



Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/25185>



This document is available under CC BY-NC-ND license

To cite this version :

Nicolas PERRY, Robin CHAVANNE, Siddharth PARTHASARATHI, Thecle ALIX, Tom BAUER, Carole CHARBUILLET, Alph SAGNA, Hripsime SNKHCHYAN, Tuçe TURKBAY ROMANO - Économie Circulaire 4.0 ou l'usage des technologies de l'Industrie 4.0 pour circulariser les produit complexes : SDC2 Smart Disassembly Cell for Circularity - In: 1er Congrès Interdisciplinaire sur l'Economie Circulaire, France, 2024-06-26 - 1er Congrès Interdisciplinaire sur l'Economie Circulaire - 2024

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : scienceouverte@ensam.eu





Économie Circulaire 4.0 ou l'usage des technologies de l'Industrie 4.0 pour circulariser les produit complexes : SDC2 Smart Disassembly Cell for Circularity

N. Perry^a, R.Chavanne^b, S.Parthasarathi^b, T.Alix^a, T.Bauer^c, C.Charbuillet^c, A.Sagna^a,
H.Snkhchyan^a, T.Turkbay^d

^a *Arts et Metiers Institute of Technology, Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, I2M,
UMR 5295, F-33400 Talence, Fr.*

^b *Arts et Metiers Institute of Technology, F-33400 Talence, Fr.*

^c *Arts et Metiers Institute of Technology, Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, I2M,
UMR 5295, F-73000 Chambéry, Fr.*

^d *G2Elab, Grenoble INP, CNRS, University Grenoble Alpes, F-38000 Grenoble, Fr.*

Auteur correspondant : nicolas.perry@ensam.eu

1. Introduction

L'augmentation des produits en fin de vie et des déchets de produits de consommation pose des défis majeurs en termes de gestion des ressources, notamment des matériaux critiques et des composants stratégiques. Dans le contexte de la transition électrique, ces enjeux sont exacerbés, mettant en lumière la nécessité d'une gestion efficace des ressources et d'une économie circulaire. Cette proposition avance une vision du développement de solutions adaptées de l'industrie 4.0, dans le but de promouvoir une Industrie 4.0 Circulaire [1,2]. L'objectif est de présenter les technologies et leurs enjeux dans le cadre d'une Économie Circulaire 4.0, afin de favoriser la réparation ou la réutilisation de parties (modules ou composants) encore fonctionnelles à l'étape de fin de vie des produits (souvent en fin d'usage), dans le but de préserver les ressources abiotiques, de réduire les impacts environnementaux et, de favoriser le basculement des activités économiques vers des filières régénératives locales.

Conscients que la seule voie d'avenir réside dans une réduction de la consommation, cette proposition présente une vision qui cherche à adapter des solutions technologiques au contexte du développement de l'économie circulaire. Le recyclage n'est pas la solution qui résoudra les problèmes [3,4], mais le constat des tensions d'approvisionnement des composants, des matériaux critiques, de la loi AGECE (Anti Gaspillage pour l'Économie Circulaire - 2021) [5] qui encourage le développement des stratégies et des acteurs de la réparation et l'émergence de nouvelles filières REP [6] (responsabilités élargies des producteurs), constituent autant de signaux nous incitant à développer des solutions pour intensifier le couplage des briques technologiques de l'industrie 4.0 au service de l'économie circulaire. Nous nous focaliserons sur des analyses et propositions appliquées à des produits techniques de grande consommation (déchets d'équipements électriques et

électroniques, et particulièrement des produits de la transition énergétique vers plus de solutions électriques hors batterie). Ces produits soulèvent des enjeux : (1) liés à l'explosion du nombre de ce type de produits en fin de vie ; (2) de ressources critiques pour les produire mais aussi difficiles à récupérer ; (3) d'approvisionnement de certains composants dans des filières logistiques complexes et tendues ; (4) d'obligations réglementaires qui visent à favoriser la réparabilité et à prolonger la durée de vie des produits. Globalement, il s'agit de la question de la souveraineté en ressources et composants, mais aussi des besoins de traitement efficace de ces objets qui conservent souvent une forte valeur matérielle, voire fonctionnelle.

