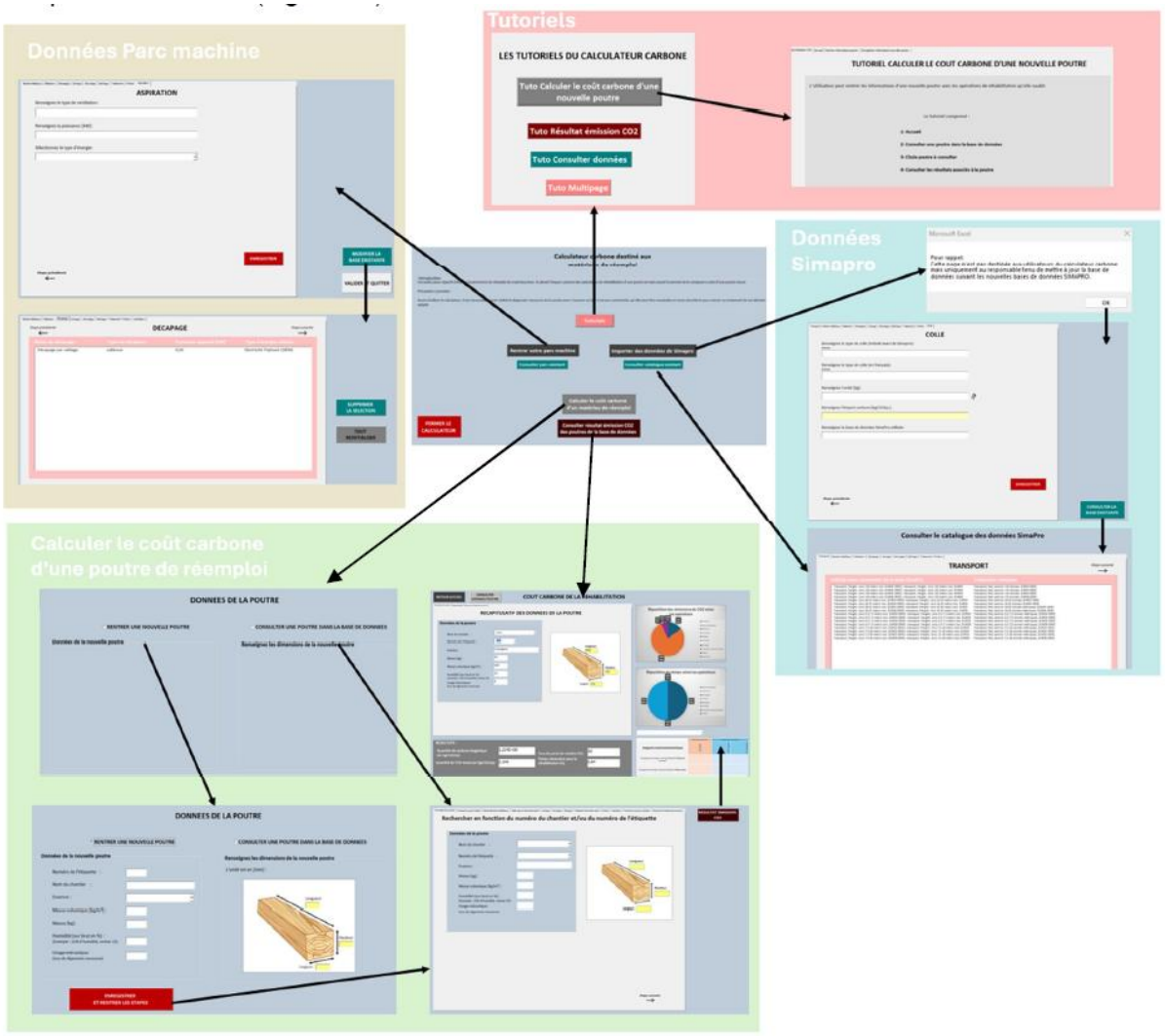


Figure 65 - Maquette de l'interface du calculateur

4.3.3.4.1- La page d'accueil

La page d'accueil constitue la première interface affichée lors du lancement du calculateur carbone. Elle présente une introduction concise et informative, offrant un aperçu du contexte et des objectifs de l'outil. Cette page permet également la navigation vers les autres sections du calculateur. Deux modalités principales sont proposées pour la saisie de nouvelles données afin de compléter la base existante :

- Première méthode : l'utilisateur peut entrer des données propres à son atelier de reconditionnement ou modifier les données déjà présentes pour son atelier, dans le cas d'une utilisation antérieure du calculateur.

- Deuxième méthode : l'utilisateur peut intégrer de nouvelles données issues de la base Ecoinvent 3.10 notamment en cas d'incomplétude de la base du calculateur ou lors d'une mise à jour de la base Ecoinvent.

La page d'accueil permet également d'accéder aux tutoriels du calculateur carbone, conçus pour répondre aux besoins d'un large éventail d'utilisateurs et de contextes. Il est enfin possible de lancer le calcul de l'impact carbone d'une poutre en saisissant les étapes relatives à son processus de réemploi, ou de consulter les résultats d'une poutre déjà intégrée à la base. La (Figure 66) illustre la page d'accueil du calculateur et détaille l'ensemble des éléments qui y sont présents.

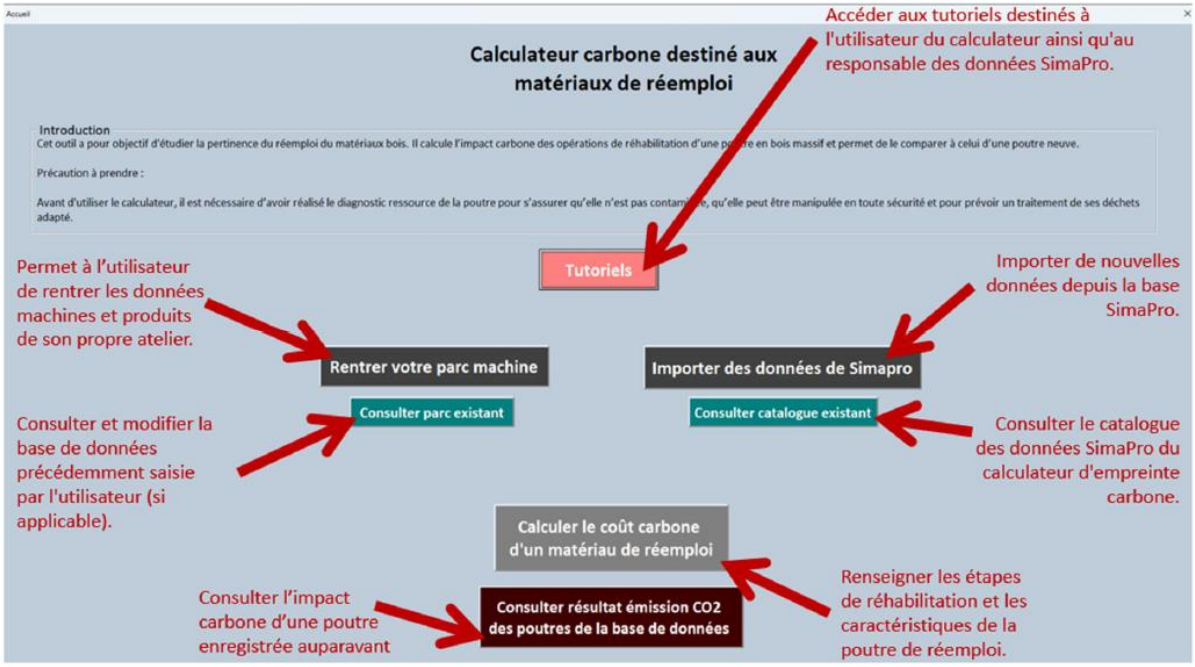


Figure 66 - Page d'accueil du calculateur

4.3.3.4.2- Les pages « Tutoriels »

La page dédiée aux tutoriels met en avant deux modules pédagogiques distincts, conçus pour répondre aux besoins de deux catégories d'utilisateurs :

- Les utilisateurs exploitant le calculateur carbone pour la saisie ou l'analyse des données ;
- Les personnes habilitées à mettre à jour les informations issues du logiciel SimaPro.

Ces tutoriels ont pour objectif d'accompagner méthodiquement les utilisateurs dans l'exécution des opérations souhaitées au sein du calculateur. Chaque étape du processus y est décrite de manière détaillée, avec des explications précises et la mise en évidence des éléments spécifiques associés.

4.3.3.4.3- Les pages « Rentrer votre parc machine »

Cette page permet à l'utilisateur de renseigner l'ensemble des caractéristiques des machines présentes dans son atelier de reconditionnement. La navigation s'effectue au travers de différents onglets, chacun correspondant à une étape spécifique du processus de reconditionnement de la poutre. Les données pouvant être saisies pour l'intégration d'une nouvelle machine sont de plusieurs natures :

- Le mode : il est nécessaire de préciser le mode opératoire associé à l'étape de reconditionnement concernée. Par exemple, pour la phase d'usinage, il convient d'indiquer si l'opération correspond à un dégauchissage, un rabotage ou une autre typologie d'usinage. Dans le cas de l'étape de décapage, le mode employé doit être spécifié (décapage thermique, sablage, procédé mécanique ou chimique). Pour l'étape de détection d'éléments métalliques, il est également nécessaire de préciser si la détection est réalisée de manière robotisée ou mécanique.
- Le type : l'utilisateur doit fournir des informations détaillées sur la machine utilisée. Cette indication comprend la typologie de l'équipement (scie robotisée, dégauchisseuse, ponceuse, décapeur thermique, etc.), mais également des données plus spécifiques telles que la marque, la série ou le modèle précis de l'appareil.
- La puissance : la puissance du moteur de la machine ou de l'appareil doit être renseignée et exprimée en kilowatts (kW).
- Le type d'énergie : l'énergie utilisée pour le fonctionnement de la machine doit également être précisée. Plusieurs options sont proposées à l'utilisateur :
    - Electrique triphasée ;
    - Electrique monophasée ;
    - Essence, adaptée à certains types de moteurs ;
    - Diesel, pour les moteurs nécessitant ce type de carburant ;
    - Mélange carburant pour les moteurs 2 temps ;
    - Essence pour les moteurs 4 temps.

Dans les onglets Finition, Aboutage et Traitement, il est également possible de renseigner des informations relatives aux produits utilisés :

- Le type de produit : il est nécessaire de préciser la nature du produit utilisé afin d'identifier précisément sa typologie (colle, produit de finition ou de traitement), sa composition ainsi que son mode d'application (par immersion ou par application en surface). Il convient également d'indiquer la destination du produit en fonction de son exposition, qu'elle soit intérieure ou extérieure.

- Emission de $CO_{2,eq}$: l'émission de carbone associée à la production d'un kilogramme de produit (colle, finition ou traitement) doit être renseignée. Pour ce faire, l'utilisateur est invité à se rapprocher de ses fournisseurs afin d'obtenir les données correspondantes.

Afin de faciliter la saisie des informations, une aide contextuelle est disponible : l'utilisateur peut afficher des exemples explicatifs en positionnant le curseur de la souris sur une icône dédiée. Une fois les données renseignées dans l'onglet actif, l'utilisateur doit cliquer sur le bouton « Enregistrer » afin de sauvegarder les informations dans la base de données. Il peut ensuite accéder à l'onglet suivant. Pour finaliser le processus de saisie et lancer les premières opérations de calcul dans la feuille de calcul, l'utilisateur doit sélectionner l'option « Valider et Quitter » à l'aide du bouton correspondant. Par ailleurs, l'utilisateur peut accéder à son parc machine existant via le bouton « Modifier la base existante », qui permet soit de consulter les données enregistrées, soit de les modifier. La (Figure 67) illustre un exemple correspondant à l'étape de détection.

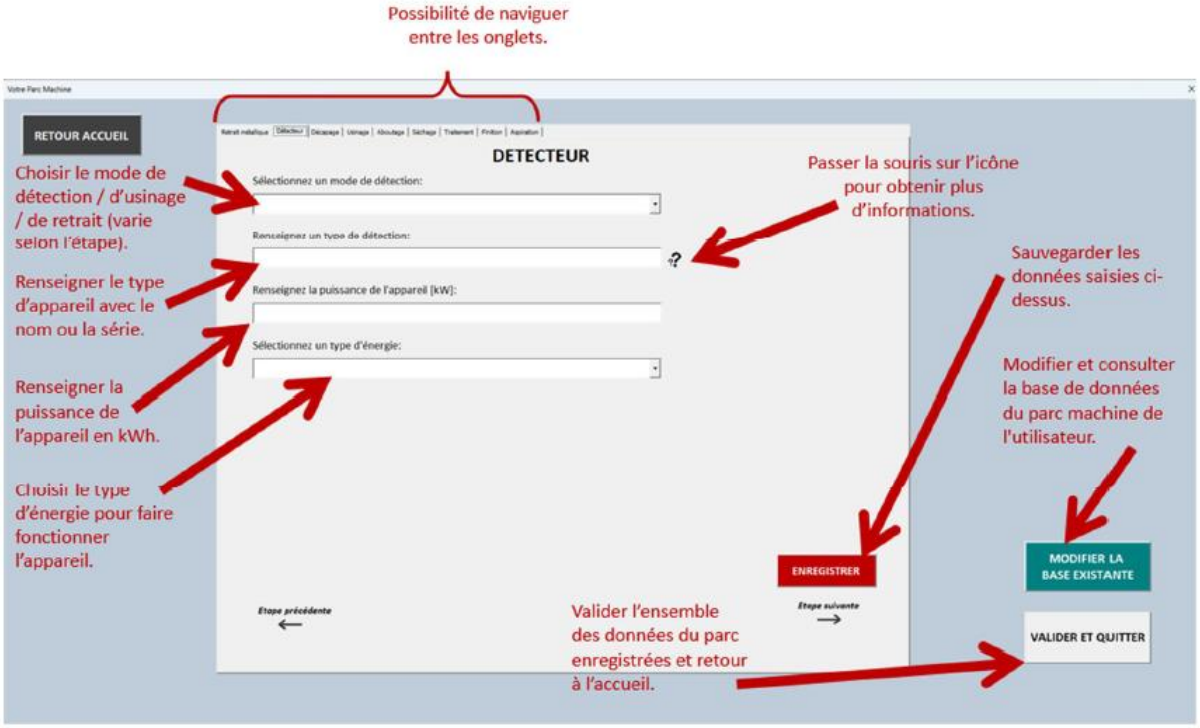


Figure 67 - Exemple de l'une des pages « Rentrer votre parc machine »

4.3.3.4.4- Les pages « Consulter Parc existant »

Dans ces pages, l'utilisateur dispose de la possibilité de consulter et, le cas échéant, de modifier le parc machine existant. La navigation s'effectue au travers des différents onglets correspondant aux étapes du processus de reconditionnement de la poutre. L'utilisateur peut ainsi accéder aux informations relatives aux machines enregistrées, notamment : le mode d'utilisation, le type de machine, la puissance exprimée en kilowatts (kW) ainsi que le type d'énergie nécessaire à leur fonctionnement. Dans le cas où l'utilisateur souhaiterait supprimer un élément de la liste, il doit d'abord sélectionner la ligne correspondante, puis cliquer sur le bouton « Supprimer la sélection ». La suppression des données s'effectue de manière séquentielle, ligne par ligne. Si une réinitialisation complète de la liste est souhaitée, l'utilisateur peut utiliser le bouton « Tout réinitialiser ». Comme son intitulé l'indique, cette action entraîne la suppression de l'ensemble des données enregistrées dans le parc machines. Le bouton « Retour Parc Machine » permet de revenir au formulaire de saisie afin d'ajouter de nouvelles machines à la base de données. Le bouton « Retour Accueil » offre quant à lui la possibilité de revenir à la page d'accueil du calculateur. La (Figure 68) illustre un exemple correspondant à l'étape d'usinage.

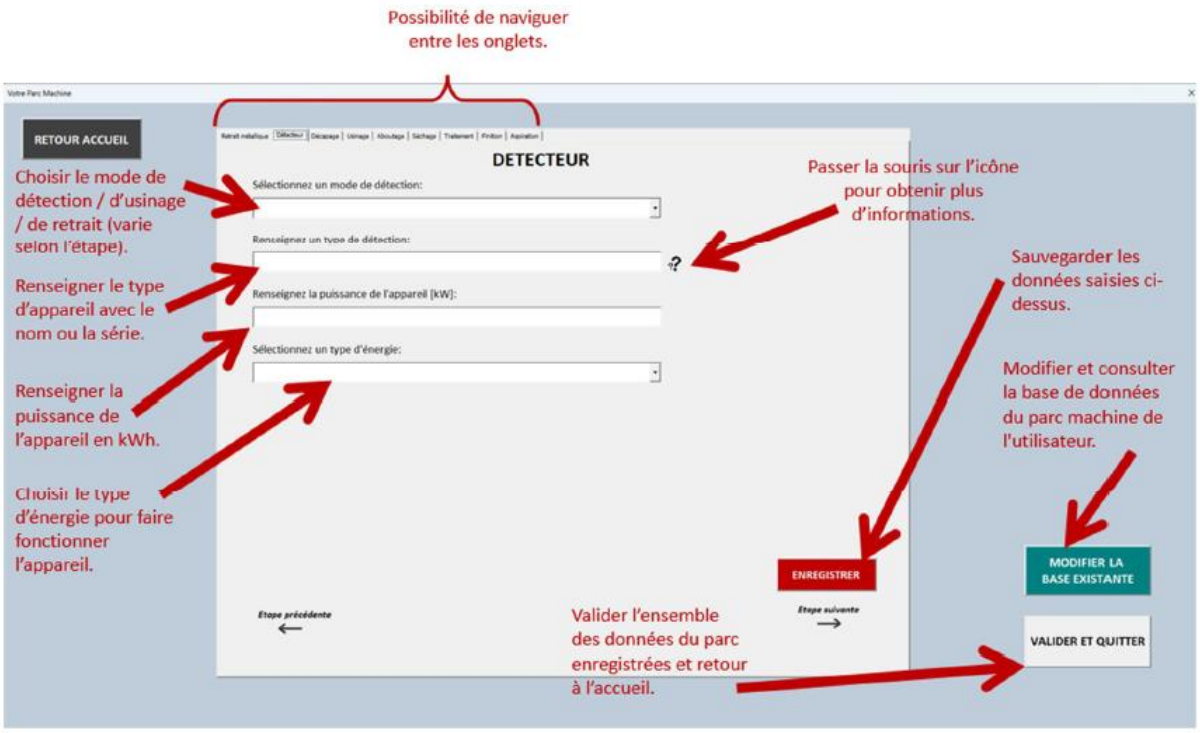


Figure 68 - Exemple de l'une des pages « Consulter parc existant »

4.3.3.4.5- Les pages « Importer des données de SimaPro »

À l'instar des pages dédiées à la saisie du parc machine, le calculateur permet également l'intégration de données issues du logiciel SimaPro. Toutefois, cette fonctionnalité est réservée aux utilisateurs disposant des habilitations nécessaires. À ce titre, un message d'avertissement s'affiche lorsque l'utilisateur sélectionne l'option « Importer des données de SimaPro » depuis la page d'accueil.

Trois catégories de données peuvent être importées dans le calculateur :

- Les données relatives au transport ;
- Les données relatives aux machines ;
- Les données relatives aux produits.

Chaque typologie de données nécessite des modalités de saisie spécifiques, conformément aux principes déjà présentés pour la page « Rentrer votre parc machine ». Afin de garantir la cohérence des informations intégrées, le gestionnaire de la base de données est invité à se référer au tutoriel dédié à cette fonctionnalité. Celui-ci détaille notamment les étapes d'accès aux données SimaPro, la sélection des informations pertinentes et la complétion du formulaire du calculateur. Une aide contextuelle est également disponible : l'utilisateur peut afficher des exemples explicatifs en positionnant le curseur de la souris sur une icône dédiée. Une fois les données renseignées dans l'onglet actif, l'utilisateur doit cliquer sur le bouton « Enregistrer » afin de sauvegarder les informations dans la base de données, puis accéder à l'onglet suivant. Dans le cadre de la gestion des données issues de SimaPro, le responsable de la base dispose également d'un accès au catalogue existant du calculateur via le bouton « Consulter la base existante ». Cette fonctionnalité permet de visualiser les données déjà enregistrées, mais uniquement dans une perspective consultative, sans possibilité de modification. La (Figure 69) illustre un exemple correspondant à l'étape de finition.

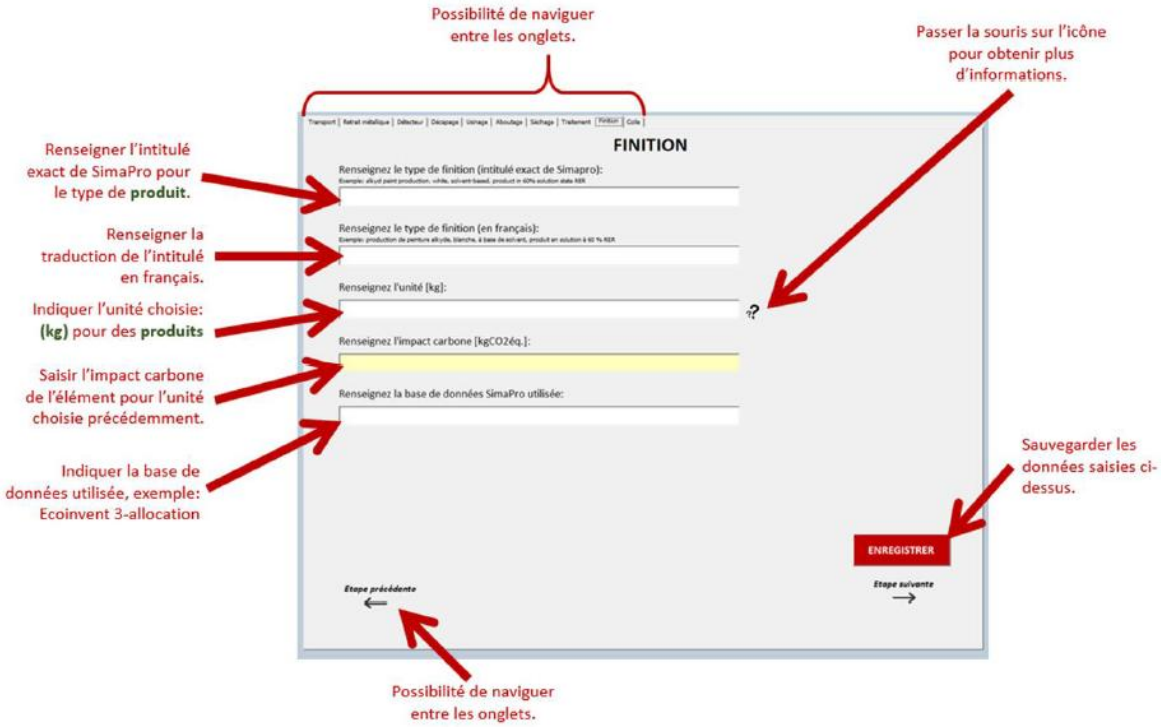


Figure 69 - Exemple de l'une des pages « Importer des données de Sima Pro »

4.3.3.4.6- Les pages « Catalogue SimaPro »

Ces pages permettent à l'utilisateur de consulter les données issues du logiciel SimaPro intégrées dans le calculateur. Il convient de préciser que cette base de données est accessible uniquement en consultation : l'utilisateur ne dispose d'aucune autorisation pour la modifier, que ce soit par l'ajout ou la suppression d'éléments. La gestion et la mise à jour des données SimaPro sont réservées à l'utilisateur habilité, désigné comme responsable de cette fonction. La navigation s'effectue au travers de différents onglets, chacun correspondant à une étape du processus de réemploi d'une poutre. Dans un premier temps, les informations sont présentées sous leur libellé d'origine tel qu'il apparaît dans SimaPro. Elles sont ensuite accompagnées d'une traduction en français, afin de faciliter la compréhension et la sélection des données lors de leur utilisation dans le calculateur. Le bouton « Retour Importation SimaPro » permet à l'utilisateur disposant des autorisations nécessaires d'accéder au formulaire de saisie afin d'intégrer de nouvelles données issues du logiciel SimaPro. Le bouton « Retour Accueil » permet quant à lui de revenir à la page d'accueil du calculateur et d'accéder aux différentes sections de l'outil. La (Figure 70) illustre un exemple correspondant à l'étape de transport.

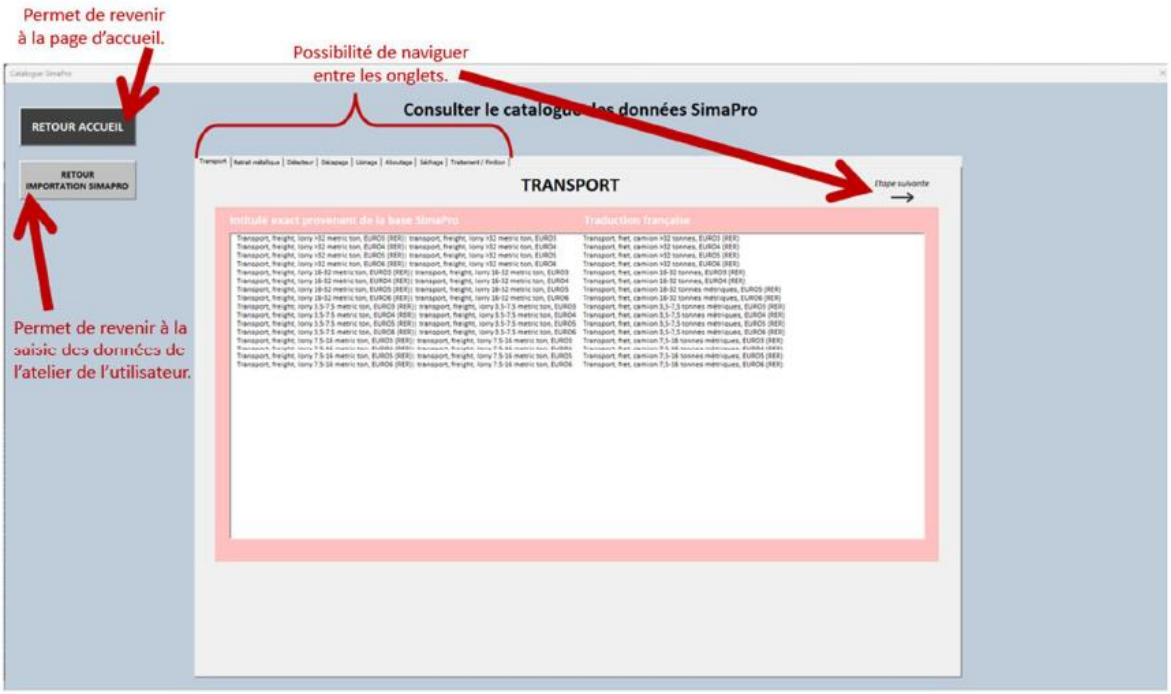


Figure 70 - Exemple de l'une des pages « Catalogue SimaPro »

4.3.3.4.7- Les pages « Données poutre »

Lorsque l'utilisateur accède à l'interface « Données de la poutre », deux options principales lui sont proposées :

- Saisir une nouvelle poutre afin de l'intégrer dans la base de données ;
- Consulter une poutre existante déjà enregistrée dans la base de données.

Lorsqu'un utilisateur sélectionne le bouton « Rentrer une nouvelle poutre », la page « Données de la poutre » est mise à jour afin de permettre la saisie des informations spécifiques à l'élément concerné. L'utilisateur peut ainsi renseigner l'ensemble des caractéristiques nécessaires à son identification et à son intégration dans la base de données. Une fois la saisie des données finalisée, l'utilisateur a la possibilité d'enregistrer les informations relatives aux différentes étapes et d'accéder à l'étape suivante. La page « Données calcul » s'ouvre alors automatiquement. La (Figure 71) illustre cette étape du processus.

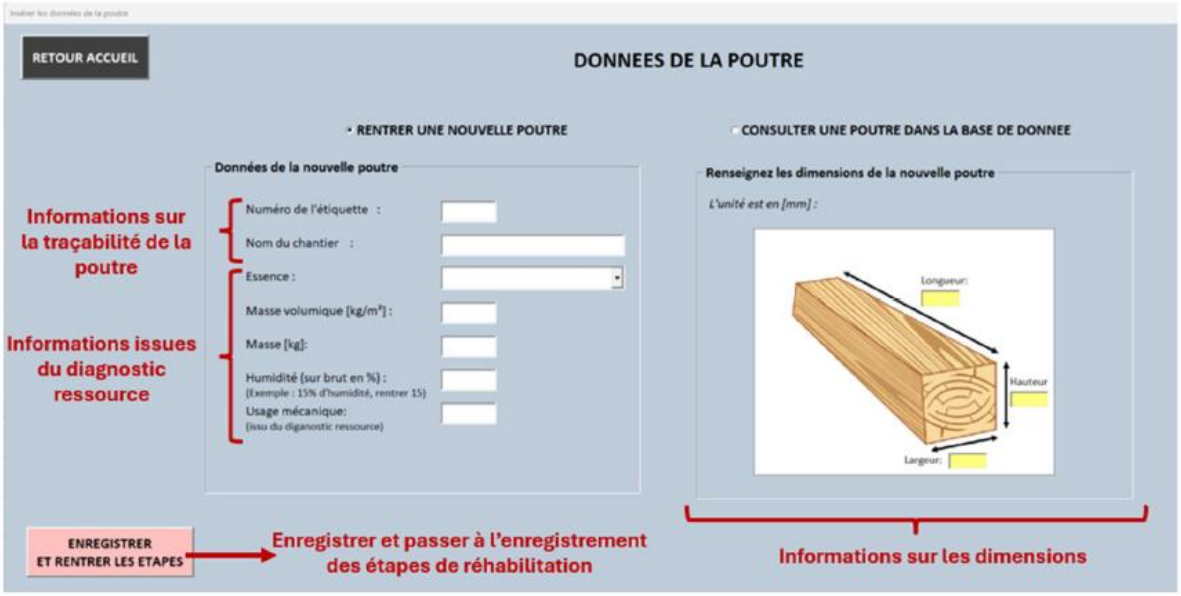


Figure 71 - La Page « Données poutre »

Lorsqu'un utilisateur sélectionne l'option « Consulter une poutre dans la base de données », il est redirigé vers la page « Consulter une poutre ». Sur cette interface, il est invité à sélectionner le nom du chantier et/ou le numéro d'étiquette correspondant à la poutre qu'il souhaite consulter. Une fois la sélection effectuée, les informations relatives à la poutre ainsi que les données associées aux différentes opérations du processus de réemploi, préalablement enregistrées, sont automatiquement affichées. L'utilisateur peut alors naviguer entre les différentes pages de l'interface afin de consulter les informations disponibles, mais également enregistrer de nouvelles données ou modifier celles déjà existantes.

4.3.3.4.8- Les pages « Données calcul »

Dans les pages consacrées aux données de calcul du coût carbone de la poutre bois, l'utilisateur est invité à renseigner les informations pertinentes relatives aux différentes étapes du processus de réemploi. Ces informations, nécessaires au calcul de l'impact carbone, sont enregistrées dans les interfaces dédiées. Pour chaque opération du processus, les données doivent être validées par l'utilisateur en cliquant sur le bouton « Enregistrer », afin qu'elles soient sauvegardées dans la base de données. La (Figure 72) illustre un exemple correspondant à l'étape de transport vers le site de reconditionnement.



Figure 72 - Exemple de l'une des pages « Données calcul »

4.3.3.4.9- Les pages « Résultat des émissions de $CO_{2,eq}$ »

La page « Résultat » est accessible depuis la page « Accueil », la page « Consulter données » ou la page « Rentrer les opérations ». Lorsqu'il accède à cette interface, l'utilisateur peut sélectionner l'étiquette correspondant à la poutre dont il souhaite consulter les résultats. Les résultats sont présentés sous différentes formes, comme l'illustre la (Figure 73) :

- Une vue multipage comprend notamment une page récapitulative présentant l'ensemble des opérations associées au processus de réemploi de la poutre. L'utilisateur dispose de la possibilité de modifier les informations et de les enregistrer à nouveau. Les données sont alors sauvegardées dans la base sous la forme d'une étiquette. En cas de modification, l'enregistrement est réalisé selon le même principe, en conservant le numéro d'étiquette initial auquel est ajoutée une indication de version. Cette fonctionnalité permet de tester différents scénarios hypothétiques de réemploi et d'en comparer les émissions de carbone.

- Des représentations graphiques de type diagramme circulaire (camembert) permettent de visualiser la répartition du temps et des émissions de CO_2 eq par étape du processus. Ces représentations facilitent l'identification rapide des opérations les plus consommatrices de temps ou les plus émettrices en carbone.

- Les résultats sous forme numérique permettent d'accéder aux valeurs brutes des calculs, intégrant l'ensemble des étapes du processus de réemploi de la poutre. Cette présentation

offre une vision détaillée et quantitative des émissions de carbone associées à chaque opération.

- Les résultats sous forme de diagramme de Sankey complètent l'analyse graphique. Ce type de représentation s'inspire de la présentation des résultats proposée par le logiciel SimaPro et devient visible lorsque l'utilisateur fait défiler la page. L'épaisseur des flux représentés est proportionnelle aux émissions de CO_2 eq associées à chaque étape, ce qui permet d'identifier rapidement les opérations les plus contributrices aux émissions. Sur cette même page, une fonctionnalité permet également de comparer les émissions de carbone associées à une poutre de réemploi avec celles d'une poutre neuve équivalente, issues de la base de données INIES. Toutefois, cette fonction de comparaison n'est pas encore entièrement automatisée dans la version actuelle du code et nécessite encore certaines manipulations.

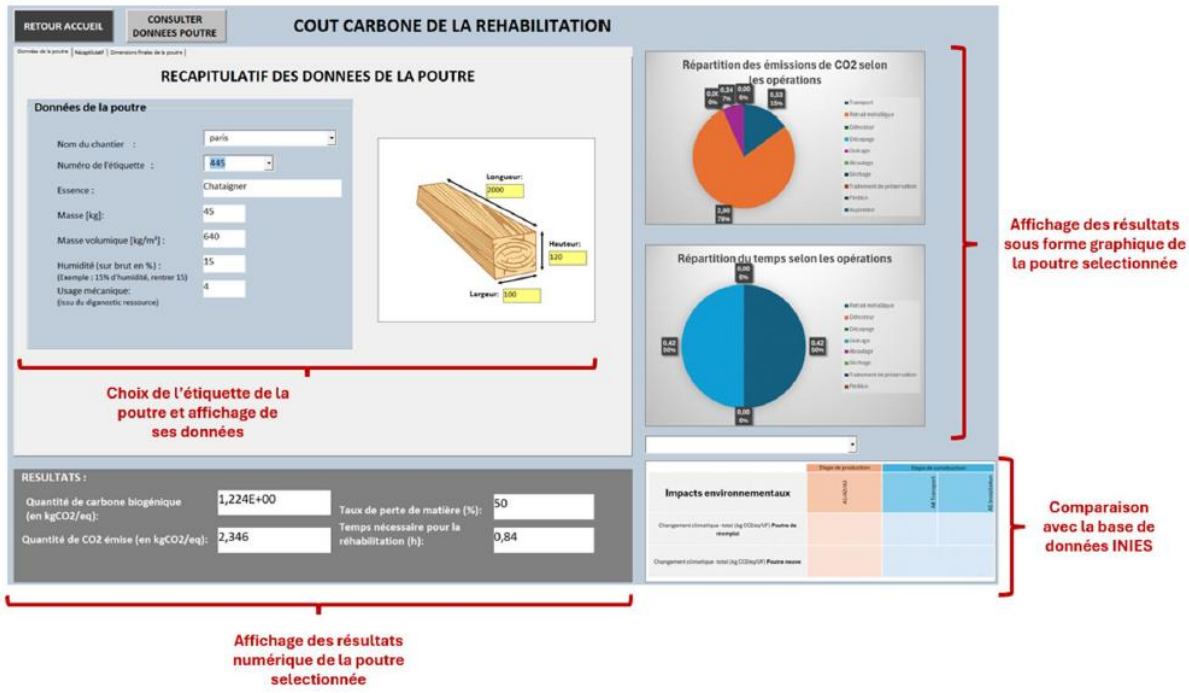


Figure 73 - Page « Résultat des émissions de CO2,eq » dans le cadre d'un exemple de poutre

4.3.3.5- Utilisation du calculateur dans le cadre d'une solive issue du chantier de Remiremont

Ce chapitre présente l'application du calculateur carbone à une solive provenant du chantier de Remiremont. L'objectif est d'illustrer de manière concrète le fonctionnement de l'outil et d'évaluer le coût carbone associé aux différentes étapes du processus de réemploi pour cet élément spécifique.

4.3.3.5.1- Importation du parc machine de l'entreprise de charpente

Conformément aux indications du chapitre 4.3.2, les données relatives au parc machine de l'entreprise de charpente sont désormais disponibles. Il devient ainsi possible d'intégrer ce parc machine au calculateur carbone. Cette intégration permet de réaliser l'évaluation du coût carbone pour une solive issue du chantier de Remiremont, en mobilisant à la fois les données spécifiques au parc machine et les informations complémentaires provenant du logiciel SimaPro.

4.3.3.5.1.1- Importation des données relatives à la tronçonneuse

Les informations associées à l'étape de pré-débit d'une solive concernent l'utilisation d'une tronçonneuse. Cet équipement présente les caractéristiques suivantes :

- Tronçonneuse essence de la marque HUSQVARNA, modèle 365, d'une puissance de 3,6 kW.

Ces données peuvent être saisies directement depuis les pages « Rentrer votre parc machine ». La (Figure 74) illustre cette opération au sein de l'interface correspondante.

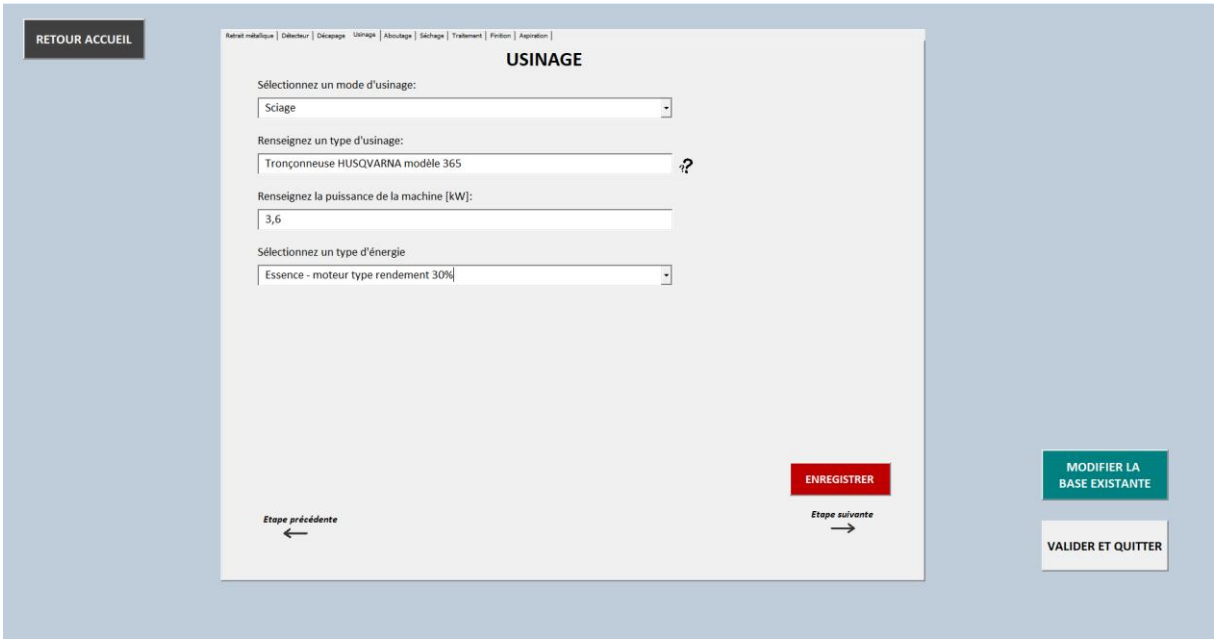


Figure 74 - Saisie des données relatives à la tronçonneuse dans le cadre d'une solive bois

4.3.3.5.1.2- Importation des données relatives à la scie de débit

Les informations concernant les étapes de délignage, de mise à longueur et d'usinage des extrémités de la solive concernent l'utilisation d'une scie de débit. Cet équipement présente les caractéristiques suivantes :

- Scie de débit électrique de la marque Hundegger, modèle SC3-200, d'une puissance de 5,5 kW.

Ces données peuvent être saisies directement depuis les pages « Rentrer votre parc machine ». La (Figure 75) illustre cette opération au sein de l'interface correspondante.

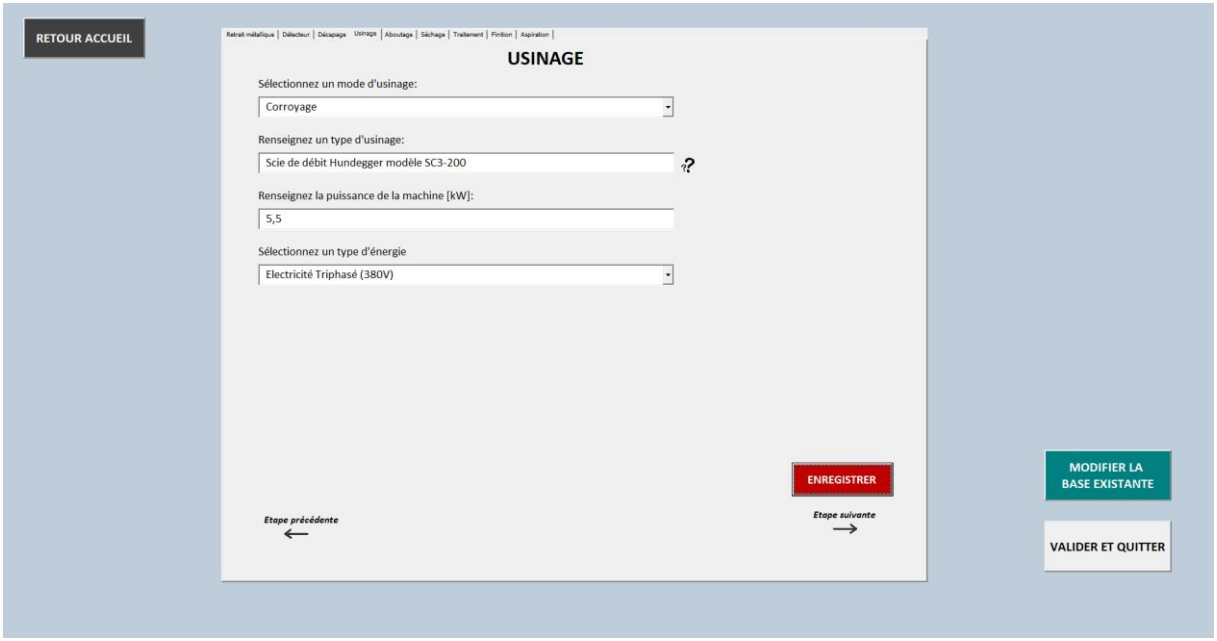


Figure 75 - Saisie des données relatives à la scie de débit dans le cadre d'une solive bois

4.3.3.5.2- Calculer le coût carbone relatif à une solive bois

Il est possible de procéder au calcul carbone d'une solive de réemploi à l'aide du calculateur. Pour ce faire, il convient dans un premier temps de créer les données spécifiques à la solive depuis la page « Données de la poutre », comme illustré à la (Figure 76).

