



Valorisation des équipements ferroviaires intégration d'un indicateur de sécurité incendie dans les études d'éco-conception

Valuation of railway equipment: integration of a fire safety indicator in eco-design studies

Aymerick YARD
Sector group
12 Av. du Québec,
91140 Villebon-sur-Yvette
aymerick.yard@sector-group.net

Asmaa BOULENOUAR
Sector group
12 Av. du Québec,
91140 Villebon-sur-Yvette
asmaa.boulenouar@sector-group.net

AHANDA Marie
Sector group
12 Av. du Québec,
91140 Villebon-sur-Yvette
marie.ahanda@sector-group.net

I. RESUMES

Cet article présente l'intégration d'un indicateur de sécurité incendie dans les études d'éco-conception. L'objectif principal de cet outil est de développer une méthode capable de mutualiser le travail entre les études d'éco-conception et de sécurité incendie, dans le but de gagner du temps. La mutualisation de ces études nous permet, dans un second temps, de trouver le meilleur compromis entre les performances environnementales de fin de vie (valorisation) et la gestion du risque en cas d'incendie (charge calorifique embarquée). L'article présente les différentes étapes de développement de l'indicateur et explique comment il peut être utilisé pour l'analyse des impacts environnementaux des équipements ferroviaires. Un exemple concret d'application de cette méthode est présenté, démontrant l'efficacité de l'outil développé. Les résultats montrent que l'intégration de cet indicateur dans les études d'éco-conception peut améliorer la sécurité incendie et réduire l'impact environnemental des équipements ferroviaires. Enfin, l'article conclut en présentant les perspectives pour des améliorations futures de cette méthode et de son application dans la valorisation des équipements ferroviaires.

This article presents the integration of a fire safety indicator in eco-design studies. The main objective of this tool is to develop a method that is capable of sharing the workload between eco-design and fire safety studies, in order to save time. The sharing of these studies allows us to find the best compromise between end-of-life environmental performance (recovery) and fire risk management (embedded calorific load). The article presents the different stages of indicator development and explains how it can be used for the analysis of the environmental impacts of railway equipment. A concrete example of the application of this method is presented, demonstrating the effectiveness of the developed tool. The results show that the integration of this indicator in eco-design studies can improve fire safety and reduce the environmental impact of railway equipment. Finally, the article concludes by presenting avenues for future improvements in this method and its application in the valorization of railway equipment.

Keywords/Mots clés : Charge calorifique ; Etudes de valorisabilité, Fin de vie, Eco-conception

II. INTRODUCTION

L'industrie ferroviaire fait face à de nombreux défis en matière d'éco-conception de ses équipements pour répondre aux demandes croissantes de durabilité et de protection de l'environnement. L'un de ces défis est de bien gérer et valoriser le matériel en fin de vie, que ce soit par du réemploi, du recyclage ou par valorisation thermique. Cependant, la sécurité incendie est également une préoccupation majeure pour les industries qui utilisent des matières combustibles. L'objectif principal lors de la conception et l'évaluation de ce type de produit/équipement est de minimiser et de contrôler les risques liés aux incendies. Cela passe par deux aspects importants : la limitation de la charge calorifique et l'évaluation du risque selon les normes (par exemple EN45545). Nous reconnaissons que l'éco-conception et la gestion du risque d'incendie peuvent avoir des objectifs divergents voire contraires. L'un souhaite maximiser la charge calorifique pour favoriser sa valorisation en fin de vie, tandis que l'autre cherche à réduire cette charge calorifique pour diminuer le risque.

C'est pourquoi nous souhaitons proposer une approche innovante pour concilier ces deux domaines. Les concepts clés de cette recherche incluent la durabilité, l'éco-conception, la sécurité incendie et l'évaluation des risques. Notre objectif est de trouver une méthode rigoureuse qui permette de trouver le bon compromis pour que, lors de la conception, les bons choix puissent être faits sans rajouter de travail supplémentaire, voire en faisant gagner du temps. Le plan envisagé pour cette recherche comprend 4 grandes parties. Dans la première partie, nous vous présenterons les bases littéraires et scientifiques que nous utilisons pour notre travail, à savoir la présentation de la norme internationale pour le calcul de recyclabilité et de la norme nord-américaine pour la charge calorifique. Dans la deuxième partie, nous vous présenterons en détail l'approche que nous avons développée pour concilier ces deux domaines. Dans la troisième partie, nous vous présenterons un exemple concret où nous avons appliqué cette méthode. Nous concluons en présentant les perspectives pour des améliorations futures.

36 Cette étude pourrait fournir des résultats significatifs pour améliorer l'éco-conception et la sécurité incendie dans l'industrie ferroviaire, et pourrait avoir
37 des applications beaucoup plus larges dans d'autres industries confrontées à ces mêmes défis. Toutefois, ce travail n'a pas pour but immédiat d'être appliqué en
38 industrie. Notre travail et notre réflexion ne sont pas encore suffisamment matures et devront être perfectionnés pour atteindre cet objectif.

41 III. REVUE DE LITERATURE

42 A. Norme ISO 22 628

43 1) Définition des concepts

44 Qu'est-ce que le recyclage ? La recyclabilité ? Recyclable ? Recyclé ?

45 La recyclabilité est la capacité d'un matériau à être recyclé. Cela signifie qu'un produit qui peut être recyclé est conçu pour être réintroduit dans un processus
46 de production. Le recyclage, quant à lui, est le processus visant à obtenir des matières premières recyclées. Les matériaux recyclables sont des produits,
47 emballages ou composants associés qui peuvent être prélevés sur le flux des déchets par des processus et des programmes disponibles, collectés, traités et
48 transformés en matières premières ou en produits à usage industriel. Toutefois, il peut s'écouler plusieurs années entre le moment où un matériau est utilisé
49 dans la fabrication d'un produit et celui où une technique de recyclage ainsi qu'une filière de collecte et de commercialisation sont mises en place. Ainsi, un
50 produit avec un bon taux de recyclabilité n'est pas nécessairement recyclé. Le taux de recyclage est un taux représentatif de la réalité immédiate, tandis que la
51 recyclabilité est un taux plus théorique, généralement défini au moment de la conception/fabrication d'un produit. De même, la notion de recyclable est
52 théorique : elle désigne un matériau ayant la capacité d'être réintroduit dans une chaîne de production, contrairement aux matériaux recyclés qui ont déjà été
53 soumis au processus de recyclage et qui sont déjà sous forme de matière première ou de pièce finale.

54 Qu'est-ce que la valorisation ? La valorisabilité ? Valorisable ? Valorisé ?

56 La valorisabilité pourrait se définir comme l'aptitude à être valorisé. La valorisation consiste en le réemploi, le recyclage ou toute autre action visant à
57 obtenir, à partir des déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie, selon la loi du 13 juillet 1992. Cette valorisation inclut donc le recyclage, mais
58 également la régénération et la valorisation énergétique.

59 Deux définitions de l'ADEME :

- 60 • "La régénération consiste en un procédé physique ou chimique qui redonne à un déchet les caractéristiques permettant de l'utiliser en
61 remplacement d'une matière première neuve." ("Traitement des déchets, quelques définitions - Universalis") C'est le cas, par exemple, de la
62 régénération des huiles usées ou des solvants, ou du papier qui est à la fois recyclé et régénéré par le désencrage.
- 63 • La valorisation énergétique consiste à utiliser les calories contenues dans les déchets, en les brûlant et en récupérant l'énergie ainsi produite
64 pour, par exemple, chauffer des immeubles ou produire de l'électricité. C'est l'exploitation du gisement d'énergie que contiennent les déchets.

65 Le taux de valorisation d'un déchet reflète une réalité immédiate, notamment en termes de disponibilité des solutions techniques. En revanche, la
66 valorisabilité représente un taux plus théorique, défini généralement au moment de la conception ou de la fabrication d'un produit. Le taux de recyclabilité
67 prend en compte les éléments qui peuvent être réutilisés ou recyclés. Le taux de valorisabilité ajoute à cela les matériaux valorisés.

68 Il existe plusieurs normes et méthodologies qui permettent de calculer le taux de recyclabilité et de valorisabilité. La plupart de ces méthodes sont
69 spécialisées pour une typologie de produit spécifique, telle que les emballages, les produits électroniques, les véhicules, etc. Parmi celles-ci, on peut citer :

- 70 • ISO 22628 :2002 Véhicules routiers — Recyclabilité et valorisabilité — Méthode de calcul (Le dernier examen de cette norme date de 2018. Cette
71 édition reste donc d'actualité.)
- 72 • ISO 21106 :2019 Applications ferroviaires — Méthode de calcul de recyclabilité et valorisabilité pour matériel roulant ("Railway applications —
73 Recyclability and recoverability calculation ...")
- 74 • Méthode UNIFE de 2013 (UNIFE Sustainable Transport Committee, Topical Group: Life Cycle Assessment) Recyclability and Recoverability
75 Calculation Method - Railway Rolling Stock ("Sustainable Transport Committee - UNIFE")
- 76 • ISO 16714 :2008 Engins de terrassement — Recyclabilité et récupérabilité — Terminologie et méthode de calcul ("Earth-moving machinery —
77 Recyclability and recoverability — Terminology ...")
- 78 • XP E01-015 2018 Produits mécaniques - Méthodologie pour l'évaluation de la conception des assemblages en vue du traitement pour leur recyclage en
79 fin de vie - Partie 2 : étude de la recyclabilité
- 80 • NF EN 45555 2019 Méthodes générales pour l'évaluation de la recyclabilité et de la récupérabilité des produits liés à l'énergie ("Norme NF EN 45555
81 - Afnor EDITIONS")
- 82 • Méthode VDI 2243 2002 Recycling-oriented product development
- 83 • Méthode Eco'DEEE – Bureau Veritas CODDE – 2008 Méthodologie éco'DEEE (Recovery Conscious Design for electr(on)ic products

