



HAL
open science

Choix de modes de valorisation des produits de fin de vie en fonctions des modes de désassemblage et des paramètres techniques et environnementaux et des modes de valorisation

Sarra Brahem, Raoudha Gaha, Abdelfattah Mlika, Borhen Louhichi, Benoit Eynard

► To cite this version:

Sarra Brahem, Raoudha Gaha, Abdelfattah Mlika, Borhen Louhichi, Benoit Eynard. Choix de modes de valorisation des produits de fin de vie en fonctions des modes de désassemblage et des paramètres techniques et environnementaux et des modes de valorisation. 25e Congrès Français de Mécanique, Nantes, 29 août-2 septembre 2022, Aug 2022, Nantes, France. hal-04280081

HAL Id: hal-04280081

<https://hal.science/hal-04280081v1>

Submitted on 15 Nov 2023

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

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

Choix de modes de désassemblage des produits de fin de vie en fonctions des paramètres techniques et environnementaux et des modes de valorisation

S. BRAHEM^a, R. GAHA^{b*}, A. MLIKA^a, B. LOUHICHI^c, B. EYNARD^b

a. Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sousse. Sarahbrahem24@gmail.com

b. Université de Technologie de Compiègne, Laboratoire Roberval. raoudha.gaha@utc.fr

a. Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sousse. Abdelfattah.mlika@eniso.u-sousse.tn

c. Laboratoire de Mécanique de Sousse, borhen.louhichi@issatso.u-sousse.tn

b. Université de Technologie de Compiègne, Laboratoire Roberval. benoit.eynard@utc.fr

Résumé

Les industries deviennent de plus en plus intéressées par l'économie circulaire vu les avantages qu'elle apporte de point de vue environnement et revenus financières. Pour implanter une stratégie d'économie circulaire plusieurs étapes sont introduites dans le cycle de vie du produit. Dans cet article on va s'intéresser à l'étape de fin de vie où un désassemblage du produit est proposé pour récupérer les pièces et matériaux utiles en les valorisant dans le but de minimiser les impacts environnementaux de la production. Dans cet article on va indiquer les différents modes de valorisation des produits de fin de vie et on va déterminer une stratégie de décision de mode de valorisation en fonction des paramètres de désassemblage.

Abstract

Industries are more and more interested in the circular economy due to the advantages it brings to the environment and to the financial income. To assure a good strategy for circular economy it is very important to introduce different steps in the life cycle of the product. In this article we will put the lights on the last step where the End-Of-Life products are disassembled to give value to the used components in order to be reused. This act will decrease the environmental impact of the production.

In this article we will indicate the different modes of giving value to End-Of-Life products and determine a strategy of giving value to components based on the disassembly parameters.

Mots clefs

Economie circulaire, produit de fin de vie, modes de valorisation, recyclage, remanufacturing, réparation, désassemblage.

1 Introduction

Depuis des années, le sujet de l'environnement ne cesse d'intéresser tous les secteurs industriels, ce qui les ramène à implanter une stratégie d'économie circulaire ayant pour avantages des impacts économiques et environnementaux. Elle vise à rendre les produits durables une norme dans l'UE [1]. Dans cet article seulement le côté environnemental nous concerne. L'économie circulaire consiste à exploiter les produits en fin de vie et les déchets et minimiser le gaspillage. Son but c'est de boucler au maximum les flux pour avoir des ressources renouvelables. Le concept de l'économie circulaire basé