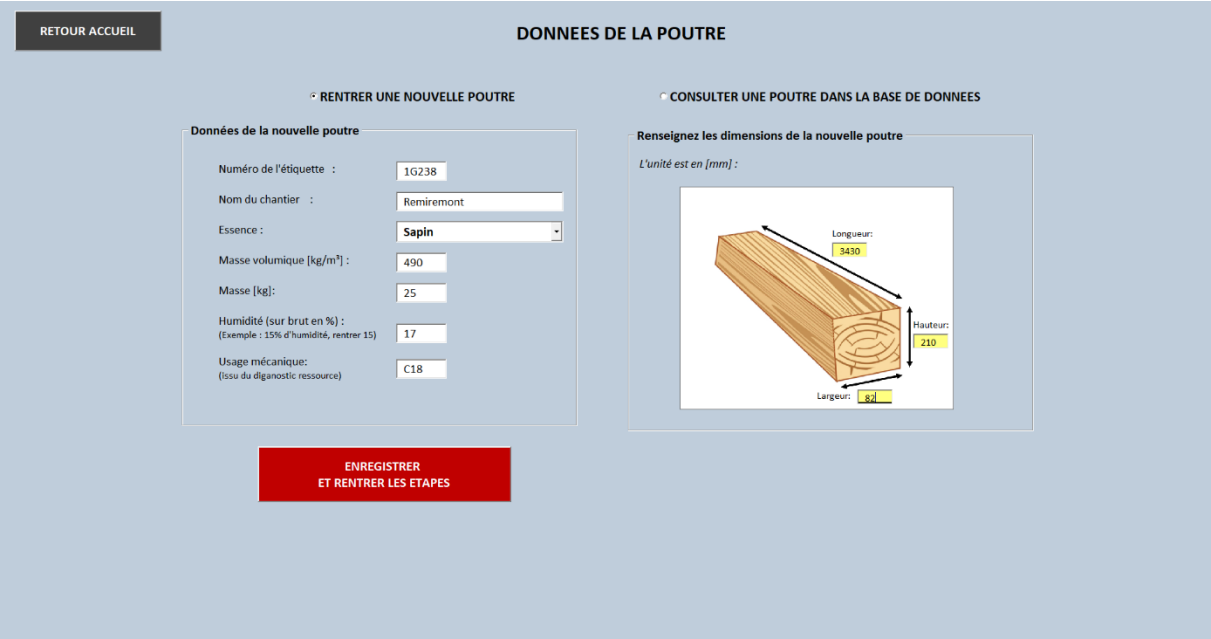


Figure 76 - Saisie des données relatives à la solive bois

Une fois la création des données de la solive réalisée, il est possible de renseigner les différentes étapes du processus de réemploi dans les pages « Données calcul ». Pour la solive issue du chantier de Remiremont, trois étapes doivent être renseignées :

- Le transport depuis le site de déconstruction jusqu'à l'entreprise de charpente bois.
- La phase de reconditionnement, incluant le pré-débit, le délignage, la mise à longueur et l'usinage des extrémités de la solive.
- Le transport de l'entreprise de charpente bois jusqu'au chantier de construction.

Concernant la phase de reconditionnement, il est important de noter que les étapes liées à l'utilisation de la scie de débit sont assimilées à un corroyage. Cette approximation est nécessaire, car le calculateur carbone ne permet pas d'associer plusieurs étapes à un même mode d'usinage. Il est toutefois précisé que cette modification n'affecte pas les résultats obtenus.

La (Figure 77) illustre l'intégration du transport depuis le site de déconstruction jusqu'à l'atelier de charpente bois. La (Figure 77) présente l'intégration de la phase de reconditionnement, incluant le pré-débit, le délignage, la mise à longueur et l'usinage des extrémités de la solive. Enfin, la (Figure 79) illustre l'intégration du transport depuis l'atelier de charpente bois jusqu'au chantier de construction. Chacune de ces figures correspond à l'intégration du processus de réemploi en considérant le parc machine de l'entreprise de charpente bois. Une opération similaire est réalisée en utilisant les données issues du logiciel SimaPro.

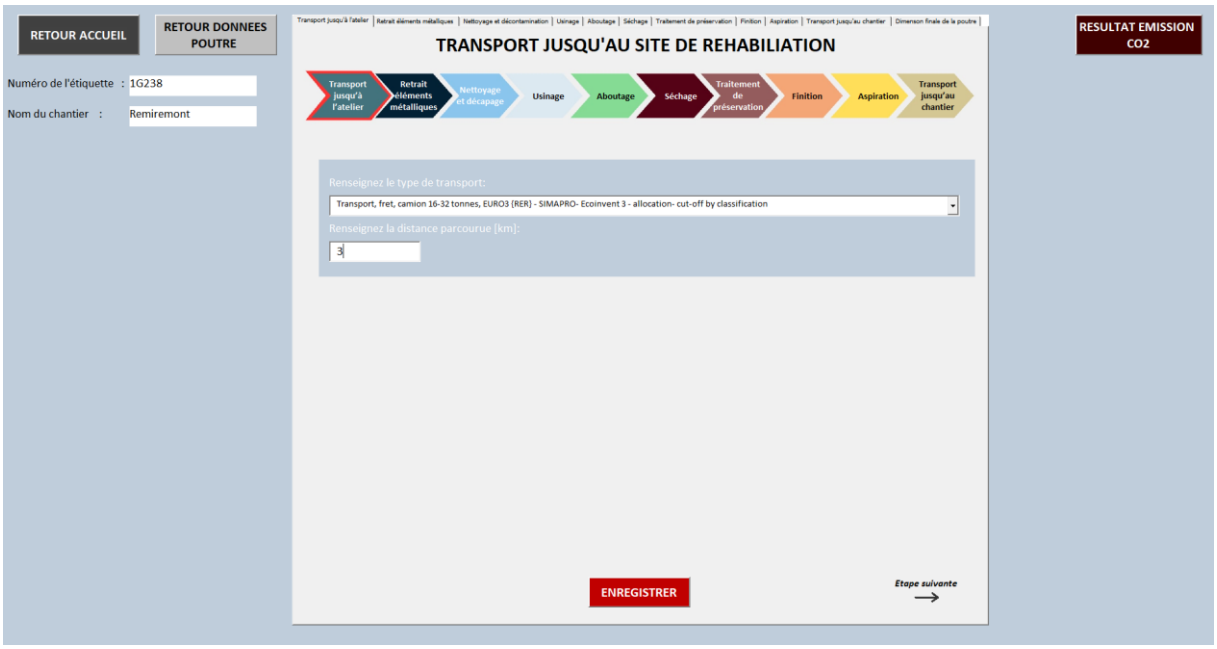


Figure 77 - Saisie des données relatives au transport du site de déconstruction jusqu'à l'entreprise de charpente bois de la solive bois

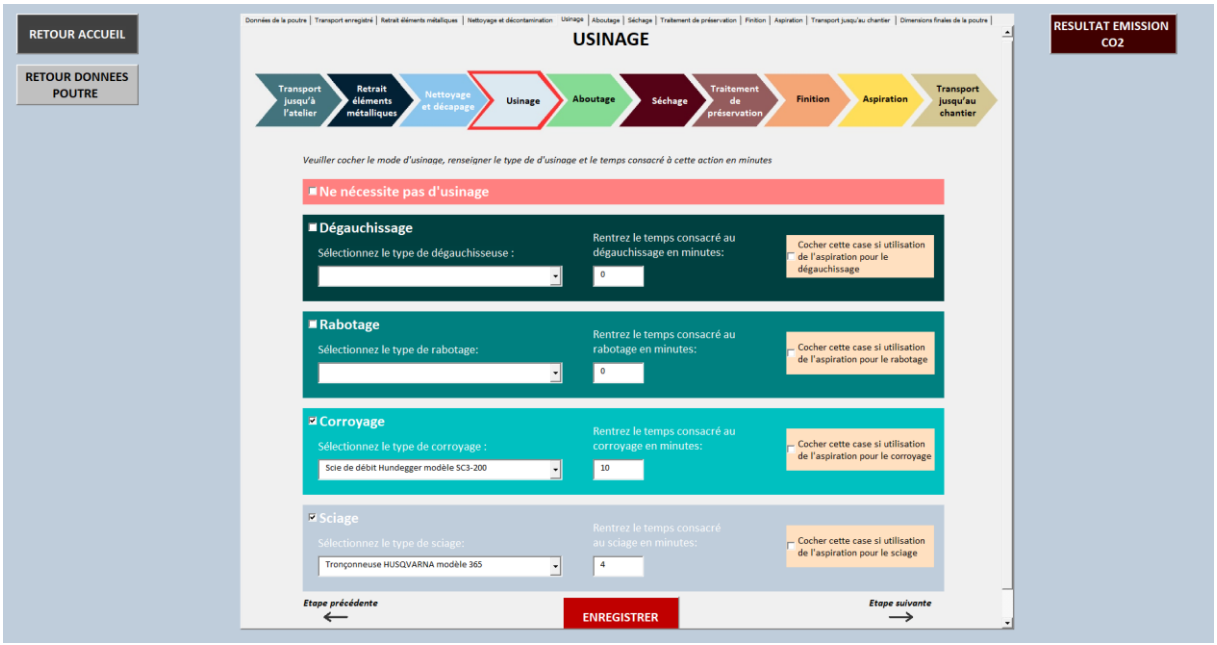


Figure 78 - Saisie des données relatives à l'usinage de la solive bois

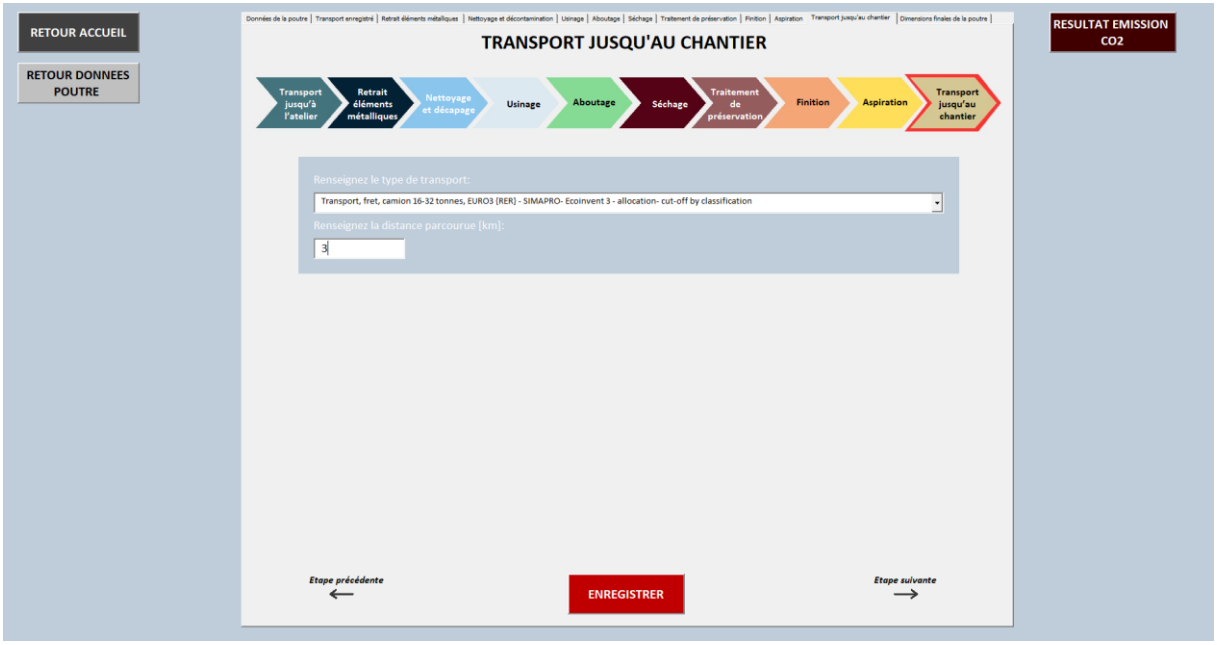


Figure 80 - Saisie des données relatives au transport du site de l'entreprise de charpente bois jusqu'au site de construction de la solive bois

Il est enfin possible de saisir les dimensions finales de la poutre, comme illustré à la (Figure 79).

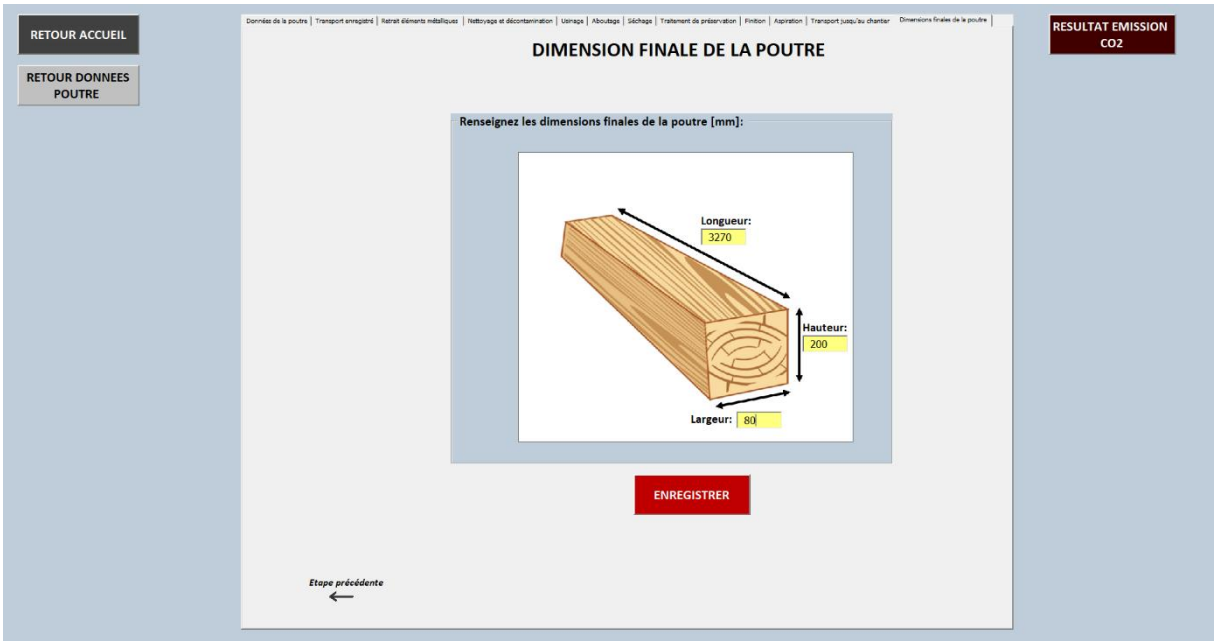


Figure 79 - Saisie des données relatives aux dimensions finales de la solive bois

4.3.3.5.3- Interprétation des résultats et Comparaison à une solive neuve manufacturée équivalente

Une fois les données relatives au processus de réemploi de la solive renseignées dans l'interface du calculateur, il devient possible d'analyser les résultats obtenus. La (Figure 81) reprend les émissions de carbone calculées, affichées dans les pages « Résultats des émissions ».

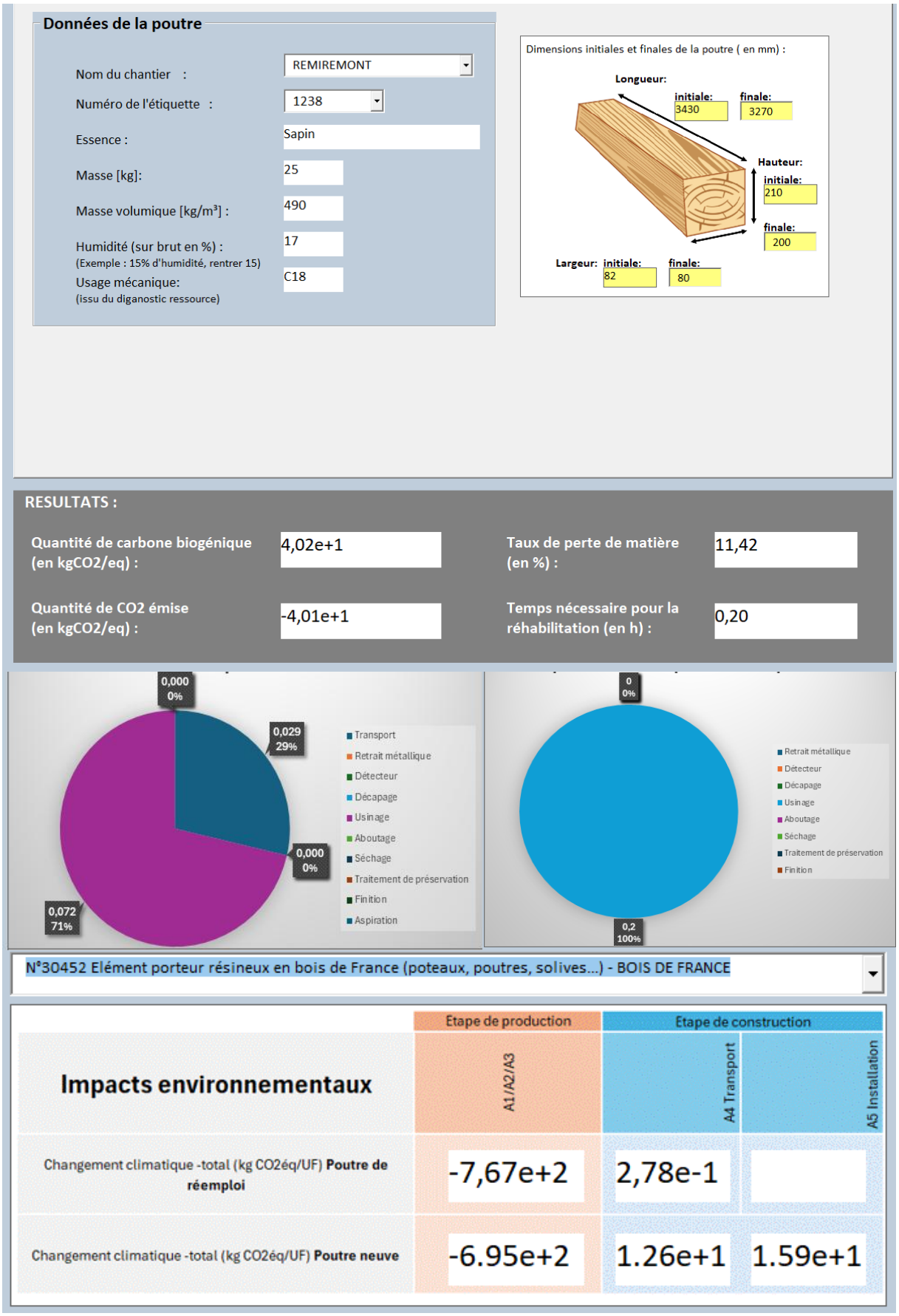


Figure 81 - Résultats obtenus dans le cadre de la solive bois considérée

L'analyse de la (Figure 81) met en évidence plusieurs éléments significatifs. Avant d'aborder les résultats relatifs aux émissions de carbone, il convient de s'intéresser au temps de reconditionnement. Celui-ci est estimé à 0,2 heure par solive. En extrapolant cette durée à l'ensemble du lot destiné au chantier de construction, composé de 180 solives, le temps total de reconditionnement s'élève à environ 38 heures. Ce volume de travail correspond ainsi à une semaine complète d'activité pour une entreprise de charpente. En pratique, l'entreprise Passiv Home a réparti cette opération sur une durée de deux semaines.

Dans le cadre de l'analyse du taux de perte, celui-ci est estimé à 11,4 % pour la solive étudiée. Cette perte est principalement liée à la réduction de la longueur de l'élément lors des opérations de reconditionnement. À l'échelle de l'ensemble du lot de solives, il apparaît que le taux de perte demeure inférieur à 20 %. Cette limite s'explique par la nécessité d'adapter chaque élément aux dimensions requises par le projet de construction neuf, en recherchant une correspondance optimale avec les longueurs attendues. Par ailleurs, les résidus de bois issus du reconditionnement peuvent être valorisés selon deux voies principales : le recyclage ou la valorisation énergétique. Ces sous-produits s'intègrent ainsi dans les filières de valorisation existantes, ce qui indique que le réemploi d'éléments en bois ne remet pas en cause le fonctionnement ni la pérennité de ces filières.

Dans le cadre de l'analyse des données carbone, il a été déterminé que la solive étudiée contient 40,2 $kg_{CO_2,eq}$ de carbone biogénique. Par ailleurs, le potentiel de changement climatique associé à cette solive de réemploi s'élève à -40,1 $kg_{CO_2,eq}$. Cette valeur négative traduit une rétention prolongée du carbone biogénique au sein du matériau. Ce résultat met en évidence l'intérêt de la valorisation en cascade des éléments bois, visant à prolonger le stockage du carbone dans le temps. L'analyse des contributions aux émissions indique que la phase de réusinage constitue le principal poste d'émissions du processus de réemploi, représentant 71 % du total. À l'inverse, les émissions liées au transport apparaissent relativement faibles, en raison de la proximité entre le site de reconditionnement et le chantier de construction. Cette configuration permet de limiter significativement l'impact du transport. Ces résultats soulignent l'importance d'un développement local territorialisé des filières de réemploi, afin de réduire au maximum les distances parcourues et, par conséquent, l'impact sur le potentiel de changement climatique. Le calculateur carbone permet également de comparer les résultats obtenus avec ceux d'un élément bois neuf équivalent, défini à partir d'une FDES. Dans cette étude, la FDES n°30452, intitulée « Élément porteur résineux en bois de France », réalisée par l'entreprise Esteana pour le compte de la Fédération Nationale du Bois, a été retenue comme référence, voir l'{Annexe 8}. Afin d'assurer la comparabilité des résultats, les données relatives à la solive de réemploi ont été converties à l'unité fonctionnelle de référence, soit 1 m³ de bois, comme illustré dans la partie inférieure de la (Figure 81). La comparaison met en évidence que la solive de réemploi présente un

potentiel de réchauffement climatique plus favorable sur les phases de production A1 à A3. Le bilan carbone s'établit à -767 $kg_{CO_2,eq}$ pour la solive de réemploi, contre -695 $kg_{CO_2,eq}$ pour une solive neuve équivalente. Concernant la phase A4, relative au transport vers le site de construction, l'impact carbone est de 0,28 $kg_{CO_2,eq}$ pour la solive de réemploi, contre 12,6 $kg_{CO_2,eq}$ pour la solive neuve. Cette différence significative s'explique par l'écart de distance parcourue : 3 kilomètres pour la solive de réemploi contre 94 kilomètres pour la solive neuve. En résumé, durant les phases de production A1 à A3, la solive de réemploi présente une différence de 10 % en termes de bénéfice carbone par rapport à la solive neuve équivalente. Sur la phase A4, la différence s'établit 98 % en termes de bénéfice carbone, illustrant l'importance du développement du réemploi à l'échelle locale. À partir de la phase A5, les deux solutions présentent un cycle de vie identique. Ainsi, les écarts observés sur les phases amont influencent directement le bilan global. L'ensemble de ces résultats montre que le recours à des solives de réemploi permet de réduire l'empreinte carbone par rapport à l'utilisation de solives neuves. Dans le cadre de l'opération de Remiremont, cette stratégie de réemploi s'avère particulièrement pertinente, en contribuant de manière significative à la diminution du coût carbone du bâtiment.

Dans le cadre de cette étude, il est intéressant d'examiner l'impact carbone de la phase de dépose sélective et de le comparer par rapport à l'impact carbone de la phase C1 d'un produit neuf manufacturé comparable. Selon l'{Annexe 8} la phase C1 pour une solive neuve est de 15,7 $kg_{CO_2,eq}$ tandis que le coût carbone lié à la dépose sélective d'une solive issu du chantier de Remiremont est de 6,6 $kg_{CO_2,eq}$. Cette valeur est déterminée selon les hypothèses décrites au travers du chapitre 4.3.2.1.1 et de l'équation (18) pour les émissions associées à la scie sabre électrique. Le coût carbone lié à la dépose sélective dans le cadre du chantier de Remiremont est donc deux fois inférieur à celui associé lors d'une démolition ou d'une déconstruction « classique ». Cette différence s'explique en grande partie par l'hypothèse prise dans le cadre de la FDES qui considère un temps d'utilisation d'un camion grue de 15 minutes par mètre cube de solive. Cette approche permet de mettre en évidence qu'il serait possible de mieux prendre en compte le coût carbone lié à la dépose sélective des éléments de réemploi.

Dans le cadre de cette étude, il apparaît pertinent d'examiner l'influence d'une variation des distances de transport sur les résultats carbone. En référence aux objectifs de la REP PMCB, il est recommandé que la distance entre un point de collecte, tel qu'un chantier de déconstruction, et un centre de reconditionnement soit limité à 30 kilomètres en zone rurale et à 20 kilomètres en zone urbaine. L'utilisation du calculateur carbone permet d'explorer ce type de scénarios alternatifs, notamment en faisant varier les distances parcourues lors des phases de transport. La (Figure 83) présente les résultats carbones obtenus en considérant une distance de 20 kilomètres entre le chantier de déconstruction et

le site de reconditionnement, tandis que la (Figure 82) illustre le cas d'une distance portée à 30 kilomètres.

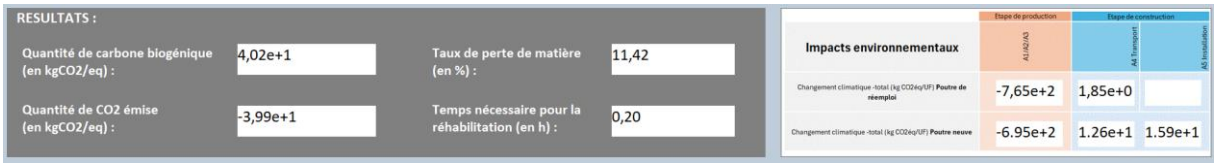


Figure 83 - Résultats obtenus dans le cadre de la solive bois considérée avec l'hypothèse d'un transport de 20 kilomètres

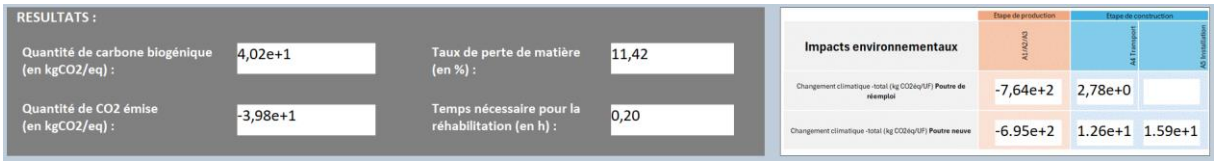


Figure 82 - Résultats obtenus dans le cadre de la solive bois considérée avec l'hypothèse d'un transport de 30 kilomètres

L'analyse des deux figures met en évidence que le transport a une influence limitée sur le bilan carbone associé à l'étape de production. En effet, dans le cas de la (Figure 83), le résultat carbone de cette étape s'élève à -765 $kg_{CO_2\ éq}$, tandis qu'il atteint -764 $kg_{CO_2\ éq}$ pour la (Figure 82). Ces valeurs, très proches, indiquent une variation négligeable liée au transport. Par ailleurs, dans les deux configurations, les résultats obtenus demeurent plus favorables que celui issu de la FDES utilisée comme référence. Une attention particulière peut également être portée aux résultats de la phase A4. Ceux-ci se révèlent, dans les deux cas, inférieurs à la valeur de la FDES. Plus précisément, la (Figure 83) présente une valeur de 1,85 $kg_{CO_2\ éq}$, contre 2,78 $kg_{CO_2\ éq}$ pour la (Figure 82). Enfin, afin d'assurer la cohérence de la comparaison, il est possible de retenir l'hypothèse adoptée dans la FDES, à savoir une distance de transport de 94 kilomètres. Le résultat correspondant est présenté en (Figure 84).

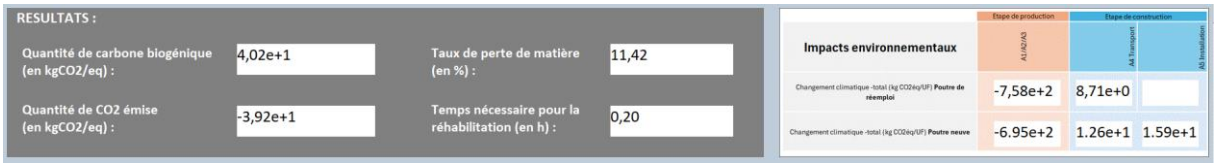


Figure 84 - Résultats obtenus dans le cadre de la solive bois considérée avec l'hypothèse d'un transport de 94 kilomètres

Il apparaît que, même dans cette configuration, les résultats obtenus, tant pour l'étape de production que pour la phase A4, restent inférieurs à ceux issus de la FDES. Ces observations suggèrent que l'impact carbone du transport, dans le cadre du processus de réemploi, demeure secondaire. En revanche, les étapes liées au reconditionnement de la poutre constituent des postes déterminants dans le bilan carbone global. En effet, l'augmentation du nombre d'opérations nécessaires au reconditionnement se traduit directement par une hausse du coût carbone associé.

Les résultats de la présente étude se concentrent exclusivement sur les phases de production (A1, A2 et A3), ainsi que sur la phase A4 relative au transport entre le centre de reconditionnement — en l'occurrence, le site du charpentier bois — et le chantier de construction. Toutefois, il est possible

d'élargir l'analyse à l'ensemble du cycle de vie de la solive de réemploi en s'appuyant sur la FDES précédemment mentionnée pour les étapes ultérieures. À ce titre, les données issues de cette FDES indiquent que la phase A5 présente un impact carbone de 15,9 $kg_{CO_2\ éq}$. Par ailleurs, les phases d'usage du bâtiment (phases B) sont considérées comme ayant un impact carbone nul dans ce contexte, dans la mesure où l'élément étudié est de nature structurelle. En revanche, les étapes de fin de vie (phases C) génèrent un impact carbone significatif, estimé à 736 $kg_{CO_2\ éq}$.

En intégrant l'ensemble de ces valeurs, le coût carbone de la solive de réemploi, rapporté à l'unité fonctionnelle et considéré sur l'ensemble de son cycle de vie, s'établit à -14,8 $kg_{CO_2\ éq}$. Ce résultat traduit le fait que le processus de réemploi, tel qu'il est mis en œuvre dans le cadre du projet de Remiremont, présente des bénéfices environnementaux significatifs. En effet, cette approche contribue à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, notamment en favorisant la séquestration du carbone biogénique. À titre de comparaison, l'impact carbone d'un élément neuf s'élève à 70,1 $kg_{CO_2\ éq}$. Ainsi, dans le cadre de l'analyse environnementale menée, l'intégration d'un élément neuf apparaît nettement moins favorable que celle d'un élément issu du réemploi dans le contexte étudié.

La démarche comparative réalisée jusqu'à présent, ne s'est ancrée que dans le cadre d'une approche statique. Or, il est aussi essentiel de reprendre les résultats sous une approche dynamique. Comme mentionné au chapitre 2.4.1.3, seules les étapes d'utilisation et de fin de vie du produit sont concernées par l'utilisation du coefficient de pondération des émissions de gaz à effet de serre. La (Figure 85) permet de comparer les résultats entre l'approche statique et l'approche dynamique dans le cadre de la solive en réemploi.

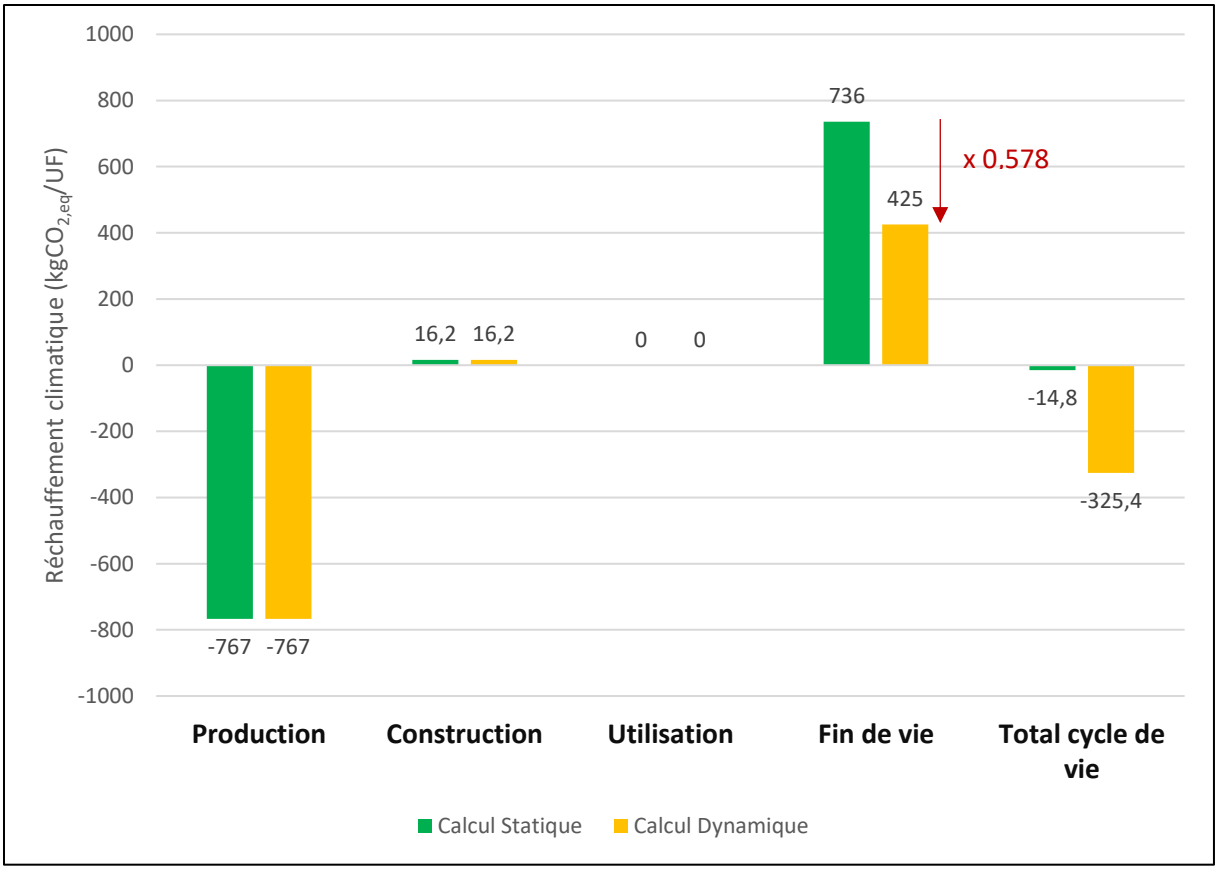


Figure 85 - Comparaison de l'impact carbone d'une solive de réemploi selon une approche dynamique ou statique dans le cadre de l'analyse de cycle de vie

La (Figure 85) permet bien de visualiser la différence de résultat dans le cadre de l'étape de fin de vie entre l'approche dynamique et l'approche statique. Dans le cadre de l'approche statique, le résultat pour l'étape de fin de vie est de 736 $kg_{CO_2\,éq}$ tandis que dans le cadre de l'approche dynamique la valeur s'établit à 425 $kg_{CO_2\,éq}$. En conséquence, on trouve que le coût carbone associé à la solive de réemploi, rapporté à l'unité fonctionnelle et considéré sur l'ensemble de son cycle de vie, s'établit à -325,4 1 $kg_{CO_2\,éq}$. Ce résultat traduit la valorisation des matériaux biosourcés au travers de l'approche dynamique. On peut reprendre la comparaison établie avec la solive neuve équivalente sous l'approche dynamique, c'est ce que montre la (Figure 86).

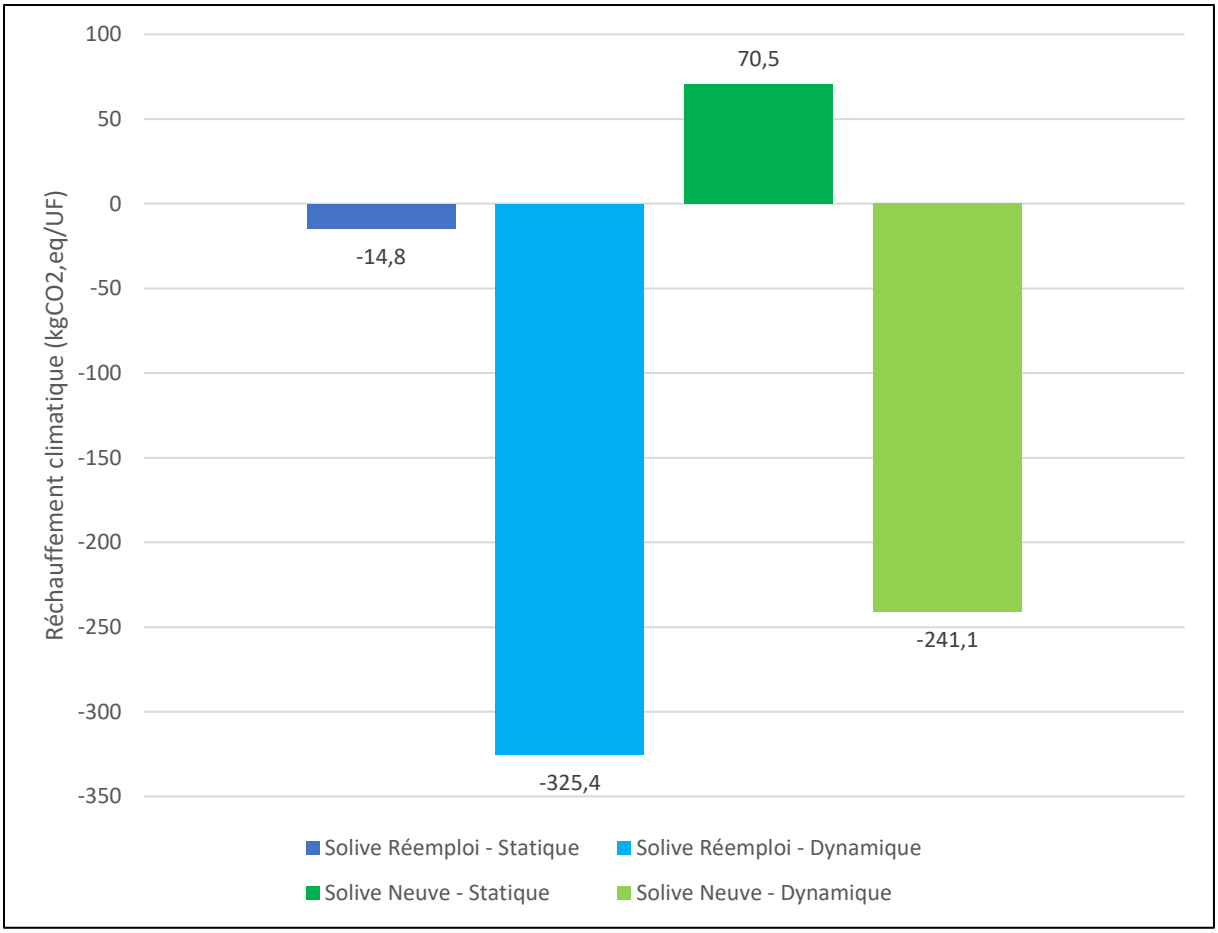


Figure 86 - Comparaison entre l'impact carbone d'une solive de Remiremont et l'impact carbone d'une solive neuve équivalente selon une approche dynamique ou statique dans le cadre de l'analyse de cycle de vie

La (Figure 86) montre bien la différence de résultat sur l'impact carbone entre une approche dynamique ou une approche statique. Dans le cadre de l'approche dynamique, la poutre neuve équivalente admet cette fois un résultat de coût carbone, rapporté à l'unité fonctionnelle et considéré sur l'ensemble de son cycle de vie, de – 241,1 $kg_{CO_2\ éq}$. La solive de réemploi présente donc une différence de 26 % en termes de bénéfice carbone par rapport à la solive neuve équivalente dans le cadre de l'approche dynamique. Ainsi, malgré une approche dynamique la conclusion trouvée dans le cadre de l'approche statique reste identique : l'intégration d'un élément neuf apparaît nettement moins favorable que celle d'un élément issu du réemploi dans le contexte étudié.

Afin de proposer une évaluation environnementale exhaustive, il est nécessaire de rapporter les résultats à l'ensemble du volume de bois de réemploi mobilisé dans le cadre de l'opération. À ce titre, le projet intègre un total de 180 solives issues du réemploi, correspondant à un cubage de 8,47 m³. Sur cette base, le coût carbone associé aux solives de réemploi s'élève à -125 $kg_{CO_2\ éq}$, tandis que l'utilisation de solives neuves équivalentes aurait conduit à un impact de 594 $kg_{CO_2\ éq}$, en approche statique. À l'échelle de l'édifice, le recours à ce lot de solives de réemploi présente ainsi un intérêt environnemental significatif. Cette démarche permet en effet d'éviter l'émission d'environ 600 kg de CO_2, tout en

contribuant au maintien du carbone biogénique stocké dans le matériau sur le long terme. Dans le cadre d'une approche dynamique, le coût carbone associé aux solives de réemploi s'élève à -2756 $kg_{CO_2 éq}$, tandis que l'utilisation de solives neuves équivalentes aurait conduit à un impact de -2042 $kg_{CO_2 éq}$. Les émissions évitées s'élèvent cette fois-ci à environ 700 kg de CO_2. L'approche dynamique est donc d'autant plus intéressante que l'approche statique. Par ailleurs, ces résultats invitent à interroger certaines limites liées à l'application de la RE2020. En effet, conformément à la méthodologie définie par la norme NF EN 15804+A2/CN, la phase A1 est considérée comme ayant un impact carbone nul dans le cas du réemploi. Or, pour les matériaux biosourcés, cette phase correspond précisément à celle où s'exprime une part importante du stockage de carbone biogénique, constituant ainsi un facteur différenciant majeur. Dans ce contexte, l'application stricte de cette convention méthodologique tend à atténuer l'avantage environnemental du réemploi par rapport à l'utilisation de matériaux neufs. Cette analyse met ainsi en évidence une limite notable du cadre normatif actuel, qui ne semble pas pleinement prendre en compte la spécificité et la diversité des matériaux de réemploi, en particulier lorsqu'il s'agit de matériaux biosourcés.

5- Conclusions et perspectives

Au travers des chapitres précédents, ce travail s'est attaché à analyser en détail un projet de déconstruction et de reconstruction mené à l'échelle réelle. L'étude a plus particulièrement porté sur la méthodologie et le processus de réemploi mis en œuvre dans ce contexte. Le présent chapitre vise à mettre en lumière les principaux enseignements issus de ce cas d'étude, ainsi que les perspectives qu'il ouvre pour le développement de la filière du réemploi.

S'agissant de la phase de déconstruction, le chantier de Remiremont permet de dégager plusieurs enseignements majeurs. En premier lieu, la déconstruction et la dépose sélective en vue du réemploi doivent être anticipées et planifiées dès les phases amont du projet. Cette anticipation repose notamment sur l'intégration rigoureuse des matériaux identifiés comme potentiellement réemployables au sein du diagnostic PEMD ou, le cas échéant, du diagnostic ressources. Plus largement, l'intégration précoce du réemploi dans les objectifs du projet apparaît comme un levier déterminant pour en assurer la réussite. Une telle démarche permet en effet de limiter les difficultés fréquemment rencontrées en phase de réalisation, telles que les pertes de traçabilité ou les surcoûts économiques.

Par ailleurs, la mise en œuvre d'une démarche de réemploi implique une adaptation des pratiques et des procédures de chantier afin de répondre aux spécificités de cette approche. Cette adaptation concerne à la fois les modalités de dépose des matériaux et l'organisation globale du site. À titre d'exemple, la mise en place d'une zone de stockage tampon constitue un levier d'optimisation de la gestion des ressources. En outre, les acteurs de la déconstruction sont appelés à renforcer leurs compétences afin d'améliorer l'efficacité des opérations de réemploi. Cette montée en compétence ne saurait toutefois se limiter à des formations théoriques. Elle suppose également le développement de dispositifs d'accompagnement, tels que des bureaux d'études spécialisés, capables de soutenir les acteurs tout au long des projets. Enfin, le partage des retours d'expérience issus des chantiers de réemploi apparaît essentiel pour enrichir les pratiques et favoriser une diffusion plus large de ces démarches au sein du secteur. Je propose par exemple la mise en place d'une plateforme de partage autour du réemploi, regroupant des retours d'expériences de chantiers ou encore des éléments bibliographiques, le tout en open source afin de toucher le plus grand nombre.

Les activités de déconstruction et de dépose sélective gagnent également à s'inscrire dans une démarche à dimension sociale, en intégrant pleinement le recours à des structures d'insertion. L'articulation entre la filière du réemploi et ces structures favorise en effet la convergence entre économie circulaire et économie sociale et solidaire. Une telle dynamique contribue au renforcement du maillage territorial des initiatives de réemploi, en s'appuyant sur le réseau d'acteurs de l'insertion

présents à l'échelle locale. Cette approche s'inscrit pleinement dans les objectifs portés par la REP PMCB ainsi que par les éco-organismes qui en assurent la mise en œuvre.

En ce qui concerne la requalification mécanique des éléments en bois, ma recherche propose une méthodologie opérationnelle, validée dans le cadre d'une application à l'échelle réelle. Celle-ci repose sur l'utilisation de techniques non destructives pour l'estimation du module d'élasticité. Les campagnes expérimentales menées sur des échantillons de bois de réemploi montrent que la méthode vibratoire permet d'obtenir des estimations plus représentatives des propriétés mécaniques réelles que la méthode ultrasonore. Il en ressort également que le niveau de sécurité associé à la technologie vibratoire est supérieur. Néanmoins, ces deux approches présentent des champs d'application complémentaires. La méthode vibratoire ne peut être mise en œuvre que sur des éléments déposés, tandis que la technologie ultrasonore peut être mobilisée directement sur des bois encore en œuvre. À ce titre, cette dernière constitue un outil pertinent pour une évaluation préliminaire du potentiel de réemploi, en amont des opérations de déconstruction. Enfin, il convient de souligner que les travaux réalisés se sont limités à des bois résineux. Dans cette perspective, la conduite de campagnes expérimentales complémentaires semble nécessaire afin d'évaluer la robustesse et la généralisation de ces méthodes dans le contexte élargi des bois de réemploi.