84 Dans cet article, nous nous baserons sur la norme ISO 22 628 qui détaille une méthode de calcul pour déterminer les taux de recyclabilité et de valorisabilité
85 d'un nouveau véhicule routier, exprimés sous forme de fractions massiques de ce véhicule. Nous avons opté pour cette norme car elle est aujourd'hui largement
86 reconnue dans l'industrie pour sa simplicité ainsi que pour sa large utilisation qui facilite les comparaisons entre les valeurs obtenues.
87

89 2) Principe de la norme :

90 La norme ISO 22 628, initialement conçue pour l'industrie automobile, détaille la méthode de calcul du pourcentage de recyclabilité et de valorisabilité
 91 (tel que défini précédemment). Ces pourcentages sont calculés en fonction des masses partielles (sommées des masses) des matériaux à chaque étape de la
 92 démarche de traitement du véhicule en fin de vie (prétraitement, démontage, séparation des métaux et traitement des résidus), conformément à la norme ISO
 93 22 628 de 2002. Le calcul dépend également des propriétés des matériaux, de la conception du véhicule et de la technologie de traitement reconnue (testée par
 94 un laboratoire et ayant fait ses preuves).

95

96 a) Décomposition des matériaux

97 La norme spécifie sept catégories de matériaux listés ci-dessous :

- | | | | |
|-----|--|-----|--|
| 98 | • Métaux ; | 103 | <ul style="list-style-type: none"> • Matériaux organiques naturels modifiés (MONM), tels que cuir, bois, carton et textiles de coton ; • Autres (composants, matériaux ou les deux, pour lesquels une décomposition détaillée des matériaux ne peut pas être établie, tels que composants électroniques, électriques). |
| 99 | • Polymères, à l'exclusion des élastomères ; | 104 | |
| 100 | • Élastomères ; | 105 | |
| 101 | • Verre ; | 106 | |
| 102 | • Fluides ; | 107 | |

108
109

110 b) Les quatre étapes de la démarche et les masses partielles associées :

111

112 **Prétraitement** : Il s'agit de la première étape, elle prend en compte les fluides, Tous les fluides, Batteries, Filtres à huile, Réservoir de gaz de pétrole
 113 liquéfié (GPL), Réservoir de gaz naturel comprimé (GNC), Pneumatiques, Catalyseurs. Ici la masse totale des matériaux sera notée mP. Ces derniers sont
 114 considérés comme réutilisables ou recyclables par la norme. Ces éléments sont considérés en pré traitement car ils représentent un risque pour l'environnement
 115 et l'homme.

116

117 **Démontage** : A cette étape les composantes sont également réutilisables et recyclables. Afin de les déterminer, nous nous basons sur trois critères :
 118 L'accessibilité, le type de fixation, et la technologie de démontage reconnue. A cette étape un matériau sera considéré comme recyclable en fonction de sa
 composition et de sa technologie de recyclage reconnue. La masse partielle à cette étape sera notée mD.

119

120 **Séparation des métaux** : Cette étape intervient après le broyage du produit. Selon la norme les métaux (ferreux ou non ferreux) sont considérés comme
 recyclables. Cette étape prend les matériaux de cette famille, qui ne sont pas pris en compte dans l'étape précédente. La masse sera donc noté mM.

121

122 **Traitements des résidus** : Cette étape intervient après le broyage du produit. Cette étape regroupe l'ensemble des matériaux qui ne sont pas considérés
 dans les étapes précédentes. Ainsi nous pourrions les classer en deux sous-groupes :

123

- Pour les résidus non métalliques considéré comme recyclable, la sommes des masses sera noté mTr
- Pour les résidus non métalliques valorisable, la masse partielle sera noté mTe

124

Valorisable	Recyclable	Prétraitement	mP	Taux de recyclabilité
		Démontage	mD	Masse des matériaux pris en compte à l'étape de démontage
		Séparation des métaux	mM	Masse des métaux pris en compte à l'étape de séparation des métaux
		Traitements des résidus	mTr	Masse des matériaux pris en compte à l'étape de traitement des résidus non métalliques et qui peuvent être considérés comme recyclables
			Rcov	Taux de valorisabilité
		Traitements des résidus	mTe	Masse des matériaux pris en compte à l'étape de traitement des résidus non métalliques et qui peuvent être valorisés énergétiquement
	Déchet	D	Déchets destinés à l'enfouissement	

Mv: Masse du véhicule

125 Tableau 1 : Résumé de la norme ISO22628

126

127 c) Calcul du taux de recyclabilité et de valorisabilité

128

Le calcul du taux de recyclabilité massique du véhicule R_{cyc}, est réalisé à l'aide de la formule suivante :

$$R_{cyc} = \frac{m_P + m_D + m_M + m_{Tr}}{m_V} \times 100$$

129

130

Le calcul du taux de valorisabilité massique du véhicule R_{cov}, est réalisé à l'aide de la formule suivante

$$R_{cov} = \frac{m_P + m_D + m_M + m_{Tr} + m_{Te}}{m_V} \times 100$$

131

132 *MV étant la masse totale du système

133 Dans l'article intitulé « Regard critique et comparatif des méthodologies d'évaluation du potentiel de recyclabilité et valorisabilité des véhicules routiers
134 et ferroviaires », les auteurs Lise MORFIN, Damien LACLIDE et Aymerick YARD mettent en avant les limites et les points forts de la norme. En prenant en
135 compte notre thématique, nous avons ainsi retenus les points suivants :

136 *d) Limites :*

- 137 • L'accès à la norme est payant. Les outils de calculs sont à créer par les utilisateurs.
- 138 • Ne prend pas en compte les performances des filières de recyclage ou de valorisation
- 139 • L'ensemble des éléments extraits lors du prétraitement sont automatiquement considérés comme étant réutilisés. Ce qui n'est pas le cas dans la
140 réalité.
- 141 • Les taux de recyclabilité et de valorisabilité d'un élément lors de l'étape de démantèlement est le même qu'à l'étape de broyage. Or dans la
142 réalité on constate que ce taux chute à l'étape de broyage.
- 143 • Ne prend pas en compte toutes les phases de vie du produit (pièces de rechanges, consommables lors de la fabrication, etc. ...)

144 *e) Points forts :*

- 145 • Ils incluent les masses des matériaux recyclés lors du pré-traitement (Tsuyji, 2006)
- 146 • Méthodologie la plus simple en comparaison aux autres normes présentes sur le marché
- 147 • Connaissances techniques sur l'existence ou non de filières de fin de vie nécessaires, mais pas besoin d'avoir des informations précises
148 concernant les performances des filières ce qui évite un gros travail de recherche bibliographique
- 149 • Le fait de ne pas prendre en compte les performances des filières (mais uniquement leur existence même si elles ne sont pas encore déployées
150 mais juste développées en laboratoires) rend le résultat du calcul très favorable. Le taux de recyclabilité et de valorisabilité est surestimé par
151 rapport à la réalité.
- 152
- 153

154 *B. Présentation de Fire Load*

155 Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) : est la quantité totale de chaleur libérée par la combustion d'un kilogramme de combustible, incluant la chaleur
156 sensible et la chaleur latente de vaporisation de l'eau produite.

157 Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) : est la quantité de chaleur libérée par la combustion d'un kilogramme de combustible sous forme de chaleur sensible,
158 en excluant la chaleur de vaporisation de l'eau présente à la fin de la réaction.

159 La charge calorifique (Fire load) : se réfère aux quantités d'énergie, mesurées en joules ou en kilowattheures, susceptibles d'être dégagées en cas d'incendie
160 dans le bâtiment ou le moyen de transport étudié. La charge calorifique est liée à la quantité de matériaux combustibles et aux équipements présents dans
161 l'espace, ainsi qu'au temps nécessaire pour que l'incendie atteigne son point de progression maximum.

162 Les études de risque sur la charge calorifique sont réalisées pour évaluer les risques associés à un incendie et déterminer les mesures de prévention et de
163 protection nécessaires dans le but de minimiser les effets d'un incendie potentiel.

164 Densité de charge calorifique : correspond à la charge calorifique par unité de surface ou de volume (par exemple par m²)

165 Charge Combustible : Masse totale équivalente en bois des matériaux combustibles dans un bâtiment, un espace ou une zone, y compris les meubles et les
166 éléments combustibles de construction, exprimée en kg

167 *1) Normes et Principe*

168 Normes :

- | | | |
|----------------------------|------------------------|-------------|
| 169 • NFPA 1578 | • ISO 13482 | • ISO 29761 |
| 170 • ISO 16139 | • ISO 15483 | • ISO 1716 |
| 171 • ISO 24480 | • ISO 8421 | |
| 172 • ISO 20181 | • ISO 23932 | |

173 Il existe un grand nombre de normes qui évoquent le sujet, mais très peu qui l'aborde de manière globale. La majorité des normes sont principalement
174 dédiées à l'univers du bâtiment. Notre principale problématique étant que nous n'avons pas trouvé de norme ou de méthodologie qui évalue le risque. La
175 majorité des méthodologies se contentent de quantifier la charge calorifique ou la densité. Nous pouvons donc constater que ce manque de méthode reconnue
176 et fiable sur le sujet nous a posé un certain nombre de difficultés.

