

# **Proposition d'une démarche d'écoconception des équipements électriques et électroniques centrée sur l'intégration de matières plastiques recyclées issues de DEEE dans le cadre d'une économie circulaire.**

Candidat : **M. NÈVE Nicolas**

THÈSE dirigée par : **M. PERRY Nicolas**

Et co-encadrée par : **Mme. CHARBUILLET Carole, M. POMPIDOU Stéphane**

---

Résumé de la thèse :

La catégorie de déchets des équipements électriques et électroniques (DEEE) comporte des produits très variés, en masse, en quantité, et en composition. Cette problématique oblige les organismes en charge de la collecte des DEEE à catégoriser ces derniers en catégories distinctes, qui sont séparées les unes des autres avant d'être traitées. En outre, les DEEE sont des produits complexes, constitués de nombreux matériaux de natures diverses. Par conséquent, le processus de traitement d'un équipement est long et nécessite l'intervention de plusieurs acteurs de la filière du traitement des déchets. Différentes options de valorisation des DEEE existent, et sont regroupées en trois catégories : la valorisation fonctionnelle, qui vise à réutiliser les produits ou composants, la valorisation matérielle, qui cherche à récupérer et régénérer les matériaux constitutifs de l'équipement, et enfin la valorisation énergétique, souvent assimilée à un processus d'incinération avec récupération d'énergie. Si nous nous focalisons sur le processus de recyclage, nous remarquons qu'une chaîne de recyclage est le plus souvent composée d'une étape de collecte, de démantèlement, de broyage, et de tri des matériaux. Les matériaux triés par famille doivent ensuite être séparés les uns des autres, ce qui donne lieu à une chaîne de procédés de séparation, dans le but de pouvoir régénérer les matériaux individuellement. En sortie de la chaîne de recyclage, une matière plastique recyclée (MPR) peut être remise sur le marché, ce qui donne lieu à des études permettant de comparer la composition des DEEE en entrée de la chaîne de recyclage, et aux polymères recyclés présents à l'issue de cette dernière. La filière de traitement des DEEE étant complexe, des normes ont vu le jour en Europe afin de définir et encadrer le recyclage de ces équipements, et en particulier des plastiques issus de ces derniers.

Le recyclage des matières plastiques recyclées et leur réintégration dans de nouveaux équipements électriques et électroniques soulève donc plusieurs problématiques. De manière générale, les acteurs de la filière des MPR mettent en avant des obstacles liés à quatre aspects. Premièrement, l'état général de la matière semble être source d'inquiétude, tant au niveau de la couleur que de l'odeur, qui peuvent toutes deux être des facteurs bloquants pour le choix d'une MPR en conception. Deuxièmement, les difficultés liées au recyclage des plastiques identifiées préalablement se montrent pertinentes, car ces dernières engendrent une trop faible quantité de matière sur le marché. Ce manque de matière se traduit par une incertitude au niveau de l'approvisionnement potentiel en MPR, et érode la confiance des utilisateurs en ces matières. Les deux derniers aspects concernent la qualité de la matière, en termes mécaniques, mais aussi sanitaires. En effet, la problématique des substances présentes dans les MPR est tout aussi importante que leur aptitude à satisfaire un cahier des charges fonctionnel. Dans les deux cas, les informations mises à disposition des utilisateurs de MPR ne sont pas suffisantes pour dissiper leurs doutes vis-à-vis de l'utilisation des plastiques recyclés. Répondre à ces problématiques sera le but de cette thèse. La question de recherche nous amènera à nous interroger sur la nature des leviers disponibles pour améliorer la circularité des plastiques recyclés issus de DEEE au travers de l'écoconception, et elle sera subdivisée en plusieurs sous-questions, de nature industrielle et académique.

fin d'améliorer la communication entre les différents acteurs de la filière des matières plastiques recyclées (MPR), un format de communication standardisé doit être créé. En étudiant des démarches similaires exposées dans la littérature, il est apparu évident que la meilleure approche est d'impliquer directement les acteurs concernés. Après une concertation auprès d'un consortium de fournisseurs et utilisateurs de MPR, ainsi que plusieurs organismes publics, des fiches techniques spécialement conçues pour les MPR ont été créées. Ces fiches sont à destination des industriels utilisateurs de plastiques recyclés, comme les plasturgistes, formulateurs et producteurs d'équipements électriques et électroniques. Elles recensent toutes les données fonctionnelles, chimiques, réglementaires, logistiques, environnementales, et les données de traçabilité liées à un lot de MPR. Ces fiches sont remplies par un fournisseur de plastique recyclé, et sont envoyées aux utilisateurs. Leur objectif

est d'être un outil de transmission de l'information, en permettant de communiquer les données nécessaires à l'établissement d'un grade de qualité pour les MPR. L'obtention de ces fiches a permis de dresser une liste exhaustive des propriétés nécessaires à l'évaluation de la qualité pour un plastique recyclé, et ainsi de pouvoir créer un document de référence pour tous les acteurs de la filière. Ce document, un référentiel de qualité pour les MPR, prend la forme d'une liste de paramètres qui s'appuie sur 28 normes européennes concernant les méthodes d'évaluation de ces derniers. La qualité des plastiques recyclés est donc définie de manière exhaustive et objective, et cette définition peut donc être utilisée comme référence par les fournisseurs et utilisateurs de MPR. En outre, le contenu de ce référentiel pourra ensuite être utilisé comme base pour le calcul d'indicateurs de performance pour l'écoconception.