Le Projet SDC2 (Smart Disassembly Cell for Circularity) cherche à appliquer les technologies de l'industrie 4.0 aux sujets de l'économie circulaire. Ainsi, nous travaillons sur les étapes préparatoires de produits techniques complexes (multi-composants mécaniques, électriques, électroniques, multi-structures, modules) qui couvrent les EEE (équipements électriques et électroniques) ainsi que les produits de la transition électrique (moteurs électriques, convertisseurs de puissance, par exemple). Nos travaux permettent d'envisager plusieurs scénarios de circularité, tels que la récupération de composants fonctionnels pour leur revente en seconde main, la réparation, ainsi que le tri sélectif pour des voies de recyclage plus performantes dédiées à des types de composants spécifiques. Nous abordons les produits à traiter à plusieurs niveaux pour les analyser et les traiter : au niveau système (produit complet comme un moteur électrique), au niveau sous-système ou module (convertisseur de puissance intégré, rotor avec aimants permanents fixés, carter moteur intégrant le bobinage), au niveau composant (composant d'électronique de surface, connecteur électrique ou câble, roulements ou arbre moteur), jusqu'au niveau matériaux (aimants permanents et terres rares, bobinage et cuivre). La démarche d'économie circulaire proposée vise à valoriser au mieux chaque niveau, en privilégiant la réutilisation maximale des parties fonctionnelles (produit, module ou composant), puis la réparation (produit ou module), suivie du tri sélectif des composants homogènes, pour finalement procéder au recyclage des matériaux.

Ainsi, cette présentation propose de mettre en avant les technologies de l'industrie 4.0 (initialement orientées vers la production de biens) qui nous semblent être pertinentes pour développer la circularité des produits manufacturés.

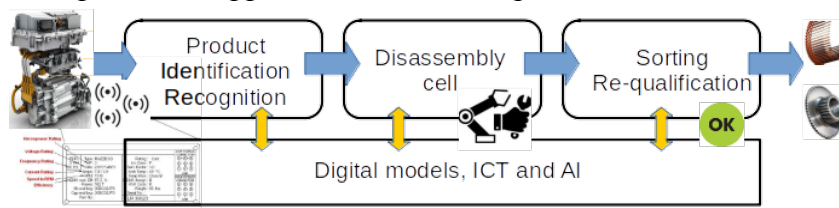


Fig. 1. Étape du processus de démantèlement pour de la valorisation modules ou composants

2. Économie circulaire et industrie 4.0

Pour intensifier l'efficacité des acteurs et des filières de l'économie circulaire, il faut notamment : (1) mettre en œuvre des opérations et actions rentables ; (2) mieux valoriser les produits en fin de vie (augmenter le ré-usage, la remise à neuf / le reconditionnement, la re-fabrication / la re-manufacturation, la récupération de composants) au-delà du simple recyclage des matériaux ; (3) créer les conditions de

remise sur le marché des composants de seconde vie (avec des performances garanties) pour la réparation ou la fabrication de nouveaux produits ; (4) proposer la meilleure stratégie sur les produits (basée sur un diagnostic itératif en cours de désassemblage) ; (5) identifier le produit et disposer de données sur sa composition et sa gamme de désassemblage [7,8]. La figure 1 présente notre vision d'une cellule de désassemblage robotisée et ses différents blocs technologiques.

2.1. Fin de vie de produit et démantèlement

La fin de vie de produits (démantèlement qui regroupe plusieurs étapes) peut être découpée en actions amont et aval aux opérations de désassemblage physiques des produits. Nous assumons le fait que tout automatiser ou robotiser n'est pas possible, et qu'il sera donc nécessaire d'avoir des experts et/ou opérateurs impliqués dans le processus de traitement. Ceci implique de prendre les enjeux de sécurité opérateur au plus haut niveau, puis de se projeter sur des conditions de travail et des opérations à effectuer valorisantes pour les acteurs, non répétitives, centrées sur leurs apports d'expertise ou de savoir-faire. Autre précision, dans nos études, les opérations de dépollution et passivation, obligatoires d'un point de vue réglementaire, ne sont pas prises en compte dans nos étapes, mais sont intégrées dans les logiques et des développements spécifiques pour le passage à l'échelle industrielle.