177 Pour la suite de notre travail, nous allons vous présenter brièvement un exemple méthodologique à travers l'exemple de la norme NFPA 557. Étant donné
178 que ces normes sont très spécifiques, nous nous permettons de les simplifier pour ne conserver que la logique afin de construire notre méthodologie. Une
179 seconde norme que nous vous présenterons dans la suite de cet article est la norme ISO 1716. Cette norme nous permettra de quantifier le PCS et le PCI des
180 matériaux selon une démarche rigoureuse. Après analyse des différentes méthodes ou normes d'essai, nous recommandons fortement l'utilisation de cette norme
181 pour quantifier les pouvoirs calorifiques des matériaux.

182 *2) Principe des normes de sécurité incendie - NFPA 557*

183 Le processus pour implémenter la méthodologie décrite dans la norme comprend plusieurs étapes clés. Dans un premier temps, il est nécessaire de
184 déterminer le type de charge calorifique - distribuée ou localisée - pour le compartiment concerné. À cet effet, il est recommandé de se référer aux sections
185 3.3.5 et 3.3.5.4 de la norme, lesquelles fournissent des définitions de la charge calorifique et des exemples de types de charges calorifiques dans un bâtiment,
186 un espace ou une zone.

187 Une fois le type de charge calorifique déterminé, le chapitre 6 de la norme présente une méthode pour calculer la densité de charge calorifique moyenne
188 ainsi que l'écart-type de la densité de charge calorifique totale. Cette méthode implique l'addition de la densité de charge calorifique moyenne fixe et de la
189 densité de charge calorifique moyenne des contenus pour déterminer la densité de charge calorifique moyenne. De plus, l'écart-type de la densité de charge
190 calorifique totale est calculée à partir des écarts-types de la densité de charge calorifique fixe et de la densité de charge calorifique des contenus. Les valeurs
191

204 de densité de charge calorifique pour les occupations de bureau/entreprise et les bâtiments de construction non combustible peuvent être trouvées dans le
205 chapitre 6.

206 Ensuite, le chapitre 7 de la norme présente une méthode pour déterminer la charge incendie totale dans le compartiment. Cette méthode implique une
207 enquête par la technique de pesée ou d'inventaire, ou une combinaison des deux. Les sections 7.3.1 à 7.3.4 fournissent des informations sur la façon de calculer
208 la charge incendie pour différents types d'éléments, tels que les matériaux non combustibles, les matériaux combustibles limités, les fils électriques, les meubles
209 rembourrés, etc.

210 Après avoir déterminé la densité de charge calorifique et la charge incendie, l'équation décrite dans le chapitre 6 est utilisée pour calculer la densité de
211 charge calorifique de conception, qui est utilisée pour atteindre les critères de performance du risque stipulés par le code applicable. La base de conception de
212 la charge calorifique et de la charge incendie doit être documentée dans un rapport conservé par le propriétaire du bâtiment et fourni à l'autorité compétente,
213 afin de garantir la sécurité des occupants et du bâtiment en cas de changement d'occupation ou de rénovation.

214 Il est également important de réaliser un examen formel de la charge calorifique et de la charge incendie tous les 5 ans, et de fournir ce rapport à l'autorité
215 compétente. Cette section énumère également les exigences pour les réparations, la documentation, les inspections et la maintenance, afin de garantir la sécurité
216 à long terme des occupants et des bâtiments.

217 3) Méthode pour les essais de pouvoir calorifique des matériaux

218 La norme ISO 1716 offre une méthode détaillée pour déterminer le pouvoir calorifique brut de combustion (QPCS) des produits à volume constant dans
219 un calorimètre à bombe. Elle est utilisée pour évaluer la quantité de chaleur libérée lors de la combustion complète d'un échantillon dans des conditions
220 standardisées. L'objectif est d'obtenir une mesure précise de la chaleur de combustion, en tenant compte des pertes de chaleur et de la chaleur latente de
221 vaporisation de l'eau produite.

222 Le principe de la norme repose sur la combustion d'un échantillon de masse spécifiée dans une atmosphère d'oxygène à l'intérieur d'un calorimètre à bombe
223 calibré. La montée de température observée est utilisée pour calculer la chaleur de combustion, en prenant en compte divers facteurs tels que les pertes de
224 chaleur et la condensation de l'eau produite. Cette méthode fournit une valeur absolue de la chaleur de combustion du produit testé, sans considération de la
225 variabilité inhérente du produit.

226 La norme spécifie également les appareils et les réactifs nécessaires pour mener à bien le test. Cela inclut des exigences détaillées pour le calorimètre à
227 bombe, le dispositif de mesure de température, le récipient calorimétrique, le dispositif de mélange, et d'autres équipements connexes. Des retraits sont
228 également prévus pour les éventuels ajouts de combustibles ou d'accessoires afin d'adapter le test aux spécificités des échantillons.

229 La procédure de test comprend des étapes telles que la préparation de l'échantillon, son conditionnement, la détermination de la masse, et la réalisation du
230 test proprement dit sous des conditions spécifiques. Des précautions sont prises pour éviter toute surchauffe ou surpression pouvant entraîner des accidents,
231 notamment en excluant les composants métalliques tels que l'aluminium du test.

232 La norme fournit également des directives pour l'évaluation des échantillons, en particulier pour les produits non homogènes. Elle spécifie la manière de
233 traiter les composants substantiels et non substantiels, ainsi que les règles d'échantillonnage pour assurer la représentativité des résultats.

234 Enfin, la norme comprend des sections sur la calibration de l'appareil, la détermination de l'équivalent en eau, et les conditions de recalibration. Ces
235 procédures visent à garantir la précision et la fiabilité des résultats obtenus à partir du test de combustion.

236 En résumé, la norme ISO 1716 fournit un cadre complet pour déterminer le pouvoir calorifique brut de combustion des produits, offrant des directives
237 détaillées pour chaque étape du processus, depuis la préparation des échantillons jusqu'à l'interprétation des résultats. Son application garantit des mesures
238 précises et reproductibles, essentielles pour évaluer la performance énergétique et environnementale des produits combustibles. Cette norme nous semble être
239 la plus appropriée.

240 C. Lien entre les études de recyclabilité et les études de fire load

241 Selon nos connaissances, il n'existe actuellement aucune étude reliant directement la charge calorifique et le calcul du taux de recyclabilité / valorisabilité
242 (Rcov). Toutefois, après une analyse minutieuse de la documentation sur le sujet, nous avons pu identifier des points de convergence prometteurs.

243 En effet, le "Fire load" permet de mesurer la charge calorifique, c'est-à-dire la quantité de chaleur qui peut être générée lors de la combustion d'un composant
244 ou d'un matériau. Dans le cadre des études de type "Fire Load", l'objectif est de minimiser cette charge calorifique afin d'améliorer le niveau de sécurité du
245 produit.

246 Quant aux normes de recyclabilité et valorisabilité, elles permettent de déterminer le potentiel de fin de vie d'un produit à travers différents scénarios tels
247 que la réutilisation, le recyclage, l'incinération ou encore les déchets finaux. Ces études se basent sur la nomenclature des éléments ou sur des pesées physiques
248 prenant en compte leur masse et leurs matériaux. En sortie nous avons donc deux indicateurs d'éco-conception qui sont le potentiel de recyclabilité et le
249 potentiel de valorisabilité. Mais un indicateur qui lui n'est pas proposé par une norme ou méthode est d'indiquer le potentiel d'énergie récupérable lors du
250 traitement de fin de vie.

251 En considérant ces deux types d'analyses, il serait envisageable de les réaliser simultanément à l'aide d'un seul outil. Cette démarche aurait deux objectifs
252 principaux : d'abord, elle permettrait de mutualiser le temps d'étude et ainsi économiser du temps, et d'autre part, elle permettrait de calculer un tout nouvel
253 indicateur afin de compléter les informations fournies par les normes de recyclabilité et valorisabilité et ainsi améliorer la conception pour la fin de vie des
254 produits.

255

256 IV. METHODOLOGIE

257 Pour rappel, nos objectifs sont de concilier ces deux domaines au travers d'un outil, afin de réaliser un gain de temps, de permettre aux concepteurs d'éco-
258 concevoir leurs produits grâce à un nouvel indicateur de performance et enfin trouver le meilleur compromis entre les deux domaines. Pour ce faire nous allons
259 donc concevoir un outil sous forme de tableau pour la réalisation de ces deux études, l'objectif étant de pouvoir automatiser un certain nombre d'informations
260 et de calculs. Mais avant d'aborder la section dédiée à l'outil, nous souhaitons vous exposer notre réflexion préalable ainsi que la méthodologie que nous avons
261 mis en place.

262 A. Partie recyclabilité et de Valorisabilité

263 La norme de recyclabilité et valorisabilité, nous stipule que nous avons plusieurs parties à définir lors de la création de notre outil et méthode :

- 264 • Les moyens de fixation et définir s'ils sont démontables ou non
- 265 • Les filières et technologies de recyclage disponible en fonction des matières ou famille de matière
- 266 • Et donc définir une liste de matériaux pertinent

267 Nous allons donc définir ces différents aspects dans la suite de cette partie.

269 1) Les modes de fixation

270 Comme le stipule la norme, le mode de fixation va pouvoir déterminer si le composant est démontable ou non. Pour cela la norme fixe trois critères :

- 271 • L'accessibilité ;

- La technologie de fixation ;
- Les technologies de démontage reconnues.