L'utilisation de technologies non destructives pour la détermination du module d'élasticité des bois de réemploi soulève par ailleurs plusieurs interrogations. Si leur application aux bois neufs constitue une pratique aujourd'hui bien établie, leur transposition au contexte du réemploi fait émerger des enjeux spécifiques, liés notamment aux caractéristiques intrinsèques et à l'historique de ces matériaux. Dans le cadre de ma recherche, une première analyse a été engagée afin d'évaluer l'influence du phénomène de plastification sur les résultats issus de ces technologies. Toutefois, la portée des conclusions demeure limitée en raison du nombre restreint d'échantillons testés. Les résultats obtenus laissent néanmoins apparaître une tendance : les modules d'élasticité estimés par les méthodes non destructives ne semblent pas refléter fidèlement l'évolution induite par la plastification. Cette problématique peut par ailleurs être rapprochée de celle du fluage, qui pourrait également influencer les propriétés mécaniques des bois de réemploi sur le long terme. Dans ce contexte, des investigations complémentaires apparaissent nécessaires afin d'approfondir la compréhension de ces phénomènes et d'évaluer plus finement la pertinence et la fiabilité des technologies non destructives pour la requalification des bois de réemploi.

Dans le cadre de ma recherche, il a été démontré que le classement en résistance des bois de réemploi peut être envisagé moyennant une adaptation de la norme NF EN 14081, initialement conçue pour les bois neufs. Cette adaptation concerne notamment le nombre minimal d'échantillons requis pour le

classement, qui apparaît devoir être réévalué à la baisse dans le contexte du réemploi. Une telle évolution s'inscrit dans une logique de préservation de la ressource, en limitant les besoins en essais destructifs. Par ailleurs, l'analyse menée sur les solives du projet de Remiremont n'a pas abordé la question du sous-classement des bois. Le choix méthodologique s'est en effet porté sur une gestion prudente, privilégiant le sur-classement dans une optique de sécurité et de maîtrise des risques. Néanmoins, la problématique du sur-classement devra être examinée à l'avenir, dans une perspective d'optimisation de l'utilisation des bois de réemploi, notamment sur le plan économique.

L'étude s'est orientée vers une approche de classement mécanique des bois de réemploi fondée sur la norme NF EN 14081. Toutefois, d'autres méthodes peuvent être envisagées, notamment une adaptation de la norme NF B52-001, relative au classement visuel des bois neufs. Le choix de privilégier la norme NF EN 14081 ne relève pas d'une décision arbitraire, mais s'inscrit dans une réflexion méthodologique approfondie. En effet, le classement visuel appliqué aux bois neufs conduit fréquemment à un sous-classement des éléments, en raison d'exigences particulièrement strictes. Dans le contexte du réemploi, une telle approche apparaît difficile à transposer de manière pertinente et efficiente à l'ensemble de la ressource disponible. À titre d'exemple, la grande diversité des essences rencontrées constitue un facteur limitant, difficilement intégrable dans une grille de critères visuels standardisée. À l'inverse, le recours à la norme NF EN 14081, fondée sur l'évaluation de propriétés physiques mesurables du matériau, offre un cadre plus objectif et mieux adapté aux spécificités des bois de réemploi. Cette approche permet de s'affranchir, dans une certaine mesure, des limites inhérentes aux critères visuels, souvent sujets à interprétation, et apparaît ainsi plus cohérente au regard des enjeux de requalification de cette ressource.

Dans le cadre du processus de requalification en résistance des bois de réemploi, la question des contraintes et exigences imposées par le cadre réglementaire apparaît centrale. En l'état, cette étape constitue un frein significatif au développement et à la diffusion du réemploi à grande échelle. Une analyse approfondie du contexte réglementaire, ainsi que des acteurs impliqués dans la qualification des bois neufs, met en évidence des disparités notables entre les exigences applicables aux bois neufs et celles imposées aux bois de réemploi. Or, les bois neufs ne sont pas exempts de risques, tandis que les bois de réemploi présentent, quant à eux, l'avantage d'avoir déjà démontré leur aptitude à l'usage au cours d'une première vie en œuvre. Dans ce contexte, il apparaît nécessaire de faire évoluer le cadre réglementaire afin de proposer des modalités de requalification plus cohérentes et adaptées aux spécificités des bois de réemploi. Une telle évolution constituerait un levier déterminant pour accompagner le changement d'échelle de la filière et sécuriser le recours à ces ressources dans les projets de construction.

Dans le cadre de la présente étude, les bois ont été réemployés directement sur site. Ils ont été mis en œuvre selon des modalités équivalentes à celles de bois neufs manufacturés, au sein d'un complexe de plancher bois/béton. La (Figure 87) illustre une partie des solives ainsi réintégrées lors du chantier de construction neuve.



Figure 87 - Photo prise lors du chantier de construction montrant la mise en œuvre des solives de réemploi dans le complexe de plancher d'un des nouveaux bâtiments

Il convient de souligner que, malgré la mise en œuvre d'une procédure de requalification des solives, leur transformation en vue de leur réintégration demeure complexe et soulève encore un certain nombre d'interrogations. Dans une optique d'optimisation des processus de transformation, une attention particulière doit être portée à la prise en compte des caractéristiques spécifiques des bois issus du réemploi. Ces spécificités peuvent notamment se traduire par la présence de traitements chimiques antérieurs ou de contaminants, tels que le plâtre ou des éléments métalliques, susceptibles d'affecter les procédés de transformation mécanique. Dans ce contexte, des travaux de recherche complémentaires apparaissent nécessaires afin de favoriser l'intégration de la ressource en bois de réemploi au sein des process industriels de transformation des produits bois.

La transformation des solives issues de Remiremont a été réalisée conformément aux exigences préalablement définies, en concertation avec l'ensemble des acteurs impliqués, à savoir le bureau

d'études spécialisé bois, le contrôleur technique et la maîtrise d'ouvrage. Toutefois, malgré l'élaboration d'un cahier des charges détaillé, le résultat obtenu ne s'avère pas pleinement satisfaisant. Il convient de préciser que les contraintes associées à la mise en œuvre de ces solives demeurent équivalentes à celles rencontrées pour des éléments neufs. Néanmoins, certaines difficultés spécifiques apparaissent lors de leur intégration, comme l'illustre la (Figure 88), qui présente la mise en place de l'extrémité d'une solive dans un sabot, mettant en évidence les problématiques rencontrées.

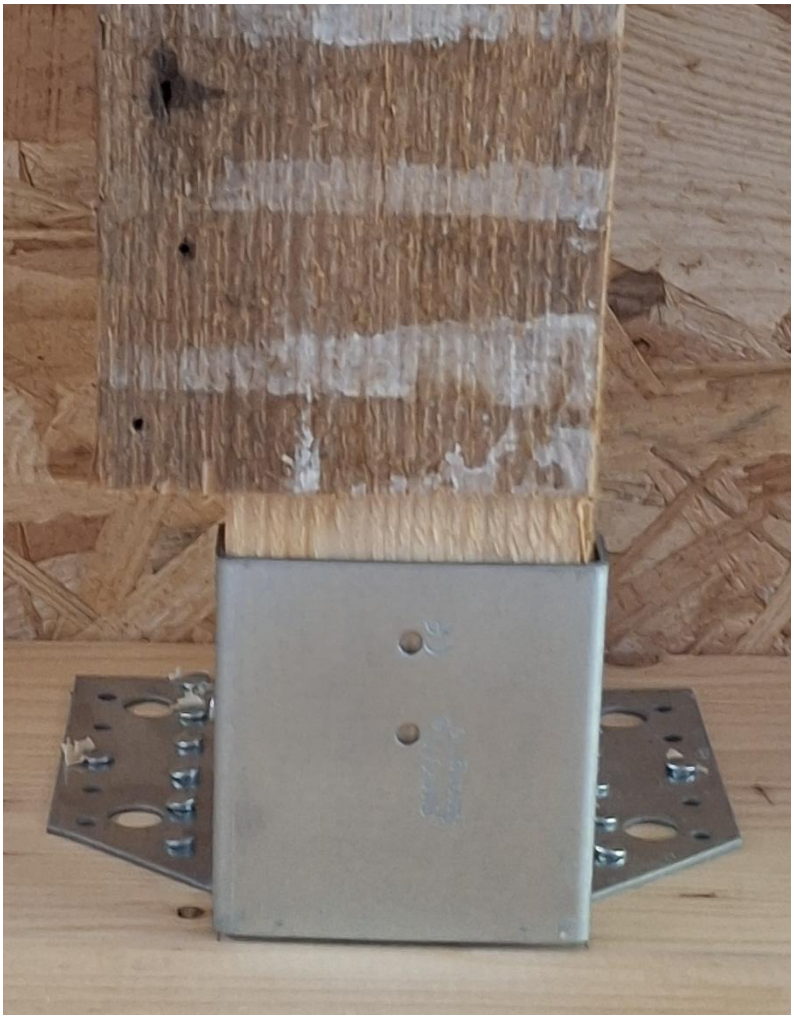


Figure 88 - Photo prise lors du chantier de construction montrant la mise en place d'une des extrémités d'une solive de réemploi dans un sabot en acier dans le complexe de plancher bois/béton

Il a été constaté que l'usinage des extrémités des solives n'a pas été réalisé conformément aux consignes établies. Cette non-conformité a engendré des anomalies, comme l'illustre la (Figure 88). En effet, la reprise des extrémités par usinage devait permettre d'obtenir un tenon centré sur la largeur de la solive, et non positionné en rive. Ces écarts de mise en œuvre soulignent la nécessité pour les entreprises d'intégrer de manière plus rigoureuse les spécificités liées à la transformation des bois de réemploi dans leurs procédures opérationnelles. Par ailleurs, il apparaît essentiel que les principes de

mise en œuvre couramment appliqués aux bois neufs soient transposés avec le même niveau d'exigence aux bois de réemploi, afin de prévenir l'apparition de désordres tels que celui observé.

Dans le cadre de ma recherche, un calculateur carbone a été développé afin de répondre de manière spécifique aux enjeux propres au bois de réemploi. En effet, les fiches FDES se rapportent généralement à un produit ou à une catégorie de produits caractérisés par un cycle de vie standardisé et bien défini. Or, dans le cas du réemploi, la variabilité des scénarios de cycle de vie — notamment en ce qui concerne les étapes de transport ou les procédés de reconditionnement — rend l'utilisation de ces référentiels plus complexe. Le calculateur proposé vise ainsi à fournir une évaluation plus fine et adaptée aux besoins des utilisateurs, en tenant compte des spécificités propres à chaque projet. Il intègre notamment la question du carbone biogénique, encore insuffisamment prise en compte dans les FDES relatives aux produits de réemploi, alors même que cet aspect revêt une importance déterminante dans l'analyse environnementale des matériaux bois. Par ailleurs, par sa conception et ses modalités d'utilisation, cet outil se positionne au plus près des acteurs de la filière du réemploi. Cette proximité permet de répondre de manière ciblée à leurs besoins opérationnels, faisant du calculateur un outil d'aide à la décision pertinent dans le cadre de projets intégrant des matériaux de réemploi.

Dans le cadre des politiques publiques visant à réduire les impacts environnementaux du secteur du bâtiment, le gouvernement français a introduit une nouvelle réglementation environnementale, en cohérence avec les objectifs nationaux de développement durable et de transition du secteur de la construction. Dans ce contexte, le réemploi, ainsi que plus largement les principes de l'économie circulaire, occupent une place croissante au sein des orientations réglementaires. Toutefois, le cadre méthodologique actuel appelle encore des évolutions afin de mieux prendre en compte les spécificités des matériaux de réemploi, en particulier lorsqu'il s'agit de matériaux bois. À cet égard, il apparaît nécessaire de préciser et d'adapter les modalités de calcul du module D, afin qu'elles intègrent de manière plus explicite les cycles de vie successifs des produits, comme cela a été proposé dans le chapitre précédent. Par ailleurs, la phase A_1 mérite une attention particulière dans le cas des matériaux biosourcés issus du réemploi. En effet, la méthodologie actuelle ne permet pas encore de valoriser de manière adéquate le carbone biogénique, pourtant déterminant dans l'évaluation environnementale de ces produits. Dans cette perspective, une évolution de la RE2020 apparaît nécessaire afin de proposer un cadre de calcul plus représentatif des bénéfices associés au réemploi, et notamment à l'utilisation de matériaux biosourcés.

Dans le cadre de l'analyse environnementale des produits issus du réemploi, il apparaît nécessaire d'élargir le périmètre d'évaluation au-delà de la seule quantification du coût carbone. L'outil présenté dans cette étude, développé en cohérence avec la réglementation en vigueur, se concentre en effet

exclusivement sur cet indicateur. Or, les bénéfices environnementaux du réemploi ne sauraient être appréhendés de manière exhaustive à travers ce seul prisme. En fonction de la nature des produits considérés, le réemploi permet notamment de limiter le prélèvement de ressources naturelles, de réduire la consommation d'eau douce ou encore de diminuer les pressions exercées sur les écosystèmes. Ces dimensions, bien que déterminantes, restent insuffisamment intégrées dans les approches actuelles d'évaluation. Par ailleurs, l'analyse de cycle de vie ne prend pas en compte les bénéfices sociaux associés à la filière du réemploi. Celle-ci mobilise pourtant un grand nombre d'acteurs issus de l'économie sociale et solidaire, notamment des associations et des structures d'insertion, qui contribuent activement au développement de l'économie circulaire. Les retombées sociales de ces initiatives, bien que significatives, demeurent encore peu valorisées, et ne sont que très rarement intégrées dans les outils d'évaluation actuels tels que l'analyse de cycle de vie. Seule l'analyse sociale de cycle de vie commence à s'intéresser aux impacts sociaux et sociaux-économiques des produits.

L'étude menée met en évidence la persistance de nombreux freins au développement du réemploi. Néanmoins, dans le cadre de la démarche mise en œuvre sur le chantier de Remiremont, plusieurs solutions ont été apportées afin de répondre aux obstacles identifiés. Si l'analyse économique n'a pas été développée de manière approfondie dans ce travail, elle constitue toutefois un paramètre central pour l'essor de la filière. Dans le cas étudié, une partie des investigations réalisées, notamment les études expérimentales conduites en laboratoire, s'inscrivait dans un cadre de recherche et n'a donc pas été répercutée sur le coût global du projet. Dans une opération classique, ces études mécaniques et environnementales seraient intégrées aux coûts, avec des incidences potentiellement significatives. Pour le projet de Remiremont, le surcoût associé à la démarche de réemploi est estimé à 150 000 €, dont 91 000 € imputables aux éléments bois. Rapporté au coût global du projet, de l'ordre de 5,3 millions d'euros, ce surcoût représente environ 3 %, traduisant ainsi un impact financier relativement modéré à l'échelle de l'opération. Toutefois, au-delà de cette dimension strictement économique, la mise en œuvre d'une démarche de réemploi dans un projet d'une telle envergure implique un investissement conséquent en termes de coordination, d'études et de réflexion. Elle mobilise une expertise spécifique ainsi qu'une forte capacité de collaboration entre les acteurs. À ce titre, le projet de Remiremont revêt une importance particulière pour le développement de la filière du réemploi, et plus spécifiquement du réemploi de bois structurel, en tant que démonstrateur à l'échelle réelle.

En définitive, ce travail met en évidence que le réemploi des matériaux, et en particulier du bois structurel, constitue une voie crédible et pertinente pour accompagner la transition du secteur de la construction vers des pratiques plus durables. Au-delà des verrous techniques, réglementaires et organisationnels encore présents, les résultats obtenus démontrent que ces obstacles peuvent être

levés par une approche intégrée, fondée sur l'anticipation, l'innovation méthodologique et la coopération entre les acteurs. Le projet de Remiremont illustre, à travers sa dimension expérimentale à l'échelle réelle, la faisabilité et l'intérêt du réemploi, tout en soulignant la nécessité d'adapter les cadres normatifs et les outils d'évaluation aux spécificités de cette ressource. Il met également en lumière le rôle structurant que peuvent jouer de tels démonstrateurs dans l'évolution des pratiques professionnelles. Ainsi, le développement du réemploi ne repose pas uniquement sur des avancées techniques, mais sur une transformation plus globale des modes de concevoir, de construire et d'évaluer les projets. À ce titre, les perspectives ouvertes par cette recherche invitent à poursuivre les travaux engagés, afin de consolider les connaissances, d'adapter les cadres existants et de favoriser le changement d'échelle de la filière.

Bibliographie

[Ackermann 1995] : Ackermann, F. 1995. Influence du type de station forestière sur les composantes intracernes de la densité du bois du chêne pédonculé (Quercus robur L) dans les chênaies de l'Adour et des coteaux basco-béarnais. In *Annales des sciences forestières* (Vol. 52, No. 6, pp. 635-652). EDP Sciences.

[ADEME 2015] : Ademe. 2015. Réemploi, réparation et réutilisation. Paris : Ademe. P 4.

[ADEME 2021] : Ademe. 2021. Forêts et usages du bois dans l'atténuation du changement climatique. Connaître et agir : le carbone forestier. Paris : Ademe. 40 p.

[ADEME 2022] : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie. experimentationsurbaines.ademe.fr/blog/ressource/programmes-repar-1-et-2/ (accessed 2022).

[ADEME 2023-1] : ADEME. 2023 Déchets - Chiffres-clés. France.

[ADEME 2023-2] : ADEME. BATI-SOBRE, sobriété matière et réemploi dans le bâtiment. L'ADEME lance un Appel à Manifestation d'Intérêt pour accompagner 30 maîtres d'ouvrage en Île-de-France et en Provence-Alpes-Côte d'Azur. BATI-SOBRE, sobriété matière et réemploi dans le bâtiment. L'ADEME lance un Appel à Manifestation d'Intérêt pour accompagner 30 maîtres d'ouvrage en Île-de-France et en Provence-Alpes-Côte d'Azur - Agence de la transition écologique (Accessed 2023)

[ADEME 2025] : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie. L'ADEME Grand Est - Agence de la transition écologique (accessed 2025).

[AITHEX 2025] : AITHEX, association d'insertion et de développement durable. Accueil - Aithex (accessed 2025).

[Aldrich 2006] : Aldrich, M. 2006. From forest conservation to market preservation: Invention and diffusion of wood-preserving technology, 1880-1939. Technology and culture, 47(2), 311-340.

[AMI 2025] : Association d'Activités Multiples d'Insertion. Association AMI Épinal | Une structure de proximité (accessed 2025).

[AppInies s.d. - 1] : AppInies. s. d. https://base-inies.fr/consultation/infos-produit/35678

[AppInies s.d. - 2] : AppInies. s. d. https://base-inies.fr/consultation/infos-produit/27874

[Arora 2020] : ARORA, Mohit, RASPALL, Felix, CHEAH, Lynette, et al. 2020. Buildings and the circular economy: Estimating urban mining, recovery and reuse potential of building components. Resources, Conservation and Recycling. vol. 154. p. 104581.

[Arrêté du 4 août 2021] : Arrêté du 4 août 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine et portant approbation de la méthode de calcul prévue à l'article R. 172-6 du code de la construction et de l'habitation, Journal Officiel du 15 août 2021.

[Arrêté du 6 avril 2022] : Arrêté du 6 avril 2022 modifiant les arrêtés pris en application des articles R. 122-22 à R. 122-25 et R. 172-1 à R. 172-9 du code de la construction et de l'habitation, Journal Officiel du 14 avril 2022.

[Arrêté du 10 juin 2022] : Arrêté du 10 juin 2022 portant cahier des charges des éco-organismes, des systèmes individuels et des organismes coordonnateurs de la filière à responsabilité élargie du producteur des produits et matériaux de construction du secteur du bâtiment. Journal Officiel du 21 juin 2022.

[Arrêté du 28 février 2023] : Arrêté du 28 février 2023 modifiant le cahier des charges des éco-organismes de la filière à responsabilité élargie du producteur des produits et matériaux de construction du secteur du bâtiment annexé à l'arrêté ministériel du 10 juin 2022, Journal Officiel du 3 mars 2023.

[Arrêté du 26 mars 2023] : Arrêté du 26 mars 2023 relatif au diagnostic portant sur la gestion des produits, équipements, matériaux et déchets issus de la démolition ou de la rénovation significative

de catégories de bâtiments et abrogeant l'arrêté du 19 décembre 2011 relatif au diagnostic portant sur la gestion des déchets issus de la démolition de catégories de bâtiments. Journal Officiel du 29 avril 2023.

[Arrêté du 20 juillet 2025] : Arrêté du 20 juillet 2025 portant agrément d'un organisme coordonnateur de la filière à responsabilité élargie du producteur de produits et matériaux de construction du secteur du bâtiment (PMCB). Journal Officiel du 13 août 2025.

[Articonnex 2025] : Articonnex. Matériaux anti-gaspi au meilleur prix - Articonnex (accessed 2025).

[Attar-Hassan 1976] : Attar-Hassan, G. "The effect of ageing on the mechanical properties of Eastern white pine." 1976. Bulletin of the Association for Preservation Technology 8(3): 64-73.

[Bakacia s. d.] : Bakacia France - Expert du réemploi pour l'immobilier. s. d. Backacia. https://backacia.com/

[Baron 2009] : Baron, T. Investigations on undamaged and fungal-damaged softwood components using selected test methods. 2009. Doctoral thesis. Weimar, Bauhaus-University Weimar.

[BatiRIM 2019] : BatiRIM. 2021. Filiale de SUEZ proposant une solution digitale permettant la réalisation de diagnostic PEMD et le suivi de chantier. URL : https://batirim.fr/, consulté le 30 août 2022.

[Billard 2019] : Billard, A., Francis, C., Frédéric, M., Bauer, R., & Longuetaud, F. 2019. Pour une valorisation optimisée de la biomasse forestière tenant compte de la variabilité de la masse volumique du bois dans l'arbre : cas du sapin pectiné. In *8èmes journées du GDR 3544 Sciences du bois*.

[Bodig 1993] : Bodig, J. and B. A. Jayne. Mechanics of wood and wood composites. 1993. Malabar, Florida (USA), Krieger Publishing Company.

[BOMA 2023] : BOMA. 2023, août. *BOMA - Construire avec l'existant - économie circulaire - matériaux*. https://boma.alsace/

[Bosela 2018] : Michal Bosela. Martin Lukac. Daniele Castagneri. Róbert Sedmák. Peter Biber, Marco Carrer. Bohdan Konôpka. Paola Nola. Thomas A. Nagel. Ionel Popa. Catalin Constantin Roibu. Miroslav Svoboda. Volodymyr Trotsiuk. Ulf Büntgen. 2018. Contrasting effects of environmental change on the radial growth of co-occurring beech and fir trees across Europe. Science of The Total Environment. Volume 615. Pages 1460-1469.

[Bouvet 2020] : BOUVET, A., BERTHELOT, A., et CHAUMET, M. Influence d'accidents climatiques majeurs (sécheresse, canicule) sur la croissance des peupliers et des Douglas. 2020.

[Brancheriau 2002] : Brancheriau, L., & Baillères, H. Natural vibration analysis of clear wooden beams: a theoretical review.2002. *Wood Science and Technology*, *36*(4), 347-365.

[Bréda 2004] : BRÉDA, Nathalie, GRANIER, André, et AUSSENAC, Gilbert. La Sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiologique et influence sur les arbres forestiers. Revue forestière française, 2004, vol. 56, no 2, p. 109-131.

[Bucur 2006] : Bucur, V. Acoustics of Wood. 2006. Germany, Springer-Edition Berlin Heidelberg.

[CARBONE 4 2023] : CARBONE 4. 2023. Scénario de convergence de la filière.

[CIRAD 2015] : CIRAD. 2015. TROPIX 7 – The main technological characteristics of 245 tropical wood species.

[CNDB 2022] : Comité National pour le Développement du Bois. Anatomie du bois – L'équilibre hygroscopique. Anatomie du bois - CNDB (accessed 2022).

[Code de l'environnement 2020] : Article L541-1-1 du Code de l'Environnement du 29 juillet 2020. Journal Officiel de la République Française du 30 juillet 2020.

[Collectif Grand-Est 2025] : Collectif Grand Est. collectif-grandest.org, la plateforme dédiée aux acteurs de l'économie circulaire de la région Grand Est (accessed 2025).

[Corvol 2019] : Corvol, A. 2019. Notre-Dame: le bois de chêne de la charpente était médiocre. Notre-Dame : le bois de chêne de la charpente était « médiocre ».

[Cossu 2015] : COSSU, R., WILLIAMS, I D. 2015. Urban mining: Concepts, terminology, challenges. Waste Management, vol. 45, p. 1-3.

[CRESS 2025] : Chambre Régionale de l'Economie Sociale et Solidaire. Accueil - CRESS Est (accessed 2025).

[CRITT Bois 2025] : Centre Régional d'Innovation et de Transfert de Technologie pour les industries du BOIS. CRITT BOIS - CRITTBOIS (accessed 2025).

[CSTB 2024] : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. Projet SPIROU - Notes Méthodologiques de diagnostic et d'évaluation des performances pour le réemploi. 2024.

[CSTB 2025-1] : CSTB. Gisements PEM. Gisements - Plateforme PEMD (accessed 2025)

[CSTB 2025-2] : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. CSTB - Le futur en construction (accessed 2025).

[CTICM 2024] : Centre Technique Industriel de la Construction Métallique. 2024. Recommandations professionnelles – Réemploi d'éléments structuraux en acier.

[Cycle-Up 2021] : Cycle-Up. 2021. Diag-it - une application mobile permettant de réaliser des diagnostics PEMD. URL : https://diag-it.fr/, consulté le 30 août 2022.

[Cycle-Up 2025] : Cycle-Up. Cycle Up - La plateforme de réemploi et de matériaux de récupération (accessed 2025).

[Cycle up s. d.] : Cycle up. s. d. https://www.cycle-up.fr/home

[DE BOIS 2025] : DE-BOIS, configurateur de FDES pour les produits de construction bois. https://v2.de-bois.fr/ (accessed 2025).

[Decker 2002] : Decker, P., Cohen, B., Butala, J. H., & Gordon, T. 2002. Exposure to wood dust and heavy metals in workers using CCA pressure-treated wood. *AIHA Journal*, *63*(2), 166-171.

[Décret n°2021-821] : Décret n°2021-821 du 25 juin 2021relatif au diagnostic portant sur la gestion des produits, équipements, matériaux et déchets issus de la démolition ou de la rénovation significative de bâtiments. Journal Officiel du 27 juin 2021.

[Décret n°2021-822] : Décret n°2021-822 du 25 juin 2021 relatifs au diagnostic portant sur la gestion des produits, équipements, matériaux et des déchets issus de la démolition ou de la rénovation significative de bâtiments. Journal Officiel du 30 juin 2021.

[Décret n°2021-1941] : Décret n° 2021-1941 du 31 décembre 2021 relatif à la responsabilité élargie des producteurs pour les produits et les matériaux de construction du secteur du bâtiment. Journal Officiel du 1 janvier 2022.

[DEMOCLES 2021] : DEMOCLES. 2021. Fiche pratique n°7 – Revêtement de sol.

[De Wolf 2017] : De Wolf C, Yang F, Cox D, Charlson A, Seif Hattan A, Ochsendorf J. 2017. Material Quantities and Embodied Carbon Dioxyde in Structures. Engineering Sustainability. 169(4):150–161.

[Directive européenne 2008/98/CE] : Directive européenne du 30 mai 2018 modifiant la directive européenne 2008/98/CE relative aux déchets. (J. O. 14 juin 2018).

[Dupont 1875] : DUPONT, Adolphe E. et DE LA GRYE, Amédée Bouquet. 1875. Les bois indigènes et étrangers : physiologie, culture, production, qualités, industrie, commerce. Rothschild.

[Dupuis 2024] : Dupuis, M., Olympio, A. 2024. *Problématiques de la transformation mécanique des bois de déconstruction* [Mémoire non publié]. ENSTIB, Epinal.

[Ecominéro 2025] : Ecominéro. Nos appels à projets Réemploi. https://www.ecominero.fr/reemploi/aap-reemploi/ (accessed 2024)

[EMMAÜS 2025] : EMMAÜS. Emmaüs France (accessed 2025).

[Envirobat 2025] : Envirobat Grand-Est. Envirobat Grand Est (accessed 2025).

[EVEA 2025] : EVEA. EVEA – cabinet de conseil en ACV et éco-conception (accessed 2025).

[Faggiano 2011] : Faggiano, B., Grippa, M. R., Marzo, A., & Mazzolani, F. M. Experimental study for non-destructive mechanical evaluation of ancient chestnut timber. 2011. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 1, 103-112.

[Faydi 2017] : Faydi, Y. Classement pour la résistance mécanique du chêne par méthodes vibratoires et par mesure des orientations des fibres. 2017. Thèse de doctorat. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers-ENSAM.

[FCBA 2022] : Institut technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement. GDBAT : Gestion des déchets de produits de construction bois en fin de vie. 2022.

[FCBA 2025] : Institut technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement. Institut Technologique FCBA (accessed 2025).

[FCRBE 2020] : FCRBE. 2020. Un guide pour l'identification du potentiel de réemploi des produits de construction.

[FCRBE - Bois massif de structure à section rectangulaire – 2021] : FCRBE. 2021. Fiche matériau - Bois massif de structure à section rectangulaire.

[FCRBE – Parquet en bois massif - 2021] : FCRBE. 2021. Fiche matériau - Parquet en bois massif.

[FCRBE-1 2021] : FCRBE. 2021. Reuse toolkit - Stratégies de prescription - Intégrer le réemploi dans les projets de grande échelle et les marchés publics.

[FCRBE-2 2021] : Smeyers Tijl, Deweerdt Morgane, Mertens Marilyn. « Reuse Toolkit - The Reclamation Audit - A Guide to Inventoy the Reuse Potential of Construction Products before Demolition ». FCRBE, 2021.

[FCRBE 2022] : FCRBE. 2022. Toolkit réemploi – L'inventaire réemploi. FCRBE.

[FCRBE 2024] : FCRBE. 2024. Rapport d'activité final. FCRBE.

[FSC 2025] : Forest Stewardship Council. Les principes et critères FSC | Forest Stewardship Council (accessed 2025).

[Gasser s. d.] : Gasser, A. s. d. *Remise - facilitateur - réemploi - bâtiment*. https://www.re-mise.fr/

[Gerhards 1982] : Gerhards, C. C. 1982. Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immediate effects. *Wood and Fiber Science*, 4-36.

[Giaume 2024] : Giaume, O. 2024, 4 avril. Forum International Bois Construction. Bâtiment en charpente bois en réemploi, démonté et remonté. Nancy. https://vimeo.com/ondemand/fbc2024/

[Gilles 2023] : GILLES, Arthur, LISEIN, Jonathan, LATTE, Nicolas, et al. Est-ce la fin de la crise des scolytes ? Suivi du phénomène par télédétection. Silva Belgica, 2023, vol. 2023, no 3.

[Görlacher 1984] : Görlacher, R. "A new method for determining the modulus of elasticity of timber." 1984. Holz als Roh-und Werkstoff 42 : 219-222.

[Gouvernement 2023-1] : Gouvernement français. Feuille de route de décarbonation de la filière bâtiment. 23064_feuille-de-route-decarbonation-batiment_BATweb.pdf (accessed 2023).

[Gouvernement 2023-2] : ministère de l'Aménagement du territoire et de la décentralisation. Plan Bâtiment Durable. Présentation générale | Plan Bâtiment Durable (accessed 2024).

[Guilleyinsta 2003] : Guilleyinsta, E., & Nepveu, G. 2003. Interprétation anatomique des composantes d'un modèle mixte de densité du bois chez le Chêne sessile (Quercus petraea Liebl.): âge du cerne

compté depuis la moelle, largeur de cerne, arbre, variabilité interannuelle et duraminisation. *Annals of forest science*, *60*(4), 331-346.

[Guitard 1987] : GUITARD, Daniel et EL AMRI, F. 1987. Modèles prévisionnels de comportement élastique tridimensionnel pour les bois feuillus et les bois résineux. In : Annales des sciences forestières. EDP Sciences. p. 335-358.

[Herin 2016] : Herin, F., Martin, J., Corvisier, J., Luc, A., & Paris, C. 2016. Application des recommandations concernant la surveillance médico-professionnelle des travailleurs exposés à l'action cancérogène des poussières de bois: évaluation de la faisabilité (étude CERBois). *Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement*, *77*(3), 413.

[Iacovidou 2016] : Iacovidou, E., & Purnell, P. 2016. Mining the physical infrastructure: Opportunities, barriers and interventions in promoting structural components reuse. Science of the Total Environment, 557, 791-807.

[IFPEB 2023-1] : IFPEB. 2023. Equation économique du réemploi dans le bâtiment – Synthèse des enseignements de l'étude.

[IFPEB 2023-2] :IFPEB. 2023. Equation économique du réemploi dans le bâtiment. Equation économique du réemploi dans le bâtiment - IFPEB.

[IPCC 2022] : Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp.

[InFutUReWood 2022] : Sandberg, K., Sandin, Y., Harte, A., Shotton, E., Hughes, M., Ridley-Ellis, D., ... & Cristescu, C. (2022). Summary report InFutUReWood–Innovative Design for the Future–Use and Reuse of Wood (Building) Components.

[John 2009] : John. E. 2009. The impacts of Sand Mining in Kallada river (Pathanapuram Taluk). Kerala. Journal of Basic and Applied Biology. 3 (1&2). 108-113.

[Kisi 2022] : Kisi, K. P., & Sulbaran, T. 2022. Construction cost and schedule impacts due to COVID-19. Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction, 14(4), 04522024.

[Labrunye 2018] : Raphaël Labrunye. 2018. TimeLine de la réglementation de la construction 1948-1975. *Smart French*. Consulté le 31 janvier 2025 à l'adresse https://doi.org/10.58079/u8ya

[Lafon 2009] : Lafon, L., & Lafon, D. 2009. Deuxième plan national santé–environnement : 2009–2013. Archives des Maladies Professionnelles et de Médecine du Travail/Archives des Maladies Professionnelles et de L'environnement, 70(6), 655-665.

[Lanvin 2012] : Jean-Denis Lanvin, Didier Reuling. 2012. Caractérisation du Chêne sessile et pédonculé de France en vue de son utilisation en structure. Revue forestière française, , 64 (2), pp.151-165.

[Lemaitre 2025] : Lemaitre, O., Bléron, L., Simon, C., & Méausoone, P. J. 2025. Strength Characterization by Vibrational Analysis of Building Demolition Wood to Assess Reuse Potential. *Recycling*, *10*(6), 204.

[Le Moniteur 2021] : Le Moniteur. Emmaüs Angers, future vitrine du réemploi dans la construction. https://www.lemoniteur.fr/article/emmaus-angers-future-vitrine-du-reemploi-dans-la-construction.2135614. (accessed 20 mars 2021)

[Loi n°2018-1021] : : Loi n°2018-1021 du 23 novembre 2018 portant évolution du logement, de l'aménagement et du numérique. 2018. (J. O. 24 novembre 2018).

[Loi n° 2019-1147] : Loi n°2019-1147 relative à l'énergie et au climat. (J. O. n°0261 9 novembre 2019)

[Loi n°2020-105] : Loi n°2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire. (J.O. 11 février 2020)

[Marian 1960] : Marian, J. E. and A. Wissing. 1960. "The Chemical and Mechanical Deterioration of Wood in Contact with Iron, Part 1: Mechanical Deterioration." Svensk Papperstidning 63(3):47-57.

[Matthew 1831] : Matthew, P. 1831. On naval timber and arboriculture: with critical notes on authors who have recently treated the subject of planting. A. Black.

[Minéka 2025] : Minéka. Boutique | Le Minék'atalogue (accessed 2025).

[Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires.2020] : Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires.2020. Déchets du bâtiment. France.

[Ministère de la transition écologique 2021] : Ministère de la transition écologique. 2021. Dossier de presse – RE2020 Eco-construire pour le confort de tous.

[Ministère de la transition énergétique. 2023] : Ministère de la transition énergétique. 2023. Panorama français des gaz à effet de serre – Emissions des GES en France en 2022. France.

[Ministères aménagement du territoire transition écologique 2022] : Ministères aménagement du territoire transition écologique. Déchets dangereux. Déchets dangereux | Ministères Aménagement du territoire Transition écologique (accessed 2022)

[MOBIUS 2025] : Mobius-réemploi. MOBIUS - Réemploi Construction France (accessed 2025).

[Nations Unies 1998] : Unies, N. (1998). Protocole de Kyoto la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. *Nations Unies. Kyoto, Japon*.

[NF B 52-001] : Norme NF B52-001. 2018. Classement visuel pour l'emploi en structure des principales essences résineuses et feuillues. — Paris La Défense : AFNOR.

[NF DTU 31.1] : Documents techniques unifiés. 2017. Travaux de bâtiment - Charpente en bois - Partie : 1-1 : cahier des clauses techniques types - Partie 1-2 : critères généraux de choix des matériaux - Partie 2 : cahier des clauses administratives spéciales types - Référence commerciale des parties P1-1, P1-2 et P2 du NF DTU 31.1 – Paris La Défense : AFNOR.

[NF EN ISO 14040] : Norme NF EN ISO 14040COMPIL 1. 2020. Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre - Texte compilé de la norme NF EN ISO 14040 d'octobre 2006 et son amendement A1 d'octobre 2020— Paris La Défense : AFNOR

[NF EN 338] : Norme NF EN 338. 2016. Bois de structure – Classes de résistance – Paris La Défense : AFNOR.

[NF EN 1995-1] : Norme NF EN 1995. 2005. Eurocode 5 - Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-1 : généralités - Règles communes et règles pour les bâtiments — Paris La Défense : AFNOR.

[NF EN 1995-2] : Norme NF EN 1995. 2005. Eurocode 5 - Conception et calcul des structures en bois - Partie 2 : ponts - Annexe Nationale à la NF EN 1995-2:2005 – Ponts — Paris La Défense : AFNOR.

[NF EN 14081] : Norme NF EN 14081. 2022. Structures en bois - Bois de structure de section rectangulaire classé selon la résistance. — Paris La Défense : AFNOR.

[NF EN 14358] : Norme NF EN 14358. 2016. Structure en bois – Détermination et vérification des valeurs caractéristiques – Paris La Défense : AFNOR.

[NF EN 15228] : Norme NF EN 15228. 2009. Bois de structure - Bois de structure traité avec un produit de préservation contre les attaques biologiques— Paris La Défense : AFNOR.

[NF EN 15804+A2/CN] : Norme NF EN 15804+A2/CN. 2022. Contributions des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction— Paris La Défense : AFNOR

[NF EN 16449] : Norme NF EN 16449. 2014. Produits en bois et dérivés du bois — Calcul du contenu en carbone biogénique du bois et conversion en dioxyde de carbone — Paris La Défense : AFNOR

[Nier 1994] : Nier, J. Experimental strength investigations on old construction timber and derived findings for load-bearing capacity assessment. 1994. Leipzig, Germany, Technische Hochschule Leipzig.

[Noguchi 2011] : Noguchi, T., E. Obataya and K. Ando. Effects of ageing on the vibrational properties of akamatsu (Pinus densiflora) wood. 2011. Wood Culture and Science. Kyoto.

[OPALIS 2024] : ROTOR. Fiche structure la Maison du réemploi à Nancy. Maison du Réemploi | Opalis (accessed 2024).

[Ouest France 2023] : Ouest France. 2023, décembre. Réemprod vend des matériaux reconditionnés à petits prix. Ouest France, Réemprod vend des matériaux reconditionnés à petits prix.

[Parlement Européen 2006] : Règlement 1907/2006/CE du Parlement européen et du Conseil du 18 décembre 2006 relatif à l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH). Journal Officiel de l'Union Européenne Loi 396/1 du 30 décembre 2006.

[Parlement Européen 2008] : Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives, Journal Officiel de l'Union Européenne Loi 312 du 22 novembre 2008.

[Parlement Européen 2018] : Directive 2018/852 du Parlement européen et du Conseil du 30 mai 2018 modifiant la directive 94/62/CE relative aux déchets. Journal Officiel de l'Union Européenne Loi 150 du 14 juin 2018.

[PEFC 2025] : Pan European Forest Certification. Le label PEFC | PEFC (accessed 2025).

[Pompey 2025] : Communautés de communes du bassin de Pompey. Réemploi des matériaux - Bassin de Pompey - Communauté de Communes (accessed 2025).

[Rebhi 2024] : Rebhi, A. 2024. Modélisation de l'endommagement d'un matériau hétérogène biosourcé : application au bois massif. Thèse de doctorat. Université de Bordeaux.

[RECIPROCITE 2025] : RECIPROCITE. Réciprocité, Employeur solidaire et inclusif (accessed 2025).

[REMISE 2025] : REMISE. Plateforme en ligne pour le réemploi des matériaux de construction dans le Grand-Est. Achat de matériaux de déconstruction (accessed 2025).

[REVAL PREST 2025] : REVAL PREST. Accueil - Reval Prest (accessed 2025).

[RE!NOUVEAU 2025] : RE!NOUVEAU collectif d'architecture et réemploi. Bureau d'études réemploi | Grand Est | RE!NOUVEAU (accessed 2025).

[Roblot 2010] : Roblot, G. 2010. *Calcul automatique du Knot Area Ratio appliqué au classement par machine des bois de structure* (Doctoral dissertation, PhD thesis, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers).

[ROTOR 2018] : Devlieger, Lionel, Michael Ghyoot, Lionel Billiet, and André Warnier. 2018. Déconstruction et réemploi : comment faire circuler les éléments de construction. Presses polytechniques et universitaires romandes.

[Sakaguchi 2014] : SAKAGUCHI, Daishi, et al. 2014. Potential for cascading wood from building. Thèse de maîtrise.

[Sandoz 1990] : Sandoz, J.-L. "Grading and reliability of construction timber, validation of the ultrasound method". 1990. thesis n°851, EPFL, IBOIS, Lausanne, Switzerland

[Sandoz 2007] : Sandoz, J.-L., Benoit, Y. Timber grading machine using multivariate parameters based on ultrasonic and density measurement. 2007. presentado en COST E, 53.

[Schultz 2007] : Schultz, T. P., Nicholas, D. D., & Preston, A. F. 2007. A brief review of the past, present and future of wood preservation. Pest Management Science: formerly Pesticide Science, 63(8), 784-788.

[Silvestro 2023] : Silvestro, R., & Rossi, S. 2023. Le changement climatique rend les arbres plus grands, mais plus faibles. La Conversation.

[Simon 2022] : Simon, C., Donnot, A., & Méausoone, P. J. 2022. Indoor wood dust analysis during machining with an original experimental device. *European Journal of Wood and Wood Products*, 1-11.

[Snyder 2020] : Snyder T. 2020. The essential wood – The Woodworker's Guide to Choosing and Using Lumber. Lancaster : Cedar Lane Press.

[Sonderegger 2008] : Sonderegger, W., D. Mandallaz and P. Niemz. "An investigation of the influence of selected factors on the properties of spruce wood.". 2008b. Wood Science and Technology 42(4): 281-298.

[Subra 1999] : *I. Subra, G. Hubert, S. Aubert, M. Héry, J.M. Elcabache*. 1999. Exposition professionnelle aux métaux lors de l'usinage des bois traités au cuivre, chrome, arsenic. *Cahiers de notes documentaires-Hygiène et sécurité du travail-N*, *175*(2e).

[Toratti 1995] : Toratti, T., & Morlier, P. 1995. Fluage à long terme du bois fléchi en grandeur structurale. *Materials and structures*, *28*, 284-292.

[United Nations Environment Programme and Global Alliance for Buildings and Construction 2024] : United Nations Environment Programme and Global Alliance for Buildings and Construction. Global Status Report for Buildings and Construction - Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector. [online]. Available: https://wedocs.unep.org/20.500.11822/45095. [Accessed: Jul. 19, 2024].

[Urban Machine 2025] : Urban Machine. Urban Machine - Thinking Differently About Wood & Lumber Waste (accessed 2024).

[Valdelia 2025] : Valdelia. Le réemploi de vos mobiliers professionnels avec Valdelia (accessed 2025).

[Viguier 2015] : Viguier, J. 2015. Classement mécanique des bois de structure. Prise en compte des singularités dans la modélisation du comportement mécanique (Doctoral dissertation, PhD thesis, Université de Lorraine).

[Viguier 2018] : Viguier, J. 2015. *Classement mécanique des bois de structure. Prise en compte des singularités dans la modélisation du comportement mécanique* (Doctoral dissertation, PhD thesis, Université de Lorraine).

[Vosges Matin 2021-1] : PIGNON, J-C. 2021, avril. À Épinal, Ami, le Renouveau et Reval Prest main dans la main. Vosges Matin, Vosges. À Épinal, Ami, le Renouveau et Reval Prest main dans la main.

[Vosges Matin 2021-2] : KUHN, S. 2021, avril. Épinal : l'ex-site Bragard connaît une déconstruction constructive. Vosges Matin, Vosges. Épinal : l'ex-site Bragard connaît une déconstruction constructive.

[Vosges Matin 2022] : KHUN, S. 2022, mai. Épinal : un chantier inédit lancé au sein de l'ex-maternité Arc-en-Ciel. Vosges Matin, Vosges. Épinal : un chantier inédit lancé au sein de l'ex-maternité Arc-en-Ciel.