Les indicateurs et indices de performance permettent de synthétiser des grandeurs physiques mesurées de nature parfois différente. Ce sont des outils de communication puissants, car ils permettent de faire le lien entre les grandeurs et les équipes de conception. Cependant, les indicateurs utilisés pour évaluer la recyclabilité des produits se cantonnent à une évaluation massive, qui occulte les problématiques de démantèlement, de coût, de disponibilité de la matière, de faisabilité de la fabrication, et d'insertion du produit dans les chaînes de traitement des déchets. Il semble donc judicieux de choisir une approche qui comporte des indicateurs multicritères, qui doivent inclure des aspects techniques, environnementaux, économiques, et un aspect lié à l'approvisionnement. Ces indicateurs peuvent être classés en trois catégories. Premièrement, certains indicateurs permettent une évaluation du choix des matériaux en conception, et peuvent ainsi donner des recommandations sur cet aspect le cas échéant. Ensuite, d'autres indicateurs sont utiles à l'évaluation des choix d'assemblage du produit. Pour les EEE, ce critère fait surtout référence à la modularité ou à la démontabilité du produit et de ses composants, ainsi qu'à la nature des liaisons entre ces derniers. Enfin, d'autres indicateurs ont pour but de s'assurer que l'équipement étudié pourra bien s'insérer dans une filière de traitement des déchets. Huit indicateurs mettant en jeu tous ces paramètres ont été créés à partir de sous-indicateurs, eux-mêmes calculés à partir de grandeurs physiques mesurées. Deux groupes de quatre indicateurs ont été agrégés en suivant une méthode de construction formelle, afin de former deux indices : l'indice de récupérabilité des matériaux, et l'indice de réintégrabilité des matériaux.

Nous définissons l'écoconception comme étant l'intégration de considérations environnementales dans le processus de conception. Il apparaît que la démarche d'écoconception gagne en efficacité si elle est mise en place au plus tôt dans le cycle de développement d'un produit. Pour ce faire, les équipes de conception peuvent avoir recours à l'utilisation de méthodes d'évaluation environnementale. L'analyse de cycle de vie (ACV) est la méthode la plus complète, mais elle est difficile à mettre en place aussi tôt dans la conception. Pour pallier ce problème, les concepteurs ont accès à des méthodes dites d'analyse de cycle de vie simplifiée. Ces méthodes permettent d'analyser les impacts environnementaux d'un produit en cours de développement, elles ne sont pas aussi précises qu'une ACV complète, mais elles sont beaucoup plus faciles à utiliser. En outre, il apparaît que la combinaison de plusieurs de ces méthodes d'ACV simplifiée permet de tirer profit de leurs avantages respectifs. Nous avons déjà identifié des indicateurs pour évaluer l'écoconception au chapitre précédent, nous devons maintenant sélectionner une méthode d'écoconception qui nous permettrait de communiquer les résultats de cette évaluation. La comparaison de méthodes d'ACV simplifiée sur plusieurs études de cas détaillées dans la littérature nous a amenés à choisir de combiner nos indicateurs d'écoconception avec une méthode d'ACV dit matricielle, qui nous permet de communiquer les résultats de façon structurée, tout en gardant une évaluation environnementale quantitative des choix de conception pour un produit donné. La matrice résultante est dressée, elle permet de mettre en perspective les différents composants d'un produit et les indicateurs identifiés au chapitre précédent, liés au choix des matériaux, à l'architecture du produit et à la filière de fin de vie.

Les choix d'indicateurs, et le choix de méthode d'écoconception effectués précédemment sont mis en œuvre sur deux cas d'application réels. La nomenclature de deux équipements électriques et électroniques nous a été fourni par une entreprise partenaire. Nous allons appliquer notre méthode d'écoconception à ces cas d'étude afin de valider notre démarche. Nous allons pouvoir évaluer les différents aspects de la conception de ces produits, et le cas échéant, dresser des lignes directrices d'écoconception pour améliorer ces derniers. Cette validation expérimentale a également pour but de s'assurer de la facilité d'utilisation de notre méthode, au travers de la mise en place des calculs, mais également de la communication des résultats.