Concernant le premier critère, il s'avère trop complexe de l'analyser uniquement à partir de la documentation disponible. Après une analyse et réflexion approfondie, nous avons formulé l'hypothèse que si une solution peut être mise en œuvre avec des outils standards, cela suggère qu'il n'y a pas de problème d'accessibilité. C'est une hypothèse à vérifier dans la pratique. Une approche potentielle consiste à effectuer une vérification à l'aide d'une maquette numérique. Dans une perspective plus large, en adoptant une approche d'éco-conception, chaque solution de fixation doit être accessible, visible et démontable. Cela répond à plusieurs objectifs, le principal étant de favoriser la réparabilité du produit. Ainsi, à partir de cette constatation, tout produit conçu selon des principes d'éco-conception ne devrait pas présenter de problèmes d'accessibilité concernant ses moyens de fixation.

Pour les technologies de fixation il existe à ce jour un nombre limité de technologies que nous listons ci-dessous, cette liste mériterait d'être plus exhaustive, mais représente la majorité des cas d'emplois :

- Mise en position 289
- Rivetage 292
- Rentré en force
- Clipage 290
- Collage 293
- Vissage 291
- Soudure

Une fois cette liste établie il faut définir si des solutions existent pour réaliser le démontage. Elles doivent être rapides, fiables, faciles à mettre en œuvre et financièrement raisonnables pour chacune d'entre elles.

Après analyse, les solutions suivantes, collage, soudure, rentré en force, seront considérées non-démontables et donc la mise en position, les clipsage, les vissage, rivetage seront considérés démontables.

Voici donc un tableau récapitulatif de cette évaluation :

Type de fixation	Solution de démontage	Rapidité	Fiabilité	Facilité de mise en œuvre	Coût
Mis en position	A la main	Très rapide	Peut-être grippé	Simple	Pas d'investissement
Clips	Pince ou outil de retrait de clip	Rapide	Fiable	Simple	Minime
Vis	Tournevis ou visseuse	Rapide	Fiable	Simple	Minime
Rivet	Un foret ou d'un outil de retrait de rivet	Rapide	Fiable	Moyen	Minime
Colle	Solvant ou par chauffage pour affaiblir la liaison	Long	Fiable	Complexe	Moyen
Soudure	Disqueuse chalumeau	Long	Fiable	Moyen	Moyen
Rentré en force	Presse	Long	Panne mécanique possible	Complexe	Onéreux

307 2) Les matériaux

308 Le second point que la norme nous demande de définir / préciser concerne les matériaux. Nous sommes partis de la liste existante de l'ISO 22628 que
309 nous nous sommes permis d'étoffer pour répondre au mieux au futur besoin d'étude.

310
311 Voici la liste initiale :

312	• Métaux	317	• Matériaux organiques naturels modifiés (MONM), tels que cuir,
313	• Polymères, à l'exclusion des élastomères	318	bois, carton et textiles de coton
314	• Élastomères	319	• Autres (composants, matériaux ou les deux, pour lesquels une
315	• Verre	320	décomposition détaillée des matériaux ne peut pas être établie, tels
316	• Fluides	321	que composants électroniques, électrique)

322
323 Et voici notre liste de matériaux :

324	• Métaux ferreux	347	• Polyétherimide	370	• Diesel
325	• Aluminium	348	• Autres thermoplastiques	371	• Graisse
326	• Laiton / Bronze / Magnésium	349	• Époxy	372	• Huile
327	• Cuivre	350	• Mélamine-formaldéhyde	373	• Autres fluides
328	• Autres métaux	351	• Polyisocyanurate	374	• Béton
329	• EPDM	352	• Polyuréthane	375	• Sable
330	• Caoutchouc naturel	353	• Mousse de polyuréthane	376	• Cuir
331	• Caoutchouc nitrile	354	• Colle et scellant	377	• Textile naturel
332	• Polychloroprène	355	• Peinture et revêtement	378	• Liège
333	• Silicone	356	• Autres thermodurcissables	379	• HPL (Stratifié haute pression)
334	• Polyuréthane thermoplastique	357	• Silicone (GF)	380	• Bois massif
335	• Pneus	358	• Autres élastomères renforcés	381	• Contreplaqué
336	• Autres élastomères	359	• PA (GF)	382	• Contreplaqué sandwich
337	• Acrylonitrile butadiène styrène	360	• Fibre synthétique thermoplastique	383	• Autres sources renouvelables
338	• Polyamide	361	• Fibre naturelle thermoplastique	384	• Batterie / Condensateurs
339	• Polycarbonate	362	• Polyester SF	385	• Câbles électriques : Fibre optique
340	• Polyéthylène	363	• EP SF	386	• Autres EEE
341	• Polytéraphthalate d'éthylène	364	• Phénolique SF	387	• Laine de verre
342	• Polypropylène	365	• Fibre synthétique thermodurcissable	388	• Laine de roche
343	• Polytetrafluoroéthylène	366	• Fibre naturelle thermodurcissable	389	• Autre laine minérale
344	• Polychlorure de vinyle	367	• Renforcé	390	• Céramiques
345	• Polyétheréthercétone	368	• Stratifié	391	• Autres matériaux inorganiques
346	• Cétone d'éther de polyaryle	369	• Agent réfrigérant		

392
393
394 Vous pouvez donc voir que nous avons considérablement détaillé la liste pour représenter au maximum les produits que nous avons analysés par le passé.
395 Celle-ci est basée sur la liste issue de la norme que nous avons détaillée, vous pouvez identifier chacune des catégories. Elle a été détaillée pour correspondre
396 au mieux aux filières de recyclage et permettre une meilleure analyse pour la charge calorifique. Les matériaux similaires aux deux critères ont été regroupés
397 pour alléger la liste. Cette liste pourrait être perfectible et n'est basée sur aucune méthode de sélection reconnue ou normée, cela pourrait être un axe
398 d'amélioration dans le cadre de la fiabilisation de notre méthode.

399
400
401

402 3) Les filières et technologies de recyclage

403 Après avoir accompli cette tâche, nous avons dû déterminer la faisabilité d'une solution de recyclage ou d'incinération pour la France métropolitaine. Il
404 convient de souligner que nous nous concentrons spécifiquement sur la France métropolitaine, étant donné la nécessité de spécifier notre méthode en
405 fonction de la localisation. En effet, les filières de gestion en fin de vie varient considérablement d'une région du monde à l'autre, et donc, les valeurs
406 calculées varient également.

407 À ce jour, presque toutes les matières inventoriées disposent d'une solution technologique de recyclage ou d'incinération, d'autant plus que les normes
408 définissent une solution comme viable dès lors qu'elle est possible à l'échelle d'un laboratoire. Cette approche vise à faciliter le choix des procédés, car il peut
409 s'écouler de nombreuses années entre la conception et la fin de vie du matériel, ce qui signifie que les filières existantes ne reflètent pas nécessairement ce
410 qui sera disponible à la fin de vie du produit. Cela suppose donc une hypothèse : si la technologie est existante à l'échelle du laboratoire aujourd'hui, elle sera
411 nécessairement déployée au moment de la fin de vie du produit. Toutefois, comme toute hypothèse, celle-ci n'est pas fiable et mériterait donc une étude de
412 sensibilité à cet égard, ou au minimum une sélection des procédés via d'autres critères. Pour ce faire, nous pourrions calculer le coût à l'échelle nationale, et
413 donc le coût de revente de la matière recyclée ou de l'énergie récupérée, ou encore la taille du gisement dans x années.

414 Pour déterminer si une filière de fin de vie peut exister, il est nécessaire de vérifier un certain nombre de critères. Ces critères incluent l'existence d'une
415 technologie, l'intérêt économique de la matière ou de l'énergie après traitement, la facilité de mise en œuvre, le coût, et la taille du gisement potentiel à
416 recycler ou à valoriser.

417 Nous n'avons pas entrepris cette démarche car la quantité d'informations disponibles est insuffisante et nous n'avons pas eu le temps de contacter les
418 professionnels du domaine pour approfondir ce sujet. Nous avons donc utilisé nos propres connaissances du sujet ainsi que d'autres informations pour
419 déterminer ce qui était recyclable et valorisable du point de vue énergétique.

420 Une piste de réflexion que nous n'avons pas eu le temps d'approfondir consiste à calculer plusieurs indicateurs : un avec les solutions actuellement
421 déployées et un autre avec les technologies existantes à l'échelle du laboratoire.

422 Pour voir comment nous avons catégorisé les matériaux, nous vous invitons à voir la partie sur l'outil. Vous pourrez y trouver une visualisation globale
423 de notre base de données par matière.

424
425 Cette étape marque donc la fin de nos recherches sur la partie de recyclabilité et valorisabilité nous disposons maintenant de tous les éléments pour créer
426 notre outil qui va automatiser le calcul. Un aspect que nous n'avons pas détaillé est l'ajout également des données de l'ADEME sur les MPS (matière premier
427 secondaire) cela permet d'ajouter facilement des informations supplémentaires notre outil.

428 B. Partie du fire load

429 Pour la liste de matière, dans un souci de cohérence nous avons décidé de repartir de la même liste que pour la partie précédente.