sur les piliers du développement durable (social, économique et environnemental) est défini par la fondation de Ellen Mc Arthur comme étant un processus basé sur la reconception des déchets, bouclage des matériaux utilisés et régénération de ressources naturelles [2]. Elle s'appuie fortement sur des processus de valorisation et de recyclage, qui permettent la réutilisation des composants et d'augmenter la durée de vie des produits. Parmi les méthodes de valorisation on trouve la réutilisation, le recyclage, la réparation, le reconditionnement et le remanufacturing. Ces méthodes sont généralement précédées par un désassemblage pour une meilleure qualité du matériau restauré. En effet, le désassemblage permet la préparation des produits aux différents processus de valorisation. L'objectif de cet article c'est d'analyser les différentes méthodes de valorisation des produits en fin de vie ainsi que les modes de désassemblage pour aboutir à une stratégie de décision permettant de trouver le mode de désassemblage convenable pour chaque mode de valorisation en fonction des paramètres du produit et des paramètres environnementaux. Le reste de cet article est organisé comme suit. La partie 2 introduit le désassemblage, ses modes, ses paramètres et ses techniques. La partie 3 montre les différents modes de valorisation et dans la partie 4 on propose une stratégie de décision du mode de désassemblage en fonction des paramètres techniques et environnementaux pour décider un mode de valorisation convenable

2 Vers un désassemblage durable : un aperçu

Le désassemblage est toute opération systématique permettant de séparer un produit en composants ou sous-composants, elle permet de distinguer différents éléments valorisables du produit de ceux qui sont polluants. La problématique du désassemblage a pris toute son importance avec la valorisation des produits en fin de vie motivée par des considérations environnementales [3]. La contrainte de désassemblage résulte de l'influence des différents paramètres techniques et environnementaux du produit. En effet, en se basant sur ces paramètres on peut choisir le mode de désassemblage (destructif, non destructif, etc.) ainsi que celui de valorisation des produits de fin de vie. Le désassemblage peut être considéré comme l'inverse de l'opération d'assemblage pour les produits simples, contrairement aux produits en fin de vie. Pour les produits en fin de vie, il est nécessaire d'élaborer des regroupements de composants en fonction de leurs matières et mode de désassemblage pour optimiser la valorisation en point de vue environnemental en diminuant le taux de déchets. Suhariyanto et al. (2017) discutent l'impact de la vitesse d'évolution du produit et de sa durée de vie sur l'augmentation du taux de déchets [4]. Ils regroupent les produits en quatre groupes, le premier est constitué des produits qui évoluent légèrement et ayant une durée de vie faible, ces produits sont généralement constitués d'un seul matériau, ils peuvent être recyclés sans désassemblage. Le deuxième groupe est constitué des produits ayant une faible vitesse d'évolution mais une durée de vie importante (fourniture, pièces automobiles...etc...), ces produits peuvent être réutilisés, remanufacturés ou recyclés pour l'extraction des matières premières, ils nécessitent un désassemblage en fin de vie. Le troisième groupe est constitué de produits ayant une grande vitesse d'évolution et une faible durée de vie, ce sont les produits électroniques grand public (téléphones portables, PC...etc...), ces produits peuvent aussi être réutilisés, remanufacturés ou recyclés pour extraire les métaux rares, après un désassemblage. Le dernier groupe est constitué des produits de grande vitesse d'évolution ainsi qu'une grande durée de vie (les machines de photocopie...etc...), ils peuvent être réutilisés ou remanufacturés, ils peuvent aussi avoir des améliorations ou être recyclés pour donner des matériaux premiers utiles, ils nécessitent un désassemblage [4]. Dans une démarche de désassemblage une analyse préalable est nécessaire, cette analyse consiste à évaluer les différentes interactions entre les constituants du système. D'après Hugo Dionne [3] pour analyser la stratégie de désassemblage il est important de faire une procédure de pré-désassemblage. Elle consiste à analyser les besoins par la définition des objectifs visés. Les options de récupération doivent être déterminés pour connaître le niveau de désassemblage à considérer. Il indique

qu'à partir des besoins et des indices sur les niveaux de désassemblage on peut analyser quelle est la stratégie à utiliser pour le désassemblage. La collecte de données complète la procédure de pré-désassemblage.