[Wang 2008] : Wang, S. Y., Chen, J. H., Tsai, M. J., Lin, C. J., & Yang, T. H. Grading of softwood lumber using non-destructive techniques. 2008. Journal of materials processing technology, 208(1-3), 149-158.

[Wilbourn 1995] : Wilbourn, J., Heseltine, E., & Møller, H. 1995. IARC evaluates wood dust and formaldehyde. Scandinavian journal of work, environment & health, 229-232.

[Yishu 2021] : Niu, Yishu. Kaarle, Rasi. Mark, Hughes. Minna, Halme. Gerhard, Fink. 2021. "Prolonging life cycles of construction materials and combating climate change by cascading: The case of reusing timber in Finland." Resources, Conservation and Recycling 170 : 105555.

Liste des figures

Figure 1 - Hiérarchie de valorisations des déchets selon la directive cadre européenne 2008/98/CE . 16
Figure 2 - Schéma d'après la thèse de master de D. Sakaguchi, Potential for cascading wood from building, Université Aalto, 2014 18
Figure 3 - Un des bâtiments sujets à la déconstruction et présentant la typologie des bâtiments présents sur le site..... 20
Figure 4 - Visualisation de la présence de l'eau libre et de l'eau lié à l'échelle microscopique sur un bois résineux..... 23
Figure 5 - Influence du type de station forestière sur la masse volumique moyenne du bois de chênes pédonculés à âge et largeur de cerne fixée, d'après une étude de F. Ackermann 26
Figure 6 - Masse volumique des différentes parties d'un arbre pour Albies alba, d'après une étude de A Billard 27
Figure 7 - Efforts dans une poutre bi-appuyée sous une charge descendantes verticale 28
Figure 8 - Le Goldeneye 702 et le Viscan, deux outils permettant le classement mécanique des bois, proposés par l'entreprise Microtech 32
Figure 9 - Une des sondes du Sylvatest® 4 accompagnée de son logiciel Sylvia® disponible sur téléphone 34
Figure 10 - Visualisation du phénomène de retrait et de gonflement sur différents types de débit de bois de section rectangulaire [CNDB 2022]..... 35
Figure 11 - Identification de métaux lourds par colorimétrie, d'après une photographie de l'entreprise Mat inspired 38
Figure 12 - Les étapes du cycle de vie d'un produit de construction ou d'un équipement 41
Figure 13 - Les différents périmètres existant pour une étude ACV 43
Figure 14 - Représentation de la durée de vie des éléments constitutifs d'un bâtiment d'après une étude de Iacovidou E. 50
Figure 15 - Mécanisme de la photosynthèse chez les plantes permettant la visualisation du carbone biogénique. 51
Figure 16 - Représentation visuelle de la différence entre la notion de réemploi et de réutilisation dans le cas d'une solive bois..... 56
Figure 17 - Seuils admissibles au cours du temps pour l'indicateur IC, construction pour chaque typologie de construction..... 58
Figure 18 - Seuils admissibles au cours du temps pour l'indicateur IC, énergie pour chaque typologie de construction..... 59
Figure 19 - Coefficient de pondération des émissions de gaz à effet de serre pour l'ACV dynamique (Source : Ministère de la transition écologique) 60
Figure 20 - Différence de résultat entre une ACV statique et une ACV dynamique dans le cas fictif d'une poutre en bois (Source : Ministère de la transition écologique)..... 61
Figure 21 - Sondages réalisés sur un mur de refend et une cloison intérieure mettant en évidence les systèmes constructifs utilisés 76
Figure 22 - Visualisation du complexe de plancher après le retrait des lames de parquet..... 77
Figure 23 - Plan de l'aile gauche des bâtiments 1 et 3 après la réhabilitation de 1995 78
Figure 24 - Exemple de la hiérarchisation des espaces sur le premier étage du bâtiment 1 de l'opération de Remiremont 79
Figure 25 - Exemple de photos prises sur site pour la constitution du reportage photo de l'ensemble du site 81
Figure 26 - Processus des tests de dépose sélective menés sur le site de l'opération..... 84

Figure 27 - Un complexe de plancher à la suite de la dépose des lames de parquet et du lattis bois .. 86
Figure 28 - Dépose sélective d'une solive par deux ouvriers de l'entreprise de déconstruction 87
Figure 29 - Les solives laissées en place permettent d'assurer un effet diaphragme nécessaire au maintien du bâtiment 88
Figure 30 - Situation du chapiteau mis en place par l'entreprise Hollinger ainsi qu'une vue de l'intérieur de celui-ci 89
Figure 31 - Etiquettes mises en place sur chacune des solives pour leur identification et leur traçabilité tout au long du processus de réemploi 91
Figure 32 - Retrait des éléments métalliques sur des solives par les intervenants de l'entreprise de déconstruction à la suite de leur dépose sélective 92
Figure 33 - Stockage des solives au niveau de la zone d'espace tampon en vue de leur caractérisation 93
Figure 34 - Perçage au niveau de l'une des extrémités d'une solive pour la mise en place du Sylvatest® Duo 97
Figure 35 - Un des deux supports constitutifs du banc d'essais fixe mis en œuvre sur une dalle d'essai 102
Figure 36 - Un des deux supports constitutifs du banc d'essai portatif 103
Figure 37 - Zone de travail pour la caractérisation des bois lors du chantier de déconstruction 106
Figure 38 - Stockage des solives au niveau de la remorque mise à disposition par le charpentier bois et au niveau de la zone de stockage de l'entreprise de charpente bois 109
Figure 39 - Montage d'essai pour les solives orientées vers le CRITT Bois 110
Figure 40 - Résultat après l'essai de résistance d'une solive acheminée au CRITT Bois 111
Figure 41 - Dispersion des modules d'élasticités longitudinaux pour les différentes méthodes dans le cadre du lot de solive issue des tests de dépose 122
Figure 42 - Dispersion des modules d'élasticités longitudinaux pour les différentes méthodes non destructives et de la méthode destructive dans le cadre du lot de solive issue des tests de dépose 125
Figure 43 - Corrélation entre les méthodes non destructives et la méthode destructive pour le module d'élasticité longitudinal 127
Figure 44 - Dispersion des modules d'élasticités longitudinaux pour les différentes méthodes vibratoire et de la méthode destructive dans le cadre du lot de solive issue des tests de dépose 130
Figure 45 - Corrélation entre les méthodes vibratoires et la méthode destructive pour le module d'élasticité longitudinal 132
Figure 46 - Répartition des modules d'élasticités longitudinaux du gisement de solives du chantier de Remiremont en différentes classes 136
Figure 47 - Dispersion des modules d'élasticités longitudinaux par bâtiment pour le gisement de solives de Remiremont 137
Figure 48 - Dispersion des modules d'élasticités longitudinaux par étage pour le gisement de solives de Remiremont 137
Figure 49 - Dispersion des modules d'élasticités longitudinaux pour le lot initial et le lot de vérification dans le cadre des essais destructifs 139
Figure 50 - Dispersion des résistances à la flexion pour le lot initial et le lot de vérification dans le cadre des essais destructifs 139
Figure 51 - Dispersion des modules d'élasticités longitudinaux pour les différentes méthodes dans le cadre des solives issues de l'opération d'Epinal 144
Figure 52 - Dispersion des modules d'élasticités longitudinaux pour les différentes méthodes dans le cadre des chevrons issus de l'opération d'Epinal 144

Figure 53 - Dispersion des modules d'élasticités longitudinaux pour les différentes méthodes non destructives et de la méthode destructive dans le cadre du lot de solive issu de l'opération d'Epinal 147
Figure 54 - Dispersion des modules d'élasticités longitudinaux pour les différentes méthodes non destructives et de la méthode destructive dans le cadre du lot de chevron issu de l'opération d'Epinal 147
Figure 55 - Corrélation entre les méthodes non destructives et la méthode destructive pour le module d'élasticité longitudinal dans le cadre du lot de solive issu de l'opération d'Epinal 149
Figure 56 - Corrélation entre les méthodes non destructives et la méthode destructive pour le module d'élasticité longitudinal dans le cadre du lot de chevron issu de l'opération d'Epinal 150
Figure 57 - Arbre de conséquences lié au reconditionnement d'un bois structurel pour son réemploi 156
Figure 58 - Arbre de conséquence associé au processus de réemploi d'une poutre bois 168
Figure 59 - Extrait de l'onglet TDD_Poutre 170
Figure 60 - Extrait de l'onglet TDD_VAL 171
Figure 61 - Extrait de l'onglet TRAD 171
Figure 62 - Extrait de l'onglet TDD_PARC 172
Figure 63 - Extrait de l'onglet TDD 172
Figure 64 - Etapes nécessaire à l'élaboration de l'interface 178
Figure 65 - Maquette de l'interface du calculateur 179
Figure 66 - Page d'accueil du calculateur 180
Figure 67 - Exemple de l'une des pages « Rentrer votre parc machine » 182
Figure 68 - Exemple de l'une des pages « Consulter parc existant » 183
Figure 69 - Exemple de l'une des pages « Importer des données de Sima Pro » 185
Figure 70 - Exemple de l'une des pages « Catalogue SimaPro » 186
Figure 71 - La Page « Données poutre » 187
Figure 72 - Exemple de l'une des pages « Données calcul » 188
Figure 73 - Page « Résultat des émissions de CO2,eq » dans le cadre d'un exemple de poutre 189
Figure 74 - Saisie des données relatives à la tronçonneuse dans le cadre d'une solive bois 190
Figure 75 - Saisie des données relatives à la scie de débit dans le cadre d'une solive bois 191
Figure 76 - Saisie des données relatives à la solive bois 192
Figure 77 - Saisie des données relatives au transport du site de déconstruction jusqu'à l'entreprise de charpente bois de la solive bois 193
Figure 78 - Saisie des données relatives à l'usinage de la solive bois 193
Figure 79 - Saisie des données relatives aux dimensions finales de la solive bois 194
Figure 80 - Saisie des données relatives au transport du site de l'entreprise de charpente bois jusqu'au site de construction de la solive bois 194
Figure 81 - Résultats obtenus dans le cadre de la solive bois considérée 196
Figure 82 - Résultats obtenus dans le cadre de la solive bois considérée avec l'hypothèse d'un transport de 30 kilomètres 199
Figure 83 - Résultats obtenus dans le cadre de la solive bois considérée avec l'hypothèse d'un transport de 20 kilomètres 199
Figure 84 - Résultats obtenus dans le cadre de la solive bois considérée avec l'hypothèse d'un transport de 94 kilomètres 199
Figure 85 - Comparaison de l'impact carbone d'une solive de réemploi selon une approche dynamique ou statique dans le cadre de l'analyse de cycle de vie 201

Figure 86 - Comparaison entre l'impact carbone d'une solive de Remiremont et l'impact carbone d'une solive neuve équivalente selon une approche dynamique ou statique dans le cadre de l'analyse de cycle de vie 202
Figure 87 - Photo prise lors du chantier de construction montrant la mise en œuvre des solives de réemploi dans le complexe de plancher d'un des nouveaux bâtiments 207
Figure 88 - Photo prise lors du chantier de construction montrant la mise en place d'une des extrémités d'une solive de réemploi dans un sabot en acier dans le complexe de plancher bois/béton 208

Liste des tableaux

Tableau 1 - Variations des masses volumiques des différents tissus constitutif d'un cerne de croissance dans le cadre du chêne sessile, d'après les travaux de E Guilleyinsta 27
Tableau 2 - Tableau des classes de résistance des bois résineux en fonction des essais de flexion sur chant selon la norme NF EN 338 30
Tableau 3 - Tableau de correspondance entre les catégories visuelles et les classes de résistance mécanique du Chêne pour tous type section selon la norme NF B 52 001 31
Tableau 4 - Analyse de sensibilité sur le cas du recyclage des emballages en acier (source : ADEME) 47
Tableau 5 - Résultat des caractéristiques élémentaires des solives issues des tests de dépose..... 120
Tableau 6 - Résultat des modules d'élasticité longitudinaux des solives issues des tests de dépose . 121
Tableau 7 - Résultat des tests destructifs pour les solives issues des tests de dépose 124
Tableau 8 - Comparaison des méthodes non destructives à la méthode destructive par le calcul des écarts relatifs dans le cadre de la médiane et de la moyenne 126
Tableau 9 - Résultat des modules d'élasticité longitudinaux dans le cadre de la méthode vibratoire menée sur le banc d'essai mobile pour des solives issues des tests de dépose 129
Tableau 10 - Comparaison des méthodes vibratoires à la méthode destructive par le calcul des écarts relatifs dans le cadre de la médiane et de la moyenne..... 131
Tableau 11 - Comparaison entre les résultats des valeurs du lot initial par rapport aux valeurs requises pour la classe de résistance C18..... 133
Tableau 12 - Matrice coût global obtenue dans le cadre de la vérification du classement en résistance du lot initial..... 134
Tableau 13 - Résultat des caractéristiques élémentaires des bois issus de l'opération d'Epinal 142
Tableau 14 - Résultat des modules d'élasticité longitudinaux pour les bois issus de l'opération d'Epinal 143
Tableau 15 - Résultat des tests destructifs pour les bois issus de l'opération d'Epinal..... 146
Tableau 16 - Comparaison des méthodes non destructives à la méthode destructive par le calcul des écarts relatifs dans le cadre de la médiane et de la moyenne pour les bois issus de l'opération d'Epinal 148

Annexe 1 : Régressions simples linéaires pour les résineux et régressions simples puissances pour les feuillus où les constantes élastiques sont en fonction de la masse volumique, d'après les travaux de D. Guitard.

Unités	Lois puissances "F" $S_{ij}^{-1} = \bar{S}_{ij}^{-1} \left(\frac{\rho}{\bar{\rho}}\right)^B$ 10^6 Pa — ρ gr/cm³	R	CVR %
$S_{11}^{-1} = E_R$	$1810 \cdot \left(\frac{\rho}{0,65}\right)^{1,33}$	*** 0,935	25
$S_{22}^{-1} = E_T$	$1030 \cdot \left(\frac{\rho}{0,65}\right)^{1,77}$	*** 0,920	37
$S_{33}^{-1} = E_L$	$14200 \cdot \left(\frac{\rho}{0,65}\right)^{1,03}$	*** 0,918	18
$-S_{12}^{-1} = \frac{E_T}{\nu_{TR}} = \frac{E_R}{\nu_{RT}}$	$2780 \cdot \left(\frac{\rho}{0,65}\right)^{1,43}$	*** 0,904	35
$-S_{23}^{-1} = \frac{E_L}{\nu_{LT}} = \frac{E_T}{\nu_{TL}}$	$31200 \cdot \left(\frac{\rho}{0,65}\right)^{1,14}$	*** 0,800	35
$-S_{31}^{-1} = \frac{E_R}{\nu_{RL}} = \frac{E_L}{\nu_{LR}}$	$39300 \cdot \left(\frac{\rho}{0,65}\right)^{1,003}$	*** 0,767	40
$S_{44}^{-1} = G_{TL}$	$916 \cdot \left(\frac{\rho}{0,65}\right)^{1,25}$	*** 0,895	26
$S_{55}^{-1} = G_{LR}$	$1220 \cdot \left(\frac{\rho}{0,65}\right)^{1,13}$	*** 0,908	22
$S_{66}^{-1} = G_{RT}$	$870 \cdot \left(\frac{\rho}{0,65}\right)^{1,74}$	*** 0,864	48

(1) $\nu = N - 2 = 38$ Degrés de liberté.

**** Test significatif au seuil de 1 ‰* *A = 0,5007.*

Unités	Lois linéaires "R" $S_{ij}^{-1} = \bar{S}_{ij}^{-1} + B(\rho - \bar{\rho})$ 10^6 Pa — ρ en gr/cm³	$R_{S_{ij}^{-1}\,\rho}$	CVR %
$S_{11}^{-1} = E_R$	$998 + 2360\ (\rho - 0,45)$	*** 0,672	23
$S_{22}^{-1} = E_T$	$641 + 2020\ (\rho - 0,45)$	*** 0,755	25
$S_{33}^{-1} = E_L$	$13100 + 43500\ (\rho - 0,45)$	*** 0,880	17
$-S_{12}^{-1} = \frac{E_T}{\nu_{TR}} = \frac{E_R}{\nu_{RT}}$	$2090 + 5950\ (\rho - 0,45)$	*** 0,576	37
$-S_{23}^{-1} = \frac{E_L}{\nu_{LT}} = \frac{E_T}{\nu_{TL}}$	$30700 + 104000\ (\rho - 0,45)$	*** 0,811	23
$-S_{31}^{-1} = \frac{E_R}{\nu_{RL}} = \frac{E_L}{\nu_{LR}}$	$35000 + 132000\ (\rho - 0,45)$	*** 0,805	26
$S_{44}^{-1} = G_{TL}$	$748 + 1030\ (\rho - 0,45)$	0,529	19
$S_{55}^{-1} = G_{LR}$	$836 + 1850\ (\rho - 0,45)$	*** 0,594	27
$S_{66}^{-1} = G_{RT}$	$84,5 + 247\ (\rho - 0,45)$	** 0,461	51

(1) $\nu = N - 2 = 38$ Degrés de liberté.

*** Test significatif au seuil de 1 %* *R = 0,4128.*

**** Test significatif au seuil de 1 ‰* *R = 0,5126.*

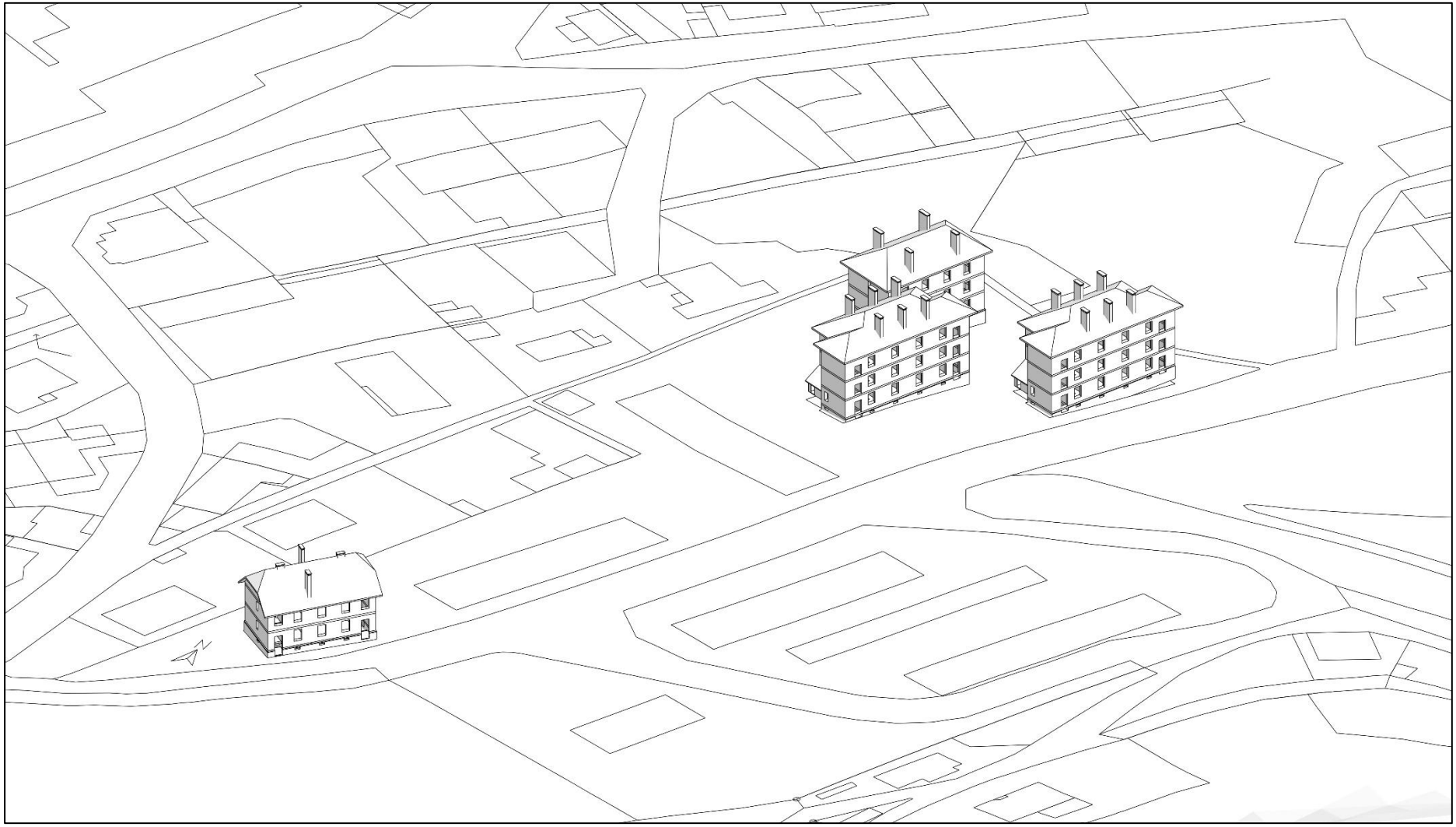
Annexe 2 : Liste des différents indicateurs environnementaux utilisés accompagnée de leur unité relative et d'une brève description.

Indicateurs d'impact		Unité	Description
Changement climatique 	Total	kg CO_2 équivalent	Prend en compte les émissions de gaz à effet de serre (CO_2, méthane, ...) qui contribue au réchauffement climatique à un horizon de 100 ans
	Combustibles fossiles		
	Biogénique		
	Occupation des sols et transformation de l'occupation des sols		
Appauvrissement de la couche d'ozone		kg CFC 11 équivalent	Prend en compte toutes les substances qui contribuent à l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique
Acidification	 	kg de H+ équivalent	Liée à la pollution atmosphérique. L'acidification des sols génère un dépérissement des arbres. L''acidification de l'eau provoque une diminution de la biodiversité et augmente le risque de saturnisme et d'intoxication par l'aluminium.
Eutrophisation 	Aquatique, eaux douces	kg P équivalent	Eutrophisation de l'eau. Introduction de nutriment dans les milieux aquatiques qui conduit à leur modification et à leur dégradation (augmentation de la production d'algues vertes).
	Aquatique marine	Kg N équivalent	
	Terrestre	Mole de N équivalent	Eutrophisation terrestre
Formation d'ozone photochimique		kg COVNM équivalent	Oxydants photochimiques responsables de la formation d'ozone au niveau de la troposphère (smog de pollution au dessus des villes en période estivale). Les substances à l'origine de cet impact sont le plus souvent les émissions de COV, CO et NOx.
Epuisement des ressources abiotiques (minéraux et métaux)		kg Sb équivalent	Inclut toutes les ressources non renouvelables de matières abiotiques à l'exception des ressources fossiles (exemple : la consommation de minerais)
Epuisement des ressources abiotiques (combustibles fossiles)		MJ, pouvoir calorifique inférieur	Inclut toutes les ressources fossiles + uranium
Besoin en eau		m^3 de privation équivalent (monde)	Consommation d'eau pondérée en fonction de la privation
Emission de particules fines		Incidence de maladies	Incidence potentielle de maladies
Rayonnements ionisants, santé humaine		kBq de U235 équivalent de H+ équivalent	Efficacité potentielle de l'exposition humaine à l'isotope U235 (PIR)
Ecotoxicité	Eau douce 	CTUe	
Toxicité humaine 	Effets cancérigènes	CTUh	
	Effets non cancérigènes	CTUh	
Impacts liés à l'occupation des sols/Qualité du sol		-	Qualité des sols

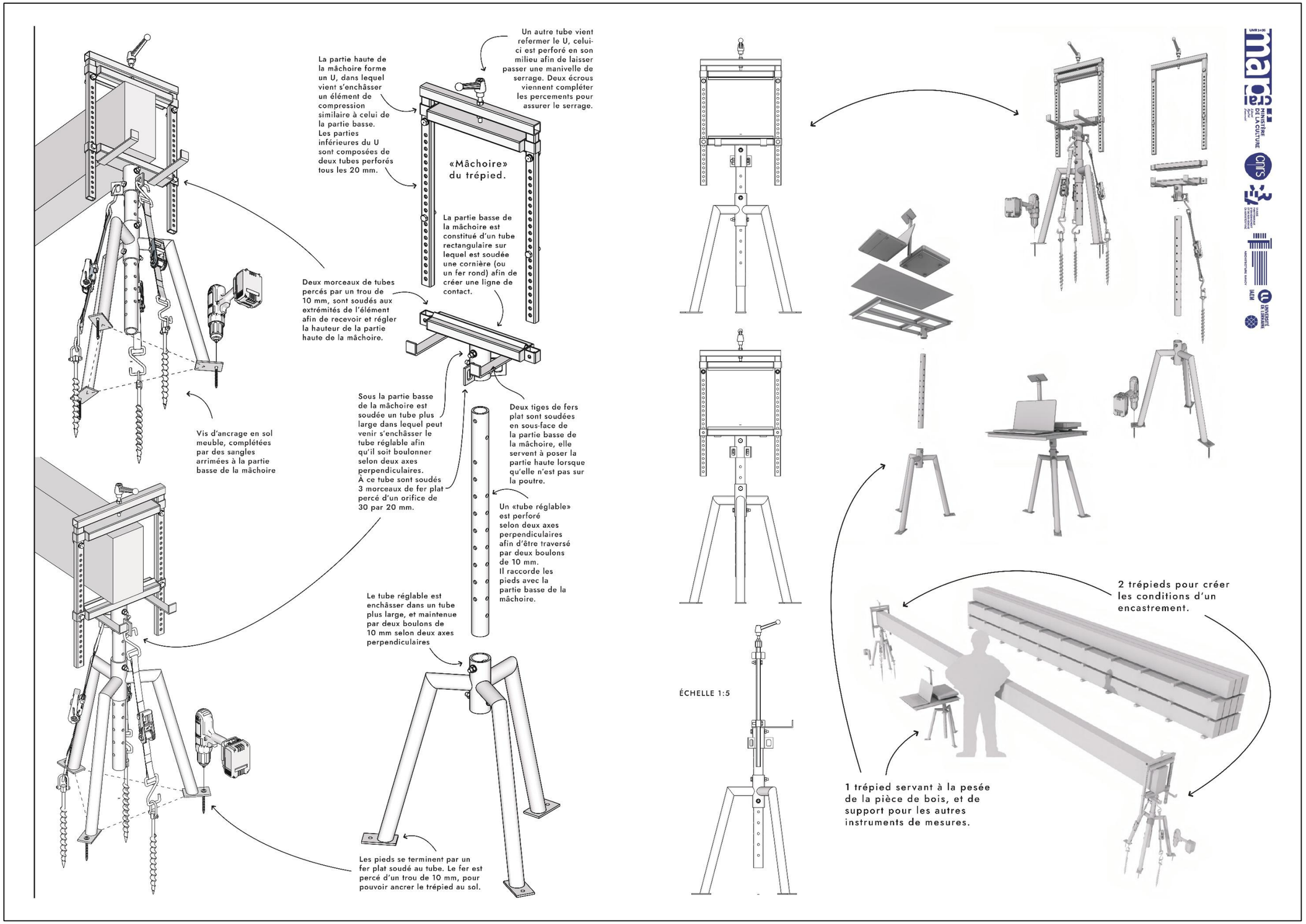
Indicateurs décrivant l'utilisation de ressources		Unité	Description
Ressources d'énergie primaire **renouvelables** à l'exception des ressources utilisées comme matières premières		MJ, pouvoir calorifique inférieur	Utilisation de ressources d'énergie primaire renouvelables dans les procédés
Ressources d'énergie primaire **renouvelables** utilisées comme matières premières		MJ, pouvoir calorifique inférieur	Utilisation de ressources d'énergie primaire renouvelables en tant que matières premières
Total des ressources d'énergie primaire **renouvelables**		MJ, pouvoir calorifique inférieur	Total de l'utilisation de ressources d'énergie primaire renouvelables
Ressources d'énergie primaire **non renouvelables** à l'exception des ressources utilisées comme matières premières		MJ, pouvoir calorifique inférieur	Utilisation de ressources d'énergie primaire non renouvelables dans les procédés
Ressources d'énergie primaire **non renouvelables** utilisées comme matières premières		MJ, pouvoir calorifique inférieur	Utilisation de ressources d'énergie primaire non renouvelables en tant que matières premières
Total des ressources d'énergie primaire **non renouvelables**		MJ, pouvoir calorifique inférieur	Total de l'utilisation de ressources d'énergie primaire non renouvelables
Matières secondaires		kg	Utilisation de matières secondaire
Combustibles secondaire renouvelables		MJ, pouvoir calorifique inférieur	Utilisation de combustibles secondaires renouvelables
Combustibles secondaires non renouvelables		MJ, pouvoir calorifique inférieur	Utilisation de combustibles secondaires non renouvelables
Utilisation nette d'eau douce		m^3	-

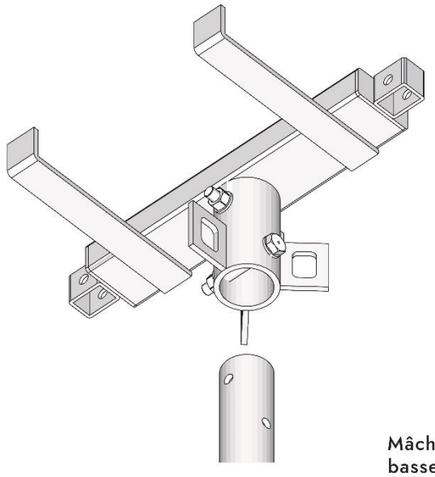
Indicateurs de flux sortants		Unité	Description
Déchets dangereux éliminés		kg	Déchets dangereux produits au cours du cycle de vie du produit
Déchets non dangereux éliminés		kg	Déchets non dangereux produits au cours du cycle de vie du produit
Déchets radioactifs éliminés		kg	Déchets radioactifs produits au cours du cycle de vie du produit
Composants destinés à la réutilisation		kg	-
Matériaux destinés au recyclage	-	kg	-
Matériaux destinés à la récupération d'énergie	-	kg	-
3 indicateurs d'énergie fournie à l'extérieur (électricité, thermique, gaz)	-	MJ par vecteur énergétique	-

Annexe 3 : Vue de la modélisation 3D sous forme filaire des bâtiments liés à l'opération de Remiremont, réalisée avec le logiciel SketchUp

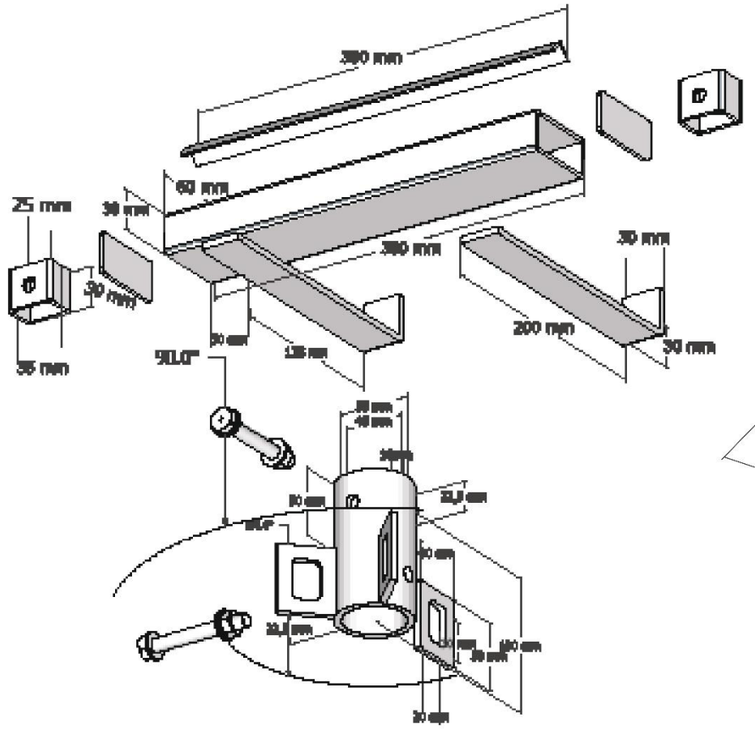


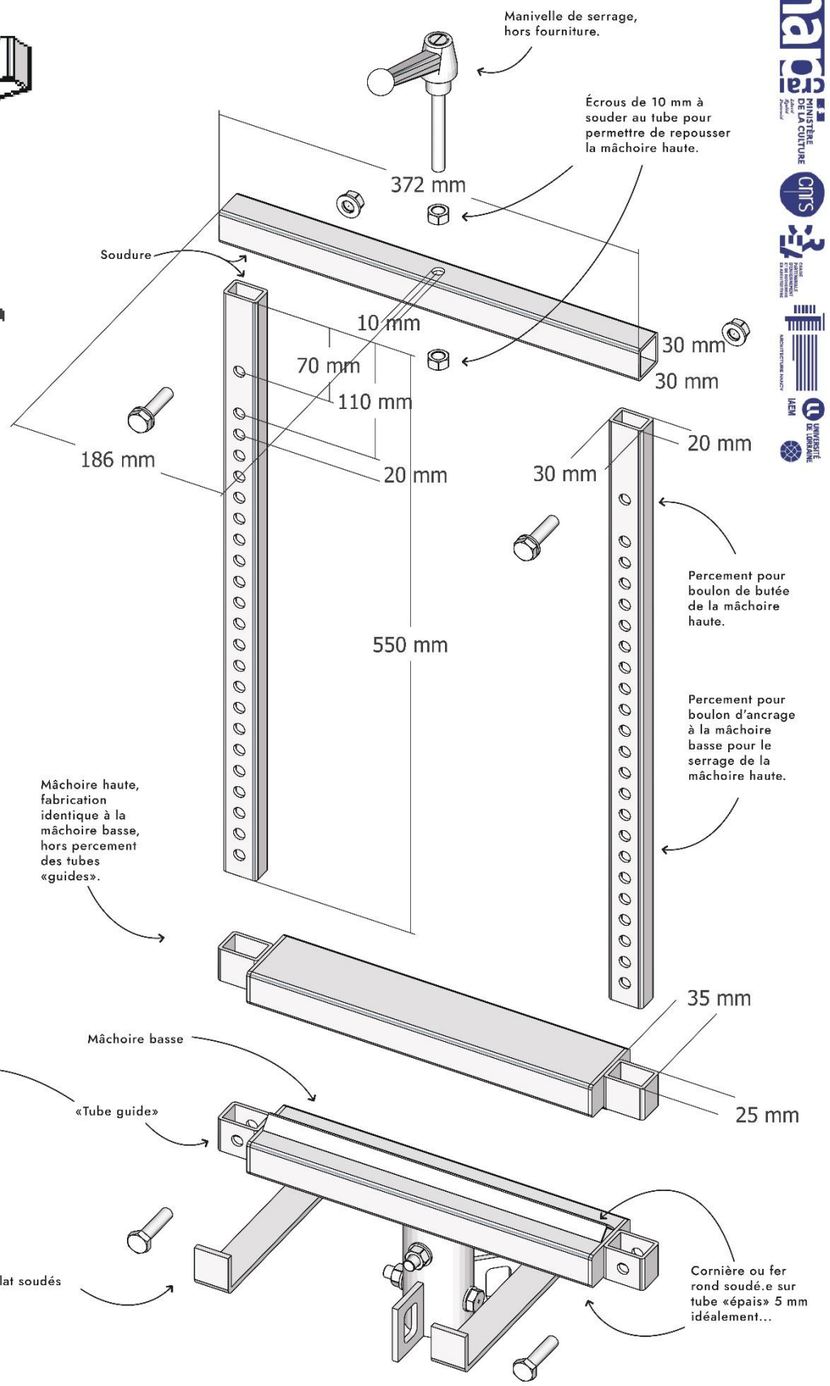
Annexe 4 : Description et explication du modèle 3D du banc d'essai mobile

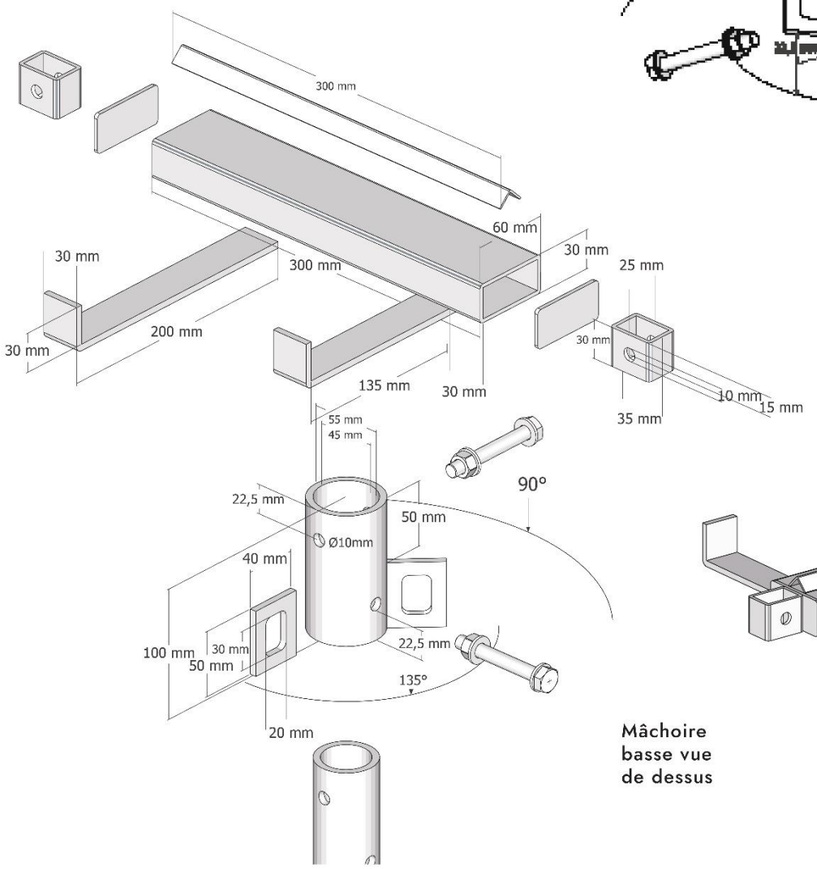




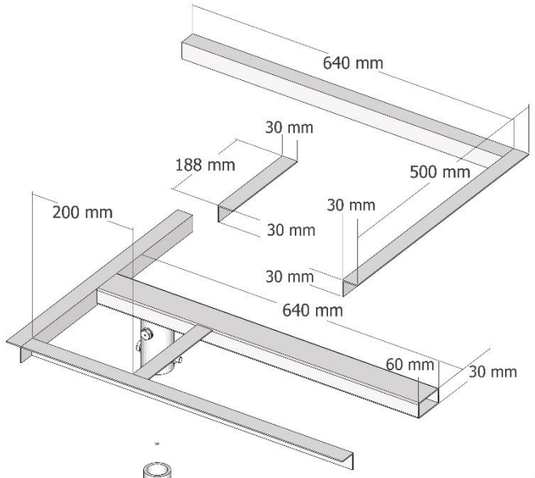
Mâchoire basse vue de dessous

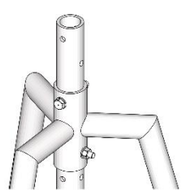


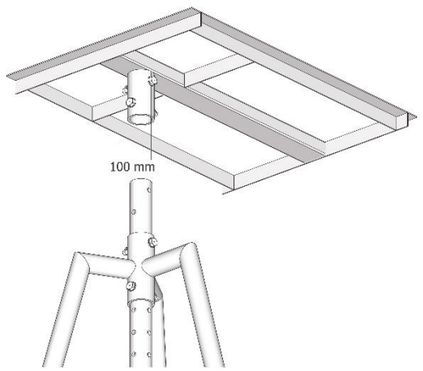




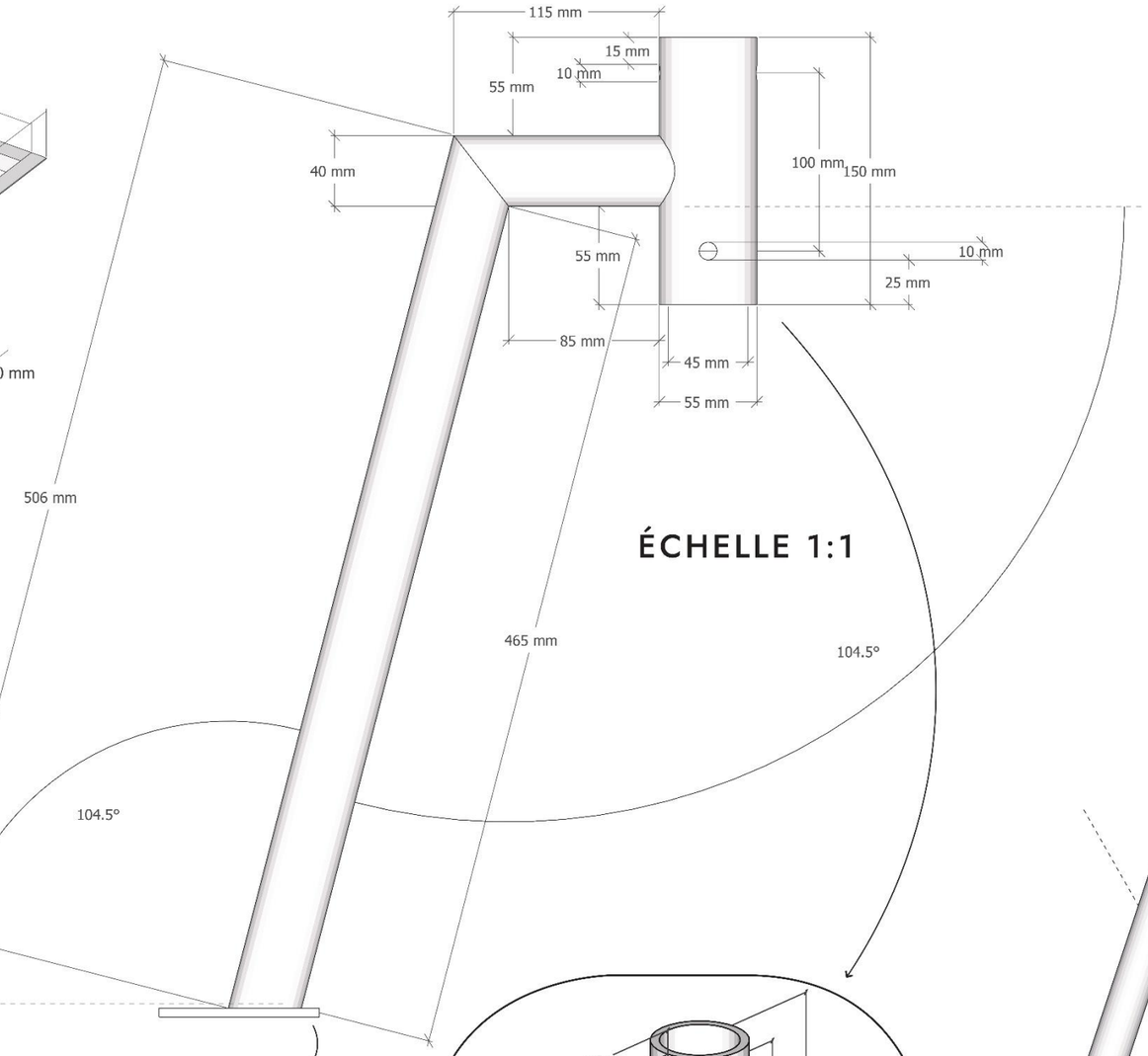
Mâchoire basse vue de dessus



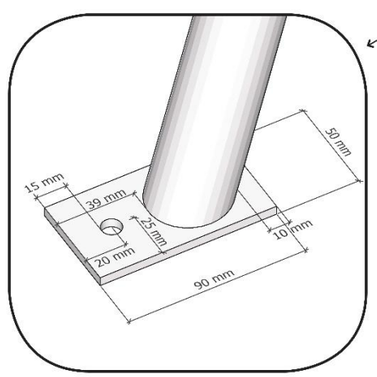


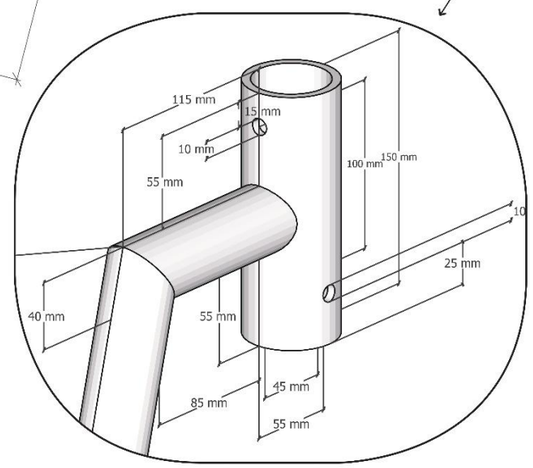


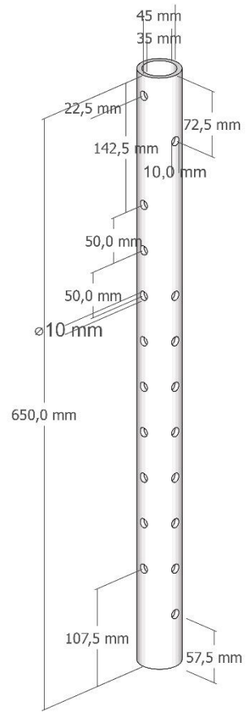
Plateau du trépied servant à la pesée de la pièce de bois, et de support pour les autres instruments de mesures.