430

431 Pour la composante liée au pouvoir calorifique, la recherche s'est avérée plus complexe. Malgré la profusion de normes détaillant les méthodologies d'étude
432 et d'évaluation des risques, aucune ne dispose d'une base de données sur le pouvoir calorifique spécifique (PCS) ou le pouvoir calorifique inférieur (PCI) des
433 matériaux. Par conséquent, nous ne disposons d'aucune donnée fiable pour cette section. Nous préconisons de soumettre l'ensemble des matériaux définis
434 précédemment à des tests conformes à la norme ISO 1716, une norme que nous avons identifiée dans notre revue de littérature.

435 Nous avons entrepris de rechercher des valeurs pour chacun des matériaux figurant dans notre liste. Les valeurs trouvées sont de nature générale, car les
436 matériaux sélectionnés dans notre liste ne sont pas des matériaux spécifiques, mais plutôt des familles ou des types de matériaux. Idéalement, il serait nécessaire
437 d'utiliser des données spécifiques pour chaque matériau (au sens chimique du terme) et de les soumettre à des tests conformes à la norme ISO 1716. Cependant,
438 en raison de contraintes budgétaires, nous n'avons pas pu réaliser ce travail. Même en l'absence de contraintes budgétaires, un autre facteur limiterait cette
439 approche : le nombre considérable de matériaux à tester. Cette démarche serait infinie et complexifierait inutilement l'étude.

440 Par conséquent, nous avons opté pour l'utilisation de valeurs génériques de matériaux, en tenant compte de la présence d'additifs pouvant modifier le
441 comportement au feu des matériaux. Déterminer une valeur moyenne de la réduction du pouvoir calorifique due à l'ajout d'un agent retardant de flamme ou autre
442 additif est difficile en raison des nombreuses variables impliquées. Cependant, selon certaines études et observations empiriques, l'ajout d'agents retardant de
443 flamme peut généralement réduire le pouvoir calorifique d'un matériau de l'ordre de 5 à 20 %. Nous avons donc choisi d'appliquer une valeur moyenne de 12 %
444 de réduction du pouvoir calorifique en présence d'un agent retardant de flamme.

445 Pour consulter les valeurs que nous avons attribuées aux différents matériaux, nous vous invitons à vous référer à la section sur l'outil, où vous trouverez une
446 représentation visuelle de notre base de données par matériau.

447

448

449 Afin d'évaluer le risque, nous débutons par la quantification de l'ensemble des charges calorifiques de chaque composant. Ces valeurs sont ensuite agrégées
450 pour obtenir la charge calorifique totale, puis divisées par la masse totale pour déterminer la charge calorifique moyenne (exprimée en MJ/kg). Ces premières
451 étapes nous permettent de calculer nos deux principaux indicateurs, mais le travail ne s'arrête pas là ; il est crucial d'évaluer désormais les risques inhérents à
452 notre système. Deux principes doivent être pris en compte : l'aspect comparatif des valeurs d'une étude à l'autre et la possibilité de les cumuler, car l'analyse peut
453 être menée par sous-système avant d'être consolidée au niveau global.

454

455 Pour évaluer le risque, nous nous sommes notamment inspirés de la norme NFP 557, qui quantifie le risque lié à la charge calorifique par zone ou
456 compartiment. Cette approche semble pertinente, car elle vise à évaluer le risque par zone en cas de départ de feu, plutôt que de se baser sur la charge calorifique
457 totale, qui ne serait pas représentative de ce risque.

458 Par exemple, si un système comporte deux compartiments séparés par une paroi métallique, il convient de considérer chaque compartiment individuellement
459 dans notre étude. En cas de feu dans le premier compartiment, celui-ci ne se propagera pas au second. Ainsi, deux sous-systèmes distincts doivent être évalués
460 pour déterminer le risque associé à leur charge calorifique. Cette approche nous permet d'obtenir des valeurs de charge calorifique totale et moyenne par zone de
461 risque, ce qui facilite notre analyse des risques dans des conditions représentatives de notre système.

462

463 Pour compléter les informations nécessaires à la réalisation de nos études de risque, nous envisageons de fournir un diagramme de Pareto. L'objectif est
464 d'identifier aisément les principaux équipements de notre système contribuant à la charge calorifique totale, afin de cibler les composants problématiques.

465

466 Enfin, la dernière étape consiste à évaluer le niveau de risque associé à la charge calorifique moyenne de notre système ou de nos sous-systèmes.

467

468 L'échelle d'évaluation du risque lié à la charge calorifique moyenne, exprimée en MJ/kg, peut être définie en fonction de plusieurs facteurs. Voici l'approche
469 retenue pour définir cette échelle :

470

- 471 1. Identification des plages de valeurs : Commencez par identifier les plages de valeurs de charge calorifique moyenne en MJ/kg que vous souhaitez
472 évaluer. Par exemple, vous pourriez diviser les valeurs en plages comme 0-10 MJ/kg, 10-20 MJ/kg, 20-30 MJ/kg, etc.
- 473 2. Attribution des niveaux de risque : Pour chaque plage de valeurs, attribuez un niveau de risque correspondant. Par exemple :
 - 474 • Plage 0-10 MJ/kg : Risque Faible
 - 475 • Plage 10-20 MJ/kg : Risque Modéré
 - 476 • Plage 20-30 MJ/kg : Risque Élevé
 - 477 • Et ainsi de suite, en fonction de vos besoins spécifiques et des seuils de risque que vous souhaitez établir.
- 478 3. Détermination des critères de classification : Pour chaque niveau de risque, déterminez les critères spécifiques qui définissent ce niveau. Ces
479 critères peuvent inclure des considérations telles que la vitesse de propagation du feu, la génération de fumée, la toxicité des gaz émis, etc.

480

481

482 En résumé, l'échelle d'évaluation du risque de la charge calorifique moyenne devrait être basée sur des plages de valeurs spécifiques, avec des niveaux de
483 risque attribués à chaque plage en fonction de critères définis. Cette échelle doit être flexible et sujette à validation et ajustement en fonction des besoins et des
484 évolutions dans le domaine de l'évaluation des risques incendie.

485

486

487

488 C. L'outil :

489 Dans le but de réaliser nos objectifs, qui consistent à concilier deux domaines distincts au moyen d'un outil, afin de gagner du temps, de permettre aux
 490 concepteurs d'éco-concevoir leurs produits grâce à un nouvel indicateur de performance, et enfin de trouver le meilleur compromis entre ces deux domaines, nous
 491 proposons la mise en place d'un outil permettant de calculer un "indice de compromis", noté NC. La valeur de cet indice détermine si le produit, le matériau ou
 492 la technologie étudiée prend en compte de manière équitable les aspects de charge calorifique moyenne et de taux d'incinération total (pourcentage de masse
 493 combustible sur la masse totale).

494 Pourquoi avons-nous choisi d'utiliser la charge calorifique moyenne plutôt que la charge calorifique totale ? Nous avons fait ce choix car cela permet de
 495 comparer les résultats d'une étude à une autre. En effet, la charge calorifique totale dépend de l'inventaire du produit réalisé, et par conséquent, la charge calorifique
 496 d'un produit A, pesant 10 kg, ne sera pas la même que celle obtenue lors de l'étude d'un train ou d'un avion dans son ensemble.

497 Quant au taux d'incinération total, pourquoi ne pas avoir utilisé le taux de valorisabilité ? Si vous vous souvenez de ce que nous avons défini au début de cet
 498 article, le taux de valorisabilité intègre les composants recyclables et réutilisables. Or, les produits réutilisables et recyclables ne sont pas nécessairement
 499 incinérables (par exemple, les métaux). Il n'aurait donc pas de sens d'utiliser cette valeur, car elle ne répond pas totalement à notre besoin. Notre objectif en
 500 utilisant cette matrice est de définir le meilleur compromis entre la charge calorifique moyenne pour réduire le risque et optimiser la fin de vie de notre produit,
 501 en garantissant la possibilité de récupérer un maximum d'énergie.

502 Pour ce faire, nous nous sommes inspirés de la matrice d'évaluation des risques. Il s'agit d'un tableau à double entrée qui permet d'évaluer le niveau de risque
 503 en fonction de sa probabilité d'occurrence et de sa gravité. Pour construire ce tableau, une échelle de gravité et une échelle de probabilité sont établies en fonction
 504 du niveau d'exigence de l'analyse.

505 Ainsi, dans cet article, nous mettons en relation la charge calorifique moyenne et le taux d'incinération total afin d'obtenir une valeur de NC. Pour simplifier
 506 notre analyse, nous avons établi une échelle de quatre niveaux pour chacun de nos facteurs. La valeur 1 correspond à un intervalle de valeurs optimal, tandis que
 507 la valeur 4 correspond à un intervalle de valeurs pessimistes.

$$NC = N_{Cal. Power} \times N_{Inc}$$

Avec

- $N_{Cal. Power}$: le niveau du pouvoir calorifique
- N_{Inc} : le niveau d'incinération

511 La valeur du NC varie ainsi entre 1 et 16. L'échelle d'incinération est construite en fonction des objectifs de l'entreprise. Il est à noter que dans le calcul de
 512 la valorisabilité suivant ISO 22628, des pourcentages élevés sont faciles à atteindre. Ainsi, nous proposons une échelle qui peut s'appliquer à un large éventail
 513 de cas. Ci-dessous, vous trouverez une illustration de l'indice de compromis :

N_{Rcov}	1 = Intervalle optimiste (entre 95% et 100%)	2=Intervalle de valeurs intermédiaires majorés (généralement entre 90% et 95%)	3=Intervalle de valeurs intermédiaires minorés (généralement entre 85% et 90%)	4=Intervalle pessimiste (généralement moins de 85%)
$N_{Cal. Power}$				
4= intervalle correspondant au pouvoir calorifique élevé	NC = 4	NC = 8	NC = 12	NC = 16
3 = Intervalle comprenant des valeurs intermédiaires majoré	NC = 3	NC = 6	NC = 6	NC = 12
2 = Intervalle comprenant des valeurs intermédiaires minorés	NC = 2	NC = 4	NC = 6	NC = 8
1= Intervalle correspondant au pouvoir calorifique le plus bas	NC = 1	NC = 2	NC = 3	NC = 4

Tableau 2 : Détermination de l'indice de Compromis

Trois cas se présente :

- Si NC est inférieur ou égale à 3 cela signifie que les objectifs de sécurité et de valorisabilité sont respectés de façon optimales
- Si NC est compris entre 4 et 6 cela signifie que les objectifs ont-été pris en compte de façon équitable
- Si NC est supérieur ou égale à 8 cela signifie que les objectifs d'un type d'étude sont défavorisés par rapport à l'autre.