2.1 Modes de désassemblage

Choisir le type de désassemblage convenable est indispensable pour le bon déroulement de l'opération de traitement de déchet et valorisation des produits en fin de vie. De ce fait, il est important de connaître les différents modes de désassemblage. Ils sont principalement groupés comme suit : complet, partiel, ou sélectif, parallèle ou séquentiel et on trouve également les désassemblages destructif ou non destructif, manuel ou automatique [5]. Le désassemblage complet implique l'extraction de tous les composants et sous-composants, dans le cas de désassemblage partiel il y a des composants qui ne sont pas totalement désassemblés, pour le désassemblage sélectif des composants sont extraits pour atteindre des pièces spécifiques [6]. Ce mode de désassemblage est généralement utilisé pour la maintenance ou le recyclage. Le désassemblage parallèle consiste à désassembler deux ou plusieurs composants en même temps contrairement au désassemblage séquentiel où tous les composants sont retirés un par un consécutivement [7]. Le désassemblage destructif est tel que la géométrie de l'un ou de plusieurs composants change contrairement au désassemblage non destructif où les composants restent intacts pendant le désassemblage [6]. Un désassemblage manuel est un désassemblage élaboré par une personne et un désassemblage automatique est élaboré par des robots ou machines [6].

2.2 Paramètres de désassemblage

La complexité du désassemblage nécessite avant toute opération de définir les paramètres à prendre en compte pour le désassemblage. Ces paramètres peuvent être classés en deux catégories, les paramètres techniques et les paramètres environnementaux. Les paramètres techniques dépendent de la structure, du matériau et des liaisons entre les composants comme indiqués dans le tableau suivant.

	Structure	Matériau	Liaisons
Paramètres produits	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre de composants • Identification des parties non recyclables • Identification des parties de grande valeur • Direction de désassemblage • Volume du composant par rapport au produit 	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre de différents types de matériaux • Sous-ensembles inséparables dont la matière est compatible ou identique. • Matériaux recyclables 	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre des liaisons • Nombre d'outils nécessaires pour le désassemblage • Nombre de liaisons faciles à désassembler • Accessibilité des points de liaison

	<ul style="list-style-type: none"> • Disposition des composants dans le produit 		<ul style="list-style-type: none"> • Accessibilité aux pièces • Nombre de liaisons irréversibles et réversibles • Type de liaisons
--	--	--	---

Tableau 1 : Paramètres techniques du désassemblage [8]

Les paramètres environnementaux sont principalement la consommation d'énergie, on parmi les travaux de recherches trouvés on peut citer celui de Guo et al (2020), qui ont établi un nouveau modèle d'optimisation pour minimiser la consommation d'énergie dans un processus de démontage réel des produits [9]. Un désassemblage durable vise, aussi, à la réduction du taux de déchets ainsi que l'émission des substances toxiques dans le produit [10]. On considère aussi le taux de récupération des métaux rares et l'effet du désassemblage sur la santé des individuels. De plus, le milieu où se fait le désassemblage peut être considéré comme paramètre d'impact sur l'environnement, en effet si le désassemblage est effectué dans un milieu fermé qui contient des machines pour purifier l'air il aura moins d'effet qu'un désassemblage effectué en plein air ou dans un milieu qui n'est pas occupé par ce type de machines [11].

3 Le désassemblage et les stratégies de valorisation des produits en fin de vie

3.1 Recyclage et reconditionnement

L'index de recyclabilité est l'un des principaux indicateurs de l'économie circulaire, d'une part, et de soutenabilité des produits en fin de vie, d'une autre part. Il est, aussi, un outil à prendre en considération pour l'amélioration du désassemblage dès la phase de conception [12]. Un axe de recherche qui a été largement étudié [13-15]. Nombreux sont les profits du recyclage dont on peut citer :

- Permettre le traiter tout type de déchets permettant de réintroduire des nouveaux composants utiles dans la production si le matériau est de bonne qualité.
- Permettre la transformation des déchets en matière première prête à l'emploi.
- Permettre d'éviter le gaspillage des ressources et de l'énergie.
- Etc.