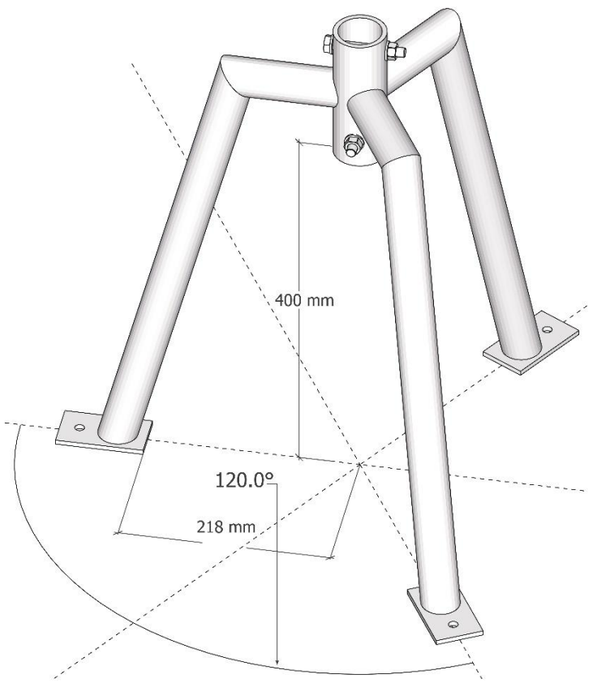


ÉCHELLE 1:1









Annexe 5 : Annexe J du règlement du programme INIES relative aux

ANNEXE J – Règles spécifiques au programme INIES

Version de l'annexe	Décembre 2025
Version précédente	Décembre 2024

Ce chapitre regroupe les principales décisions du COPIL (à la date de mise à jour de ces règles) concernant l'application des règles du programme qu'elles proviennent de l'interprétation ou du besoin de préciser les exigences des normes ou de la définition de règles de fonctionnement propres au programme.

J.1 Règles de calcul relatives au Module D

La déclaration du module D est obligatoire pour toutes les FDES dont l'attestation de vérification est postérieure au 31/10/2022. La déclaration du module D est obligatoire pour toutes les FDES à compter du 1/1/2025.

Le FD CEN/TR 16970 " Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Lignes directrices pour la mise en application de l'EN 15804" mentionne au §5.2.2 que "les contributions au module D ne peuvent provenir que des modules A4-C4". Ainsi la prescription de la norme NF EN 15804 "les charges et bénéfices associés à A1-A3 n'apparaissent pas dans le module D" devrait toujours être appliquée.

Le vérificateur peut accepter une dérogation à la « règle générale », à condition de bien s'assurer que cette tolérance porte sur un enjeu limité à quelques pourcents de la masse de l'UF et que l'hypothèse ainsi faite est réellement conservatrice (c'est-à-dire qu'elle a pour effet d'augmenter légèrement les impacts de la FDES).

Clarification des définitions

Matériau pré-consommateur et post-consommateur

Dans le cadre de la norme NF EN15804+A2, compte tenu des définitions de la norme EN 45557, tout matériau issu de la valorisation d'un déchet généré dans les modules A4 à C4 doit être considéré comme un matériau post-consommateur.

En se basant sur la même norme, les déchets générés par un process d'un système de produit (en A1-A3) ne peuvent pas être considérés comme des matériaux pré-consommateurs pour ce même système de produit. En conséquence, un matériau pré-consommateur issu d'un système de produit ne peut pas être pris en compte dans le calcul du flux « utilisation de matière secondaire » de ce système de produit ; il peut toutefois entrer dans le calcul de ce flux pour un système de produit différent.

La norme NF EN15804+A2 (§6.3.5.2) considère que certains flux ayant atteint le statut de fin de déchet sont méthodologiquement considérés comme des coproduits et d'autres des déchets valorisés. Elle introduit ainsi une différence dans la prise en compte des matériaux post-consommateurs et pré-consommateurs. Les matériaux pré-consommateurs doivent, sauf justification, en effet être considérés comme des co-produits du système de produits qui les génère alors que les matériaux post-consommateurs sont considérés comme des matériaux issus de la valorisation d'un déchet. Ce paragraphe semble en contradiction avec la définition de co-produit donnée par la norme (§3.8) puisque seul un déchet ne doit pas être considéré comme un co-produit. Or un déchet ayant atteint le

règles spécifiques

statut de fin de déchet n'est par définition plus un déchet et devrait donc être considéré comme un co-produit.

Par exemple, une chute de bois issue de la préfabrication d'un mur à ossature bois en A3 est considérée méthodologiquement, dans l'application actuelle de la norme, comme un coproduit et se verra allouer une partie des impacts de la production du mur à ossature bois. La même chute générée sur un chantier (en A5) est considérée comme un déchet valorisé, elle ne se verra allouer aucun impact de la production du mur à ossature bois. Bien sûr, ces deux flux peuvent être gérés différemment (collecte sélective ou collecte en mélange) mais peuvent aussi être gérer de façon identique.

Le programme INIES considère qu'une clarification paraît nécessaire sur la définition de co-produits et qu'il n'est pas possible d'apporter cette clarification sans introduire dans les règles du programme INIES un écart significatif avec la norme NF EN15804+A2.

Flux sortant et extrant

La norme NF EN ISO 14044 définit la notion d'extrant comme étant tout flux qui sort d'un système de produit, quel qu'il soit. Un co-produit est donc un extrant (ou flux sortant) au sens de cette norme. Le paragraphe 6.4.3.3 de la norme NF EN15804+A2 indique que le calcul du module D se fait en utilisant la différence entre le flux sortant et le flux entrant (flux net) d'une même matière ou combustible secondaire. Mais ce n'est vrai que si le flux sortant n'est pas issu de A1-A3. La norme NF EN15804+A2 considère donc qu'un coproduit est parfois un flux sortant, parfois non pour le calcul du module D.

Pour le programme INIES, cela semble signifier que si un système de produits considère l'un de ces flux comme un co-produit alors il ne peut plus le considérer comme un flux sortant au sens de la norme NF EN15804+A2 pour le calcul du module D.

En absence de clarification de la notion de co-produit, le programme INIES propose de clarifier la norme NF EN15804+A2 en considérant que les flux sortants sont les flux (matière ou énergie) sortants des modules A4 à C4 contribuant au calcul des « informations décrivant les flux sortants » au sens de la norme NF EN15804+A2 (tableau 8, §7.2.4.4 de la norme NF EN15804+A2).

Composants destinés à la réutilisation	kg
Matériaux destinés au recyclage	kg
Matériaux destinés à la récupération d'énergie	kg
Énergie fournie à l'extérieur	MJ par vecteur énergétique

De même, pour le programme INIES, les flux entrants sont les flux (matière ou énergie) entrants dans les modules A1 à C4 contribuant au calcul des informations décrivant les flux entrants suivants (extrait du tableau 6, §7.2.4.2 de la norme NF EN15804+A2).

Utilisation de matière secondaire	kg
Utilisation de combustibles secondaires renouvelables	MJ, pouvoir calorifique inférieur
Utilisation de combustibles secondaires non renouvelables	MJ, pouvoir calorifique inférieur

Cette clarification conforte la dissymétrie entre les flux sortants (A4-C4) et les flux entrants (A1-C4) introduite par la norme NF EN15804+A2 à prendre en compte pour les calculs de flux net.

Clarification de la notion de flux net quittant le système ou flux sortant net

Pour le calcul du module D, la norme NF EN15804+A2 fait référence au calcul de flux nets quittant le système (§6.3.5.6), flux sortant nets (§6.4.3.3 ou D3.4), d'impacts net (§6.4.3.3). Pour un flux donné, son flux net correspond à la différence entre la quantité sortante de ce flux contribuant au calcul de « l'information décrivant le flux sortant » et la quantité entrante de ce flux contribuant au calcul des paramètres décrivant les ressources (tableau 6, §7.2.4.2 de la norme NF EN15804+A2). Le programme INIES propose de de considérer qu'un flux net est considéré sortant (ou quittant le système) si le flux net est positif.

Calcul du module D pour les FDES A1

Le COPIL considère que l'élaboration des FDES A1, dont l'attestation de vérification est antérieure au 01/11/2022 et qui ne déclarent pas de module D, n'a pas forcément permis de collecter les informations nécessaires au calcul du module D.

Considérant que ces FDES arriveront en fin de validité au plus tard le 31/12/2025, le COPIL autorise les déclarants de ces FDES à déclarer des valeurs nulles dans leur module D. Toutes ces FDES seront autorisées à réaliser une mise à jour mineure dans la base INIES pour compléter la base de données sans nouvelle vérification. La modification du fichier PDF de la FDES pour ajouter le module D nul est optionnelle.

La déclaration d'un module D avec des valeurs non nulles devant faire l'objet d'une vérification, cette déclaration devra accompagner une mise à jour majeure de la FDES au format A2 et suivre les exigences décrites ci-dessous.

Clarification et précisions sur les règles de calcul du module D pour les FDES A2

Règle 1 – Calcul de la contribution au module D des flux nets

Le calcul de la contribution au module D est réalisé systématiquement pour les flux nets positifs (correspondant à la notion de flux net quittant le système ou de flux sortant net). Pour les flux nets négatifs ou nuls, la contribution au module D peut être, au choix, calculée ou déclarée nulle.

Règle 2 - Introduction d'une règle de coupure sur la contribution des emballages au module D

Concernant les flux nets sortants relatifs aux emballages, si ces derniers représentent en masse moins de 1% de la masse du flux de référence (produit principal + produits complémentaires), le programme INIES autorise les déclarants à considérer pour ces flux sortants relatifs aux emballages une contribution nulle au module D. Les autres règles de coupure définies dans la norme NF EN15804+A2 et son complément national s'appliquent au module D.

Calcul du module D pour les produits réemployés

Le module D d'un produit réemployé doit être calculé comme celui de n'importe quel autre produit. En effet, un produit réemployé arrivant en fin de vie peut par exemple faire l'objet d'un recyclage ou d'une valorisation énergétique. Toutefois, le scénario de fin de vie d'un produit réemployé ne peut pas prévoir à nouveau du réemploi.

J.2 Précision sur le carbone biogénique

Le carbone dit « biogénique » est le carbone constitutif du végétal, provenant du processus de photosynthèse à partir du CO_2 présent dans l'air. Dans le cadre de la réglementation environnementale RE2020, cet indicateur StockC doit être renseigné dans les FDES des produits concernés et s'exprime en **kgC/UF**.

J.3 Règles à utiliser pour déclarer la fin de vie des produits bois

Pour les FDES de produits intégrant du bois, les règles et scénarii publiés dans les rapports du projet GDBAT financé par le CODIFAB et France Bois Forêt https://www.fcba.fr/travaux/gdbat-gestion-des-dechets-de-produits-de-construction-bois-en-fin-de-vie/ , dans leur version mise à jour pour être utilisables avec la norme EN15804+A2 et son complément national, doivent être utilisés. Toute autre méthodologie ou scenario considéré, devra être justifié dans la FDES.

J.4 Phase B7

Certaines FDES comptabilisent l'eau utilisée lors de la vie en œuvre en phase B7 et d'autres non (ex. tuyauterie). Cette comptabilisation peut être faite ainsi si les scénarios sont clairement explicités dans la FDES.

J.5 Prise en compte de l'électricité verte

Les règles de la norme ISO 14067 : 2018 *Gaz à effet de serre — Empreinte carbone des produits — Exigences et lignes directrices pour la quantification* (§ 6.4.9.4 Electricité) doivent être respectées si de l'électricité verte est utilisée dans un projet.

J.6 Interdiction des principes d'affectation de type « Mass Balance Credits » et « Book and Claim »

L'utilisation de différents principes d'affectation des flux d'inventaire à un produit dans le cadre d'une analyse de cycle de vie fait l'objet de nombreuses discussions en normalisation européenne (CEN TC350 notamment) et internationale. Les principes d'affectation discutés sont aujourd'hui fortement corrélés aux principes de traçabilité des flux et aux chaines de contrôle mises en place pour garantir cette traçabilité. La norme ISO 22095 :2020 décrit différents principes de chaines de contrôle. L'association européenne Eco Platform, qui regroupe notamment 24 opérateurs de programme de déclarations majeurs, a publié deux positions en février 2023 et en décembre 2023 interdisant, pour la réalisation de déclarations environnementales, l'utilisation des méthodes d'affectation basées sur les modèles de chaine de contrôle dits « mass balance credits » et « Book and Claim » (voir aussi annexe E). L'utilisation de ces méthodes n'est à ce jour pas jugé consensuel. Ces positions confortent l'interdiction formulée par le programme INIES depuis plusieurs années. Afin de lever toute ambiguïté, le programme INIES précise que la méthode « mass balance – rolling average percentage method » est autorisée. L'interdiction des méthodes « mass balance credits » et « Book and Claim » serait levée si leur utilisation devenait consensuelle par l'adoption de normes européennes ou internationales sur l'ACV ou les déclarations environnementales de produits dans le champ de la construction.

J.7 Règles spécifiques à la réalisation de FDES sur des systèmes d'assainissement non collectif

L'ensemble des règles propres à l'ACV des systèmes d'assainissement non collectif est disponible dans le guide « Recommandations méthodologiques pour la réalisation des ACV des systèmes d'assainissement non collectif » de l'ATEP (https://atep-france.fr/fr/recommandations-methodologiques-pour-la-realisation-des-acv-des-systemes-d-assainissement-non-collectif/). Ne sont reprises ici que les règles spécifiques aux FDES et aux ANC.

L'unité fonctionnelle peut être formulée comme suit : « traiter la charge de pollution des eaux usées domestiques reçues sur la période de référence de 50 ans par un dispositif ANC d'une capacité nominale de x Equivalent.Habitant (EH) ». Pour rappel, le volume d'eau traité est pris conventionnellement à 2400m3 d'eau par EH (48m3 d'eau/habitant/an). La durée de vie de référence d'un système ANC est de 50 ans.

La FDES est alors utilisable pour n'importe quelle charge de pollution inférieure ou égale à la capacité nominale de x EH du dispositif.

Les éléments du dispositif ANC pris en compte sont : les cuves, les composants, les médias filtrants et les accessoires (voir annexe du guide ATEP pour leur liste détaillée, par type de dispositif). Parmi ces éléments, une partie des canalisations en amont et en aval du dispositif sont pris en compte. Une longueur de canalisation de 5 m en amont et en aval du dispositif est comprise dans le périmètre de la FDES.

En phase A5, un scénario spécifique concernant les travaux d'excavation pour installer le dispositif est proposé. Pour éviter tout double comptage à l'échelle du bâtiment, le titre de la FDES doit préciser si ces travaux ont été inclus ou non dans la FDES.

En phase d'utilisation, les consommables nécessaires au traitement des eaux et le traitement des résidus de traitement des eaux usées (matières de vidange) sont considérés pris en compte par la Donnée conventionnelle de l'Etat relative au service d'assainissement des eaux usées par un système ANC. Toutefois, la vidange de l'équipement et le transport des boues jusqu'à un site de traitement sont à inclure dans le périmètre de la FDES. Les impacts environnementaux relatifs aux émissions directes du procédé de traitement des eaux usées et à l'émission des eaux traitées par le dispositif ANC ne sont pas dans le périmètre de la FDES parce qu'ils sont aussi pris en compte par la donnée conventionnelle de l'Etat.

Pour les modules B2 à B5, les durées de vie par défaut des composants du dispositif sont mentionnées dans le guide ATEP (tableau 8). Il est possible d'utiliser des durées de vie inférieures, à ces durées de vie par défaut, sans justification et supérieures avec justification.

Le module C comprend la fin de vie des éléments du dispositif ANC et intègre une étape de démantèlement calculée de la même manière que l'étape d'installation.

Les règles décrites ci-dessus et dans le guide ATEP sont susceptibles d'évoluer en fonction du périmètre de la DES ANC mise à disposition pour la RE2020.

J.8 Utilisation de jeux de données spécifiques pour l'approvisionnement en matières premières

Lorsqu'un déclarant veut faire valoir des approvisionnements en matières premières auprès de fournisseurs spécifiques, il est autorisé à utiliser des données spécifiques à ce fournisseur (type

inventaire de cycle de vie, formulation spécifique…). Ce fournisseur doit être l'émetteur de ce jeu de données et le déclarant doit fournir au vérificateur :

- une attestation sur l'honneur justifiant son approvisionnement spécifique et la stabilité de son approvisionnement pendant la période de validité de la déclaration environnementale (voir annexe K).
- un justificatif du fournisseur pour le jeu de données concerné (déclaration environnementale, rapport d'ACV, certificat de composition par exemple).

J.9 Règle spécifique à la prise en compte des Laitiers de Haut Fourneau (LHF)

La fonte et les laitiers de haut fourneau sont deux coproduits du même procédé de fabrication. Suite à la décision du COPIL du 23 juin 2022, l'affectation des impacts du procédé de fabrication doit se faire sur une base économique. Toute règle d'extension du système est interdite. La valeur à utiliser pour cette affectation est de 1,4% des impacts affectés aux LHF pour le marché français. Pour calculer les impacts, des inventaires de cycle de vie génériques ou des données spécifiques sur le procédé de fabrication peuvent être utilisées. L'affectation des impacts doit rester 1,4% aux LHF et 98,6% à la fonte.

Toute étape ultérieure de transformation des LHF nécessaires à leur utilisation comme matière première dans un produit de construction est affectée aux LHF (transport, granulation…).

Le programme INIES accepte aussi le principe de prise en compte de la recarbonatation des laitiers dans certaines applications. Le déclarant doit soumettre les justificatifs nécessaires et la méthode de calcul utilisée au vérificateur.

J.10 Règles pour la réalisation de FDES sur les toitures végétalisées

3 approches sont possibles concernant les déclarations environnementales de systèmes de toiture végétalisée :

- Déclaration d'un ou plusieurs éléments du système uniquement (couche drainante, filtre, substrat…)
- Déclaration d'un complexe de toiture végétalisée complet sans végétation (couche drainante+filtre+substrat par exemple)
- Déclaration d'un complexe de toiture végétalisée complet avec végétation (couche drainante+filtre+substrat+végétaux par exemple)

Dans les deux derniers cas, le titre de la FDES doit mentionner clairement la prise en compte ou non de la végétation.

Enfin, dans le cas où la végétation est prise en compte, le type de végétation doit être clairement décrit dans la FDES et l'intégralité des étapes du cycle de vie du végétal doivent aussi être prises en compte. Ainsi, un stockage de carbone ne saurait être pris en compte si le reste du cycle de vie des végétaux n'est pas pris en compte.

J.11 Mise en oeuvre du jeu de facteurs de caractérisation EF3.1 du JRC

Le §6.5.2 de la norme EN15804+A2 dit que les facteurs de caractérisation du JRC doivent être utilisés pour tous les indicateurs mentionnés dans son annexe C soit le jeu EF3.1 depuis début 2023. La méthode de caractérisation référencée dans l'annexe C de la norme EN15804+A2 pour le changement climatique n'est pas la même (GIEC 2013 au lieu de GIEC 2021) que celle utilisée dans le jeu de facteurs

EF3.1. Cette méthode était utilisée dans le jeu EF3.0. La différence concerne essentiellement voire uniquement les émissions de méthane. Le jeu 3.0 est donc plus défavorable.

Le programme INIES recommande donc l'utilisation du jeu de facteurs 3.1 et tolère toutefois l'usage du jeu de facteurs 3.0 pour toutes les déclarations soumises à vérification jusqu'au 30/06/2024.

J.12 Harmonisation des UF utilisées pour les produits servant à constituer un réseau de transport des fluides liquides ou gazeux (extrait du document COPIL N112 approuvé le 30 juin 2023)

Les éléments constituants des réseaux de transport de fluides liquides ou gazeux peuvent être déclarés :

- Séparément (tubes, tuyaux, canalisations, vannes, robinets, tubes spéciaux (en L, en T), boites de raccordement…)
- Sous forme d'une installation complète type.

Dans le premier cas, le périmètre des produits couverts doit être clairement explicité (diamètres, formes ,…) ainsi que les applications possibles du produit. Dans le cas de FDES de gamme, la gamme doit être clairement explicitée et les règles applicables aux FDES de gamme doivent être respectées. Les unités fonctionnelles recommandées sont le mètre linéaire pour des tubes, un nombre de pièces pour les éléments singuliers du réseau.

Dans le second cas, l'utilisation d'une unité fonctionnelle en mètre linéaire moyen de réseau est appropriée. La description de l'UF doit alors indiquer pour quelle application la FDES est utilisable (adduction d'eau, adduction de gaz, évacuation des eaux…) et pour quel ouvrage type (maison individuelle, logement collectif (petit/grand), tertiaire de bureau…). La description physique de l'UF doit décrire l'ensemble des éléments intégrés dans le mètre linéaire moyen. Préciser toute information nécessaire au bon choix et à la bonne utilisation de la FDES dans l'ouvrage est recommandé. En particulier, la FDES doit préciser si les éléments de fixation du réseau au bâti sont pris en compte ou pas et la limite entre ce réseau et les équipements qui y sont raccordés. Si un ouvrage type est mentionné, les conditions d'utilisation de la FDES pour d'autres ouvrages types doivent être précisées. Ces conditions d'utilisation doivent répondre aux règles des FDES de gamme.

Cette décision s'applique à toute mise à jour majeure complète ou à toute nouvelle FDES à compter du 01/09/2023. Pour les FDES existantes, le COPIL recommande aux déclarants de faire une mise à jour mineure pour compléter les informations descriptives requises.

Quelques exemples :

« Une vanne deux points de diamètre d'entrée/sortie de 20mm pour réseau d'adduction d'eau d'une durée de vie de 20 ans. »

« Un mètre linéaire de canalisation de 150mm de diamètre pour l'évacuation des eaux vannes d'une durée de vie de 50 ans. La FDES porte sur le linéaire de tube, elle ne comprend pas les autres éléments du réseau. Elle est valable pour l'ensemble de notre gamme de canalisations de 80 à 150mm de diamètre intérieur. »

« 1 mètre linéaire moyen d'un réseau d'adduction de méthane dimensionné pour une maison individuelle de 110 m2 habitable d'une durée de vie de 50 ans. Cette FDES peut être utilisée sans modification pour tout bâtiment de logement de surface habitable inférieure à 200m2. L'ouvrage type comprend les fixations du réseau au bâti.» La description de l'UF devrait aussi comprendre des éléments tels que « L'installation comprend 1 point de puisage fermé par un robinet pour 10 ml de

canalisation. Elle ne comprend pas les tubes de raccord des équipements au réseau (plaque de cuisson, chaudière…). Elle comprend 20 ml de tubes, 2 vannes, x colliers et pattes de fixation et y vis.»

J.13 Bonnes pratiques pour la réalisation d'une déclaration environnementale d'un produit issu du réemploi

Un produit issu du réemploi est un produit qui a déjà eu une 1ère vie en œuvre. Par conséquent, cela exclut les produits /surplus de chantier, les fins de stock etc…

Justification de l'utilisation d'une déclaration de produit issu du réemploi : il sera nécessaire pour pouvoir utiliser la déclaration de justifier de la bonne correspondance entre le produit objet de la déclaration et le produit réemployé mis en œuvre : preuve du réemploi, traçabilité jusqu'au chantier, performance après reconditionnement du produit, justification de la durée de vie.

Comment justifier que le produit est issu du réemploi ? il faut démontrer la source du produit et justifier de sa traçabilité. Le diagnostic déchet réalisé lors de la déconstruction / réhabilitation d'un bâtiment pourra être un justificatif.

Règles de calcul d'une FDES d'un produit issu du réemploi

A1-A3 :

- Le module A1 est pris conventionnellement égal à zéro. Les éventuels produits complémentaires nécessaires sont comptés en A3
- A2 : Dans le cas où le site de stockage temporaire et le site de reconditionnement sont différents, on considère que le transport depuis le chantier de déconstruction/rénovation/entretien jusqu'au site de stockage temporaire est attribué au 1er cycle de vie, et que le transport entre le site de stockage temporaire jusqu'au site de reconditionnement doit être pris en compte dans le 2nd cycle de vie. Dans le cas où le site de stockage temporaire et le site de reconditionnement sont identiques, on considère que le transport du chantier vers ce site unique est attribué au 1er cycle de vie (une justification doit être fournie). L'attribution au 1er cycle de vie se traduit par un impact nul pour le produit issu du réemploi. Il est également possible que le produit soit transporté depuis le chantier de dépose/déconstruction directement vers le nouveau chantier de construction. Dans ce second cas de figure, il faut imputer au 2nd cycle de vie le transport moyen entre 2 chantiers, duquel on déduit le transport C2 du 1ier cycle de vie (produit neuf). Dans le cas où cette déduction donne une valeur négative, l'impact est considéré comme nul.
- A3 - Reconditionnement du produit : on entend par « reconditionnement » toutes les actions/traitements nécessaires pour permettre une seconde vie en œuvre du produit. Le module A3 comprend : les traitements nécessaires à une 2nde vie en œuvre (exemple : relaquage, mise à longueur d'une poutre en bois, sablage, découpe, soudage, grenaillage, remplacement/réparation d'un composant, etc…), mais aussi les emballages nécessaires au reconditionnement.

A4-A5 :

- A4 : On prend en compte le transport du site de reconditionnement jusqu'au chantier de construction (pour la seconde vie en œuvre).
- A5 : Moyen de manutention (ex : grue de levage), prise en compte des produits auxiliaires pour la mise en œuvre, traitement de fin de vie des chutes sur chantier et des emballages. Identique au produit neuf, ou différent en cas de réduction justifiée des impacts.

B1-B7 :

Dans le cas où la déclaration environnementale du produit neuf existe, on retient le même scénario que celui de cette déclaration. Le produit neuf et le produit issu du réemploi doivent être similaires et avoir les mêmes performances techniques. Un scénario différent peut être utilisé, si des données différentes sont disponibles. Une justification doit alors être apportée.

Dans le cas où la déclaration environnementale du produit neuf n'existe pas, il convient d'utiliser la même méthodologie que celle qui serait appliquée pour un produit neuf.

C1-C4 :

Dans le cas où la déclaration environnementale du produit neuf existe, on retient le même scénario que celui de cette déclaration. Le produit neuf et le produit issu du réemploi doivent être similaires et avoir les mêmes performances techniques. Un scénario différent peut être utilisé, si des données différentes sont disponibles. Une justification doit alors être apportée.

Dans le cas où la déclaration environnementale du produit neuf n'existe pas, il convient d'utiliser la même méthodologie que celle qui serait appliquée pour un produit neuf.

D :

Le module D est calculé comme pour un produit neuf en cohérence avec les scénarios utilisés dans les modules C1-C4. Toutefois, le scénario de fin de vie d'un produit réemployé ne peut pas prévoir à nouveau du réemploi.

J.14 Prise en compte des produits complémentaires de mise en œuvre

Compte tenu des différentes rédactions proposées dans la norme NF EN15804+A2 et son complément national, le programme INIES considère que la prise en compte des produits complémentaires de mise en œuvre n'est pas obligatoire. Si les produits complémentaires de mise en œuvre ne sont pas inclus dans le périmètre de la FDES et si des produits complémentaires sont indispensables à la mise en œuvre, alors le titre de la FDES doit mentionner explicitement que les produits complémentaires ne sont pas inclus et la FDES doit mentionner (par exemple dans sa rubrique aptitude à l'usage) le type de produits complémentaires nécessaires. La mention « hors produits complémentaires de mise en œuvre » peut par exemple être utilisée pour compléter le titre de la FDES. Cette règle est d'application rétroactive.

J.15 FDES de systèmes dont les composants ont des durées de vie différentes

L'utilisation d'une FDES portant sur un système constitué de composants de différentes durées de vie peut engendrer des différences de résultats (par rapport aux résultats obtenus en considérant les FDES des composants séparément) lors de l'application de la méthode dynamique de la RE2020. Il est donc recommandé de ne pas réaliser ce type de FDES. Si une FDES est réalisée sur ce type de système, le déclarant doit s'assurer que le calcul RE2020 réalisé avec cette FDES système conduit à un résultat conservatoire par rapport à la réalisation de ce même calcul avec des FDES prises séparément pour chaque composant.

J.16 Principes généraux sur le choix des jeux de données d'arrière-plan

Lorsque plusieurs jeux de données d'arrière-plan sont disponibles pour réaliser une FDES, il peut y avoir désaccord entre le déclarant et le vérificateur sur le jeu de données à utiliser.

Les exigences suivantes ne devraient s'appliquer que si le choix du jeu de données conduit à un écart significatif (10%) sur les résultats des principaux indicateurs environnementaux et notamment de l'indicateur sur le changement climatique.

Le déclarant et le vérificateur doivent conjointement réaliser une évaluation quantitative de la qualité des différents jeux de données. Le jeu de données ayant la meilleure qualité doit être privilégié. En cas de désaccord sur cette évaluation ou d'absence de différence du niveau de qualité des jeux de données, le programme INIES hiérarchise les préférences en matière d'utilisation des jeux de données :

- Un jeu de données spécifique (issu du marché) est préférable à un jeu de données générique si ce jeu de données spécifique ne comporte pas d'écart méthodologique majeur avec la norme NF EN15804+A2 et son complément national. Le programme INIES considère en effet que l'utilisation de données spécifiques ne prévaut que si ces données sont conformes aux exigences méthodologiques de ces normes.
- Entre jeux de données génériques, le jeu de données le plus conservateur est préférable.

Par ailleurs, un jeu de données spécifique ne peut être utilisé que si le déclarant peut justifier l'usage d'une donnée spécifique (Utilisation de l'annexe K du règlement du programme) (voir aussi règle J.8). Elle ne peut donc pas être utilisée comme une donnée « proxy » (« approximation » d'une donnée générique ou d'une autre donnée spécifique) même en absence de toute autre donnée.

J.17 Utilisation d'une FDES d'un déclarant A par un déclarant B (extrait du document COPIL N087 approuvé le 7 octobre 2022)

Contexte

Le déclarant A fabrique un produit P_A pour son compte et un produit P_B identique ou très similaire à P_A pour le compte du déclarant B qui distribue P_B avec sa propre marque. Le déclarant A a réalisé la FDES du produit P_A. A quelles conditions le déclarant B peut-il utiliser la FDES du produit P_A pour le produit P_B ? (P_A et P_B peuvent être totalement identiques)

Ce cas couvre par exemple les commercialisations de produits fabriqués par des tiers sous marque distributeur et les commercialisations par un importateur/distributeur propre au marché français de produits non commercialisés en France par leurs fabricants. Dans les deux cas, les déclarants ne souhaitent souvent pas que le nom du fabricant apparaisse sur la déclaration.

Décision

Le programme INIES autorise le déclarant B à utiliser la déclaration réalisée par le déclarant A comme base de la déclaration du produit P_B aux conditions suivantes :

- Le déclarant A doit disposer d'une attestation de conformité à la réglementation française pour la déclaration environnementale du produit P_A
- Le déclarant A doit être informé de l'utilisation de sa déclaration et de tout ou partie des justificatifs utilisés (pour P_A) par le déclarant B dans la déclaration du produit P_B
- Le déclarant B doit établir sa propre déclaration réglementaire et réaliser sa propre démarche de publication dans INIES
- Le déclarant B doit faire vérifier sa propre déclaration par une tierce partie indépendante, celle-ci doit alors pouvoir disposer :
    a. d'une autorisation du déclarant A pour l'utilisation de la déclaration du produit A et de tout autre justificatif utilisé pour la déclaration du produit A
    b. d'une attestation prouvant que la fabrication de P_B est identique ou très similaire (impacts variant de moins de 10% sur A1-A3) à celle de P_A
    c. d'une étude prouvant que les scénarios utilisés pour P_B à partir de A4 sont identiques à ceux utilisés pour P_A ou ne conduisent pas à des écarts d'impacts de plus de 10% sur le total cycle de vie.

d. Idéalement les justificatifs d'aptitude à l'emploi, de performance, d'informations sanitaires ou de contribution aux différents conforts doivent être propres à P_B. A défaut, voir point a).

- Les pièces mentionnées aux points a) à d) ci-dessus doivent être consultables sur demande par l'opérateur du programme INIES et par les autorités de contrôle du marché. A ce titre, les pièces mentionnées aux points a) à c) doivent être déposées dans INIES comme documents accompagnant la FDES (en tant que « rapport de vérification » pour qu'ils ne soient pas disponibles publiquement).
- La procédure de vérification peut être simplifiée et porter exclusivement sur les pièces mentionnées aux points a) à d) ci-dessus.
- Le rapport de vérification doit mentionner le contrôle des pièces mentionnées aux points a) à d) et doit clairement mentionner l'attestation de vérification du produit P_A.
- Le déclarant B doit faire apparaître dans sa déclaration le/les lieu(x) de fabrication (adresse du/des site(s)) de son produit, la mention du nom du fabricant A est optionnelle.)
- Le numéro d'enregistrement au programme INIES de la FDES du produit A doit figurer sur l'attestation de vérification de la FDES du produit B
- La date de fin de validité de la déclaration du déclarant B ne peut excéder celle de la déclaration du produit A

J.18 FDES réalisées par l'importateur ou le distributeur du produit plutôt que par le fabricant

L'importateur ou le distributeur peut réaliser la déclaration environnementale d'un produit à la place du fabricant. La FDES doit respecter les mêmes exigences qu'elle soit réalisée par le fabricant ou un autre acteur de la chaine de valeur. En particulier, la structuration du cycle de vie en modules doit être conservée. A3 reste le module couvrant la fabrication du produit et le module A4 sa distribution. Le module A3 devra respecter les exigences en matière de données spécifiques. L'utilisation de données spécifiques en A4 par un déclarant distributeur ne remplace pas l'obligation d'utiliser des données spécifiques également en A3.

J.19 FDES de bâtiments modulaires

Les systèmes considérés comme des bâtiments devant répondre aux exigences de la RE2020 ne sont pas dans le champ d'application du programme INIES.

J.20 Interdiction des tableaux d'extrapolation (décision N114 du COPIL du 30/06/23)

Le programme INIES reconnait les FDES individuelles portant sur un produit ou une gamme de produits et les FDES collectives. Les FDES de gamme répondent à des exigences similaires aux FDES collectives et doivent comporter un cadre de validité. Ce cadre de validité ne prévoit aucunement l'extrapolation des valeurs déclarées à d'autres produits de la gamme. Le programme INIES ne prévoit par ailleurs aucune règle de vérification pour des règles d'extrapolation d'une déclaration environnementale quelle qu'elle soit.

Une FDES ne peut donc comporter aucune règle d'extrapolation à d'autres produits. Les tableaux contenant des valeurs pour extrapoler les indicateurs environnementaux d'un produit à partir de la FDES d'un autre produit sont donc interdits dans les FDES.

Les configurateurs peuvent permettre de répondre au besoin de décliner rapidement une FDES pour différents produits d'une gamme. Un déclarant peut aussi réaliser plusieurs FDES pour couvrir chacun des produits d'une gamme ou la sectionner afin de couvrir chaque section par une FDES « majorante ».

Cette décision est d'application rétroactive, la mise à jour des fichiers PDF des FDES concernées pourra être exigée.

J.21 Collecte de données primaires

Cas particulier des produits innovants (basée sur la décision N123 du COPIL du 29/09/2023)

Afin de ne pas bloquer la production de FDES pour les produits nouvellement mis sur le marché, des déclarants ont demandé au programme INIES s'il était possible de déroger à la règle sur le besoin de disposer de données primaires couvrant au moins une année de production pour réaliser une déclaration environnementale.

Norme NF EN15941 prévoit une telle dérogation. Le COPIL INIES autorise donc les déclarants à déroger à la règle :

- Les données de production devront couvrir au moins 6 mois de production,
- La durée de validité de la déclaration sera limitée à 2 ans. Au terme de cette période la déclaration devra être mise à jour avec des données de production couvrant au moins une année de production.

Cette décision s'applique aux produits nouvellement mis sur le marché qu'il s'agisse de nouveaux produits ou d'évolutions de produits existants (changement de composition ou de process). Cette décision ne se substitue pas à l'obligation par le déclarant de mettre à jour sa déclaration en cas de modification significative des performances environnementales (norme NF EN15804+A2, §9).

Cas particulier des productions non continues

Certains produits ne font pas l'objet de production en continue (production uniquement certaines périodes de l'année, production à la demande). La norme NF EN15804+A2 spécifie (§6.3.8.2) que « les jeux de données doivent être fondés sur des données moyennées sur un an ». Le programme INIES considère donc qu'il est possible, en restant conforme à la norme NF EN15804+A2, de moyenner des données d'une production non continue sur une année. Dans ces situations, le déclarant doit prouver que les conditions de production sont maitrisées et stables dans le temps.

J.22 Contenu des informations additionnelles de la FDES (rubrique optionnelle prévue à l'annexe K de la norme NF EN15804+A2/CN)

Sur décision du COPIL du 21/03/2024, les informations suivantes ne sont pas autorisées dans les informations additionnelles :

- valeur d'un indicateur de réchauffement climatique calculé avec la méthode dynamique simplifiée de la RE2020 car cela pourrait conduire à une mauvaise utilisation des données et à des écarts de calcul à l'échelle du bâtiment
- contenu en carbone biogénique qui fait déjà l'objet d'un espace de déclaration ailleurs dans la déclaration et dont la déclaration n'est pas optionnelle
- durée de stockage de carbone biogénique puisque celle-ci correspond à la durée de vie de référence du produit déjà déclarée par ailleurs,
- les tableaux de valeurs pour d'autres produits de la même gamme : si la FDES est une FDES individuelle de gamme alors la valeur déclarée couvre déjà toute la gamme, sinon ces tableaux

sont considérés comme des tableaux d'extrapolation de la FDES à d'autres produits, tableaux déjà interdits par la décision COPIL N114

- par extension, toute valeur d'un indicateur environnemental ou de flux non prévu par les règles de catégorie de produits.

J.23 Utilisation des données mises à disposition par le programme INIES sur les impacts environnementaux de la fin de vie des emballages

Depuis octobre 2024, le programme INIES met à disposition des données sur les impacts environnementaux de la fin de vie des principaux matériaux d'emballage. Ces données sont accessibles sur demande auprès du programme INIES inies@hqegbc.org accompagnée des conditions d'utilisation (disponibles dans les ressources du site www.inies.fr) signées. Ces jeux de données sont utilisables pour réaliser des FDES et des configurateurs respectant les règles du programme INIES. Elles sont valables uniquement pour le marché français. Elles peuvent être utilisées comme des données par défaut pour les emballages concernés. Les règles de bon usage de ces données sont spécifiées dans le rapport méthodologique les accompagnant. Leur usage n'est ni obligatoire ni indispensable pour obtenir la conformité aux règles du programme INIES ; il vise uniquement la simplification de la démarche de réalisation et de vérification des FDES.

J.24 ICV ou FDES : cas particulier des fabricants de produits intermédiaires

Les fabricants de produits intermédiaires (profilés, bobines de plaques métalliques…) hésitent parfois à réaliser des ICV ou des FDES. Ils souhaitent parfois aussi réaliser des FDES à la place de leurs clients quand ceux-ci n'ont par exemple par les moyens de réaliser des FDES. Cette règle vise à clarifier ce qui est autorisé par le programme INIES :

- Un fabricant de produits intermédiaires peut réaliser des FDES collectives pour le compte des fabricants des produits finis qui utilisent ses produits intermédiaires. Les ayants droit, sont des fabricants de produits finis, ils doivent être bien identifiés (fabricant/gamme),
- Un fabricant de produits intermédiaires peut faire des modules ICV sur ses produits intermédiaires, ses clients pourront faire des FDES de produits finis à partir de ces modules ICV. Si les produits intermédiaires sont considérés comme des produits de construction, cette solution n'est utilisable que si le fabricant atteste sur l'honneur qu'il ne réalise aucune allégation environnementale sur les produits intermédiaires,
- Un fabricant de produits intermédiaires peut aussi faire des FDES individuelles sur des produits finis qu'il fabrique ou fait fabriquer à son nom (il existe sur le marché des produits finis à son nom),
- Un fabricant de produits intermédiaires ne peut pas faire de FDES individuelles sur des produits finis qu'il ne fabrique pas ou ne fait pas fabriquer à son nom (il n'existe pas sur le marché des produits finis à son nom).

Annexe 6 : Fiche de déclaration environnementale et sanitaire du produit « Bloc porte gamme réemploi » de l'entreprise COMEC

comec Industrie

Juillet 2024

FICHE DE DECLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE DU PRODUIT

Bloc porte gamme réemploi

En conformité avec les normes NF EN ISO 14025, NF EN 15804+A2 et son complément national NF EN 15804+A2/CN



Version de la FDES : 1.0
Numéro d'enregistrement INIES : 20240739411
Réalisé par :

CERIBOIS
VOS AMBITIONS, NOTRE EXPERTISE

FDES VÉRIFIÉE inies

Avertissement

Les informations contenues dans cette déclaration sont fournies sous la responsabilité de COMEC (producteur de la FDES) selon la NF EN 15804+A2 et le complément national NF EN 15804+A2/CN.

Toute exploitation, totale ou partielle, des informations fournies dans ce document doit au minimum être accompagnée de la référence complète à la FDES d'origine ainsi qu'à son producteur qui pourra remettre un exemplaire complet.

Il est rappelé que les résultats de l'étude sont fondés seulement sur des faits, circonstances et hypothèses qui ont été soumis au cours de l'étude. Si ces faits, circonstances et hypothèses diffèrent, les résultats sont susceptibles de changer.

De plus il convient de considérer les résultats de l'étude dans leur ensemble, au regard des hypothèses, et non pas pris isolément.

La norme EN 15804+A2 du CEN sert de Règles de définition des catégories de produits (RCP).

Guide de lecture

L'affichage des données d'inventaire respecte les exigences de la norme NF EN 15804+A2.
Dans les tableaux suivants 2,53E-06 doit être lu : 2,53x10 -6 (écriture scientifique).

Les unités utilisées sont précisées devant chaque flux, elles sont :
- le kilogramme « kg »,
- le mètre cube « m^3 »,
- le kilowattheure « kWh »,
- le mégajoule « MJ »,
- le mètre carré « m^2 ».

Abréviations :
- ACV : Analyse du Cycle de Vie
- DEP : Déclaration Environnemental Produit
- DVR : Durée de Vie de Référence
- FC : Facteur de Caractérisation
- UF : Unité Fonctionnelle
- COV : Composé organique volatile
- RCP : Règle catégorie de produit
- PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur
- DND : Déchet non dangereux
- MJ : Mégajoules

Précaution d'utilisation de la FDES pour la comparaison des produits

Les DEP de produits de construction peuvent ne pas être comparables si elles ne sont pas conformes à la norme NF EN 15804+A2.

La norme NF EN 15804+A2 définie au § 5.3 Comparabilité des DEP* pour les produits de construction, les conditions dans lesquelles les produits de construction peuvent être comparés, sur la base des informations fournies par la FDES :
« Par conséquent, une comparaison de la performance environnementale des produits de construction en utilisant les informations des DEP doit être basée sur l'usage des produits et leurs impacts sur le bâtiment, et doit prendre en compte la totalité du cycle de vie (tous les modules d'information) »

NOTE 1 En dehors du cadre de l'évaluation environnementale d'un bâtiment, les FDES ne sont pas des outils permettant de comparer des produits et des services de construction.

NOTE 2 Pour l'évaluation de la contribution des bâtiments au développement durable, une comparaison des aspects et des impacts environnementaux doit être entreprise conjointement aux aspects et impacts socioéconomiques relatifs au bâtiment.

NOTE 3 Pour l'interprétation d'une comparaison, des valeurs de référence sont nécessaires.

SOMMAIRE

1 Introduction 4
2 Information Générale 5
3 Description de l'unité fonctionnelle et du produit 5
4 Etapes du cycle de vie 8
4.1 Etape de production, A1-A3 9
4.2 Etape de construction, A4-A5 9
4.3 Etape de vie en œuvre (exclusion des économies potentielles), B1-B7 9
4.4 Etape de fin de vie C1-C4 10
4.5 Potentiel de recyclage/réutilisation/récupération, D 10
5 Information pour le calcul de l'analyse de cycle de vie 10
6 Résultat de l'analyse du cycle de vie 12
7 Informations additionnelles sur le relargage de substances dangereuses dans l'air intérieur, le sol et l'eau pendant la période d'utilisation 22
8 Contribution du produit à la qualité de vie à l'intérieur des bâtiments 23

1 INTRODUCTION

Le cadre utilisé pour la présentation de la déclaration environnementale produit est basé sur le complément national NF EN 15804+A2/CN et le programme INIES.

Un rapport d'accompagnement de la déclaration a été établi et il peut être consulté, sous accord de confidentialité, au siège de COMEC.

.

Les informations contenues dans cette déclaration sont fournies sous la responsabilité de COMEC.

.