Les propositions discutées ci-après s'inscrivent dans une projection de traitement de flux de produits réels qui arrivent en fin de vie. Ainsi il faut être capable de gérer la variété des produits (variété de types, de marque, de référence), varié de vie de produits (avec de possibles dégradations comme des chocs, de la casse, de la corrosion, des modifications, ...) pour lesquels très peu d'informations sont disponibles ; pas de données sur : (1) les produits (nomenclature de composants, architecture produit et gamme d'assemblage/désassemblage, représentation 3D ...) ; (2) les conditions de vie et d'usage (monitoring durant la vie à l'instar du système de monitoring de batterie BMS, solution qui reste peu exploitable du fait de la fermeture d'accès aux informations par les constructeurs de batterie). Ainsi il n'y a ni standard, ni base de données disponible (nationale / internationale, par fabricant ou type de produits, voire par composant élémentaire) pour disposer d'un minimum d'informations sur le produit à désassembler. C'est, entre autres, un point relativement bloquant pour le déploiement de stratégies efficaces de réparation. On peut s'inspirer de la filière automobile qui s'est structurée pour donner accès aux informations par véhicules, entre autres obligée par les standards de dépollution.

2.2. Les technologies de l'Industrie 4.0 circulaire

Toutes les technologies de l'industrie 4.0 (illustrées sur la figure 2) ne sont pas pertinentes dans le contexte de l'économie circulaire. Voici celles que nous retenons, dans une perspective d'intégration dans une industrie circulaire, et qui ont été fortement développées ces dernières années : Internet des objets (IoT) : connectivité des machines et des capteurs pour collecter et échanger des données en temps réel. Fabrication additive : impression 3D comme outil potentiel pour la réparation / remanufacturing. Intelligence artificielle (IA) et apprentissage automatique associé au big data et à l'analyse avancée : exploitation des données pour identifier les produits ou les composants et guider les gammes de désassemblage. Jumeau numérique : infrastructure de simulation temps réel du jumeau physique alimenté des données

industrielles, qui permet d'alimenter la carte de santé numérique des produits. Robotique collaborative : robots autonomes ou cobots en interaction avec les opérateurs pendant le processus de désassemblage. Réalité virtuelle et augmentée : utilisées pour la formation aux opérations et pour enrichir en informations l'opérateur ou le produit [9].



Fig. 2. Technologies de l'industrie du futur pour l'économie circulaire de produits complexes

2.3. Désassemblage de composants fonctionnels

Cette partie décrit succinctement le processus de traitement physique du produit en mettant en évidence les liens avec les briques technologiques présentées précédemment. Nous suivons la structure de découpage des actions de la Figure 1, en excluant les opérations de dépollution de notre périmètre comme précisé (cf. 2.1).

a. Identification, digitalisation et diagnostic : cette étape, en amont de l'opération de désassemblage, doit aider à identifier les produits (reconnaissance basée sur l'analyse d'image ou la reconnaissance de référence produit, reconstruction 3D), les diagnostiquer (combinaison de l'expertise humaine et de l'analyse des mesures et caractérisations des produits), voire les digitaliser (reconstruction d'une représentation 2D ou 3D définissant le produit et ses éléments d'intérêt). Au-delà de la reconnaissance, cette étape permet de déterminer le potentiel du produit (basé sur des modèles et des indicateurs de marché, de composants, de matériaux, etc.) et le meilleur scénario à proposer (en fonction du potentiel en tant que produit, module ou composant) pour aller vers la réparation, le ré-usage de modules/composants (et donc leur désassemblage), le tri sélectif ou directement le broyage en vue du recyclage des matériaux. Cette étape initiale de reconnaissance/digitalisation/diagnostic est une opération itérative qui revient à chaque niveau d'intervention sur le produit et à chaque phase de désassemblage.

Pour compléter les briques technologiques déjà identifiées, il faut associer des outils d'interaction avec les opérateurs (réalité augmentée par exemple) et un jumeau numérique (qui devient le carnet de santé, minimal et enrichi à chaque opération ou pour chaque module ou composant).

b. Désassemblage / démantèlement : cette étape correspond à l'ensemble des opérations combinant intervention humaine, robotique/cobotique et automatique, pour récupérer des modules ou composants encore fonctionnels en maîtrisant le processus pour préserver cette valeur fonctionnelle. Au-delà des interactions de collaboration ou coopération opérateur-machine/machine-machine, il faut disposer de générations automatiques de gammes de désassemblage (incluant les outils, les opérations à réaliser, les contrôles intermédiaires, etc.) qui interagissent avec les différents acteurs impliqués dans les opérations. La variété des produits travaillés alimente l'apprentissage des opérateurs et des technologies d'IA apprenantes. La capture des

données des opérations doit alimenter le carnet de santé des composants/modules et un jumeau numérique qui permet d'aller vers une requalification virtuelle de ces composants.