521

522 1) Tableau / Plan d'amélioration

523 Enfin, le dernier outil que nous souhaitons proposer est un plan d'amélioration. Cet outil génère de manière automatisée des conseils pour l'optimisation
 524 du système en fonction des résultats obtenus précédemment, tout en recherchant constamment le meilleur compromis entre nos deux domaines d'intérêt.

525 Ce tableau fonctionne sous le format d'une nomenclature et reprend la même structure que l'arborescence inscrite dans l'onglet « Bill of Materials ». À
 526 cette structure, nous avons ajouté trois colonnes supplémentaires. La première colonne correspond au statut d'éco-conception, indiquant si le composant est
 527 démontable (oui ou non) et si le matériau est réutilisable, recyclable, valorisable, ou s'il n'a aucune de ces propriétés. L'outil renseigne automatiquement une
 528 valeur dans chaque cellule, en fonction des différents paramètres choisis lors de l'étude.

529 La seconde colonne indique le statut de la charge calorifique. Elle précise les principaux équipements combustibles et le pourcentage de la charge
 530 calorifique qu'ils représentent par rapport à la charge globale, ainsi que leur localisation dans un compartiment. De la même manière, toutes les valeurs sont
 531 automatisées en fonction des données saisies précédemment.

532 Enfin, dans la dernière colonne, l'outil effectue une synthèse des informations des deux premières colonnes pour formuler des conseils d'amélioration du
 533 produit. Par exemple, si un produit représente la majorité de la charge calorifique et qu'il est totalement recyclable, l'outil conseillera soit d'utiliser des additifs
 534 pour réduire cette charge, soit de remplacer le matériau par un autre ayant une charge calorifique plus faible mais restant recyclable. On pourrait même envisager
 535 d'aller plus loin en programmant l'outil pour qu'il propose un nouveau matériau. En résumé, cette dernière colonne fournit des indications précieuses pour les
 536 équipes projet afin d'améliorer la solution dans sa globalité, tout en optimisant les deux indicateurs.

Nous vous invitons à consulter, dans le chapitre suivant, la dernière illustration qui correspond à ce tableau.

DESIGNATION	STANDARD ENTRY	PCR Material Family	type of end of life		ISO 22628 Category		MPS		Fire load (source internet) Essai non réaliser suivant la norme ISO1716
			Recyclable	Incinerable	Dismantlable	Non Dismantlable	ADEME 2010	ADEME 2019	
Refrigerating agent	Refrigerating_agent	Acid, cooling agents or similar	Yes	Yes	mP	mP	0,0%	0,0%	
Silicone (GF)	Silicone_GF	Composites	No	Yes	mTe	mTe	0,0%	0,0%	
Other elastomers reinforced	Other_elastomers_reinforced	Composites	No	Yes	mTe	mTe	0,0%	0,0%	
PA (GF)	PA_GF	Composites	No	Yes	mTe	mTe	0,0%	0,0%	23
Other Thermoplastic Synthetic Fiber	Thermoplastic_Synthetic_fiber	Composites	No	Yes	mTe	mTe	0,0%	0,0%	
Other Thermoplastic Natural Fiber	Thermoplastic_Natural_fiber	Composites	No	Yes	mTe	mTe	0,0%	0,0%	
Reinforced polyester (Synthetic Fiber)	Polyester_SF	Composites	No	Yes	mTe	mTe	0,0%	0,0%	
Reinforced epoxy (Synthetic Fiber)	EP_SF	Composites	No	Yes	mTe	mTe	0,0%	0,0%	
Reinforced phenolic (Synthetic Fiber)	Phenolic_SF	Composites	No	Yes	mTe	mTe	0,0%	0,0%	
Other Thermoset Synthetic Fiber	Thermoset_Synthetic_fiber	Composites	No	Yes	mTe	mTe	0,0%	0,0%	
Other Thermoset Natural Fiber	Thermoset_NF	Composites	No	Yes	mTe	mTe	0,0%	0,0%	
EPDM	EPDM	Elastomers	No	Yes	mTe	mTe	0,0%	0,0%	43
Natural rubber	NR	Elastomers	Yes	Yes	mD	mTr	0,0%	0,0%	42,3
Nitrile rubber	NBR	Elastomers	Yes	Yes	mD	mTr	0,0%	0,0%	33,1
Polychloroprene	CR	Elastomers	No	Yes	mTe	mTe	0,0%	0,0%	16,1
Silicone	Silicone	Elastomers	Yes	Yes	mD	mTr	0,0%	0,0%	24,4
Thermoeastic polyurethane	TPU	Elastomers	Yes	Yes	mD	mTr	0,0%	0,0%	35
Tyres	Tyres	Elastomers	Yes	Yes	mP	mP	0,0%	0,0%	42
Other elastomers	Other_elastomers	Elastomers	No	Yes	mTe	mTe	0,0%	0,0%	33,7
Battery / Capacitors	Battery / Capacitors	Electric and electronic equipment	Yes	No	mP	mP	0,0%	0,0%	
Electric cables: Optical Fiber	Cables_Optical Fiber	Electric and electronic equipment	No	Yes	mTe	mTe	0,0%	0,0%	
Other EEE	Other_EEE	Electric and electronic equipment	Yes	No	mD	mM	0,0%	0,0%	
Toughened glass	Toughened	Glass	Yes	No	mD	mTr	63,1%	61,0%	0
Ferrous metals (Iron ; Stainless steel ; Steel)	Ferrous metals	Metals (Fe)	Yes	No	mD	mM	40,9%	47,0%	0
Aluminum	Aluminum	Metals (Non-Fe)	Yes	No	mD	mM	48,2%	51,0%	0
Brass / Bronze / Magnesium	Brass / Bronze / Magnesium	Metals (Non-Fe)	Yes	No	mD	mM	46,4%	46,4%	0
Copper	Copper	Metals (Non-Fe)	Yes	No	mD	mM	35,6%	35,6%	0
Other metals	Other_metals	Metals (Non-Fe)	Yes	No	mD	mM	46,4%	46,4%	0
Glass wool	Glass_wool	Mineral wool	Yes	Yes	mD	mTr	0,0%	0,0%	1,8
Rock wool	Rock_wool	Mineral wool	Yes	Yes	mD	mTr	0,0%	0,0%	1
Other mineral wool	Other_Mineral_wool	Mineral wool	Yes	Yes	mD	mTr	0,0%	0,0%	1,4
Concrete	Concrete	MONM (Concrete)	Yes	No	mD	mM	0,0%	0,0%	0
Other renewable	Other_Renewables	MONM (Other)	Yes	Yes	mD	mTr	0,0%	0,0%	0,466666667
Sand	Sand	MONM (Sand)	Yes	No	mP	mP	0,0%	0,0%	0
Leather	Leather	MONM (Textile)	No	Yes	mTe	mTe	0,0%	0,0%	17
Natural textile	Natural_textile	MONM (Textile)	Yes	Yes	mD	mTr	0,0%	0,0%	23
Cork	Cork	MONM (Wood)	Yes	Yes	mD	mTr	0,0%	0,0%	
High pressure laminate	HPL	MONM (Wood)	No	Yes	mTe	mTe	0,0%	0,0%	19
Plain wood	Plain_wood	MONM (Wood)	Yes	Yes	mD	mTr	0,0%	0,0%	21
Plywood	Plywood	MONM (Wood)	Yes	Yes	mD	mTr	0,0%	0,0%	19
Sandwich plywood	Sandwich_plywood	MONM (Wood)	No	Yes	mTe	mTe	0,0%	0,0%	
Diesel	Diesel	Oil, grease or similar	Yes	Yes	mP	mP	0,0%	0,0%	44,8
Grease	Grease	Oil, grease or similar	Yes	Yes	mP	mP	0,0%	0,0%	
Oil	Oil	Oil, grease or similar	Yes	Yes	mP	mP	0,0%	0,0%	
Other fluids	Other_fluids	Oil, grease or similar	Yes	Yes	mP	mP	0,0%	0,0%	44,8
Ceramics	Ceramic	Other inorganic materials	No	No	D	D	0,0%	0,0%	0
Other inorganic materials	Other_inorganic_materials	Other inorganic materials	No	No	D	D	0,0%	0,0%	0
Acrylonitrile butadiene styrene	ABS	Polymers (Thermoplastics)	Yes	Yes	mD	mTr	5,3%	6,5%	36
Polyamide	PA	Polymers (Thermoplastics)	Yes	Yes	mD	mTr	5,3%	6,5%	38
Polycarbonate	PC	Polymers (Thermoplastics)	Yes	Yes	mD	mTr	5,3%	6,5%	30,4
Polyethylene	PE	Polymers (Thermoplastics)	Yes	Yes	mD	mTr	5,3%	6,5%	46
Polythylene terephthalate	PET	Polymers (Thermoplastics)	Yes	Yes	mD	mTr	5,3%	6,5%	15,3
Polypropylene	PP	Polymers (Thermoplastics)	Yes	Yes	mD	mTr	5,3%	6,5%	46
Polytetrafluoroethylene	PTFE	Polymers (Thermoplastics)	Yes	Yes	mD	mTr	5,3%	6,5%	3,7
Polyvinylchloride	PVC	Polymers (Thermoplastics)	Yes	Yes	mD	mTr	5,3%	6,5%	30
Polyetheretherketone	PEEK	Polymers (Thermoplastics)	Yes	Yes	mD	mTr	5,3%	6,5%	12,4
Polyetherketoneketone	PEKK	Polymers (Thermoplastics)	Yes	Yes	mD	mTr	5,3%	6,5%	8,7
Polyetherimide	PEI	Polymers (Thermoplastics)	Yes	Yes	mD	mTr	5,3%	6,5%	11,8
Other Thermoplastics	Other_thermoplastics	Polymers (Thermoplastics)	Yes	Yes	mD	mTr	5,3%	6,5%	25,3
Epoxy	Epoxy	Polymers (Thermosets)	No	Yes	mTe	mTe	0,0%	0,0%	20
Melamine formaldehyde	MF	Polymers (Thermosets)	No	Yes	mTe	mTe	0,0%	0,0%	18,5
Polycyanurate	PIR	Polymers (Thermosets)	Yes	Yes	mD	mTr	0,0%	0,0%	15
Polyurethane	PUR	Polymers (Thermosets)	No	Yes	mTe	mTe	0,0%	0,0%	30
Polyurethane foam	PUR_foam	Polymers (Thermosets)	Yes	Yes	mD	mTr	0,0%	0,0%	27
Glue & Sealant	Glue_Sealant	Polymers (Thermosets)	No	Yes	mTe	mTe	0,0%	0,0%	
Paint & Coating	Paint_Coating	Polymers (Thermosets)	No	Yes	mTe	mTe	0,0%	0,0%	
Other Thermosets	Other_thermosets	Polymers (Thermosets)	No	Yes	mTe	mTe	0,0%	0,0%	22,1
Laminated glass	Laminated	Safety glass	Yes	No	mD	mTr	63,1%	61,0%	0