Contact :
Emmanuel BASTIDE

Coordonnées du contact :
Mail : emmanuel.bastide@comec.fr
Tel. : 06 27 39 74 59

Coordonnée de l'entreprise :
COMEC
10 rue Montevi
49280 LA TESSOUALLE
FRANCE

2 INFORMATION GENERALE

1. Nom et adresse du déclarant : COMEC, 10 rue Montevi, 49280 LA TESSOUALLE
2. Le(s) site(s), le fabricant ou le groupe de fabricants ou leurs représentants pour lesquels la FDES est représentative : COMEC
3. Produits couverts : La FDES couvre l'ensemble des blocs-portes standards gamme réemploi fabriquées par COMEC pour le marché français. Soit tous les éléments suivants :
    - Toutes les épaisseurs entre 40 et 50 mm ;
    - Toutes les masses volumiques des blocs portes de réutilisation comprises entre 425 kg/m3 et 550 kg/m3 ;
    - Toutes les hauteurs, toutes les largeurs ;
    - Les blocs portes 1 vantail ou 2 vantaux ;
    - Toutes les finitions : brut, prépeint, stratifié.
4. Impacts déclarés : Les produits couverts par la présente FDES sont représentés par un produit de référence, qui est le plus représentatif du marché. Sauf mention spécifique, l'ensemble des informations fournies dans cette FDES se rapportent à ce produit.
5. Type de FDES : Du berceau à la tombe avec le module D
6. Circuit de distribution : BtoB
7. Type de FDES : Individuelle
8. Année de collecte : 2023
9. Date de 1ère publication : 17/07/2024
10. Date de fin de validité : 31/12/2029
11. Période de validité : 5 ans
12. Numéro d'enregistrement au programme conforme ISO 14025 :
13. La référence commerciale/identification du produit : Bloc-porte gamme réemploi
14. Vérification :

La norme EN 15804 du CEN sert de RCP a).
Vérification indépendante de la déclaration, conformément à l'EN ISO 14025 : 2010 ☐interne ☒externe
(Selon le cas b)) Vérification par tierce partie : Damien DUFOUR – ESTEANA – 567A rue Maréchal Lyautey – 83220 Le Pradet
a) Règles de définition des catégories de produits *b) Facultatif pour la communication entre entreprises, obligatoire pour la communication entre une entreprise et ses clients (voir l'EN ISO 14025:2010, 9.4).*

3 DESCRIPTION DE L'UNITE FONCTIONNELLE ET DU PRODUIT

15. Description de l'unité déclarée :

Fermer une ouverture permanente de 1 m² dans une paroi intérieure de logement collectif ou individuel, tout en permettant le passage de piétons pour une durée de vie de 25 ans.

16. Description du produit :

Le produit type objet de la FDES sont des blocs-portes fabriquées par COMEC.
Les blocs-portes sont composées de plusieurs parties :

- La partie appelé ouvrant composée des éléments suivants :
    - D'une âme (en bloc porte réutilisé), le critère de cet élément sont les suivants :
        - Porte de 40 mm en âme pleine

        - Masse volumique entre 425 et 550 kg/m^3
        - Finition laquée ou stratifiée
        - Largeur 830 ou 930 mm
        - Hauteur 2040 ou plus
        - Pas de grosse détérioration
        - Pas d'oculus
    - Alaise en hêtre
    - Quincailleries
    - Colle PU
    - Stratifié
- La partie appelé dormant (huisserie) qui est exclusivement en bois

17. Description de l'usage du produit (domaine d'application) :

Les blocs-portes sont destinées à tous types de bâtiments : habitation, bureaux, commerciaux, industriels, …

18. Description des principaux composants et/ou matériaux du produit :

Paramètre	Unités	Valeur
Quantité de produit principal bloc-porte COMEC	Kg/UF	**2,12E1**
Incluant les produits suivants :	Kg/UF Kg/UF Kg/UF Kg/UF Kg/UF Kg/UF	Bois : 3,86E0 Ame (selon les critères ci-dessus) : 1,36E1 Alaise : 8,04E-1 Stratifié : 2,11E0 Colle : 2,1E-1 Acier : 6,4E-1
Quantité d'emballages	Kg/UF Kg/UF Kg/UF Kg/UF	Palette bois : 1,79E0 Carton : 1,14E0 Feuillard plastique : 1,43E-2 Film plastique : 4,82E-3
Produits complémentaires de mise en œuvre	Kg/UF Kg/UF Kg/UF	Colle : 6,00E-2 Vis : 1,6E-2 Cheville : 2,67E-3
Total flux de référence hors emballage	**Kg/UF**	**2,13E1**

19. Préciser si le produit contient des substances de la liste candidate selon le règlement REACH (si supérieur à 0,1% en masse)

Le produit ne contient pas de substances de la liste candidate selon le règlement REACH à plus de 0,1% en masse.

20. Description de la durée de vie de référence (si applicable et conformément aux §7.2.2 de la NF EN 15804+A2)

Paramètre	Unités	Valeur
Durée de vie de référence	Années	25
Qualité présumée des travaux	-	La qualité des travaux est présumée conforme aux préconisations du fabricant.
Environnement extérieur	-	-
Environnement intérieur	-	-
Conditions d'utilisation	-	L'utilisation du produit est supposée conforme aux préconisations du fabricant.
Maintenance	-	Lavage 1 fois par mois en utilisant 0,1 L d'eau

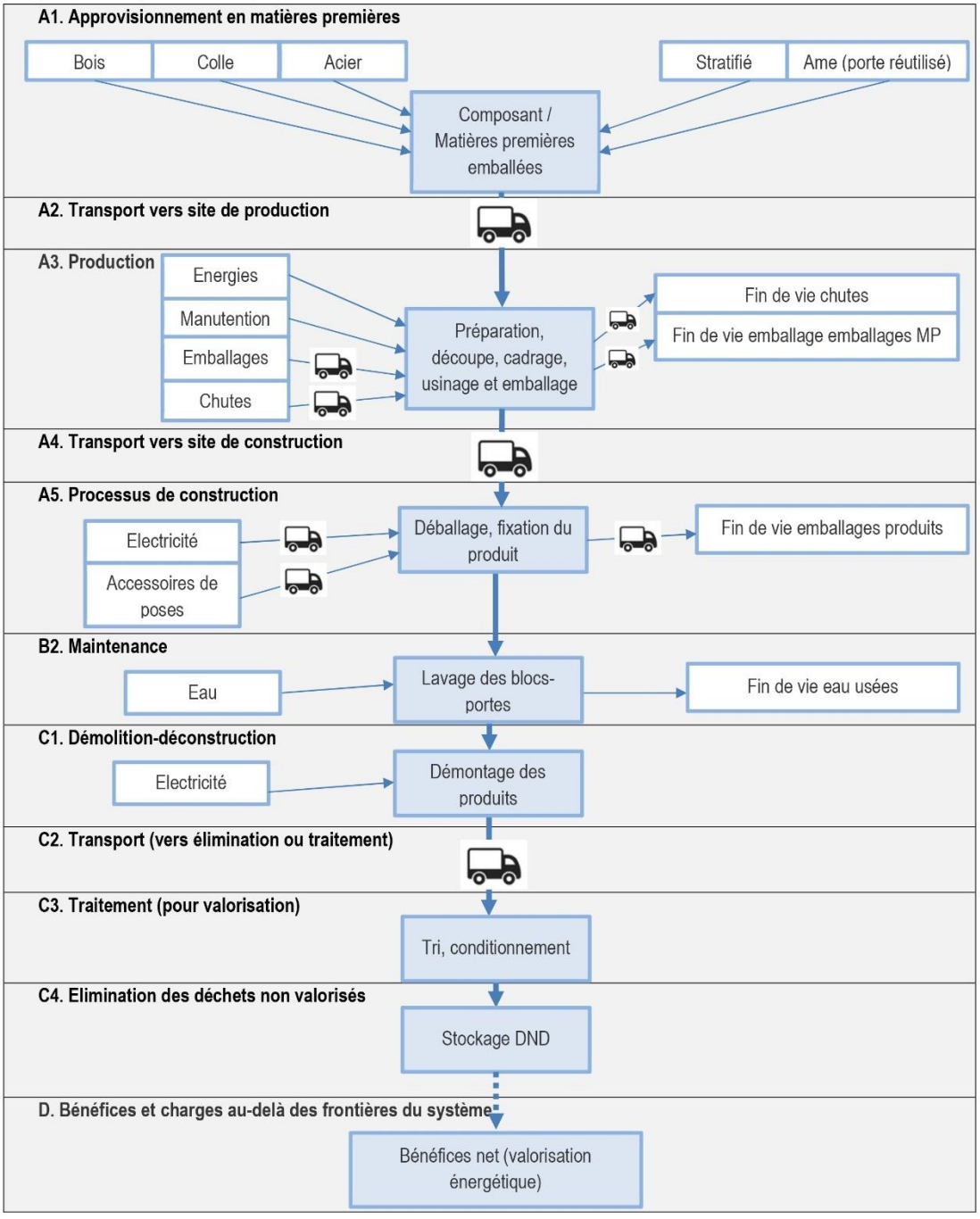
		savonneuse.

21. Contenu en carbone biogénique (si applicable exprimé en kg éq.CO2/m^3)

Paramètre	Unités	Valeur
Stockage de carbone biogénique durant la vie en œuvre du produit	kg C/UF	9,08E0
Teneur en carbone biogénique de l'emballage		1,25E0
Description du scénario du stockage	-	Le carbone biogénique est stocké sur la durée de vie du produit, cette quantité étant calculée sur la base des préconisations de la norme EN 16449.

4 ETAPES DU CYCLE DE VIE

Diagramme du cycle de vie du produit :



4.1 Etape de production, A1-A3

Les étapes A1 à A3 comprennent tous les processus depuis l'extraction des matières premières jusqu'à leur transformation en usine.

Les étapes de la production des blocs-portes sont décrites ci-dessous :

- Réception des portes
- Qualification des portes
- Affectation des portes
- Détourage et surfaçage
- Assemblage du/des prolongateurs (optionnel)
- Plaquage des chants
- Calibrage
- Débit & placage d'un nouveau stratifié
- Usinage des quincailleries
- Mise sur palette – équipement

4.2 Etape de construction, A4-A5

Transport jusqu'au chantier :

Paramètre	Unités	Valeur
Type de combustible et consommation du véhicule ou type de véhicule	-	Les véhicules pour le transport sont de type Euro 6 et de charge utiles 16 - 32 tonnes
Distance jusqu'au chantier	km	4,11E2
Masse volumique du produit transporté	kg/UF	2,12E1

Installation dans le bâtiment :

Paramètre	Unités	Valeur
Description du scénario	-	Scénario de fin de vie pour chacun des emballages du produit : Produit composé de bois → 100 % recyclage Produit composé de plastique → 50 % recyclage et 50 % incinéré Prise en compte d'intrants auxiliaires cités ci-dessous.
Intrants auxiliaires pour l'installation (spécifier par matériau)	Kg/UF Kg/UF Kg/UF Kg/UF	Acier : 1,6E-2 Cheville : 2,67E-3 Colle : 6,0E-2 Électricité : 3,0E-3

4.3 Etape de vie en œuvre (exclusion des économies potentielles), B1-B7

B1 Utilisation :
Aucune utilisation ou application du produit n'a lieu durant la durée de vie de référence.

B2 Maintenance :

Information du scénario	Unités
Processus de maintenance	Lavage à l'eau, scénario fournit par COMEC
Cycle de maintenance	Mensuel
Consommation nette d'eau douce	36 kg

B3 Réparation :

Aucune réparation n'est nécessaire lors de la vie en œuvre du produit pour des conditions d'utilisations normales.

B4 Remplacement :

Aucun remplacement n'est nécessaire lors de la vie en œuvre du produit pour des conditions d'utilisations normales.

B5 Réhabilitation :

Aucune réhabilitation n'est nécessaire lors de la vie en œuvre du produit pour des conditions d'utilisations normales.

B6 – B7 Utilisation de l'énergie et de l'eau :

Aucune utilisation d'énergie ou d'eau n'est nécessaire lors de la vie en œuvre du produit pour des conditions d'utilisations normales.

4.4 Etape de fin de vie C1-C4

Paramètre	Unités	Valeur/description
Description du scénario	-	Pour l'étape C1 nous utilisons le scénario suivant : Consommation d'énergie pour la déconstruction des blocs-portes, on considère la consommation de l'utilisation d'une visseuse avec pour consommation 3,0E-3 kWh. Pour l'étape C2 une distance de 50 km est prise. Pour l'étape C3 un stockage en zone DND est considéré cependant les produits passent tous d'abord par un centre de tri des déchets. Pour l'étape C4 on considère un stockage à 100 % en zone DND.
Quantités pour les Installation de stockage de déchets non dangereux (ISDND - mise en décharge)	%/UF	100 %
Carbone biogénique résiduel	kgC/UF	8,17E0

4.5 Potentiel de recyclage/réutilisation/récupération, D

Le scénario utilisé est une valorisation énergétique possible de 100 % des produits bois. Pour ce faire la formule suivante a été utilisé :

$$Bénéfice\ net\ valorisation\ énergétique = MSval \times (ISval - RE_{val} \times IV_{val})$$

5 INFORMATION POUR LE CALCUL DE L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE

PCR utilisé	NF EN 15804+A2 et NF EN 15804+ A2/CN.
Frontières du système	Les frontières du système respectent les limites imposées par la norme NF EN 15804+A2 et son complément national NF EN 15804+A2/CN.
Règle de coupure	1.La règle de coupure utilisée dans cette FDES est celle définie dans la norme NF EN 15804+A2 2. Les flux non remontées sont les suivants : - Fabrication transport et fin de vie des outils utilisés lors de la construction, installation. - Fabrication transport et fin de vie des outils utilisés lors de la dépose.
Allocations	- Affectation fondée sur des valeurs économiques ; - Flux de matières présentant des propriétés inhérentes spécifiques, par exemple contenu énergétique, composition élémentaire (par exemple teneur en carbone biogénique), toujours affectés de manière à refléter les flux physiques, quelle que soit l'affectation choisie pour le processus.
Représentativité	Données génériques issues de la base de données ecoinvent v3.9.1.

géographique et représentativité temporelle des données primaires et secondaires	EPD des fournisseurs pour certains produits. Logiciels utilisés : SimaPro, logiciel d'analyse de cycle de vie en version 9.5. - Ev-DEC, (www.ev-dec.com), développée par le cabinet conseil EVEA (www.evea-conseil.com), qui aide à la réalisation des FDES.
Variabilité des résultats	Réchauffement climatique total : 0 % → 33 % Réchauffement climatique fossile : -29 % → 27 % Total énergie renouvelable : -13 % → 11 % Déchets non dangereux : 0 % → 52 %

6 RESULTAT DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE

La mention "ND" signifie : Non déclaré. Elle remplace les résultats des indicateurs d'impacts environnementaux additionnels, soumis à l'exonération de responsabilité 2 définie par la norme NF EN 15804+A2, § 5.3 Déclaration des indicateurs environnementaux issus de l'ACV.
Exonération de responsabilité :
Les résultats des indicateurs ci-dessous doivent en effet être utilisés avec prudence car les incertitudes de ces résultats sont élevées ou car l'expérience liée à ces indicateurs est limitée :

- Potentiel d'épuisement pour les ressources abiotiques non fossiles (ADP minéraux métaux)
- Potentiel d'épuisement pour les ressources abiotiques fossiles (ADP fossile)
- Potentiel de privation en eau (des utilisateurs), consommation d'eau pondérée en fonction de la privation (WDP)
- Unité toxique comparative potentielle pour les écosystèmes (ETP-fw)
- Unité toxique comparative potentielle pour les êtres humains (HTP-c)
- Unité toxique comparative potentielle pour les êtres humains (HTP-nc)
- Indice potentiel de qualité des sols (SQP)

La catégorie d'impact suivant : Rayonnement ionisant, santé humaine concerne principalement l'impact éventuel sur la santé humaine des rayonnements ionisants à faible dose du cycle des combustibles nucléaires. Elle ne prend pas en compte les conséquences d'éventuels accidents nucléaires, d'une exposition professionnelle ou de l'élimination de déchets radioactifs dans des installations souterraines. Les rayonnements ionisants potentiels provenant du sol, du radon et de certains matériaux de construction ne sont pas non plus mesurés par cet indicateur.

Catégorie d'impact / flux	Etape de production			Etape de mise en œuvre		Etape de vie en œuvre							Etape de fin de vie				D Bénéfices et charges au-delà des frontières du système
	A2 Approvisionnement en matières premières	A2 Transport	A3 Fabrication	A4 Transport	A5 Installation	B1 Usage	B2 Maintenance	B3 Réparation	B4 Remplacement	B5 Réhabilitation	B6 Utilisation de l' énergie	B7 Utilisation de l' eau	C1 Déconstruction/démolition	C2 Transport	C3 Traitement des déchets	C4 Elimination	
Emissions de particules fines Incidence de Maladie	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Rayonnements ionisants (santé humaine) kBq de U235 éq/UF	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Ecotoxicité (eaux douces) CTUe/UF	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Toxicité humaine, effets cancérigènes CTUh/UF	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Toxicité humaine, effets cancérigènes CTUh/UF	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Impacts liés à l'occupation des sols / Qualité des Sols sans dimension	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Tableau 1 Impacts environnementaux additionne

Catégorie d'impact / flux	Etape de production	Etape de mise en œuvre		Etape de vie en œuvre							Etape de fin de vie				Bénéfices et charges au-delà des frontières du système
	A1 – A3 Production	A4 Transport	A5 Installation	B1 Usage	B2 Maintenance	B3 Réparation	B4 Remplacement	B5 Réhabilitation	B6 Utilisation de l' énergie	B7 Utilisation de l' eau	C1 Déconstruction/ démolition	C2 Transport	C3 Traitement des déchets	C4 Elimination	D
Changement climatique – total kg CO2 eq/UF	-5,60E+00	1,84E+00	5,20E+00	0,00E+00	2,28E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,46E-04	1,97E-01	3,42E-01	3,99E+01	-1,91E+00
Changement climatique – fossile kg CO2 eq/UF	2,76E+01	1,83E+00	4,95E-01	0,00E+00	2,03E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,45E-04	1,97E-01	3,41E-01	2,12E-01	-1,91E+00
Changement climatique – biogénique kg CO2 eq/UF	-3,33E+01	5,91E-04	4,71E+00	0,00E+00	2,48E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,97E-07	6,34E-05	2,89E-04	3,97E+01	-2,34E-04
Changement climatique – occupation des sols et transformation de l'occupation des sols kg CO2 eq/UF	1,10E-01	9,13E-04	3,64E-04	0,00E+00	2,98E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,42E-08	9,79E-05	1,26E-04	5,02E-05	-1,79E-04
Appauvrissement de la couche d'ozone kg CFC11 eq/UF	1,45E-06	3,99E-08	1,57E-08	0,00E+00	4,37E-10	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,08E-11	4,28E-09	8,06E-09	6,20E-09	-6,06E-08
Acidification des sols et de l'eau mol H+ eq/UF	1,20E-01	4,01E-03	2,60E-03	0,00E+00	1,21E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,09E-07	4,30E-04	1,48E-03	1,38E-03	-6,36E-03
Eutrophisation aquatique, eaux douces kg P eq/UF	4,31E-03	1,49E-05	2,53E-05	0,00E+00	4,08E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,88E-09	1,60E-06	2,76E-06	2,36E-06	-2,82E-05
Eutrophisation aquatique marine kg N eq/UF	3,31E-02	9,87E-04	6,46E-04	0,00E+00	6,62E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,06E-07	1,06E-04	5,46E-04	1,17E-03	-8,54E-04
Eutrophisation terrestre mol N eq/UF	3,02E-01	1,03E-02	5,01E-03	0,00E+00	3,10E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,13E-06	1,10E-03	5,87E-03	6,27E-03	-9,37E-03

Formation d'ozone photochimique kg NMVOC eq/UF	1,07E-01	6,23E-03	1,90E-03	0,00E+00	7,93E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,51E-07	6,68E-04	2,11E-03	4,67E-03	-4,29E-03
Épuisement des ressources abiotiques – minéraux et métaux kg Sb eq/UF	2,09E-04	6,15E-06	7,02E-06	0,00E+00	1,17E-07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,91E-09	6,59E-07	1,10E-06	4,39E-07	-5,25E-07
Épuisement des ressources abiotiques – combustibles fossiles MJ/UF	1,03E+03	2,61E+01	8,93E+00	0,00E+00	3,24E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,99E-02	2,79E+00	1,25E+01	4,90E+00	-2,46E+01
Besoin en eau m3 depriv. /UF	1,00E+01	1,07E-01	3,12E-01	0,00E+00	-3,41E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,79E-05	1,15E-02	2,86E-02	2,57E-02	-3,11E-02
Émissions de particules fines disease inc. /UF	1,35E-06	1,36E-07	4,24E-08	0,00E+00	1,13E-09	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,94E-12	1,46E-08	3,96E-08	3,40E-08	-6,50E-08
Rayonnement ionisant, santé humaine kBq U-235 eq/UF	7,03E+00	1,32E-02	1,71E-02	0,00E+00	2,08E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,97E-04	1,42E-03	8,62E-02	5,01E-03	-5,79E-03
Écotoxicité (eaux douces) CTUe/UF	1,52E+02	1,29E+01	1,84E+01	0,00E+00	1,68E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,06E-03	1,38E+00	2,19E+00	3,05E+00	-3,14E+00
Toxicité humaine, effets cancérigènes CTUh/UF	4,86E-08	8,36E-10	3,84E-09	0,00E+00	6,61E-11	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,35E-13	8,97E-11	1,47E-10	1,12E-10	-3,40E-10
Toxicité humaine, effets non cancérigènes CTUh/UF	2,46E-07	1,85E-08	8,96E-09	0,00E+00	3,05E-09	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,12E-12	1,98E-09	2,84E-09	1,26E-08	-6,40E-09
Impacts liés à l'occupation des sols/qualité du sol Pt/UF	1,60E+03	1,58E+01	1,56E+00	0,00E+00	1,02E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,32E-03	1,69E+00	2,05E+00	1,20E+01	-9,12E-01

Tableau 2 Impacts environnementaux

Catégorie d'impact / flux	Etape de production	Etape de mise en œuvre		Etape de vie en œuvre							Etape de fin de vie				Bénéfices et charges au-delà des frontières du système
	A1 – A3 Production	A4 Transport	A5 Installation	B1 Usage	B2 Maintenance	B3 Réparation	B4 Remplacement	B5 Réhabilitation	B6 Utilisation de l' énergie	B7 Utilisation de l' eau	C1 Déconstruction /démolition	C2 Transport	C3 Traitement des déchets	C4 Elimination	D
Ressources d'énergie primaire renouvelables à l'exception des ressources utilisées comme matières premières MJ/UF	-9,59E+01	4,10E-01	4,20E+01	0,00E+00	4,55E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,38E-04	4,39E-02	2,51E-01	2,10E-01	-1,61E-01
Ressources d'énergie primaire renouvelables utilisées comme matières premières MJ/UF	4,94E+02	0,00E+00	-4,14E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Total des ressources d'énergie primaire renouvelables MJ/UF	3,97E+02	4,10E-01	6,16E-01	0,00E+00	4,55E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,38E-04	4,39E-02	2,51E-01	2,10E-01	-1,61E-01
Ressources d'énergie primaire non renouvelables à l'exception des ressources utilisées comme matières premières MJ/UF	9,77E+02	2,61E+01	8,19E+00	0,00E+00	3,24E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,99E-02	2,79E+00	1,25E+01	4,90E+00	-2,46E+01
Ressources d'énergie primaire non renouvelables utilisées comme matières premières MJ/UF	5,18E+01	0,00E+00	7,37E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Total des ressources d'énergie primaire non renouvelables MJ/UF	1,03E+03	2,61E+01	8,93E+00	0,00E+00	3,24E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,99E-02	2,79E+00	1,25E+01	4,90E+00	-2,46E+01
Matières secondaires kg/UF	1,51E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Utilisation de combustibles secondaires renouvelables MJ/UF	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Utilisation de combustibles secondaires non renouvelables MJ/UF	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Utilisation nette d'eau douce m3	4,21E-01	3,74E-03	8,15E-03	0,00E+00	-7,82E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,88E-06	4,01E-04	2,39E-03	5,97E-03	-1,23E-03

Tableau 3 Utilisation des ressources

Catégorie d'impact / flux	Etape de production	Etape de mise en œuvre		Etape de vie en œuvre							Etape de fin de vie				D Bénéfices et charges au-delà des frontières du système
	A1 – A3 Production	A4 Transport	A5 Installation	B1 Usage	B2 Maintenance	B3 Réparation	B4 Remplacement	B5 Réhabilitation	B6 Utilisation de l' énergie	B7 Utilisation de l' eau	C1 Déconstruction/démolition	C2 Transport	C3 Traitement des déchets	C4 Elimination	
Déchets dangereux éliminés Kg/UF	4,34E+00	2,51E-02	1,10E-01	0,00E+00	1,51E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,26E-05	2,70E-03	6,39E-03	5,55E-03	-1,60E-02
Déchets non dangereux éliminés Kg/UF	1,34E+01	1,50E+00	3,10E-01	0,00E+00	1,73E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,21E-04	1,61E-01	1,93E-01	2,13E+01	-2,20E-01
Déchets radioactifs éliminés Kg/UF	9,47E-03	8,57E-06	1,64E-05	0,00E+00	1,66E-06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,24E-07	9,19E-07	1,13E-04	2,77E-06	-3,98E-06

Tableau 4 Catégorie de déchets

Catégorie d'impact / flux		Etape de production	Etape de mise en œuvre		Etape de vie en œuvre							Etape de fin de vie				D Bénéfices et charges au-delà des frontières du système
		A1 - A3 Production	A4 Transport	A5 Installation	B1 Usage	B2 Maintenance	B3 Réparation	B4 Remplacement	B5 Réhabilitation	B6 Utilisation de l' énergie	B7 Utilisation de l' eau	C1 Déconstruction/démolition	C2 Transport	C3 traitement des déchets	C4 Elimination	
Composants destinés à la réutilisation kg/UF		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Matériaux destinés au recyclage kg/UF		4,83E+00	0,00E+00	2,94E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Matériaux destinés à la récupération d'énergie kg/UF		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Energie fournie à l'extérieur (par vecteur énergétique) MJ/UF	Electricité	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Vapeur	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,13E+01	0,00E+00
	Gaz de process	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Tableau 5 Flux sortants

Catégorie d'impact / flux	Total Production	Total Mise en œuvre	Total Vie en œuvre	Total Fin de vie	Total Cycle de vie
Changement climatique – total kg CO2 eq/UF	-5,60E+00	7,04E+00	2,28E-02	4,04E+01	4,19E+01
Changement climatique – fossile kg CO2 eq/UF	2,76E+01	2,33E+00	2,03E-02	7,50E-01	3,07E+01
Changement climatique – biogénique kg CO2 eq/UF	-3,33E+01	4,71E+00	2,48E-03	3,97E+01	1,11E+01
Changement climatique – occupation des sols et transformation de l'occupation des sols kg CO2 eq/UF	1,10E-01	1,28E-03	2,98E-05	2,75E-04	1,12E-01
Appauvrissement de la couche d'ozone kg CFC11 eq/UF	1,45E-06	5,56E-08	4,37E-10	1,85E-08	1,53E-06
Acidification des sols et de l'eau mol H+ eq/UF	1,20E-01	6,61E-03	1,21E-04	3,29E-03	1,30E-01
Eutrophisation aquatique, eaux douces kg P eq/UF	4,31E-03	4,02E-05	4,08E-05	6,72E-06	4,40E-03
Eutrophisation aquatique marine kg N eq/UF	3,31E-02	1,63E-03	6,62E-04	1,83E-03	3,72E-02
Eutrophisation terrestre mol N eq/UF	3,02E-01	1,53E-02	3,10E-04	1,32E-02	3,31E-01
Formation d'ozone photochimique kg NMVOC eq/UF	1,07E-01	8,12E-03	7,93E-05	7,44E-03	1,23E-01
Épuisement des ressources abiotiques – minéraux et métaux kg Sb eq/UF	2,09E-04	1,32E-05	1,17E-07	2,20E-06	2,25E-04
Épuisement des ressources abiotiques – combustibles fossiles MJ/UF	1,03E+03	3,50E+01	3,24E-01	2,02E+01	1,08E+03
Besoin en eau m3 depriv. /UF	1,00E+01	4,19E-01	-3,41E-01	6,59E-02	1,02E+01
Émissions de particules fines disease inc. /UF	1,35E-06	1,79E-07	1,13E-09	8,82E-08	1,62E-06
Rayonnement ionisant, santé humaine kBq U-235 eq/UF	7,03E+00	3,03E-02	2,08E-03	9,30E-02	7,15E+00
Écotoxicité (eaux douces) CTUe/UF	1,52E+02	3,13E+01	1,68E+00	6,62E+00	1,92E+02
Toxicité humaine, effets cancérigènes CTUh/UF	4,86E-08	4,67E-09	6,61E-11	3,49E-10	5,37E-08
Toxicité humaine, effets non cancérigènes CTUh/UF	2,46E-07	2,74E-08	3,05E-09	1,75E-08	2,94E-07
Impacts liés à l'occupation des sols/qualité du sol Pt/UF	1,60E+03	1,73E+01	1,02E-01	1,57E+01	1,64E+03
Ressources d'énergie primaire renouvelables à l'exception des ressources utilisées comme matières premières MJ/UF	-9,59E+01	4,24E+01	4,55E-02	5,06E-01	-5,30E+01
Ressources d'énergie primaire renouvelables utilisées comme matières premières MJ/UF	4,94E+02	-4,14E+01	0,00E+00	0,00E+00	4,52E+02
Total des ressources d'énergie primaire renouvelables	3,97E+02	1,03E+00	4,55E-02	5,06E-01	3,99E+02

MJ/UF					
Ressources d'énergie primaire non renouvelables à l'exception des ressources utilisées comme matières premières MJ/UF	9,77E+02	3,42E+01	3,24E-01	2,02E+01	1,03E+03
Ressources d'énergie primaire non renouvelables utilisées comme matières premières MJ/UF	5,18E+01	7,37E-01	0,00E+00	0,00E+00	5,26E+01
Total des ressources d'énergie primaire non renouvelables MJ/UF	1,03E+03	3,50E+01	3,24E-01	2,02E+01	1,08E+03
Matières secondaires kg/UF	1,51E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,51E+01
Utilisation de combustibles secondaires renouvelables MJ/UF	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Utilisation de combustibles secondaires non renouvelables MJ/UF	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Utilisation nette d'eau douce m3	4,21E-01	1,19E-02	-7,82E-03	8,77E-03	4,34E-01
Déchets dangereux éliminés Kg/UF	4,34E+00	1,35E-01	1,51E-03	1,47E-02	4,50E+00
Déchets non dangereux éliminés Kg/UF	1,34E+01	1,82E+00	1,73E-02	2,17E+01	3,70E+01
Déchets radioactifs éliminés Kg/UF	9,47E-03	2,50E-05	1,66E-06	1,17E-04	9,61E-03
Composants destinés à la réutilisation Kg/UF	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Matériaux destinés au recyclage Kg/UF	4,83E+00	2,94E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,77E+00
Matériaux destinés à la récupération d'énergie Kg/UF	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Énergie fournie à l'extérieur, électricité MJ/UF	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Energie fournie à l'extérieur, vapeur MJ/UF	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,13E+01	2,13E+01
Energie fournie à l'extérieur, gaz de process MJ/UF	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Tableau 6 Résultats global du cycle de vie

Tableau de résultats de l'analyse du cycle de vie affichés conformément au Décret n°2021-1674 du 16 décembre 2021[1]

[1] Décret n° 2021-1674 du 16 décembre 2021 relatif à la déclaration environnementale de produits de construction et de décoration ainsi que des équipements électriques, électroniques et de génie climatique

7 INFORMATIONS ADDITIONNELLES SUR LE RELARGAGE DE SUBSTANCES DANGEREUSES DANS L'AIR INTERIEUR, LE SOL ET L'EAU PENDANT LA PERIODE D'UTILISATION

		Résultats d'essais	Justification et/ou rapport d'essai
Émission dans l'air intérieur[1] [2]	Emissions de COV et de formaldéhyde	Les produits étudiés entrent dans le champ d'application du décret n° 2011-321 du 23 mars 2011 relatif à l'étiquetage des produits de construction ou de revêtement de mur ou de sol et des peintures et vernis sur leurs émissions de polluants volatils (cf. liste indicative du 26 janvier 2016 diffusée par le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie et le Ministère du Logement, de l'Égalité des Territoires et de la Ru ra lité). Des essais de mesure des émissions de substances volatiles sur produits de construction solides selon les normes EN ISO 16000-3, ISO 16000-6, EN ISO 16000-9 et EN ISO 16000-11 ont été réalisés pour le compte de COMEC. Sur la base des résultats de ces essais, COMEC considère que la classe déclarée pour les produits couverts par la présente FDES varie de A à A+.	Rapports d'essais FCBA n°402-RC-12-10-f-a et n°402-RC-12-10-f-b
	Comportement face à la croissance fongique et bactérienne	Aucun essai de croissance fongique et bactérienne n'a été réalisé sur le produit.	-
	Emissions radioactives naturelles des produits de construction	Aucun essai d'émissions radioactives n'a été réalisé sur le produit.	-
	Emissions de fibres et de particules	Aucun essai d'émissions de fibres et de particules n'a été réalisé sur le produit.	-
Émission dans le sol et l'eau[1] [2]	Emissions dans l'eau	Le produit n'est pas en contact avec l'eau potable. Aucun essai n'a été réalisé.	-
	Emissions dans le sol	Le produit n'est pas en contact avec l'eau de ruissellement. Aucun essai n'a été réalisé.	-

1) Émissions dans l'air intérieur, le sol et l'eau selon les normes horizontales relatives aux mesures des émissions de substances dangereuses réglementées, provenant des produits de construction, au moyen de méthodes d'essai harmonisées conformes aux dispositions des Comités Techniques respectifs des Normes européennes de produits, lorsqu'elles sont disponibles.
Pour plus d'informations se référer à l'EeB Guide : http://www.eebguide.eu/?p=1991
2) En France le comité technique INIES Base (CTIB) donne des recommandations sur la déclaration des caractéristiques sanitaire et de confort - Guide de rédaction des résumés sanitaires et confort (CTIB N94, Juin 2018)

8 CONTRIBUTION DU PRODUIT A LA QUALITE DE VIE A L'INTERIEUR DES BATIMENTS

Caractéristiques du produit participant à la création des conditions de confort hygrothermique dans le bâtiment :
Le produit ne revendique aucune performance liée au confort hygrothermique

Caractéristiques du produit participant à la création des conditions de confort acoustique dans le bâtiment :
Le produit ne revendique aucune performance acoustique.

Caractéristiques du produit participant à la création des conditions de confort visuel dans le bâtiment :
Le produit ne revendique aucune performance liée au confort visuel.

Caractéristiques du produit participant à la création des conditions de confort olfactif dans le bâtiment :
Le produit ne revendique aucune performance liée au confort olfactif.

Annexe 7 : Fiche de déclaration environnementale et sanitaire du produit « Façade sanitaire gamme réemploi » de l'entreprise COMEC

comec Industrie

Juillet 2024

FICHE DE DECLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE DU PRODUIT

Façade sanitaire gamme réemploi

En conformité avec les normes NF EN ISO 14025, NF EN 15804+A2 et son complément national NF EN 15804+A2/CN



Version de la FDES : 1.0

Numéro d'enregistrement INIES : 20240739410

Réalisé par :

CERIBOIS

VOS AMBITIONS, NOTRE EXPERTISE

FDES VÉRIFIÉE inies

Avertissement

Les informations contenues dans cette déclaration sont fournies sous la responsabilité de COMEC (producteur de la FDES) selon la NF EN 15804+A2 et le complément national NF EN 15804+A2/CN.

Toute exploitation, totale ou partielle, des informations fournies dans ce document doit au minimum être accompagnée de la référence complète à la FDES d'origine ainsi qu'à son producteur qui pourra remettre un exemplaire complet.

Il est rappelé que les résultats de l'étude sont fondés seulement sur des faits, circonstances et hypothèses qui ont été soumis au cours de l'étude. Si ces faits, circonstances et hypothèses diffèrent, les résultats sont susceptibles de changer.

De plus il convient de considérer les résultats de l'étude dans leur ensemble, au regard des hypothèses, et non pas pris isolément.

La norme EN 15804+A2 du CEN sert de Règles de définition des catégories de produits (RCP).

Guide de lecture

L'affichage des données d'inventaire respecte les exigences de la norme NF EN 15804+A2.
Dans les tableaux suivants 2,53E-06 doit être lu : 2,53x10 -6 (écriture scientifique).

Les unités utilisées sont précisées devant chaque flux, elles sont :
- le kilogramme « kg »,
- le mètre cube « m^3 »,
- le kilowattheure « kWh »,
- le mégajoule « MJ »,
- le mètre carré « m^2 ».

Abréviations :
- ACV : Analyse du Cycle de Vie
- DEP : Déclaration Environnemental Produit
- DVR : Durée de Vie de Référence
- FC : Facteur de Caractérisation
- UF : Unité Fonctionnelle
- COV : Composé organique volatile
- RCP : Règle catégorie de produit
- PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur
- DND : Déchet non dangereux

Précaution d'utilisation de la FDES pour la comparaison des produits

Les FDES de produits de construction peuvent ne pas être comparables si elles ne sont pas conformes à la norme NF EN 15804+A2
.
La norme NF EN 15804+A2 définie au § 5.3 Comparabilité des DEP* pour les produits de construction, les conditions dans lesquelles les produits de construction peuvent être comparés, sur la base des informations fournies par la FDES :
« Par conséquent, une comparaison de la performance environnementale des produits de construction en utilisant les informations des DEP doit être basée sur l'usage des produits et leurs impacts sur le bâtiment, et doit prendre en compte la totalité du cycle de vie (tous les modules d'information) »

NOTE 1 En dehors du cadre de l'évaluation environnementale d'un bâtiment, les FDES ne sont pas des outils permettant de comparer des produits et des services de construction.

NOTE 2 Pour l'évaluation de la contribution des bâtiments au développement durable, une comparaison des aspects et des impacts environnementaux doit être entreprise conjointement aux aspects et impacts socioéconomiques relatifs au bâtiment.

NOTE 3 Pour l'interprétation d'une comparaison, des valeurs de référence sont nécessaires.

SOMMAIRE

1 Introduction 4

2 Information Générale 5

3 Description de l'unité fonctionnelle et du produit 5

4 Etapes du cycle de vie 8

4.1 Etape de production, A1-A3 9

4.2 Etape de construction, A4-A5 9

4.3 Etape de vie en œuvre (exclusion des économies potentielles), B1-B7 9

4.4 Etape de fin de vie C1-C4 10

4.5 Potentiel de recyclage/réutilisation/récupération, D 10

5 Information pour le calcul de l'analyse de cycle de vie 10

6 Résultat de l'analyse du cycle de vie 12

7 Informations additionnelles sur le relargage de substances dangereuses dans l'air intérieur, le sol et l'eau pendant la période d'utilisation 22

8 Contribution du produit à la qualité de vie à l'intérieur des bâtiments 23

1 INTRODUCTION

Le cadre utilisé pour la présentation de la déclaration environnementale produit est basé sur le complément national NF EN 15804+A2/CN et le programme INIES.

Un rapport d'accompagnement de la déclaration a été établi et il peut être consulté, sous accord de confidentialité, au siège de COMEC.

.

Les informations contenues dans cette déclaration sont fournies sous la responsabilité de COMEC.

.

Contact :
Emmanuel BASTIDE

Coordonnées du contact :
Mail : emmanuel.bastide@comec.fr
Tel. : 06 27 39 74 59

Coordonnée de l'entreprise :
COMEC
10 rue Montevi
49280 LA TESSOUALLE
FRANCE

2 INFORMATION GENERALE

1. Nom et adresse du déclarant : COMEC, 10 rue Montevi, 49280 LA TESSOUALLE
2. Le(s) site(s), le fabricant ou le groupe de fabricants ou leurs représentants pour lesquels la FDES est représentative : COMEC
3. Produits couverts : La FDES couvre l'ensemble des façades sanitaires en gamme réemploi fabriquées par COMEC pour le marché français. Soit tous les éléments suivants :
    - Toutes les dimensions et nombres de portes ;
    - Toutes les épaisseurs entre 40 et 50 mm ;
    - Toutes les masses volumiques des blocs portes de réutilisation comprises entre 425 kg/m3 et 550 kg/m3 ;
    - Toutes les finitions des chants et tasseaux : brut, peinture.
4. Impacts déclarés : Les produits couverts par la présente FDES sont représentés par un produit de référence, qui est le plus représentatif du marché. Sauf mention spécifique, l'ensemble des informations fournies dans cette FDES se rapportent à ce produit.
5. Type de FDES : Du berceau à la tombe avec le module D
6. Circuit de distribution : BtoB
7. Type de FDES : Individuelle
8. Année de collecte : 2023
9. Date de 1ère publication : 17/07/2024
10. Date de fin de validité : 31/12/2029
11. Période de validité : 5 ans
12. Numéro d'enregistrement au programme conforme ISO 14025 :
13. La référence commerciale/identification du produit : Façade sanitaire Gamme réemploi
14. Vérification :

La norme EN 15804 du CEN sert de RCP a).
Vérification indépendante de la déclaration, conformément à l'EN ISO 14025 : 2010 ☐interne ☒externe
(Selon le cas b)) Vérification par tierce partie : Damien DUFOUR – ESTEANA – 567A rue Maréchal Lyautey – 83220 Le Pradet
a) Règles de définition des catégories de produits *b) Facultatif pour la communication entre entreprises, obligatoire pour la communication entre une entreprise et ses clients (voir l'EN ISO 14025:2010, 9.4).*

3 DESCRIPTION DE L'UNITE FONCTIONNELLE ET DU PRODUIT

15. Description de l'unité fonctionnelle :

Fermer 1 m² d'ouverture permanente dans une paroi, tout en permettant l'accès de piétons aux sanitaires via des portes, et l'habillage de l'espace encadrant ces portes, pour une durée de vie de référence de 30 ans.

16. Description du produit :

Le produit type objet de la FDES sont des façades sanitaires fabriquées par COMEC. Les façades sanitaires sont destinées à occulter les sanitaires, tout en laissant accès aux utilisateurs via les portes.
Les façades sanitaires sont composées de plusieurs parties :

- Les vantaux constituant la partie ouvrante ;

- Les meneaux constituant les parties fixes encadrant latéralement les portes ;
- Les impostes constituant les parties fixes disposée au-dessus des portes.

Les façades sanitaires sont donc un ensemble des éléments cités ci-dessus principalement constituées :

- D'une âme (en bloc porte réutilisé), le critère de cet élément sont les suivants :
  - Porte de 40 mm en âme pleine
  - Masse volumique entre 425 et 550 kg/m^3
  - Finition laquée ou stratifiée
  - Largeur 830 ou 930 mm
  - Hauteur 2040 ou plus
  - Pas de grosse détérioration
  - Pas d'oculus
- De 2 parements en MDF
- De 2 couches de stratifiés
- D'alaise en bois de hêtre
- De quincailleries et d'organes de rotations en acier

17. Description de l'usage du produit (domaine d'application) :

Les façades sanitaires sont destinées à tous types de bâtiments : habitation, bureaux, commerciaux, industriels, …

18. Description des principaux composants et/ou matériaux du produit :

Paramètre	Unités	Valeur
Quantité de produit principal façade sanitaire COMEC	**Kg/UF**	**2,34E+1**
Incluant les produits suivants sortie usine :	Kg/UF	Colle : 2,90E-1
	Kg/UF	Acier : 6,3E-1
	Kg/UF	Ame (selon les critères ci-dessus) : 1,22E1
	Kg/UF	Bois : 6,55E0
	Kg/UF	MDF : 7,10E-1
	Kg/UF	Fibres prépeintes : 6,80E-1
	Kg/UF	Stratifié : 2,37E0
Quantité d'emballages	Kg/UF	Palette bois : 1,25E0
	Kg/UF	Carton : 3,55E-1
	Kg/UF	Feuillard plastique : 2,00E-2
	Kg/UF	Doufline : 4,00E-2
	Kg/UF	Film plastique : 3,40E-3
Produits complémentaires de mise en œuvre	Kg/UF	Colle : 6,00E-2
	Kg/UF	Vis : 1,2E-2
	Kg/UF	Cheville : 2,00E-3
	Kg/UF	Tasseau bois : 3,9E-1
	Kg/UF	Polyéthylène : 3,00E-2
Total flux de référence hors emballage	**Kg/UF**	**2,39E1**

19. Préciser si le produit contient des substances de la liste candidate selon le règlement REACH (si supérieur à 0,1% en masse)

Le produit ne contient pas de substances de la liste candidate selon le règlement REACH à plus de 0,1% en masse.