c. (Re)qualification : l'enjeu est de pouvoir désassembler en maîtrisant les dégradations du produit initial (si on veut réparer) ou du module ou composant (si on veut le réutiliser). La maîtrise des données de désassemblage pertinentes permet de se projeter vers cette finalité. Pour autant, la remise de produit sur le marché va passer par un engagement de performance du produit (réparé/récupéré) et donc un besoin de requalification totale ou partielle (garantie). Le jumeau numérique, la qualification virtuelle, la maintenance prédictive basée sur les données, vont compléter les opérations de mesure physique pour réduire les temps de certification des produits récupérés (voire réparés) et ainsi orienter les filières de remise sur le marché.

d. Chaîne numérique et IA : comme déjà identifié dans les opérations sur le produit physique (étapes a à c précédentes ci-dessus), il est nécessaire de disposer d'une chaîne numérique (ensemble de données et d'outils numériques interopérables) et de jumeaux numériques (modèles numériques alimentés et calculés en temps réel avec les données du jumeau physique) pour alimenter des algorithmes d'IA qui permettent de : (1) reconnaître les produits ; (2) cibler les parties d'intérêt à travailler et les scénarios à laver (de réparation à recyclage) ; (3) générer des gammes opératoires ; (4) interagir et informer les opérateurs ; (5) capitaliser et apprendre dynamiquement ; (6) (pré)qualifier virtuellement des opérations et composants, et enfin ; (7) disposer d'un carnet de santé produit/module ou composant pour accompagner une remise sur le marché, etc.

Nous pensons que le carnet de santé numérique du produit assurera la traçabilité des opérations menées pour accompagner la remise sur le marché de ces produits. C'est aussi un élément qui va faire le lien avec le passeport de produit numérique (DPP) en cours de développement au niveau européen. Notre approche propose de construire un référentiel lié aux données techniques du produit ouvrant la voie à un niveau de performance (et de garantie), et incluant les dimensions environnementales.

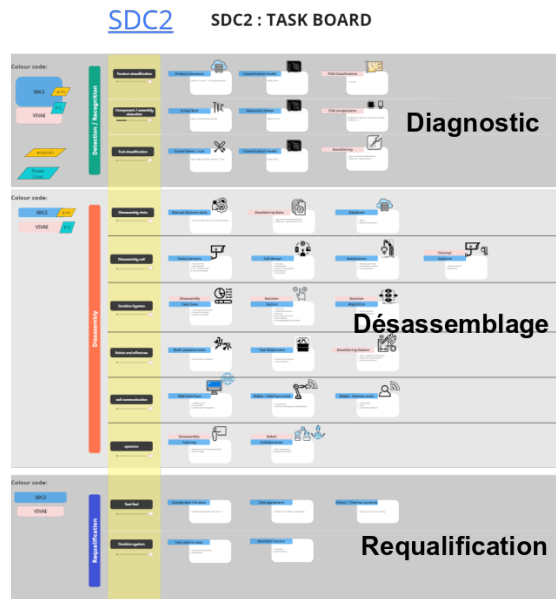
Cette brique numérique doit également pouvoir s'alimenter de données provenant des marchés (bases de données produits/composants) et des différents besoins et tensions (matériaux/composants/produits) pour enrichir les indicateurs de choix des stratégies et éléments sur lesquels interagir en priorité.

e. Sécurité des opérateurs et interactions : placé en dernière position, cet axe est pourtant le plus important. Les risques sont nombreux pour les opérateurs. Il faut donc identifier les risques (nature, zone, occurrence), prévenir les opérateurs et les guider par des opérations et outillages spécifiques. La protection passe par des aspects d'ergonomie des postes de travail et des manipulations, par des actions valorisantes et des stimulations adaptées au profil des opérations, à mener en lien avec les connaissances et le savoir-faire des opérateurs.