539

540

541

542

543
544
545
546
547
548
549
550

V. RESULTAT

Dans cet article nous allons prendre pour exemple un Canapé UPSON.

Nous proposons un outil créé grâce au logiciel Microsoft Office Excel. Notre outil regroupe les points suivants :

- Description matériaux : désignation, masse, quantité, matière
- Détermination du niveau de valorisabilité : Calcul du taux de valorisabilité : masse partielle, l'accessibilité, le type de fixation, et la technologie de démontage reconnue
- Détermination du niveau du pouvoir calorifique : Calcul du Fire load, Pouvoir calorifique, charge calorifique, etc.
- Indice de compromis

551
552
553
554

A. Description du produit étudié

Dans notre exemple, ce canapé est produit par Sector. Ci-dessous le détail de ses matériaux

Tableau 3 : Nomenclature Canapé UPSON

niveau	Composant	Matière	Processus	Masse	Quantité
0	canapé 2 places				1
1	pieds	PVC	injection	0.02	4
1	structure				1
2	structure	bois	sciage / ponçage	40	1
2	équerre	inox	emboutissage	0.14	12
2	vis	inox		0.002	100
1	assise				1
2	élastique	élasthanne	agrafé	1.01	1
2	mousse	PU	collé	4	1
2	tissus	coton	couture + agraffer	2	1
2	agrafé	inox	-	0.001	200
1	dossier / cousin				2
2	mousse	PU		2.4	1
2	tissue	coton	couture	1	1

555
556
557

B. Resultats de l'étude et visuel de l'outil:

Voici des visuelles de notre outils, vous pourrez également voir l'analyse du canapé cité plus haut

	Material record and recyclability potential template	Document Reference:	Application date : April 2024
Written by:	Aymerick YARD / Ecodesign Expert & F&S		
Approved by:	Orders, by his/her signature, the implementation of the document.		
To be used as is	1		

Purpose

This file shall be used to realise material balance and to calculate their Recyclability and Recoverability potential. It will also be used to quantify the heat load.

Scope of application

The present document is applicable to all Product

Document approval AVVA cycle

	NAME	FUNCTION	DATE	SIGNATURE
Author				
Verifier 1				
Verifier 2				
Approbator				

558
559

Nom de l'onglet : Front Page

Recyclability and Recoverability note

Recyclability and recoverability potentials of the system

	Kg	%
Total weight of System	56,07	100%
Total inventory weight	56,07	100,00%
Total of non inventoried	0,00	0,00%

	ISO 22628 Calculation
Recyclability rate	82,5%
Incineration rate of non-recyclable products	17,5%
Total incineration rate	96,3%
Recovery rate	100,0%

Percentage of Recycled Content (MPS)		
Mean value	Weight	% of Weight
13%	2,16	3,9%

Material class in compliance with ISO 22628 (kg)		
mP	0,00	56,07
mD	46,26	
mM	0,00	
mTr	0,00	
mTe	9,81	
D	0,00	

Material class in compliance with ISO 22628		
UNITS	Kg	%
Recyclable (Rcyc)	46,26	82,50%
Recovery (Rcov)	56,07	100,00%
Waste	0,00	0,00%

Evaluation Score

	Incineration rate MJKg	1= more than 0,95	2= between 0,9 and 0,95	3= between 0,85 and 0,9	4= less than 0,85
		Ncal	95%	90%	85%
4= more than 9000	12000	NC = 4	NC = 8	NC = 12	NC = 16
3= between 1200 and 9000	9000	NC = 3	NC = 6	NC = 6	NC = 12
2= between 600 and 1200	1200	NC = 2	NC = 4	NC = 6	NC = 8
1= less than 600	600	NC = 1	NC = 2	NC = 3	NC = 4

Statut	NC	Explication
Optimal	NC < 4	If NC is less than or equal to 3, it means that the safety and usability objectives are optimally respected.
Disadvantaged	NC > 8	If NC is greater than or equal to 8, it means that the objectives of one type of study are disadvantaged compared to the other.
Fair	3 < NC < 7	If NC is between 4 and 6, it means that the objectives have been taken into account equally.

NC / Product compliance :	Optimal
----------------------------------	---------

	Value	
N Inc	1	Si NC est en vert, la mise en place de mesures additionnelles n'est pas nécessaire Si NC est jaune, la mise en place de mesures sont à est recommandée Si NC est rouge, la mise en place de mesure est nécessaire
N CalPower	3	
NC value	3	
NC Reference	NC < 4	

Nom de l'onglet : Dash Bord

Improvement plan

LVL	ID	Component designation	Material Family	Type of fixation	Weight per material (kg)	Quantity of parts / Assembly or Sub-assembly	Status on ecodesign	Status on Fire Load	Possibility for improvement action
0	ref1	canapé 2 places				1,00			
1	ref2	pieds	PVC	Screwing	0,02	4,00	Removable component therefore reusable and recyclable	ok	ok
1	ref3	structure - assemblage				1,00			
2	ref4	structure	Plain_wood	Screwing	40,00	1,00	Removable component therefore reusable and recyclable	68% of the combustible mass must be reduced	To see to replace the material with a material always recyclable To see to treat the materials to reduce are PCS
2	ref5	équerre	Ferrous metals	Screwing	0,14	12,00	Removable component therefore reusable and recyclable	ok	ok
2	ref6	vis	Ferrous metals	Screwing	0,00	100,00	Removable component therefore reusable and recyclable	ok	ok
1	ref7	assise - assemblage				1,00			
2	ref8	élastique	Other_elastomers	Fitting	1,01	1,00	Non-recyclable but insertable component		
2	ref9	mousse 1	PUR	Fitting	4,00	1,00	Non-recyclable but insertable component	9,7% of the combustible mass must be reduced	to see to replace the material with a recyclable material if there is no change in material, do not affect the calorific value with an additive (flame retardant)
2	ref10	tissue 1	Natural_textile	Gluing	2,10	1,00	Recyclable but not reusable component	ok	ok
2	ref11	agrafé	Ferrous metals	Clips	0,00	200,00	Removable component therefore reusable and recyclable	ok	ok
1	ref12	dossier / cousin - assemblage				2,00			
2	ref13	mousse 2	PUR	Fitting	2,40	1,00	Non-recyclable but insertable component	11,7% of the combustible mass must be reduced	to see to replace the material with a recyclable material if there is no change in material, do not affect the calorific value with an additive (flame retardant)
2	ref14	tissue 2	Natural_textile	Gluing	1,00	1,00	Recyclable but not reusable component	ok	ok

Nom de l'onglet : Dash Bord

567
568
569

VI. DISCUSSION ET PERSPECTIVES

A. Discussion

L'analyse des résultats obtenus au cours de cette étude révèle de nombreux points pertinents quant à notre approche innovante visant à concilier éco-conception et sécurité incendie.

Innovation Apportée: L'outil Excel développé est une véritable avancée, car il permet de mutualiser le travail et de générer des gains de temps substantiels. La possibilité de réaliser une double étude sans les contraintes de réaliser deux études distinctes montre des bénéfices en termes de productivité et de cohérence des données.