20. Description de la durée de vie de référence (si applicable et conformément aux §7.2.2 de la NF EN 15804+A2)

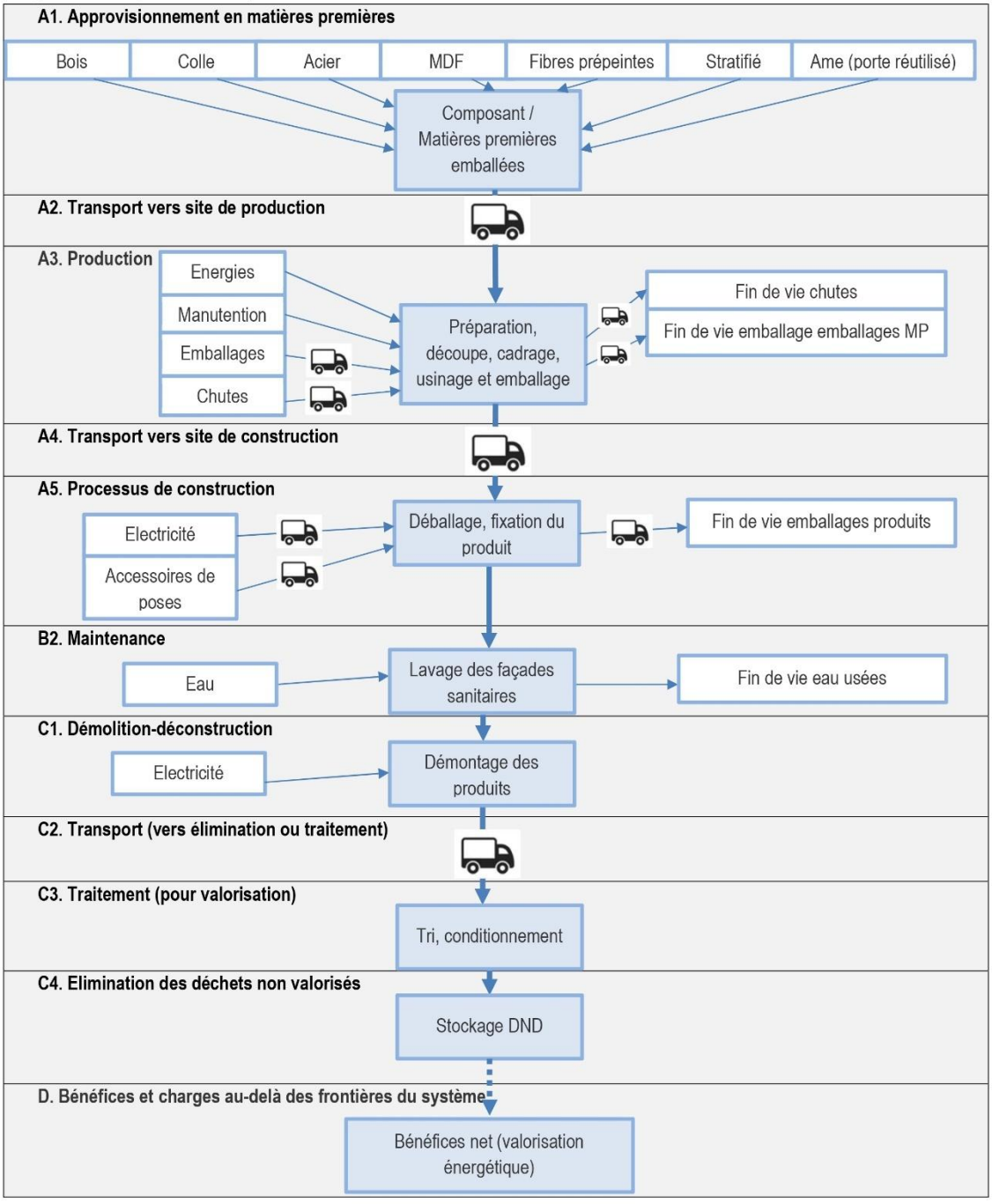
Paramètre	Unités	Valeur
Durée de vie de référence	Années	30
Qualité présumée des travaux	-	La qualité des travaux est présumée conforme aux préconisations du fabricant.
Environnement extérieur	-	-
Environnement intérieur	-	-
Conditions d'utilisation	-	L'utilisation du produit est supposée conforme aux préconisations du fabricant.
Maintenance	-	Lavage 1 fois par mois en utilisant 0,1 L d'eau savonneuse.

21. Contenu en carbone biogénique (si applicable exprimé en kg éq.C/m^2)

Paramètre	Unités	Valeur
Teneur en carbone biogénique en sortie d'usine	kg C/UF	9,3E0
Teneur en carbone biogénique de l'emballage	Kg C/UF	6,8E-1
Description du scénario du stockage	-	Le carbone biogénique est stocké sur la durée de vie du produit.

4 ETAPES DU CYCLE DE VIE

Diagramme du cycle de vie du produit :



4.1 Etape de production, A1-A3

Les étapes A1 à A3 comprennent tous les processus depuis l'extraction des matières premières jusqu'à leur transformation en usine.

Les étapes de la production de façades sanitaires sont décrites ci-dessous :

- Réception des portes de réemplois
- Qualification des portes
- Affectation des portes
- Détourage et surfaçage
- Recomposition et assemblage
- Placage des chants
- Calibrage
- Débit et placage d'un nouveau stratifié
- Mise en place des quincailleries
- Mise sur palette

4.2 Etape de construction, A4-A5

Transport jusqu'au chantier :

Paramètre	Unités	Valeur
Type de combustible et consommation du véhicule ou type de véhicule	-	Les véhicules pour le transport sont de type Euro 6 et de charge utiles 16 - 32 tonnes
Distance jusqu'au chantier	km	4,11E2
Masse volumique du produit transporté	kg/UF	2,34E1

Installation dans le bâtiment :

Paramètre	Unités	Valeur
Description du scénario	-	Scénario de fin de vie pour chacun des emballages du produit : Produit composé de bois → 100 % recyclage Produit composé de plastique → 50 % recyclage et 50 % incinéré Prise en compte d'intrants auxiliaires cités ci-dessous.
Intrants auxiliaires pour l'installation (spécifier par matériau)	Kg/UF Kg/UF Kg/UF Kg/UF Kg/UF KWh/UF	Acier : 1,2E-2 Cheville : 2,0E-3 Colle : 6,0E-2 Bois : 3,9E-1 Polyéthylène : 3,0E-2 Électricité : 3,0E-3

4.3 Etape de vie en œuvre (exclusion des économies potentielles), B1-B7

B1 Utilisation :
Aucune utilisation ou application du produit n'a lieu durant la durée de vie de référence.

B2 Maintenance :

Information du scénario	Unités
Processus de maintenance	Lavage à l'eau, scénario fournit par COMEC
Cycle de maintenance	Mensuel
Consommation nette d'eau douce	36 kg

B3 Réparation :

Aucune réparation n'est nécessaire lors de la vie en œuvre du produit pour des conditions d'utilisations normales.

B4 Remplacement :

Aucun remplacement n'est nécessaire lors de la vie en œuvre du produit pour des conditions d'utilisations normales.

B5 Réhabilitation :

Aucune réhabilitation n'est nécessaire lors de la vie en œuvre du produit pour des conditions d'utilisations normales.

B6 – B7 Utilisation de l'énergie et de l'eau :

Aucune utilisation d'énergie ou d'eau n'est nécessaire lors de la vie en œuvre du produit pour des conditions d'utilisations normales.

4.4 Etape de fin de vie C1-C4

Paramètre	Unités	Valeur/description
Description du scénario	-	Pour l'étape C1 nous utilisons le scénario suivant : Consommation d'énergie pour la déconstruction des façades sanitaires, on considère la consommation de l'utilisation d'une visseuse avec pour consommation 3,0E-3 kWh. Pour l'étape C2 une distance de 50 km est prise. Pour l'étape C3 un stockage en zone DND est considéré cependant les produits passent tous d'abord par un centre de tri des déchets. Pour l'étape C4 on considère un stockage à 100 % en zone DND.
Quantités pour les Installation de stockage de déchets non dangereux (ISDND - mise en décharge)	%/UF	100 %
Carbone biogénique résiduel	kgC/UF	8,37E0

4.5 Potentiel de recyclage/réutilisation/récupération, D

Le scénario utilisé est une valorisation énergétique possible de 100 % des produits bois. Pour ce faire la formule suivante a été utilisé :

$$Bénéfice\ net\ valorisation\ énergétique = MSval \times (ISval - RE_{val} \times IV_{val})$$

5 INFORMATION POUR LE CALCUL DE L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE

PCR utilisé	NF EN 15804+A2 et NF EN 15804+A2/CN.
Frontières du système	Les frontières du système respectent les limites imposées par la norme NF EN 15804+A2 et son complément national NF EN 15804+A2/CN.
Règle de coupure	1.La règle de coupure utilisée dans cette FDES est celle définie dans la norme NF EN 15804+A2 2. Les flux non remontées sont les suivants : - Fabrication transport et fin de vie des outils utilisés lors de la construction, installation. - Fabrication transport et fin de vie des outils utilisés lors de la dépose.
Allocations	- Affectation fondée sur des valeurs économiques ; - Flux de matières présentant des propriétés inhérentes spécifiques, par exemple

	contenu énergétique, composition élémentaire (par exemple teneur en carbone biogénique), toujours affectés de manière à refléter les flux physiques, quelle que soit l'affectation choisie pour le processus.
Représentativité géographique et représentativité temporelle des données primaires et secondaires	Données génériques issues de la base de données ecoinvent v3.9.1. EPD des fournisseurs pour certains produits. Logiciels utilisés : SimaPro, logiciel d'analyse de cycle de vie en version 9.5. - Ev-DEC, (www.ev-dec.com), développée par le cabinet conseil EVEA (www.evea-conseil.com), qui aide à la réalisation des FDES.
Variabilité des résultats	Changement climatique total : 0 % → 22 % Changement climatique fossile : 0 % →12 % Total énergie renouvelable : 0 % → 8 % Déchets non dangereux : 0 % → 33 %

6 RESULTAT DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE

La mention "ND" signifie : Non déclaré. Elle remplace les résultats des indicateurs d'impacts environnementaux additionnels, soumis à l'exonération de responsabilité 2 définie par la norme NF EN 15804+A2, § 5.3 Déclaration des indicateurs environnementaux issus de l'ACV.
Les résultats des indicateurs ci-dessous doivent en effet être utilisés avec prudence car les incertitudes de ces résultats sont élevées ou car l'expérience liée à ces indicateurs est limitée :

- Potentiel d'épuisement pour les ressources abiotiques non fossiles (ADP minéraux métaux)
- Potentiel d'épuisement pour les ressources abiotiques fossiles (ADP fossile)
- Potentiel de privation en eau (des utilisateurs), consommation d'eau pondérée en fonction de la privation (WDP)
- Unité toxique comparative potentielle pour les écosystèmes (ETP-fw)
- Unité toxique comparative potentielle pour les êtres humains (HTP-c)
- Unité toxique comparative potentielle pour les êtres humains (HTP-nc)
- Indice potentiel de qualité des sols (SQP)

La catégorie d'impact suivant : Rayonnement ionisant, santé humaine concerne principalement l'impact éventuel sur la santé humaine des rayonnements ionisants à faible dose du cycle des combustibles nucléaires. Elle ne prend pas en compte les conséquences d'éventuels accidents nucléaires, d'une exposition professionnelle ou de l'élimination de déchets radioactifs dans des installations souterraines. Les rayonnements ionisants potentiels provenant du sol, du radon et de certains matériaux de construction ne sont pas non plus mesurés par cet indicateur.

Catégorie d'impact / flux	Etape de production			Etape de mise en œuvre		Etape de vie en œuvre							Etape de fin de vie				D Bénéfices et charges au-delà des frontières du système
	A1 Approvisionnement en matières premières	A2 Transport	A3 Fabrication	A4 Transport	A5 Installation	B1 Usage	B2 Maintenance	B3 Réparation	B4 Remplacement	B5 Réhabilitation	B6 Utilisation de l'énergie	B7 Utilisation de l'eau	C1 Déconstruction/démolition	C2 Transport	C3 Traitement des déchets	C4 Elimination	
Emissions de particules fines Incidence de Maladie	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Rayonnements ionisants (santé humaine) kBq de U235 éq/UF	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Ecotoxicité (eaux douces) CTUe/UF	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Toxicité humaine, effets cancérigènes CTUh/UF	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Toxicité humaine, effets cancérigènes CTUh/UF	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Impacts liés à l'occupation des sols / Qualité des Sols sans dimension	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Tableau 1 Impacts environnementaux additionnels

Impacts environnementaux	Etape de production	Etape de mise en œuvre		Etape de vie en œuvre							Etape de fin de vie				D Bénéfices et charges au-delà des frontières du système
	A1 – A3 Production	A4 Transport	A5 Installation	B1 Usage	B2 Maintenance	B3 Réparation	B4 Remplacement	B5 Réhabilitation	B6 Utilisation de l' énergie	B7 Utilisation de l' eau	C1 Déconstruction/ démolition	C2 Transport	C3 Traitement des déchets	C4 Elimination	
Changement climatique – total kg CO2 eq/UF	-3,45E+00	1,90E+00	2,19E+00	0,00E+00	2,28E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,46E-04	2,21E-01	3,83E-01	4,09E+01	-2,15E+00
Changement climatique – fossile kg CO2 eq/UF	3,05E+01	1,90E+00	7,02E-01	0,00E+00	2,03E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,45E-04	2,21E-01	3,83E-01	2,38E-01	-2,15E+00
Changement climatique – biogénique kg CO2 eq/UF	-3,41E+01	6,13E-04	1,48E+00	0,00E+00	2,48E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,97E-07	7,12E-05	3,24E-04	4,06E+01	-2,63E-04
Changement climatique – occupation des sols et transformation de l'occupation des sols kg CO2 eq/UF	1,21E-01	9,47E-04	1,81E-03	0,00E+00	2,98E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,42E-08	1,10E-04	1,42E-04	5,62E-05	-2,01E-04
Appauvrissement de la couche d'ozone kg CFC11 eq/UF	1,60E-06	4,14E-08	1,79E-08	0,00E+00	4,37E-10	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,08E-11	4,81E-09	9,04E-09	6,97E-09	-6,83E-08
Acidification des sols et de l'eau mol H+ eq/UF	1,36E-01	4,16E-03	3,69E-03	0,00E+00	1,21E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,09E-07	4,83E-04	1,66E-03	1,55E-03	-7,16E-03
Eutrophisation aquatique, eaux douces kg P eq/UF	4,95E-03	1,55E-05	4,43E-05	0,00E+00	4,08E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,88E-09	1,79E-06	3,10E-06	2,65E-06	-3,18E-05
Eutrophisation aquatique marine kg N eq/UF	3,72E-02	1,02E-03	9,89E-04	0,00E+00	6,62E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,06E-07	1,19E-04	6,13E-04	1,32E-03	-9,62E-04

Eutrophisation terrestre mol N eq/UF	3,51E-01	1,07E-02	8,85E-03	0,00E+00	3,10E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,13E-06	1,24E-03	6,59E-03	7,04E-03	-1,06E-02
Formation d'ozone photochimique kg NMVOC eq/UF	1,26E-01	6,46E-03	3,41E-03	0,00E+00	7,93E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,51E-07	7,49E-04	2,36E-03	5,06E-03	-4,84E-03
Épuisement des ressources abiotiques – minéraux et métaux kg Sb eq/UF	2,22E-04	6,38E-06	7,12E-06	0,00E+00	1,17E-07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,91E-09	7,40E-07	1,23E-06	4,93E-07	-5,91E-07
Épuisement des ressources abiotiques – combustibles fossiles MJ/UF	9,29E+02	2,70E+01	1,30E+01	0,00E+00	3,24E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,99E-02	3,14E+00	1,40E+01	5,51E+00	-2,77E+01
Besoin en eau m3 depriv. /UF	1,16E+01	1,11E-01	3,81E-01	0,00E+00	-3,41E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,79E-05	1,29E-02	3,21E-02	2,83E-02	-3,50E-02
Émissions de particules fines disease inc. /UF	1,83E-06	1,41E-07	8,58E-08	0,00E+00	1,13E-09	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,94E-12	1,64E-08	4,44E-08	3,82E-08	-7,32E-08
Rayonnement ionisant, santé humaine kBq U-235 eq/UF	5,44E+00	1,37E-02	1,72E-02	0,00E+00	2,08E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,97E-04	1,59E-03	9,67E-02	5,64E-03	-6,53E-03
Écotoxicité (eaux douces) CTUe/UF	1,99E+02	1,34E+01	1,95E+01	0,00E+00	1,68E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,06E-03	1,55E+00	2,45E+00	3,42E+00	-3,54E+00
Toxicité humaine, effets cancérigènes CTUh/UF	5,92E-08	8,67E-10	3,82E-09	0,00E+00	6,61E-11	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,35E-13	1,01E-10	1,65E-10	1,26E-10	-3,84E-10
Toxicité humaine, effets non cancérigènes CTUh/UF	2,70E-07	1,92E-08	1,08E-08	0,00E+00	3,05E-09	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,12E-12	2,23E-09	3,19E-09	1,33E-08	-7,21E-09
Impacts liés à l'occupation des sols/qualité du sol Pt/UF	1,85E+03	1,63E+01	1,03E+02	0,00E+00	1,02E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,32E-03	1,90E+00	2,30E+00	1,35E+01	-1,03E+00

Tableau 2 Impacts environnementaux

Utilisation des ressources	Etape de production	Etape de mise en œuvre		Etape de vie en œuvre							Etape de fin de vie				Bénéfices et charges au-delà des frontières du système
	A1 – A3 Production	A4 Transport	A5 Installation	B1 Usage	B2 Maintenance	B3 Réparation	B4 Remplacement	B5 Réhabilitation	B6 Utilisation de l' énergie	B7 Utilisation de l' eau	C1 Déconstruction /démolition	C2 Transport	C3 Traitement des déchets	C4 Elimination	D
Ressources d'énergie primaire renouvelables à l'exception des ressources utilisées comme matières premières MJ/UF	-3,39E+00	4,25E-01	3,38E+01	0,00E+00	4,55E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,38E-04	4,93E-02	2,81E-01	2,37E-01	-1,81E-01
Ressources d'énergie primaire renouvelables utilisées comme matières premières MJ/UF	5,11E+02	0,00E+00	-1,16E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Total des ressources d'énergie primaire renouvelables MJ/UF	5,07E+02	4,25E-01	2,22E+01	0,00E+00	4,55E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,38E-04	4,93E-02	2,81E-01	2,37E-01	-1,81E-01
Ressources d'énergie primaire non renouvelables à l'exception des ressources utilisées comme matières premières MJ/UF	8,68E+02	2,70E+01	1,19E+01	0,00E+00	3,24E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,99E-02	3,14E+00	1,40E+01	5,51E+00	-2,77E+01
Ressources d'énergie primaire non renouvelables utilisées comme matières premières MJ/UF	6,07E+01	0,00E+00	1,16E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Total des ressources d'énergie primaire non renouvelables MJ/UF	9,29E+02	2,70E+01	1,30E+01	0,00E+00	3,24E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,99E-02	3,14E+00	1,40E+01	5,51E+00	-2,77E+01
Matières secondaires kg/UF	1,63E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Utilisation de combustibles secondaires renouvelables MJ/UF	2,36E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Utilisation de combustibles secondaires non renouvelables MJ/UF	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Utilisation nette d'eau douce m3	4,36E-01	3,88E-03	9,23E-03	0,00E+00	-7,82E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,88E-06	4,50E-04	2,68E-03	6,72E-03	-1,39E-03

Tableau 3 Utilisation des ressources

Catégorie de déchets	Etape de production	Etape de mise en œuvre		Etape de vie en œuvre							Etape de fin de vie				D Bénéfices et charges au-delà des frontières du système
	A1 – A3 Production	A4 Transport	A5 Installation	B1 Usage	B2 Maintenance	B3 Réparation	B4 Remplacement	B5 Réhabilitation	B6 Utilisation de l' énergie	B7 Utilisation de l' eau	C1 Déconstruction/démolition	C2 Transport	C3 Traitement des déchets	C4 Elimination	
Déchets dangereux éliminés Kg/UF	4,31E+00	2,61E-02	9,82E-02	0,00E+00	1,51E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,26E-05	3,03E-03	7,17E-03	6,25E-03	-1,80E-02
Déchets non dangereux éliminés Kg/UF	1,49E+01	1,56E+00	4,13E-01	0,00E+00	1,73E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,21E-04	1,81E-01	2,16E-01	2,39E+01	-2,48E-01
Déchets radioactifs éliminés Kg/UF	7,39E-03	8,89E-06	1,47E-05	0,00E+00	1,66E-06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,24E-07	1,03E-06	1,26E-04	3,11E-06	-4,49E-06

Tableau 4 Catégories de déchets

Flux sortants		Etape de production	Etape de mise en œuvre		Etape de vie en œuvre							Etape de fin de vie				D Bénéfices et charges au-delà des frontières du système
		A1 - A3 Production	A4 Transport	A5 Installation	B1 Usage	B2 Maintenance	B3 Réparation	B4 Remplacement	B5 Réhabilitation	B6 Utilisation de l' énergie	B7 Utilisation de l' eau	C1 Déconstruction/démolition	C2 Transport	C3 traitement des déchets	C4 Elimination	
Composants destinés à la réutilisation kg/UF		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Matériaux destinés au recyclage kg/UF		8,86E+00	0,00E+00	1,64E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Matériaux destinés à la récupération d'énergie kg/UF		2,18E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Energie fournie à l'extérieur (par vecteur énergétique) MJ/UF	Electricité	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Vapeur	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,16E+01	0,00E+00
	Gaz de process	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Tableau 5 Flux sortants

Catégorie d'impact / flux	Total Production	Total Mise en œuvre	Total Vie en œuvre	Total Fin de vie	Total Cycle de vie
Changement climatique – total kg CO2 eq/UF	-3,45E+00	4,09E+00	2,28E-02	4,15E+01	4,21E+01
Changement climatique – fossile kg CO2 eq/UF	3,05E+01	2,61E+00	2,03E-02	8,42E-01	3,40E+01
Changement climatique – biogénique kg CO2 eq/UF	-3,41E+01	1,48E+00	2,48E-03	4,06E+01	7,99E+00
Changement climatique – occupation des sols et transformation de l'occupation des sols kg CO2 eq/UF	1,21E-01	2,76E-03	2,98E-05	3,08E-04	1,24E-01
Appauvrissement de la couche d'ozone kg CFC11 eq/UF	1,60E-06	5,93E-08	4,37E-10	2,08E-08	1,68E-06
Acidification des sols et de l'eau mol H+ eq/UF	1,36E-01	7,85E-03	1,21E-04	3,70E-03	1,48E-01
Eutrophisation aquatique, eaux douces kg P eq/UF	4,95E-03	5,97E-05	4,08E-05	7,54E-06	5,06E-03
Eutrophisation aquatique marine kg N eq/UF	3,72E-02	2,01E-03	6,62E-04	2,05E-03	4,20E-02
Eutrophisation terrestre mol N eq/UF	3,51E-01	1,95E-02	3,10E-04	1,49E-02	3,86E-01
Formation d'ozone photochimique kg NMVOC eq/UF	1,26E-01	9,87E-03	7,93E-05	8,18E-03	1,44E-01
Épuisement des ressources abiotiques – minéraux et métaux kg Sb eq/UF	2,22E-04	1,35E-05	1,17E-07	2,47E-06	2,38E-04
Épuisement des ressources abiotiques – combustibles fossiles MJ/UF	9,29E+02	4,01E+01	3,24E-01	2,27E+01	9,92E+02
Besoin en eau m3 depriv. /UF	1,16E+01	4,93E-01	-3,41E-01	7,34E-02	1,19E+01
Émissions de particules fines disease inc. /UF	1,83E-06	2,27E-07	1,13E-09	9,91E-08	2,15E-06
Rayonnement ionisant, santé humaine kBq U-235 eq/UF	5,44E+00	3,09E-02	2,08E-03	1,04E-01	5,57E+00
Écotoxicité (eaux douces) CTUe/UF	1,99E+02	3,29E+01	1,68E+00	7,43E+00	2,41E+02
Toxicité humaine, effets cancérigènes CTUh/UF	5,92E-08	4,69E-09	6,61E-11	3,91E-10	6,43E-08
Toxicité humaine, effets non cancérigènes CTUh/UF	2,70E-07	3,00E-08	3,05E-09	1,87E-08	3,22E-07
Impacts liés à l'occupation des sols/qualité du sol Pt/UF	1,85E+03	1,19E+02	1,02E-01	1,77E+01	1,99E+03
Ressources d'énergie primaire renouvelables à l'exception des ressources utilisées comme matières premières MJ/UF	-3,39E+00	3,42E+01	4,55E-02	5,68E-01	3,14E+01
Ressources d'énergie primaire renouvelables utilisées comme matières premières MJ/UF	5,11E+02	-1,16E+01	0,00E+00	0,00E+00	4,99E+02
Total des ressources d'énergie primaire renouvelables	5,07E+02	2,26E+01	4,55E-02	5,68E-01	5,30E+02

MJ/UF					
Ressources d'énergie primaire non renouvelables à l'exception des ressources utilisées comme matières premières MJ/UF	8,68E+02	3,89E+01	3,24E-01	2,27E+01	9,30E+02
Ressources d'énergie primaire non renouvelables utilisées comme matières premières MJ/UF	6,07E+01	1,16E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,19E+01
Total des ressources d'énergie primaire non renouvelables MJ/UF	9,29E+02	4,01E+01	3,24E-01	2,27E+01	9,92E+02
Matières secondaires kg/UF	1,63E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,63E+01
Utilisation de combustibles secondaires renouvelables MJ/UF	2,36E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,36E-02
Utilisation de combustibles secondaires non renouvelables MJ/UF	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Utilisation nette d'eau douce m3	4,36E-01	1,31E-02	-7,82E-03	9,85E-03	4,51E-01
Déchets dangereux éliminés Kg/UF	4,31E+00	1,24E-01	1,51E-03	1,65E-02	4,45E+00
Déchets non dangereux éliminés Kg/UF	1,49E+01	1,97E+00	1,73E-02	2,43E+01	4,13E+01
Déchets radioactifs éliminés Kg/UF	7,39E-03	2,36E-05	1,66E-06	1,31E-04	7,54E-03
Composants destinés à la réutilisation Kg/UF	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Matériaux destinés au recyclage Kg/UF	8,86E+00	1,64E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,05E+01
Matériaux destinés à la récupération d'énergie Kg/UF	2,18E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,18E-03
Énergie fournie à l'extérieur, électricité MJ/UF	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Energie fournie à l'extérieur, vapeur MJ/UF	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,16E+01	2,16E+01
Energie fournie à l'extérieur, gaz de process MJ/UF	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Tableau 6 Résultats global du cycle de vie

Tableau de résultats de l'analyse du cycle de vie affichés conformément au Décret n°2021-1674 du 16 décembre 2021[1]

[1] Décret n° 2021-1674 du 16 décembre 2021 relatif à la déclaration environnementale de produits de construction et de décoration ainsi que des équipements électriques, électroniques et de génie climatique

7 INFORMATIONS ADDITIONNELLES SUR LE RELARGAGE DE SUBSTANCES DANGEREUSES DANS L'AIR INTERIEUR, LE SOL ET L'EAU PENDANT LA PERIODE D'UTILISATION

		Résultats d'essais	Justification et/ou rapport d'essai
Émission dans l'air intérieur[1] [2]	Emissions de COV et de formaldéhyde	Les produits étudiés entrent dans le champ d'application du décret n° 2011-321 du 23 mars 2011 relatif à l'étiquetage des produits de construction ou de revêtement de mur ou de sol et des peintures et vernis sur leurs émissions de polluants volatils (cf. liste indicative du 26 janvier 2016 diffusée par le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie et le Ministère du Logement, de l'Égalité des Territoires et de la Ru ra lité). Des essais de mesure des émissions de substances volatiles sur produits de construction solides selon les normes EN ISO 16000-3, ISO 16000-6, EN ISO 16000-9 et EN ISO 16000-11 ont été réalisés pour le compte de COMEC. Sur la base des résultats de ces essais, COMEC considère que la classe déclarée pour les produits couverts par la présente FDES varie de A à A+.	Rapports d'essais FCBA n°402-RC-12-10-f-a et n°402-RC-12-10-f-b
	Comportement face à la croissance fongique et bactérienne	Aucun essai de croissance fongique et bactérienne n'a été réalisé sur le produit.	-
	Emissions radioactives naturelles des produits de construction	Aucun essai d'émissions radioactives n'a été réalisé sur le produit.	-
	Emissions de fibres et de particules	Aucun essai d'émissions de fibres et de particules n'a été réalisé sur le produit.	-
Émission dans le sol et l'eau[1] [2]	Emissions dans l'eau	Le produit n'est pas en contact avec l'eau potable. Aucun essai n'a été réalisé.	-
	Emissions dans le sol	Le produit n'est pas en contact avec l'eau de ruissellement. Aucun essai n'a été réalisé.	-

1) Émissions dans l'air intérieur, le sol et l'eau selon les normes horizontales relatives aux mesures des émissions de substances dangereuses réglementées, provenant des produits de construction, au moyen de méthodes d'essai harmonisées conformes aux dispositions des Comités Techniques respectifs des Normes européennes de produits, lorsqu'elles sont disponibles.
Pour plus d'informations se référer à l'EeB Guide : http://www.eebguide.eu/?p=1991
2) En France le comité technique INIES Base (CTIB) donne des recommandations sur la déclaration des caractéristiques sanitaire et de confort - Guide de rédaction des résumés sanitaires et confort (CTIB N94, Juin 2018)

8 CONTRIBUTION DU PRODUIT A LA QUALITE DE VIE A L'INTERIEUR DES BATIMENTS

Caractéristiques du produit participant à la création des conditions de confort hygrothermique dans le bâtiment :
Le produit ne revendique aucune performance liée au confort hygrothermique.

Caractéristiques du produit participant à la création des conditions de confort acoustique dans le bâtiment :
Le produit ne revendique aucune performance acoustique.

Caractéristiques du produit participant à la création des conditions de confort visuel dans le bâtiment :
Le produit ne revendique aucune performance liée au confort visuel.

Caractéristiques du produit participant à la création des conditions de confort olfactif dans le bâtiment :
Le produit ne revendique aucune performance liée au confort olfactif.

Annexe 8 : Fiche de déclaration environnementale et sanitaire du produit « Élément porteur résineux en bois de France (poteaux, poutres, solives…) » de la part de la Fédération Nationale du Bois



INTRODUCTION

GÉNÉRALITÉS

Les informations contenues dans cette déclaration sont fournies sous la responsabilité de son déclarant. Toute exploitation, totale ou partielle, des informations ainsi fournies devra au minimum être constamment accompagnée de la référence complète de la déclaration d'origine : « Producteur, Titre complet, Date de publication ». Pour toute information complémentaire concernant l'établissement de cette FDES ou les produits couverts par celle-ci, veuillez contacter le déclarant.

Le présent document constitue une Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire d'un produit de construction établie conformément à la norme NF EN ISO 14025 (août 2010), à la norme NF EN 15804+A1 (avril 2014) et à son complément national français NF EN 15804/CN (juin 2016).

TERMINOLOGIE DEP ET FDES

La traduction littérale en français du terme normatif EN 15804 « EPD » (Environmental Product Declaration) est « DEP » (Déclaration Environnementale de Produit). Toutefois, en France les déclarations environnementales de produits de construction sont complétées par des informations sanitaires concernant les produits couverts, et on utilise le terme de « FDES » (Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire). La FDES est donc bien une DEP complétée par des informations sanitaires et de contribution aux aspects de confort (hygrothermique, acoustique, visuel, olfactif).

ABRÉVIATIONS UTILISÉES DANS LE DOCUMENT

ACV	Analyse de Cycle de Vie
AFNOR	Agence Française de Normalisation
COV	Composé Organique Volatil
DEP	Déclaration Environnementale Produit
DTU	Document Technique Unifié
EICV	Évaluation des Impacts du Cycle de Vie
FDES	Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire
FNB	Fédération Nationale du Bois

UNITÉS UTILISÉES DANS LE DOCUMENT

MJ	Mégajoule (unité d'énergie)
kWh	Kilowattheure (unité d'énergie)
kg	Kilogramme (unité de masse)
g	Gramme (unité de masse)
m	Mètre (unité de longueur)
mm	Millimètre (unité de longueur)
m^2	Mètre carré (unité de surface)
m^3	Mètre cube (unité de volume)

FORMAT D'AFFICHAGE DES RÉSULTATS

Les résultats de l'EICV sont affichés sous forme scientifique avec trois chiffres significatifs : 1,23E+02 se lit $1{,}23 \times 10^2$. Toutefois, les valeurs nulles sont représentées par un zéro.

PRÉCAUTION D'UTILISATION DE LA FDES POUR LA COMPARAISON DES PRODUITS

Les fiches de déclarations environnementales et sanitaires de produits de construction peuvent ne pas être comparables si elles ne sont pas conformes à la NF EN 15804+A1, ne sont pas établies sur les mêmes bases scientifiques harmonisées, ne concernent pas les mêmes unités fonctionnelles, ne sont pas basées sur l'usage des produits et leurs impacts sur le bâtiment, et ne prennent pas en compte la totalité du cycle de vie (tous les modules d'informations).

Crédits photos couverture : HAHA, Adam SAS, Studio Grand Ouest

1. INFORMATIONS GÉNÉRALES

Déclarant	Fédération Nationale du Bois 6 rue François 1er 75008 Paris - France
Réalisation	Esteana 26 rue Mège 83220 Le Pradet - France
Type d'ACV	« Du berceau à la tombe » (sur l'ensemble du cycle de vie, avec module D)
Type de FDES	Collective
Produits couverts	Les produits couverts par la présente FDES sont les éléments porteurs fabriqués en bois de France qui remplissent l'ensemble des conditions présentées dans la section « Cadre de validité de la FDES » (à la fin de la FDES) et reprises ci-dessous : ▪ Essences : toutes essences résineuses françaises ▪ Durabilité : naturelle ou conférée par imprégnation, trempage court, pulvérisation, aspersion ▪ Classe d'emploi : classe 2, classe 3.1, classe 3.2, classe 4 ▪ Type de bois : Bois massif, Bois lamellé-collé, Bois massif abouté, Bois massif reconstitué ▪ Distance d'approvisionnement des sciages : Jusqu'à 500 km ▪ Distance atelier-chantier : Jusqu'à 700 km En particulier, par bois de France on entend bois issus de forêts françaises et transformés en France. Le label « Bois de France » est un des moyens de garantir l'origine des bois. **La présente FDES est complémentaire aux FDES « Charpente traditionnelle en bois de France massif » et « Charpente traditionnelle en bois de France collé » puisqu'elle couvre l'utilisation de bois résineux de France dans tous les autres types de structure protégées des intempéries (poteaux, solives, poutres…).**
Sites de production couverts	Tous les sites de production en France qui fabriquent des éléments porteurs résineux en bois de France.
Circuit de distribution	BtoB & BtoC
Impacts déclarés	Les produits couverts par la présente FDES sont représentés par un « produit de référence » moyen, déterminé à l'issue d'une étude d'ACV complète. Les résultats de l'EICV présentés dans cette FDES se rapportent au produit de référence. La section « Cadre de validité de la FDES » présente succinctement la méthode utilisée pour déterminer ce produit de référence et ses principales caractéristiques.
Date de 1ère publication	Mai 2021
Date dernière mise à jour	Mai 2021
Date de validité	Mai 2026

Nom et version	« Règlement du programme INIES » de Mars 2021
N° d'enregistrement	5-604:2021
Date de vérification	Mai 2021
Opérateur du programme	Agence Française de Normalisation (AFNOR) 11, rue Francis de Pressensé 93571 La Plaine Saint-Denis Cedex – France

Démonstration de la vérification

La norme NF EN 15804+A1 sert de RCP
Vérification indépendante de la déclaration et des données, conformément à l'EN ISO 14025:2010 ☐ interne ☑ externe
Vérification par tierce partie : Nicolas Béalu, EVEA, 11 rue Voltaire, 44000 Nantes

2. DESCRIPTION DE L'UNITÉ FONCTIONNELLE ET DU PRODUIT TYPE

Unité fonctionnelle

Constituer 1 m³ d'un élément porteur en bois dans le bâtiment sur la durée de vie de référence de 100 ans

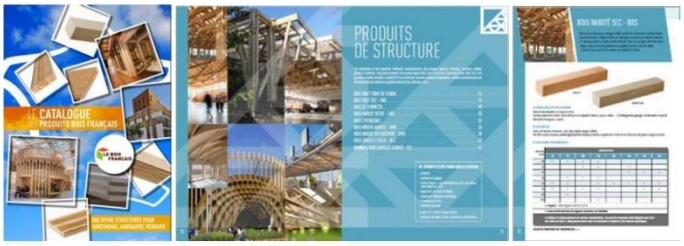
Les résultats de la présente FDES étant proportionnels au volume de bois, il est possible pour l'utilisateur de cette dernière d'utiliser un ratio permettant de ramener les résultats à un mètre linéaire d'élément porteur pour une section donnée. Ce ratio étant égal au volume d'un mètre linéaire d'élément porteur en m³.

Performance principale

Constituer un élément porteur en bois dans le bâtiment

Caractéristiques techniques non incluses dans l'unité fonctionnelle

Les caractéristiques techniques des éléments de structure sont celles indiquées sur la page internet www.preferezlesboisdefrance.fr .Le catalogue des produits bois français vient compléter cette page et est gratuitement téléchargeable sur le site précédent.



Unité

m³ (mètre cube)

Description du produit type

Un élément porteur est un élément de structure en bois de grandes sections destiné à reprendre et transmettre les efforts structurels d'une partie d'un bâtiment. Il est principalement constitué d'éléments rectilignes en bois (poteaux, poutres, solives…) assemblés entre eux par des assemblages bois et/ou métalliques (pointes, tirefonds, boulons, équerres…).

Le tableau suivant présente les sections standardisées, couramment utilisées pour la fabrication d'éléments porteurs. Les scieries françaises sont réputées pour faire du « débit sur liste », elles peuvent donc aussi scier à la demande et répondre à tous besoins spécifiques.

ÉPAISSEUR EN MM	LARGEUR EN MM							
	70	95	120	145	155	168	193	217
22	×	×	×	×				
28			×	×		×		
34						×	×	×
35		×	×	×				
57	×	×		×	×	×	×	×
70	×	×	×	×			×	×
95		×						
145				×				
> **Longueur :** toute longueur allant de 3 à 6 m								
> **Toutes autres sections et longueurs possibles sur demande.**								

Si l'utilisateur de cette FDES souhaite déterminer les résultats d'un mètre linéaire d'un élément porteur de section A * B, avec A et B en mètre. Il suffit de multiplier les résultats de la présente FDES par le coefficient A * B en m³.

Pour un élément de section 145 * 145 mm², la valeur du ratio est de 2,10E-02.

Description de l'usage

Les éléments porteur en bois sont destinées à assurer le transfert de charges au sein de tous types de bâtiments : logements, bureaux, commerces, bâtiments scolaires, bâtiments industriels et agricoles, autres établissements recevant du public, etc.






Preuves d'aptitude à l'usage

Norme de fabrication : NF P21-365
Norme conduisant au marquage CE :

- Pr EN 14081 pour les bois massifs
- NF EN 15497 pour les bois aboutés
- EN 14080 pour les bois lamellé-collés

Norme de durabilité : FD-P 20-651
Norme de mise en œuvre : NF DTU 31-1

Déclaration de contenu

Le produit type ne contient pas plus de 0,1% en masse d'une substance classée extrêmement préoccupante (SVHC) selon la liste candidate fournie par l'annexe XIV du règlement REACH

Carbone biogénique stocké

210 kg C /m³ (soit une captation de 769 kg CO_2 /m³) pour le produit de référence

Principaux constituants

Bois (produit déclaré)
Connecteurs métalliques (produit déclaré)

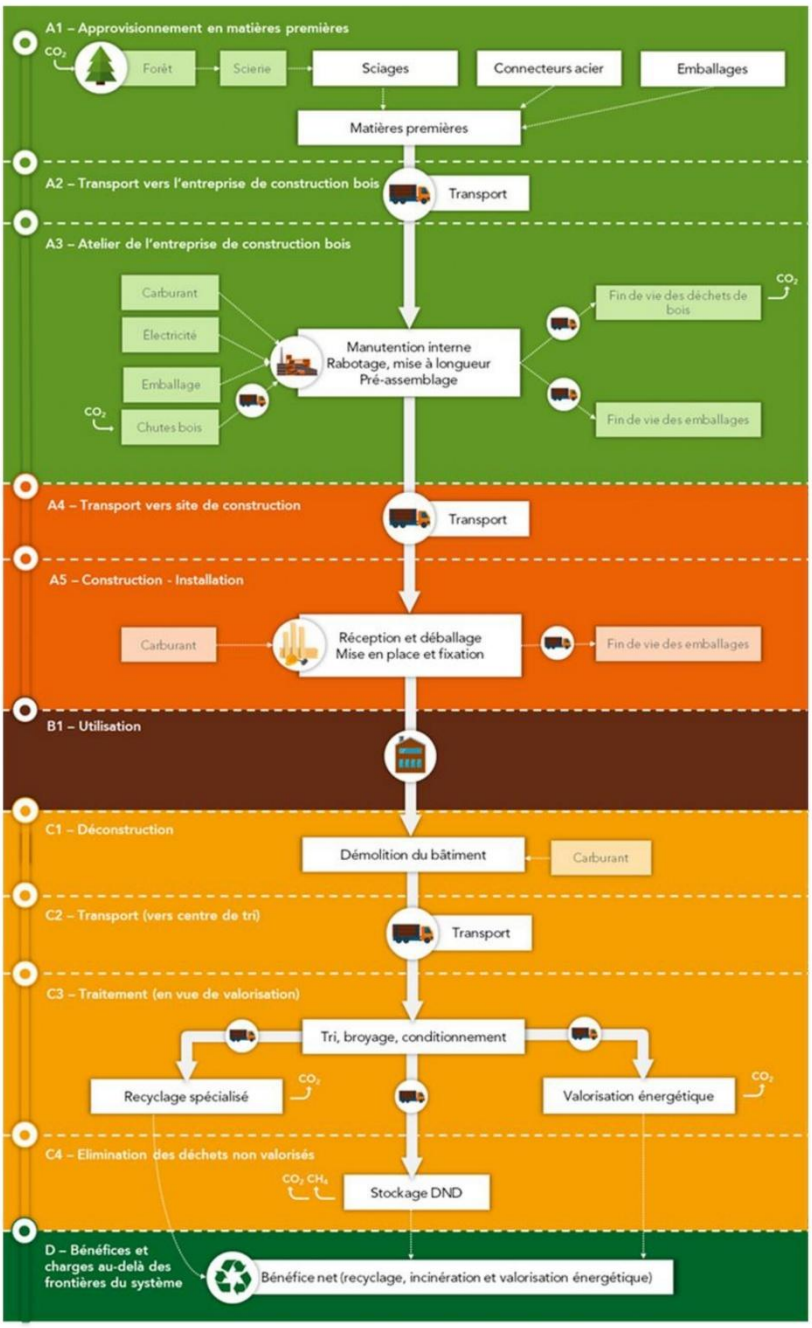
DÉTAIL DES PRINCIPAUX CONSTITUANTS POUR LE PRODUIT DE RÉFÉRENCE

Principaux constituants	Masse par unité fonctionnelle (en kg)
Bois (Produit déclaré)	495,2
Connecteurs métalliques type « tiges » (Produit déclaré)	1,45
Connecteurs métalliques type « tôle pliée » (Produit déclaré)	0,38
Feuillard plastique (Emballage)	0,10

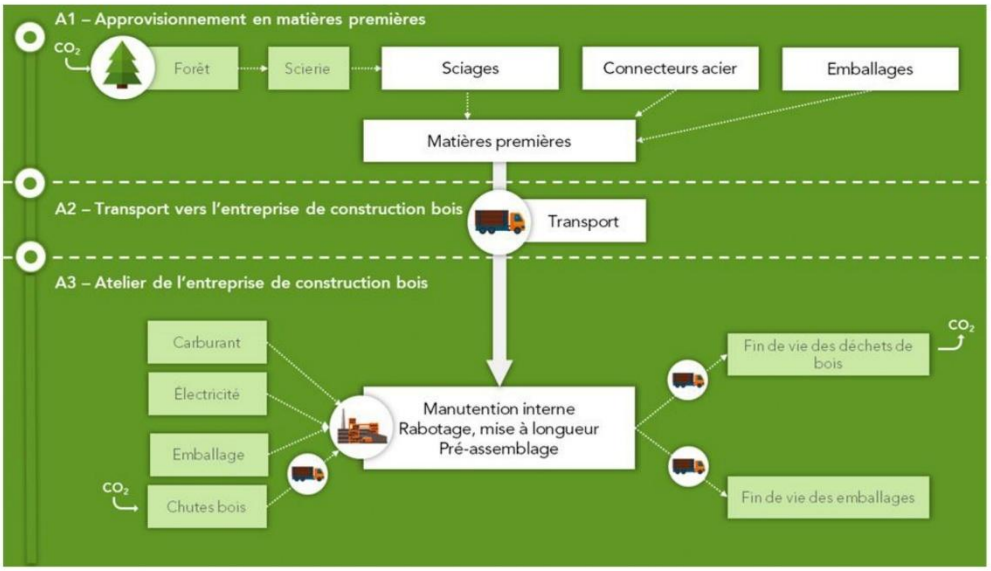
PRÉCISIONS CONCERNANT LA DURÉE DE VIE DE RÉFÉRENCE (DVR)

Paramètre	Valeur
Durée de vie de référence	100 ans
Propriétés de produit déclarées (à la sortie d'usine) et finitions	Les produits en sortie d'atelier sont finis et prêts à être posés.
Paramètres de conception (si indiqués par le fabricant), y compris les références aux pratiques appropriées	Respect de la norme produit et normes associées, et des éventuelles recommandations du fabricant.
Mise en œuvre de qualité conformément aux instructions du fabricant	Respect de la norme de du rabilité et de la norme de mise en oeuvre, et des éventuelles recommandations du fabricant.
Environnement extérieur (pour les applications extérieures), par exemple intempéries, polluants, exposition aux UV et au vent, orientation du bâtiment, ombrage, température	Sans objet
Environnement intérieur (pour les applications intérieures), par exemple température, humidité, exposition à des produits chimiques	Afin de protéger le bois des attaques d'insectes, termites, coléoptères et de pourritures superficielles et occasionnelles. Les composants en bois massifs peuvent être traités.
Conditions d'utilisation, par exemple fréquence d'utilisation, exposition mécanique	Sans objet pour les produits couverts par la présente FDES.
Maintenance, par exemple fréquence exigée, type et qualité des composants remplaçables	Les produits couverts par la présente FDES sont prévus pour une durée de vie de référence de 100 ans sans entretien.