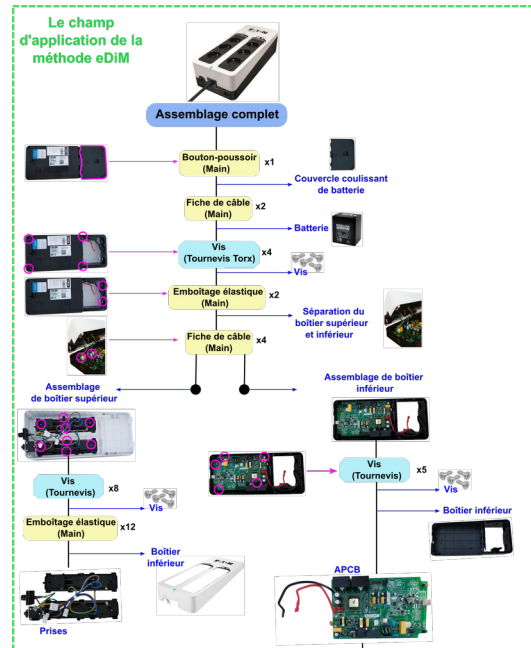
3. Exemples de réalisations

Le travail actuellement mené consiste à développer une série de briques technologiques adaptées aux enjeux de traitement en fin de vie comme présenté précédemment. Cet ensemble de solutions (illustré sur la figure 4) permet de disposer d'un ensemble de technologies à tester pour différents types de produits et d'évaluer

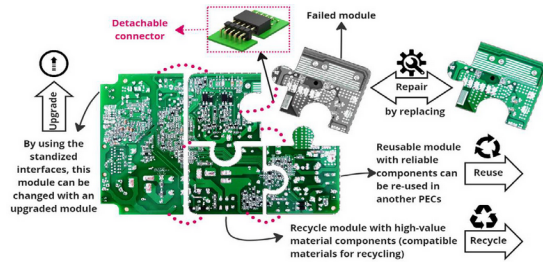
les nouveaux développements à mener.



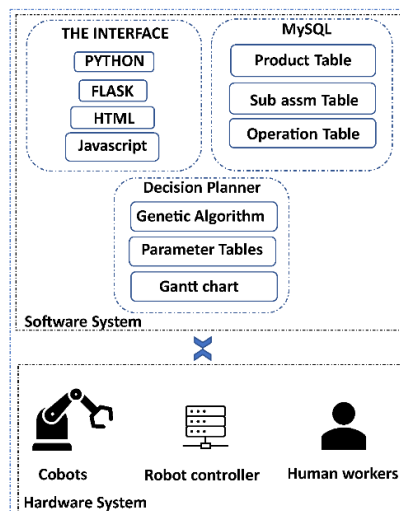
a. modules technologiques développés



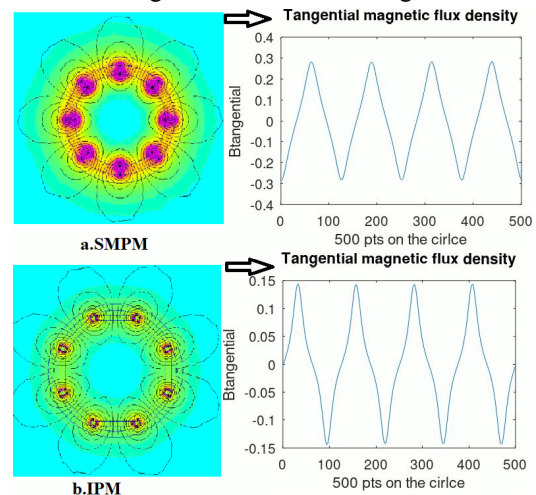
b. gamme de désassemblage



c. Aide à la conception et indicateurs de valorisation



e. structure d'information de pilotage de la cellule opérateur / cobot



d. banc d'identification/caractérisation d'aimant permanents



f. démontage robotisé

Fig. 4. Des développements orientés Économie Circulaire [10,11]

4. Discussion

Ce positionnement d'activité survient après près de 20 ans d'activités avec les acteurs du recyclage et les acteurs de l'écoconception de produits. Une première étape a conduit à faire évoluer les recycleurs de la simple gestion des déchets à la fourniture de matières premières secondaires, impliquant des liens plus étroits entre les recycleurs et les concepteurs (pour concevoir pour la fin de vie, mais aussi et surtout pour concevoir à partir de la fin de vie). Il est nécessaire de poursuivre la transformation de ces acteurs pour les amener à devenir des fournisseurs de composants ou de modules de seconde vie, en renforçant les liens et les échanges entre les concepteurs de produits et les recycleurs / fournisseurs de composants de seconde vie.

Pour les recycleurs, il est essentiel de passer d'une approche de traitement des flux (gestion / recyclage de tonnes) à une approche de traitement au niveau du produit (recherche d'un produit spécifique dans le gisement, récupération d'un composant spécifique dans le produit). De plus, il est nécessaire d'intégrer des technologies dans leurs processus, dont les difficultés ne doivent pas être sous-estimées. La priorité doit être accordée à la sécurité des opérateurs, ainsi qu'à l'augmentation des compétences et de la technicité de ces industries, et à la mise en place de solutions d'échange d'informations sécurisées pour mettre en œuvre ces filières. Ceci ne se fera pas sans prendre en compte les considérations sociales, sociétales et environnementales, afin de garantir que ces solutions de désassemblage robotisé contribuent réellement à une économie circulaire et durable.