Nouveaux Indicateurs d'Éco-Conception: Cette recherche a permis de créer de nouveaux indicateurs, notamment en ce qui concerne la fin de vie des produits. Les indicateurs actuels (réparabilité, démontabilité, pourcentage de valorisabilité) bien que pertinents, ne capturent pas l'ensemble des paramètres clés. Les nouveaux indicateurs que nous avons développés apportent une perspective plus complète et plus fiable pour faire des choix éclairés en matière d'éco-conception.

Difficultés Rencontrées: Nous avons identifié plusieurs défis techniques et méthodologiques. Le principal obstacle réside dans l'absence de base de données exhaustive pour certaines informations clés, notamment les valeurs de pouvoir calorifique spécifiques aux matériaux. De plus, la partie "Fire Load" de notre outil souffre d'un manque de retour d'expérience et nécessite davantage de tests pour validation.

Limites de l'Étude: Certaines limitations de la norme ISO 22628 ont une incidence sur notre travail. Par exemple, la norme ne prend pas correctement en compte les performances réelles des filières de recyclage ou les éléments d'un produit qui, bien que démontables, ne sont pas effectivement recyclés. Les taux de recyclabilité et de valorisabilité estimés peuvent être surestimés, ce qui pose une question de fiabilité des résultats.

B. Perspectives

Approfondissement des Indicateurs: Une voie d'approfondissement consiste à affiner et valider nos nouveaux indicateurs par des études de cas supplémentaires et des collaborations avec des partenaires industriels. Une inclusion plus rigoureuse des données spécifiques relatives aux matériaux, notamment par la norme ISO 1716, pourrait renforcer la précision de nos modèles.

Extension de la Méthode: La prochaine étape de cette recherche pourrait viser une standardisation et une validation industrielle. Cela implique de tester notre outil sur un plus grand échantillon de produits et dans diverses industries au-delà du secteur ferroviaire. Des études de sensibilité et des analyses détaillées de coûts et bénéfices devraient également être menées.

Améliorations Techniques: Nos recherches futures impliqueront le perfectionnement de l'outil Excel actuel pour intégrer de nouvelles fonctionnalités automatisées et améliorer l'interface utilisateur pour une simplicité et une efficacité accrues. En particulier, l'intégration des retours d'expérience et des tests supplémentaires dans la partie "Fire Load" est cruciale.

Perspective Multidisciplinaire: Il serait pertinent d'explorer les synergies entre les études de sécurité incendie et les études environnementales dans d'autres contextes industriels. Des partenariats interdisciplinaires pourraient conduire à des découvertes innovantes et offrir des solutions globales aux défis de la durabilité et de la sécurité.

Impact Sociétal: Cette démarche, orientée vers un dialogue pragmatique entre éco-conception et gestion du risque d'incendie, pourrait servir de modèle pour les politiques environnementales et industrielles. La sensibilisation accrue et des politiques incitatives en matière de recherche et développement seront essentielles pour adopter ces nouvelles méthodes de manière plus large.

Invitation au Test: Nous invitons les chercheurs et les industriels à tester notre approche et à contribuer à son amélioration continue. Il reste beaucoup à explorer pour optimiser la fin de vie des produits tout en assurant des niveaux de sécurité élevés, et les contributions diverses pourront bénéficier à l'ensemble de la communauté.

VII. CONCLUSION

Cette étude propose une méthode innovante et complémentaire visant à concilier les exigences d'éco-conception et de sécurité incendie dans l'industrie ferroviaire. Notre approche, issue de deux études distinctes, repose sur l'élaboration d'un outil Excel qui mutualise les efforts nécessaires pour réaliser des études de recyclabilité et de valorisabilité des matériaux, tout en évaluant leur charge calorifique. Cette double objectif permet non seulement de réduire les temps d'analyse, mais également d'améliorer la prise de décision lors de la conception des produits.

L'outil Excel développé présente des avantages significatifs, notamment en termes de gains de temps. En mutualisant le travail, il évite la réalisation de deux études distinctes souvent effectuées par des personnes différentes, rendant ainsi le processus plus optimal. Les résultats montrent que notre méthode peut offrir de nouveaux indicateurs d'éco-conception, bien plus complets que les critères traditionnels de réparabilité, démontabilité et valorisabilité. Ces nouveaux indicateurs permettent une évaluation plus éclairée de la fin de vie des produits, contribuant ainsi à des choix de conception mieux informés et plus adaptés aux défis actuels.

Cependant, cette étude n'est pas exempte de limites. La partie "Fire Load" de notre outil nécessite encore des retours d'expérience et des tests supplémentaires pour être pleinement opérationnelle. De plus, l'absence de bases de données spécialisées pour certaines informations, comme les valeurs spécifiques de pouvoir calorifique des matériaux, a posé des défis que nous avons dû contourner par des hypothèses et l'utilisation de valeurs génériques.

Malgré ces contraintes, nos premières conclusions sont encourageantes. Elles suggèrent que notre méthode peut non seulement être optimisée pour des applications industrielles ferroviaires, mais également être étendue à d'autres secteurs confrontés à des besoins similaires en termes de durabilité et de sécurité incendie. Nous restons convaincus que les deux études sont pertinentes à rapprocher et à mutualiser. À travers notre travail, nous avons démontré que ces deux types d'études ne sont pas forcément opposées. Bien au contraire, elles sont complémentaires, car leur association a permis de créer de nouveaux indicateurs d'éco-conception ainsi qu'une matrice d'amélioration facilitant le meilleur compromis entre ces deux démarches.

Les perspectives futures incluent le perfectionnement de notre outil, l'intégration de fonctionnalités automatisées plus abouties, et une validation à travers des études de cas supplémentaires. Ce sujet montre qu'il existe de nombreux ponts à créer entre les études de sécurité et les études environnementales. Ces deux domaines, qui semblent peu liés en apparence, sont en réalité beaucoup plus interconnectés qu'il n'y paraît. Nous souhaitons conclure ce travail en invitant la communauté scientifique et industrielle à tester et adopter cette approche, dans le but de découvrir de nouvelles synergies et d'améliorer continuellement ces deux disciplines.

En somme, cette étude démontre qu'il est possible d'établir des passerelles entre les domaines de la sécurité et de l'éco-conception, ouvrant la voie à des innovations durables et sécurisées, susceptibles de répondre aux exigences croissantes de notre société en matière d'environnement et de sécurité.

VIII. REMERCIEMENTS

À l'issue de cet article, dont la production s'est déroulée dans de bonnes conditions, nous tenons à exprimer notre gratitude envers tous ceux qui ont contribué à sa réalisation. Des remerciements particuliers sont adressés :

Aux Organisateurs du Lambda Mu 2024, pour nous avoir offert l'opportunité de participer à la conférence dont ils sont initiateurs.

À Olivier DEBLOIS et Mathieu LEPAREUX directeurs généraux associés de Sector group, pour nous avoir permis de participer à cette édition du Lambda Mu par le biais de l'entreprise dont ils sont à la tête.

À Lise MORPHIN, Manager de la branche ferroviaire chez Sector pour ses conseils techniques.

IX. BIBLIOGRAPHIE

Yard, A. LACLIDE, D. et MORFIN, L. (2023). *"Regard critique et comparatif des méthodologies d'évaluation du potentiel de recyclabilité et valorisabilité des véhicules routiers et ferroviaires."* ("Paper Title (use style: paper title)") Lambda Mu 2023, 12p.

International Standard Organisation. (2002). *Norme ISO 22628 : Véhicules routiers - Recyclabilité et valorisabilité - Méthode de calcul*, 16p.

Tsuji, A. (2006). *Recyclability index for automobiles* [Thèse de doctorat. Faculté de l'université polytechnique de Californie.] <https://elibraryusa.state.gov/>

République française. (1992). *Loi N° 92-646 du 13 juillet 1992 relative à l'élimination des déchets ainsi qu'aux installations classées pour la protection de l'environnement*. Legifrance. Gouv.fr. Consulté le 15 mars 2024 sur [LOI no 92-646 du 13 juillet 1992 relative à l'élimination des déchets ainsi qu'aux installations classées pour la protection de l'environnement \(1\) - Légifrance \(legifrance.gouv.fr\)](#)

Ministère de la transition écologique et de la cohésion du territoire. (2021). *Traitement des déchets*. www.ecologie.gouv.fr. Consulté le 17 mars sur [Traitement des déchets | Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires \(ecologie.gouv.fr\)](#)

Rapport d'office parlementaire. (1999). *"Les Nouvelles techniques de recyclage et de valorisation des déchets ménagers et des déchets industriels banals."* ("Gestion des déchets en France — Wikipédia") www.senat.fr. Consulté le 20 mars sur [Les nouvelles techniques de recyclage et de valorisation des déchets ménagers et des déchets industriels banals - Sénat \(senat.fr\)](#)

Norme ISO 1716 -Reaction to fire tests for products — Determination of the gross heat of combustion (calorific value) ("BS EN ISO 1716:2018 - Reaction to fire tests for products ...")

Norme NFPA 557 - Standard for Determination of Fire Loads for Use in Structural Fire Protection Design ("Fire load density How to reliably estimate and describe it for fire ...")

Bilan national du recyclage 2010-2019

Richard E. Lyon - Fire Safety Branch AAR-440 - Federal Aviation Administration - William J. Hughes Technical Center - Atlantic City International Airport, NJ 08405