3. ÉTAPES, SCÉNARIOS ET INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES



A1 À A3 – ÉTAPE DE PRODUCTION



A1 – EXTRACTION ET TRANSFORMATION DES MATIÈRES PREMIÈRES

- Extraction des matières premières et transformations successives jusqu'à la production des sciages approvisionnés par l'entreprise de construction bois. Les processus sont inclus jusqu'à la porte de sortie du site de production et incluent entre autres : la captation de CO2 lors de la croissance de l'arbre*, les opérations de sylviculture et d'exploitation forestière, le sciage, le séchage, les éventuels traitements, collage et transports.
- Extraction des matières premières, traitement des matières secondaires et production des fixations acier (connecteurs type « tiges » et/ou connecteurs type « tôle »).
- Extraction des matières premières et production des emballages des sciages et des fixations acier (palette, carton, film pastique, feuillard plastique, et bois d'emballage). Les processus sont inclus jusqu'à la porte de sortie du site de production des emballages.

  ** La captation de CO2 est comptabilisée puisqu'en France l'ensemble des massifs forestiers sont gérés durablement. En effet, en France la gestion des forêts est encadrée par le code forestier, qui fixe les règles pour gérer, aménager et protéger les forêts.*

A2 – TRANSPORT VERS L'ENTREPRISE DE CONSUTRUCTION BOIS

- Transport des composants emballés entre leur site de production et l'entreprise de construction bois.

A3 – ATELIER DE L'ENTREPRISE DE CONSTUCTION BOIS

- Transports internes et manutention sur site de fabrication, incluant la production du carburant (gasoil non routier ou GPL), son approvisionnement et les émissions liées à son utilisation (émissions dans l'air lors de la combustion).
- Extraction des matières premières, production, mise à disposition et utilisation d'énergie de l'entreprise de construction bois (rabotage, découpe, mise à longueur, usinage et éventuel pré-assemblage)
- Extraction des matières premières et production des emballages des produits de structure (carton, film pastique et feuillard plastique). Les processus sont inclus jusqu'à la porte de sortie du site de production des emballages.
- Extraction des matières premières et transformations successives jusqu'à la production des chutes de sciages approvisionnées par l'entreprise de construction bois. Les processus sont inclus jusqu'à la porte de sortie du site de production et incluent entre autres : la captation de CO2 lors de la croissance de l'arbre, les opérations de sylviculture et d'exploitation forestière, le sciage, le séchage, les éventuels traitements, collage et transports.

- Fin de vie des emballages valorisables des constituants du produit de structure (palette bois et bois d'emballage). Sont inclus tous les processus liés au transport des déchets d'emballages et à leur traitement jusqu'à l'état sortie du statut de déchet (avant recyclage). Des flux de « matériaux destinés au recyclage » sont déclarés.
- Fin de vie des emballages non valorisables des constituants du produit de structure (carton, film plastique, feuillard plastique). Sont inclus tous les processus liés au transport des déchets d'emballages et à leur traitement jusqu'à l'élimination complète (stockage ou incinération). Des flux de « énergie fournie à l'extérieur, vapeur » sont déclarés pour la part incinérée.
- Fin de vie des chutes recyclables des produits de structure dues aux opérations de rabotage, découpe, de mises à longueur et autres. Sont inclus tous les processus liés au transport des chutes et à leur traitement jusqu'à l'état permettant à leur recyclage. Un flux de « matériaux destinés au recyclage » est déclaré.

A4 À A5 – ÉTAPE DE MISE EN ŒUVRE



A4 – TRANSPORT VERS LE SITE DE CONSTRUCTION

- Transport des produits de structure et de leurs emballages entre l'atelier de l'entreprise de construction bois et le chantier.

Paramètre	Scénario
Transport atelier > chantier	Type de véhicule : 16-32 tonnes EURO 6 Consommation de carburant : 0,073 L/tkm Charge réelle : 7,5 t Charge maxi : 24 t Taux de retour à vide : 100% Distance parcourue : 94 km

A5 – PROCESSUS DE CONSTRUCTION-INSTALLATION

- Manutention et mise en place des produits de structure sur chantier, incluant la production du carburant (gasoil pour les camions grues), son approvisionnement et les émissions liées à son utilisation (émissions dans l'air lors de la combustion).
- Fin de vie des emballages non valorisables des constituants du produit de structure. Sont inclus tous les processus liés au transport des déchets d'emballages et à leur traitement jusqu'à l'élimination complète (stockage ou incinération). Des flux de « énergie fournie à l'extérieur, vapeur » sont déclarés pour la part incinérée.

Paramètre	Scénario	Valeur pour le produit de référence
Déchets d'emballages - Feuillard plastique	50% stockés 50% incinérés	0,05 kg par UF stockés 0,05 kg par UF incinérés
Consommation de gasoil	Puissance camion grue : 210 kW Temps d'utilisation : 15 min/m^3	172 MJ par UF

B1 À B7 – ÉTAPE D'UTILISATION



B1 – UTILISATION

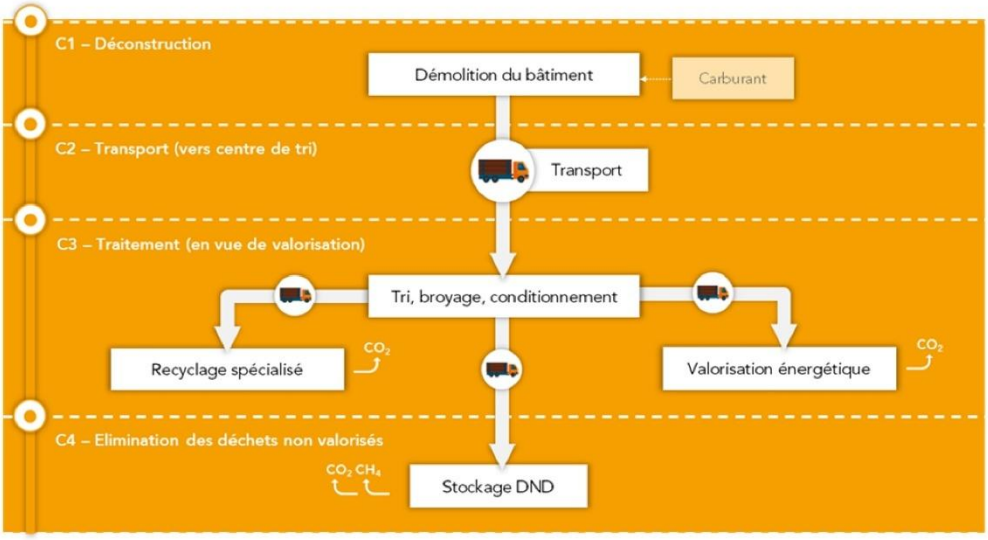
- Les composants en bois stockent du carbone biogénique durant la DVR du produit. La quantité de carbone biogénique stocké varie selon les essences.

Paramètre	Scénario	Valeur pour le produit de référence
Carbone biogénique stocké 	Sapin-épicéa : 210 kg de carbone biogénique par m^3	210 kg de carbone biogénique par UF
	Douglas : 241 kg de carbone biogénique par m^3	
	Pins : 246 kg de carbone biogénique par m^3	
	Chêne : 330 kg de carbone biogénique par m^3	
	Hêtre : 317 kg de carbone biogénique par m^3	
	Peuplier : 201 kg de carbone biogénique par m^3	
	Châtaignier : 285 kg de carbone biogénique par m^3	

B2 À B7 – MAINTENANCE, RÉPARATION, REMPLACEMENT, RÉNOVATION, UTILISATION DE L'ÉNÉRGIE ET DE L'EAU

- Pas de maintenance durant la DVR
- Pas de réparation durant la DVR
- Pas de remplacement durant la DVR
- Pas de rénovation durant la DVR
- Pas d'utilisation d'énergie et d'eau durant la DVR

C1 À C4 – ÉTAPE DE FIN DE VIE



C1 – DÉCONSTRUCTION

- Déconstruction du gros œuvre intégrant les produits de structure. Pris en compte sous la forme d'une consommation de gasoil des engins de chantier. Inclus la manutention jusqu'aux bennes de collecte de déchets de chantier

Paramètre	Scénario	Valeur pour le produit de référence
Consommation de gasoil	Puissance camion grue : 210 kW Temps d'utilisation : 15 min/m³	172 MJ par UF

C2 – TRANSPORT (VERS CENTRE DE TRI)

- Transport jusqu'au centre de tri de déchets du bâtiment.

Paramètre	Scénario
Transport vers centre de tri	Type de véhicule : 16-32 tonnes EURO 6 Consommation de carburant : 0,249 L/km Chargement (inclus trajet à vide) : 5,79 t Distance parcourue : 30 km

C3 – TRAITEMENT (EN VUE DE VALORISATION)

- Broyage, tri et conditionnement de la totalité du produit de structure en centre de tri de déchets du bâtiment. Pris en compte sous la forme d'une consommation d'électricité pour le broyage et le tri, et d'une consommation de gasoil pour la manutention.
- Transport des différents matériaux séparés vers les filières de valorisation (pour la part valorisée) ou d'élimination (pour la part éliminée). Pour la part valorisée il s'agit du transport vers les centres de traitement spécialisés en vue du recyclage (une part du bois et des fixations métalliques) ou de la valorisation énergétique (une part du bois). Pour la part éliminée il s'agit du transport vers les centres de stockage (une part du bois et des fixations métalliques).

- Pour la part recyclée : opérations de tri, broyage, nettoyage, compactage, etc. des différents matériaux dans les centres de traitement spécialisés jusqu'à la sortie de statut de déchet (centre de recyclage du bois et ferrailleurs pour l'acier). Des flux « Matériau pour recyclage » sont déclarés.
- Pour la part valorisée énergétiquement : manutention et combustion en centre de valorisation énergétique, y compris toutes les émissions dans l'air et consommations d'énergie associées.

Paramètre	Scénario	Valeur pour le produit de référence
Broyage, tri et manutention de la totalité de l'élément porteur	Électricité broyage et tri : 0,030 kWh/kg Gasoil manutention : 0,0437 MJ/kg Déchets collectés : - Bois : 100% - Acier : 100%	Électricité broyage et tri : 14,91 kWh par UF Gasoil manutention : 21,72 MJ/UF Déchets collectés : - Bois : 495 kg par UF - Acier : 1,83kg par UF
Traitement Bois	Vers recyclage : 57,2% Vers stockage non dangereux : 17,3% Vers valorisation énergétique : 25,5%	Vers recyclage : 283 kg/UF Vers stockage non dangereux : 86 kg/UF Vers valorisation énergétique : 126 kg/UF
Traitement Acier	Vers recyclage : 95% Vers stockage non dangereux : 5%	Vers recyclage : 1,74 kg/UF Vers stockage non dangereux : 0,09 kg/UF

C4 – ELIMINATION DES DÉCHETS NON VALORISÉS

- Pour la part stockée : manutention des déchets et stockage, y compris toutes les émissions dans l'air, l'eau et le sol.

D – BÉNÉFICES ET CHARGES AU-DELÀ DES FRONTIÈRES DU SYSTÈME



D – BÉNÉFICES ET CHARGES AU-DELÀ DES FRONTIÈRES DU SYSTÈME

- Pour l'acier recyclé :
  - Bénéfice acier recyclé fin de vie : Msval * R * (ISval - IVval)
    - ISval : Transport vers recyclage et refonte (aciérie avec four électrique)
    - IVval : Production de fonte primaire
  - Bénéfice acier recyclé entrant : - MS * (IS - IV)
    - IS : Production et approvisionnement de ferraille
    - IV : Production de fonte primaire
- Pour le bois recyclé :
  - Bénéfice bois recyclé fin de vie : Msval * R * (ISval - IVval)
    - ISval : Transport vers recyclage (fabricant de panneau)
    - IVval : Production et approvisionnement de bois d'industrie
  - Bénéfice bois recyclé entrant : *nul puisqu'aucun bois recyclé entrant*
- Pour le bois stocké non dangereux :
  - Bénéfice valorisation énergétique : MSval (ISval - IVval * PCISval * REval)
    - ISval : Production de chaleur à partir du stock
    - IVval : Production de chaleur substituée (charbon, gaz, fioul)
- Pour le bois valorisé énergétiquement :
  - Bénéfice valorisation énergétique : MSval (ISval - IVval * PCISval * REval)
    - ISval : Production de chaleur à partir du stock
    - IVval : Production de chaleur substituée (charbon, gaz, fioul)

4. MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE DU CYCLE DE VIE



RCP utilisée

Norme NF EN 15804+A1 « Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction », accompagnée de son complément national NF EN 15804/CN. En complément les exigences de la RCP relative aux produits de construction à base de bois NF EN 16485 ont été respectées

Frontières du système

Les frontières du système ont été fixées en respect des normes NF EN 15804+A1 et NF EN 15804/CN, en particulier avec le respect des principes de « modularité » (les processus sont affectés au module dans lequel ils ont lieu) et du « pollueur-payeur » (les processus de traitement des déchets sont affectés aux processus qui génèrent les déchets).

Pour les composants en bois, les frontières du système sont en ligne avec la norme NF EN 16485, en particulier les processus liés à la sylviculture sont inclus dans les frontières du système.

Les processus inclus dans chaque étape du cycle de vie sont présentés de façon synthétique dans le schéma du cycle de vie et les paragraphes de la section 3.

Par convention les processus suivants ont été considérés à l'extérieur des frontières :

- Pour l'étape A3 : éclairage du site de fabrication et transport des employés
- Pour toutes les étapes : fabrication et maintenance lourde de l'outil de production et des systèmes de transport (camions, routes, pylônes électriques, bâtiments et équipements lourds du site de fabrication...). Toutefois, certaines données génériques utilisées pour ces travaux ont été incluses avec les contributions liées aux infrastructures.

Règle de coupure

Les règles de coupure énoncées dans les normes NF EN 15804+A1 et NF EN 15804/CN ont également été respectées (1% par processus, 5% par module, en termes de masse et de consommation d'énergie primaire). Les flux non remontés pour la présente FDES sont les suivants :

- Fabrication, transport et fin de vie des outils manuels usés lors de la construction-installation (visseuse, cloueur et scie circulaire)
- Fabrication, transport et fin de vie des outils manuels usés lors de la déconstruction (visseuse et scie circulaire)

Allocations

Les règles d'affectation fixées par les normes NF EN 15804+A1 et NF EN 15804/CN ont été respectées :

- Affectation évitée tant que possible ;

- Affectation fondée sur les propriétés physiques (par exemple masse, volume) lorsque la différence de revenus générés par les co-produits est faible ;
- Dans tous les autres cas, affectation fondée sur des valeurs économiques ;
- Flux de matières présentant des propriétés inhérentes spécifiques, par exemple contenu énergétique, composition élémentaire (par exemple teneur en carbone biogénique), toujours affectés de manière à refléter les flux physiques, quelle que soit l'affectation choisie pour le processus.

Aussi, en ligne avec la norme NF EN 16485, les flux de carbone biogéniques et d'énergie inclus dans les composants en bois sont affectés de façon physique.

Représentativité

Les données d'ICV génériques utilisées sont pour la plupart issues de la base de données Ecoinvent V3.5 « allocation, cut-off by classification », dont la dernière mise à jour date d'Août 2018. Elles correspondent à des processus se déroulant en France, en Europe ou dans le Monde, la donnée la plus précise ayant été privilégiée, et des ajustements ayant été réalisés si nécessaire.

Les données d'ICV génériques relatives aux composants en bois sont issues du rapport de l'association « Préférez le bois français » de 2020. Ces ICV ont été réalisés en 2020 conformément à NF EN 15804+A1 et ont été soumis à revue critique.

Les données d'ICV spécifiques ont été collectées par la FNB auprès de ses membres et du comité de pilotage du projet. Leur représentativité est décrite ci-dessous :

- Géographique : produits fabriqués en France et mis en œuvre en France
- Temporelle : fabrication et mise en œuvre entre 2018 et 2019
- Technologique : cf. « Description du produit type » en section 2

Variabilité des résultats

La variabilité des résultats de l'EICV pour les impacts environnementaux témoins est inférieure à ±40%. Les impacts environnementaux témoins retenus sont : Réchauffement climatique, Énergie primaire non renouvelable procédé, et Déchets non dangereux. Ainsi les indicateurs environnementaux déclarés sont des indicateurs moyens.

5. RÉSULTATS DE L'ÉVALUATION DE L'IMPACT DU CYCLE DE VIE

TABLEAU 1 - PARAMÈTRES DÉCRIVANT LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX







	A1-A3 - Étape de production			A4-A5 - Étape de mise en œuvre		B - Étape d'utilisation							C - Étape de fin de vie				D - Bénéfices et charges au-delà des frontières du système
	A1 - Approvisionnement en matières premières	A2 - Transport	A3 - Fabrication	A4 - Transport	A5 - Processus de construction-installation	B1 - Utilisation	B2 - Maintenance	B3 - Réparation	B4 - Remplacement	B5 - Réhabilitation	B6 - Utilisation de l'énergie	B7 - Utilisation de l'eau	C1 - Démolition-déconstruction	C2 - Transport	C3 - Traitement des déchets	C4 - Élimination des déchets	
Réchauffement climatique en kg eq. CO_2 /UF	-6,95E+02			1,26E+01	1,59E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,57E+01	2,40E+00	6,73E+02	4,49E+01	-1,14E+02
Appauvrissement de la couche d'ozone en kg eq. CFC 11 /UF	1,70E-05			2,33E-06	2,86E-06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,86E-06	4,44E-07	7,39E-06	2,23E-07	-1,24E-05
Acidification des sols et de l'eau en kg eq. SO_2 /UF	4,28E-01			3,01E-02	1,20E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,19E-01	5,74E-03	1,18E-01	4,83E-03	-3,90E-01
Eutrophisation en kg eq. PO_4^{3-} /UF	1,53E-01			4,04E-03	2,59E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,59E-02	7,71E-04	2,06E-02	2,24E-03	-2,81E-02
Formation d'ozone photochimique en kg eq. Éthène /UF	1,79E-02			1,92E-03	3,15E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,15E-03	3,67E-04	6,26E-03	6,72E-03	-4,70E-02
Épuisement des ressources abiotiques – éléments en kg eq. Sb /UF	6,56E-04			3,85E-05	5,32E-06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,32E-06	7,35E-06	9,74E-05	1,02E-06	-1,75E-05
Épuisement des ressources abiotiques – combustibles fossiles en MJ PCI /UF	1,03E+03			1,93E+02	2,27E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,27E+02	3,69E+01	5,12E+02	1,90E+01	-1,83E+03
Pollution de l'air en m^3 /UF	1,12E+04			1,25E+03	1,93E+03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,93E+03	2,38E+02	3,95E+03	9,30E+01	-9,95E+03
Pollution de l'eau en m^3 /UF	5,13E+01			4,32E+00	4,98E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,98E+00	8,26E-01	1,20E+01	6,97E-01	-2,18E+01

TABLEAU 2 - PARAMÈTRES DÉCRIVANT L'UTILISATION DES RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES PRIMAIRES



	A1-A3 - Étape de production			A4-A5 - Étape de mise en œuvre		B - Étape d'utilisation							C - Étape de fin de vie				D - Bénéfices et charges au-delà des frontières du système
	A1 - Approvisionnement en matières premières	A2 - Transport	A3 - Fabrication	A4 - Transport	A5 - Processus de construction-installation	B1 - Utilisation	B2 - Maintenance	B3 - Réparation	B4 - Remplacement	B5 - Réhabilitation	B6 - Utilisation de l'énergie	B7 - Utilisation de l'eau	C1 - Démolition-déconstruction	C2 - Transport	C3 - Traitement des déchets	C4 - Élimination des déchets	
Utilisation de l'énergie primaire renouvelable, à l'exclusion des ressources d'énergie primaire renouvelables utilisées comme matières premières (procédé) en MJ /UF	8,25E+01			2,07E+00	1,33E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,33E+00	3,96E-01	1,56E+01	6,30E-01	-4,81E+03
Utilisation des ressources d'énergie primaire renouvelables en tant que matières premières (matière) en MJ /UF	8,48E+03			0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Utilisation totale des ressources d'énergie primaire renouvelables (énergie primaire et ressources d'énergie primaire utilisées comme matières premières) (total) en MJ /UF	8,58E+03			2,07E+00	1,33E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,33E+00	3,96E-01	1,56E+01	6,30E-01	-4,81E+03
Utilisation de l'énergie primaire non renouvelable, à l'exclusion des ressources d'énergie primaire non renouvelables utilisées comme matières premières (procédé) en MJ /UF	1,79E+03			2,06E+02	2,44E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,44E+02	3,94E+01	7,18E+02	2,15E+01	-1,75E+03
Utilisation des ressources d'énergie primaire non renouvelables en tant que matières premières (matière) en MJ /UF	2,06E+01			0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Utilisation totale des ressources d'énergie primaire non renouvelables (énergie primaire et ressources d'énergie primaire utilisées comme matières premières) (total) en MJ /UF	1,83E+03			2,06E+02	2,44E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,44E+02	3,94E+01	7,18E+02	2,15E+01	-1,75E+03

TABLEAU 3 - PARAMÈTRES DÉCRIVANT L'UTILISATION DE MATIÈRES ET RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES SECONDAIRES ET L'UTILISATION D'EAU



	A1-A3 - Étape de production			A4-A5 - Étape de mise en œuvre		B - Étape d'utilisation							C - Étape de fin de vie				D - Bénéfices et charges au-delà des frontières du système
	A1 - Approvisionnement en matières premières	A2 - Transport	A3 - Fabrication	A4 - Transport	A5 - Processus de construction-installation	B1 - Utilisation	B2 - Maintenance	B3 - Réparation	B4 - Remplacement	B5 - Réhabilitation	B6 - Utilisation de l'énergie	B7 - Utilisation de l'eau	C1 - Démolition-déconstruction	C2 - Transport	C3 - Traitement des déchets	C4 - Élimination des déchets	
Utilisation de matière secondaire en MJ /UF	7,92E-01			0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Utilisation de combustibles secondaires renouvelables en MJ /UF	0,00E+00			0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Utilisation de combustibles secondaires non renouvelables en MJ /UF	0,00E+00			0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Utilisation nette d'eau douce en m^3 /UF	3,96E-01			3,32E-02	2,03E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,02E-02	6,35E-03	2,61E-01	2,26E-02	-1,49E-01

TABLEAU 4 – AUTRES INFORMATIONS ENVIRONNEMENTALES DÉCRIVANT LES CATÉGORIES DE DÉCHETS







	A1-A3 - Étape de production			A4-A5 - Étape de mise en œuvre		B - Étape d'utilisation							C - Étape de fin de vie				D - Bénéfices et charges au-delà des frontières du système
	A1 - Approvisionnement en matières premières	A2 - Transport	A3 - Fabrication	A4 - Transport	A5 - Processus de construction-installation	B1 - Utilisation	B2 - Maintenance	B3 - Réparation	B4 - Remplacement	B5 - Réhabilitation	B6 - Utilisation de l'énergie	B7 - Utilisation de l'eau	C1 - Démolition-déconstruction	C2 - Transport	C3 - Traitement des déchets	C4 - Élimination des déchets	
Déchets dangereux éliminés en kg /UF	3,04E+00			1,22E-01	1,35E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,34E-01	2,33E-02	1,37E+00	1,75E-02	-7,33E-01
Déchets non dangereux éliminés en kg /UF	2,14E+01			1,03E+01	9,35E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,85E-01	1,96E+00	2,56E+01	8,59E+01	-2,32E+01
Déchets radioactifs éliminés en kg /UF	1,76E-02			1,31E-03	1,60E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,60E-03	2,51E-04	5,86E-03	1,36E-04	-3,03E-03

TABLEAU 5 - INFORMATIONS ENVIRONNEMENTALES COMPLÉMENTAIRES DÉCRIVANT LES FLUX SORTANTS







	A1-A3 - Étape de production			A4-A5 - Étape de mise en œuvre		B - Étape d'utilisation							C - Étape de fin de vie				D - Bénéfices et charges au-delà des frontières du système
	A1 - Approvisionnement en matières premières	A2 - Transport	A3 - Fabrication	A4 - Transport	A5 - Processus de construction-installation	B1 - Utilisation	B2 - Maintenance	B3 - Réparation	B4 - Remplacement	B5 - Réhabilitation	B6 - Utilisation de l'énergie	B7 - Utilisation de l'eau	C1 - Démolition-déconstruction	C2 - Transport	C3 - Traitement des déchets	C4 - Élimination des déchets	
Composants destinés à la réutilisation en kg /UF	0,00E+00			0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Matériaux destinés au recyclage en kg /UF	3,97E+01			0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,85E+02	0,00E+00	0,00E+00
Matériaux destinés à la récupération d'énergie en kg /UF	0,00E+00			0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Énergie fournie à l'extérieur - Électricité en MJ /UF	0,00E+00			0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Énergie fournie à l'extérieur - Vapeur en MJ /UF	2,65E+00			0,00E+00	5,86E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,18E+03	1,27E+02	0,00E+00
Énergie fournie à l'extérieur - Gaz en MJ /UF	0,00E+00			0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

TABLEAU 6 - SYNTHÈSE DES INDICATEURS



Paramètre/information	Unité	TOTAL Étape de production	TOTAL Étape de mise en œuvre	TOTAL Étape d'utilisation	TOTAL Étape de fin de vie	TOTAL Cycle de vie (sauf D)	Module D
■ Impacts environnementaux							
Réchauffement climatique	kg eq. CO_2 /UF	-6,95E+02	2,84E+01	0,00E+00	7,36E+02	7,01E+01	-1,14E+02
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg eq. CFC 11 /UF	1,70E-05	5,18E-06	0,00E+00	1,09E-05	3,31E-05	-1,24E-05
Acidification des sols et de l'eau	kg eq. SO_2 /UF	4,28E-01	1,50E-01	0,00E+00	2,48E-01	8,25E-01	-3,90E-01
Eutrophisation	kg eq. PO_4^{3-} /UF	1,53E-01	2,99E-02	0,00E+00	4,95E-02	2,32E-01	-2,81E-02
Formation d'ozone photochimique	kg eq. Éthène /UF	1,79E-02	5,07E-03	0,00E+00	1,65E-02	3,94E-02	-4,70E-02
Épuisement des ressources abiotiques - éléments	kg eq. Sb /UF	6,56E-04	4,38E-05	0,00E+00	1,11E-04	8,11E-04	-1,75E-05
Épuisement des ressources abiotiques - combustibles fossiles	MJ PCI /UF	1,03E+03	4,20E+02	0,00E+00	7,95E+02	2,25E+03	-1,83E+03
Pollution de l'air	m^3 /UF	1,12E+04	3,18E+03	0,00E+00	6,22E+03	2,06E+04	-9,95E+03
Pollution de l'eau	m^3 /UF	5,13E+01	9,30E+00	0,00E+00	1,85E+01	7,91E+01	-2,18E+01
■ Utilisation des ressources énergétiques primaires							
Utilisation de l'énergie primaire renouvelable, à l'exclusion des ressources d'énergie primaire renouvelables utilisées comme matières premières	MJ/UF	8,25E+01	3,41E+00	0,00E+00	1,79E+01	1,04E+02	-4,81E+03
Utilisation des ressources d'énergie primaire renouvelables en tant que matières premières	MJ/UF	8,48E+03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,48E+03	0,00E+00
Utilisation totale des ressources d'énergie primaire renouvelables (énergie primaire et ressources d'énergie primaire utilisées comme matières premières)	MJ/UF	8,58E+03	3,41E+00	0,00E+00	1,79E+01	8,60E+03	-4,81E+03
Utilisation de l'énergie primaire non renouvelable, à l'exclusion des ressources d'énergie primaire non renouvelables utilisées comme matières premières	MJ/UF	1,79E+03	4,51E+02	0,00E+00	1,02E+03	3,26E+03	-1,75E+03
Utilisation des ressources d'énergie primaire non renouvelables en tant que matières premières	MJ/UF	2,06E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,06E+01	0,00E+00
Utilisation totale des ressources d'énergie primaire non renouvelables (énergie primaire et ressources d'énergie primaire utilisées comme matières premières)	MJ/UF	1,83E+03	4,51E+02	0,00E+00	1,02E+03	3,30E+03	-1,75E+03
■ Utilisation de ressources secondaires et d'eau							
Utilisation de matière secondaire	kg/UF	7,92E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,92E-01	0,00E+00
Utilisation de combustibles secondaires renouvelables	MJ/UF	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Utilisation de combustibles secondaires non renouvelables	MJ/UF	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Utilisation nette d'eau douce	m^3 /UF	3,96E-01	5,35E-02	0,00E+00	3,10E-01	7,60E-01	-1,49E-01
■ Catégories de déchets							
Déchets dangereux éliminés	kg/UF	3,04E+00	2,57E-01	0,00E+00	1,54E+00	4,84E+00	-7,33E-01
Déchets non dangereux éliminés	kg/UF	2,14E+01	1,12E+01	0,00E+00	1,14E+02	1,47E+02	-2,32E+01
Déchets radioactifs éliminés	kg/UF	1,76E-02	2,91E-03	0,00E+00	7,85E-03	2,83E-02	-3,03E-03
■ Flux sortants							
Composants destinés à la réutilisation	kg/UF	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Matériaux destinés au recyclage	kg/UF	3,97E+01	0,00E+00	0,00E+00	2,85E+02	3,25E+02	0,00E+00
Matériaux destinés à la récupération d'énergie	kg/UF	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Énergie fournie à l'extérieur - Électricité	MJ/UF	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Énergie fournie à l'extérieur - Vapeur	MJ/UF	2,65E+00	5,86E-01	0,00E+00	1,31E+03	1,31E+03	0,00E+00
Énergie fournie à l'extérieur - Gaz	MJ/UF	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

6. INFORMATIONS ADDITIONNELLES SUR LE RELARGAGE DE SUBSTANCES DANGEREUSES DANS L'AIR INTÉRIEUR, LE SOL ET L'EAU PENDANT L'ÉTAPE D'UTILISATION

Note : les informations présentées dans cette section sont générales et couvrent l'ensemble des éléments porteurs en bois résineux. Pour des informations spécifiques à un projet de construction, se reporter aux données techniques fournies par le fabricant concerné pour ce projet.

ÉMISSIONS DANS L'AIR INTÉRIEUR

Les produits étudiés n'entrent pas dans le champ d'application du décret n° 2011-321 du 23 mars 2011 relatif à l'étiquetage des produits de construction ou de revêtement de mur ou de sol et des peintures et vernis sur leurs émissions de polluants volatils (cf. liste indicative du 26 janvier 2016 diffusée par le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie et le Ministère du Logement, de l'Égalité des Territoires et de la Ruralité).

Aucun essai concernant la qualité sanitaire des espaces intérieurs n'a été réalisé.

ÉMISSIONS DANS LE SOL ET L'EAU

Les produits couverts par la présente FDES sont destinées à un usage intérieur. Elles ne sont donc pas en contact avec les sols et eaux de ruissellement.

7. CONTRIBUTION DU PRODUIT À L'ÉVALUATION DES RISQUES SANITAIRES ET DE LA QUALITÉ DE VIE À L'INTÉRIEUR DES BÂTIMENTS

Note : les informations présentées dans cette section sont générales et couvrent l'ensemble des éléments porteurs en bois résineux. Pour des informations spécifiques à un projet de construction, se reporter aux données techniques fournies par le fabricant concerné pour ce projet.

CARACTÉRISTIQUES DU PRODUIT PARTICIPANT À LA CRÉATION DES CONDITIONS DE CONFORT HYGROTHERMIQUE DANS LE BÂTIMENT

Les produits couverts par cette FDES ne revendiquent aucune performance concernant le confort hygrothermique.

CARACTÉRISTIQUES DU PRODUIT PARTICIPANT À LA CRÉATION DES CONDITIONS DE CONFORT ACOUSTIQUE DANS LE BÂTIMENT

Les produits couverts par cette FDES ne revendiquent aucune performance concernant le confort acoustique.

CARACTÉRISTIQUES DU PRODUIT PARTICIPANT À LA CRÉATION DES CONDITIONS DE CONFORT VISUEL DANS LE BÂTIMENT

Les produits couverts par cette FDES participent au confort visuel dans le bâtiment lorsqu'ils sont visibles. Toutefois ils ne revendiquent aucune performance chiffrée.

CARACTÉRISTIQUES DU PRODUIT PARTICIPANT À LA CRÉATION DES CONDITIONS DE CONFORT OLFACTIF DANS LE BÂTIMENT

Les produits couverts par cette FDES ne revendiquent aucune performance concernant le confort olfactif.

8. CADRE DE VALIDITÉ DE LA FDES

L'étude ayant permis la rédaction de la présente FDES a été réalisée suivant les étapes indiquées en Annexe L de la norme NF EN 15804/CN :

- Définition des objectifs et du champ de l'étude
- Choix d'une méthode de collecte de données en deux temps (collecte initiale + complémentaire)
- Choix des indicateurs environnementaux témoins
- Analyse de gravité et détermination des processus contributifs
- Analyse de sensibilité et détermination des paramètres sensibles
- Détermination des lois de distribution des paramètres sensibles
- Étude statistique et calcul de la variabilité de l'EICV
- Détermination des valeurs à déclarer pour les indicateurs environnementaux
- Rédaction de la FDES collective (y compris son cadre de validité) et du rapport de projet

Ainsi cette étude a permis l'établissement du présent cadre de validité en conformité avec les sections « Cadre de validité des FDES collectives » de l'Arrêté et du Décret « relatifs à la déclaration environnementale des produits de construction et de décoration destinés à un usage dans les ouvrages de bâtiment » et avec l'Annexe L de NF EN 15804/CN.

Les impacts environnementaux déclarés dans la présente FDES sont les impacts moyens, calculés à l'issue de l'étude statistique réalisée sur l'ensemble des produits couverts. Les valeurs des paramètres sensibles du produit de référence utilisé pour calculer ces impacts déclarés sont présentées dans le tableau ci-après. La probabilité qu'un produit couvert par cette FDES ait des impacts inférieurs à 140% de ceux déclarés dans celle-ci est de 95% (pour les impacts environnementaux témoins choisis lors de l'étude).

La présente FDES couvre les produits remplissant l'ensemble des conditions suivantes :

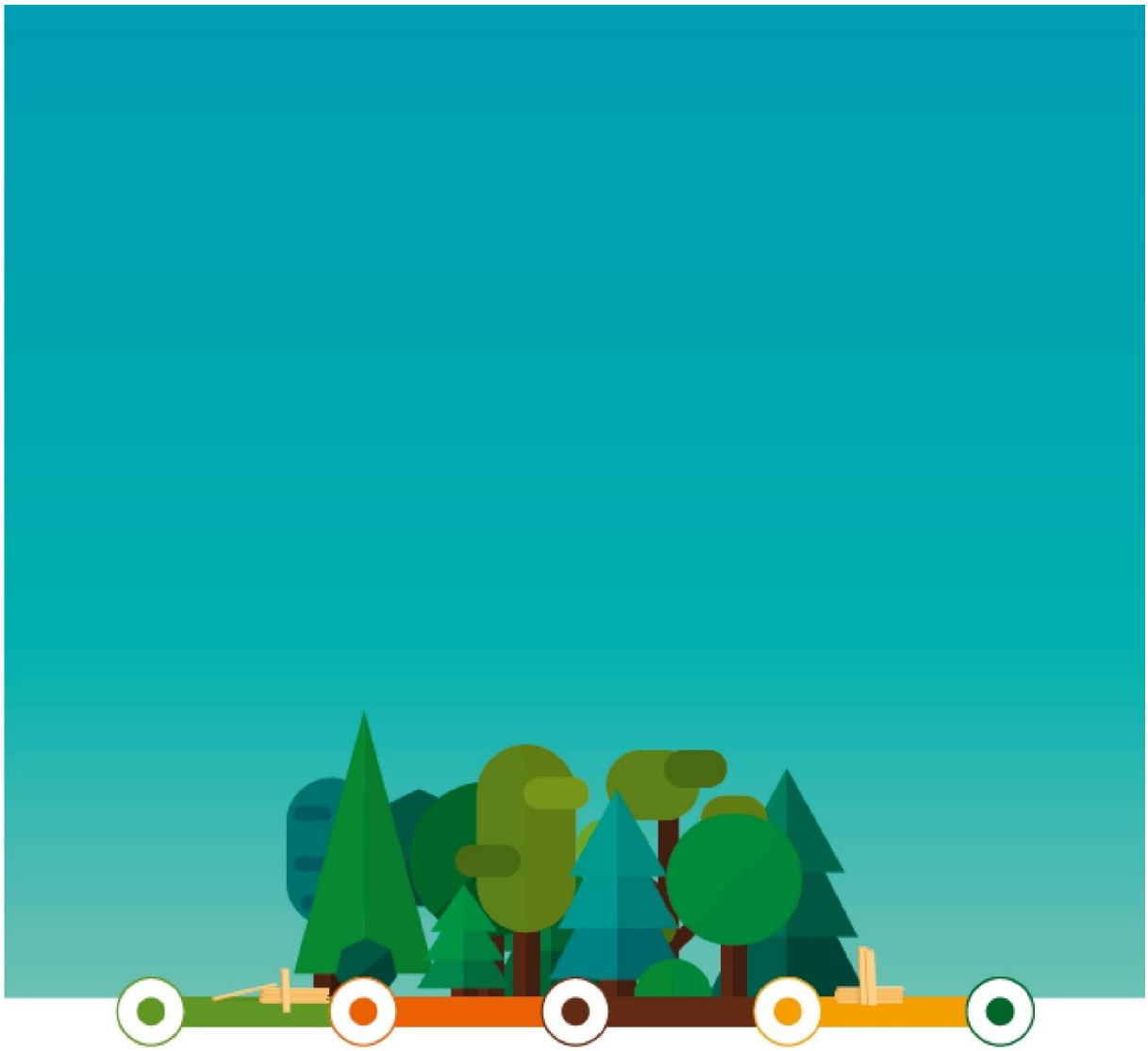
Produit type Les produits pouvant utiliser la présente FDES doivent être similaires au produit type décrit en section 2.

Le label « Bois de France » est un des moyens de garantir l'origine des bois

Ayants droits Toutes les entreprises qui produisent et/ou mettent en œuvre des éléments de structure en bois de France (issues de forêts françaises et transformées en France).

Paramètres sensibles Les plages de variations des paramètres des produits souhaitant bénéficier de la présente FDES doivent être incluses dans les plages de variation des paramètres sensibles, mesurables et maîtrisés, rencontrées lors de l'étude, et listés dans le tableau ci-dessous.

Paramètre sensible	Plage de variation couverte	Valeur pour le produit de référence
Essence	Toutes essences résineuses françaises	Sapin épicéa
Durabilité	Toutes durabilités : Naturelle , trempage court, imprégnation en autoclave, pulvérisation, aspersion	Conférée par trempage court
Classe d'emploi	Toutes classes courantes : Classe 2, Classe 3.1, Classe 3.2, Classe 4	Classe 2
Type de bois	Tous types : Bois massif, Bois lamellé-collé, Bois massif abouté, bois massif reconstitué	Bois massif
Distance d'approvisionnement des sciages	Nationale : Jusqu'à 500 km	252 km
Distance atelier-chantier	Nationale : Jusqu'à 700 km	94 km



POUR EN SAVOIR PLUS :

- Configurateur DE-boisdefrance.fr : www.de-boisdefrance.fr
- Site du label Bois de France : www.bois-de-france.org
- Site d'information sur l'offre produits en bois de France : www.preferezlesboisdefrance.fr
- Site de la base INIES rassemblant toutes les FDES : www.inies.fr
- Site Energie Carbone, préparation de la future règlementation : www.batiment-energiecarbone.fr
- Catalogue Bois Construction, solutions constructives et FDES www.catalogue-construction-bois.fr
- Normes ISO 14040 et 14044, normes NF EN 15804+A1 et NF EN 15804/CN

FNB
FÉDÉRATION NATIONALE DU BOIS

Réalisé par :
esteana

Avec le soutien financier :
France Bois Forêt
INTERPROFESSION NATIONALE

Résumé

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de l'intégration de la démarche de réemploi des matériaux de construction dans les pratiques courantes du bailleur social Vosgelis. Cette analyse s'appuie sur une recherche-action en ingénierie menée sur un chantier de déconstruction-reconstruction situé dans la ville de Remiremont, au sud-est du département des Vosges (88).

Le bailleur social souhaite s'approprier et adapter la démarche de réemploi du bois structurel à ses procédures constructives. Néanmoins, de nombreuses interrogations subsistent quant à l'intégration de cette pratique. L'expérimentation réalisée sur un échantillon de solives, issu du chantier, a permis de mener une étude comparative entre différentes méthodes non destructives de qualification mécanique du bois. Suite à l'analyse, il a été constaté que la méthode vibratoire était la plus pertinente à utiliser, notamment en raison des résultats sécuritaires. Elle a donc été employée pour établir une valeur seuil permettant de classer le gisement de bois du chantier selon sa résistance. À l'issue de ce classement, une partie des bois a pu être intégrée au projet de construction neuve.

Parallèlement, il apparaît essentiel d'évaluer la pertinence de l'usage du bois de réemploi dans la construction de bâtiments, en particulier lorsque des étapes de ré usinage sont nécessaires à la remise en œuvre du matériau. A cette fin, un outil de calcul a été conçu. Il s'agit d'un calculateur carbone destiné à la maîtrise d'œuvre ou aux bureaux d'études spécialisés dans le réemploi. Son objectif est d'évaluer l'impact carbone de scénarios de réemploi appliqués au bois et de comparer les résultats avec ceux d'un matériau neuf équivalent. Dans le cadre de l'opération de Remiremont, ce calculateur a permis de mettre en lumière les bénéfices environnementaux du scénario de réemploi, et plus particulièrement l'intérêt d'un circuit court.

Cette expérimentation vise à constituer un corpus de données qui servira de base à l'élaboration d'un cadre de référence pour l'émergence d'une filière structurée du réemploi dans le secteur du bâtiment.

Abstract

This thesis is part of the effort to integrate material reuse practices into the standard operations of the social housing provider Vosgelis. The analysis is based on an action-research approach in engineering conducted on a deconstruction–reconstruction site located in the town of Remiremont, in the southeastern part of the Vosges department.

The social housing provider aims to adopt and adapt the reuse of structural timber to its construction processes. However, several questions remain regarding the integration of this practice. An experimental study carried out on a sample of joists from the site enabled a comparative analysis of different non-destructive methods for the mechanical grading of timber. The results showed that the vibrational method was the most relevant, in particular due to safety concerns. It was therefore used to establish a threshold value for classifying the timber stock from the site according to its strength. Following this classification, part of the timber was reintegrated into the new construction project.

At the same time, it is essential to assess the relevance of using reclaimed timber in building construction, especially when reprocessing steps are required prior to reuse. To this end, a calculation tool was developed. This carbon calculator is intended for design teams and engineering consultancies specializing in material reuse. Its purpose is to evaluate the carbon impact of reuse scenarios applied to timber and to compare the results with those of an equivalent new material. In the context of the Remiremont project, the calculator highlighted the environmental benefits of the reuse scenario, particularly the advantages of a short supply chain.

This experimental work aims to establish a body of data that will serve as a foundation for the development of a reference framework to support the emergence of a structured reuse sector within the construction industry.