5. Conclusion

Ce travail est amorcé et doit être complété par des points de vue complémentaires aux échelles des filières, des dimensions réglementaires et économiques, mais aussi évidemment sociales et environnementales. In fine, l'objectif du projet SDC2 est double :

1. Capitaliser sur les expériences menées pour proposer et construire une démarche d'analyse systématique afin d'accompagner l'étude et la proposition chiffrée et validée des technologies à intégrer et des configurations de cellules performantes. Ceci permet d'une part d'accompagner des opérateurs de la fin de vie (acteurs industriels ou de l'économie sociale et solidaire qui sont les deux familles d'acteurs positionnées sur ces sujets actuellement) dans leurs choix et leurs stratégies d'évolution des moyens techniques, des compétences et formations des opérateurs, des positionnements sur la chaîne de valeur de l'économie circulaire.
2. Travailler avec les producteurs de produits pour évaluer d'une part le potentiel des produits dans leur définition actuelle vis-à-vis de la récupération / réparation effective, et d'autre part, accompagner ces concepteurs de produits vers des choix de solutions qui sont plus performantes dans une vision à minima de seconde vie du produit, des modules et des composants. Ceci amène tout autant à faire des évolutions sur les produits (choix de composants, de solutions d'assemblages, approches modulaires, etc.) que sur les offres mises sur le marché, en renforçant des approches orientées économie de la fonctionnalité et développement de solutions produits services qui impactent les organisations, les nouveaux métiers et acteurs tout en garantissant une souveraineté des composants / matériaux plus forte.

Sans imaginer que la technologie sauvera les dérives de la surconsommations / surexploitation des ressources, le premier réflexe est de moins consommer et prolonger la durée de vie des produits existants. L'industrie 4.0 circulaire ou l'économie circulaire 4.0 peut prétendre proposer des solutions à forte conservation de valeur fonctionnelle des produits / modules / composants. De plus, elle permetta d'apporter des opportunités d'évolution des métiers (conditions de travail et compétences) des acteurs du traitement de la fin de vie de produit, et de proposer de la circularité sur des périmètres courts.

Références

- [1] E. Bracquene, J. R. Peeters, J. Burez, K. De Schepper, J. R. Duflou, and W. Dewulf, "Repairability evaluation for energy related products," *Procedia CIRP*, vol. 80, pp. 536–541 (2019)
- [2] Duflou, J. R., Seliger, G., Kara, S., Umeda, Y., Ometto, A., & Willems, B. Efficiency and feasibility of product disassembly: A case-based study. *CIRP annals*, 57(2), 583-600 (2008)
- [3] Korhonen, J., Honkasalo, A., Seppälä, J.. Circular economy: the concept and its limitations. *Ecological economics*, vol. 143, p. 37-46 (2018)
- [4] Kara, S., Hauschild, M., Sutherland, J., McAloone, T. Closed-loop systems to circular economy: A pathway to environmental sustainability?. *CIRP Annals*, 71(2), 505-528 (2022).
- [5] <https://www.ecologie.gouv.fr/loi-anti-gaspillage-economie-circulaire>
- [6] <https://www.ecologie.gouv.fr/cadre-general-des-filieres-responsabilite-elargie-des-producteurs>
- [7] C. Bakker, F. Wang, J. Huisman, and M. Den Hollander, "Products that go round: exploring product life extension through design," *Journal of cleaner Production*, vol. 69, pp. 10–16, (2014)
- [8] "RREUSE. 'Improving Product Repairability: Policy Options at EU Level' September (2015)
- [9] Alliance Industrie du Futur, *Le guide des technologies de l'industrie du futur*, (2018)
- [10] Romano, T. T., Alix, T., Lembeye, Y., Perry, N., Crébier, J. C. (2023). Towards circular power electronics in the perspective of modularity. *Procedia CIRP*, 116, 588-593.
- [11] A.Sagnaa, G.Mansour, S.Clenet, N.Perry (2024) Non destructive control of permanent magnet rotors in a perspective of electric motor circularity, 31st CIRP Conference on Life Cycle Engineering (LCE 2024), *Procedia CIRP* (en cours de publication)