Le recyclage débute lorsque le produit usé est désassemblé en composants, ils sont alors séparés en catégories de matériaux distincts [3]. Certains chercheurs trouvent que le désassemblage et l'accès aux composants du système en fin de vie est l'étape la plus difficile dans la procédure du recyclage, vue son coût élevé et le temps qu'elle consomme [16], ils indiquent que le recyclage doit être un concept central de la conception d'un produit, pour faciliter son désassemblage en fin de vie et l'objectif devrait être fixé sur la teneur en recyclage des produits [16].

Lié, souvent à l'économie circulaire, le reconditionnement, présente aussi un indicateur de soutenabilité d'un désassemblage, étudié par les chercheurs [17-18]. Son essence est de promouvoir des modes de consommation plus responsables et de favoriser l'économie circulaire son but c'est de mettre le produit usagé à l'état neuf ou à un état spécifié à l'avance. Le produit est désassemblé en sous-ensembles qui sont ensuite réparés ou remplacés. Ils sont ensuite réassemblés pour donner un produit reconditionné. Ce mode de valorisation est très utile dans le cas des produits électroniques. Il permet d'augmenter la durée de vie du produit et permet sa réutilisation [19].

3.2 La réparation

Le but de la réparation c'est de ramener un produit à son état fonctionnel c'est un prolongement de la durée de vie d'un produit avant qu'il devienne définitivement inutilisable, en remplaçant ou réparant les composants épuisés. La qualité du produit réparé est généralement inférieure à celle du produit à son état initial. La réparation nécessite généralement peu de désassemblage vu que les composants non épuisés ne sont pas affectés par cette opération [3]. Les chercheurs trouvent que l'amélioration de la réparabilité d'un produit est nécessaire pour augmenter sa durée de vie et donc diminuer le taux des déchets [1]. Ellen Bracquené et al.(2018), discutent l'efficacité de deux méthodes d'évaluation de la réparation dites semi-quantitative : Matrix for ease of Repair (AsMeR) développé par KU Leuven et Repair Scoring System (RSS) développé par JRC, avec la combinaison d'autres méthodes dites quantitatives (eDiM) et qualitatives [20] Favi et al (2016) analysent la réparabilité et la capacité de désassemblage [21]. Ils indiquent que l'évaluation de la capacité de réparation d'un produit dépend de la facilité de son désassemblage et des indexes de réparabilité et ils citent trois méthodes de d'analyse de la réparabilité, la méthode qualitative qui établit des critères de réussite et d'échec [22], la méthode semi-quantitative qui compare deux produits de même famille [22-23] et la méthode qualitative qui à partir de données donne la capacité de désassemblage [24-25].

3.3 Le remanufacturing

Aussi dit « remise à neuf ». Le produit est totalement désassemblé et tous les composants et sous-composants sont inspectés précieusement. Le remanufacturing se fait en trois étapes, la première c'est le désassemblage du produit en fin de vie, suivie d'une étape d'inspection où les composants dans leurs états initiaux (intacts) sont restaurés et réutilisés, les composants en moyenne état sont réparés pour être réutilisés et les composants épuisés sont rejetés [26]. Le produit est ensuite réassemblé pour donner un produit final constitué de nouveaux et anciens composants. La nouvelle fabrication peut être combinée avec des améliorations technologiques. Mann et al.(2022) comparent deux cas de remanufacturing, le remanufacturing centralisé et le remanufacturing décentralisé des produits électroniques. Dans le cas du remanufacturing centralisé les composants sont transportés à partir des endroits de ramassage de composants à remanufacturer, situés dans les différents pays, vers des centres de remanufacturing basés dans le Moyen-Orient. Le remanufacturing décentralisé a montré un effet moins important sur le changement climatique que celui produit par le remanufacturing centralisé. Ils ont ensuite proposé une stratégie de management pour minimiser l'impact du remanufacturing, elle consiste à implanter des centres de remanufacturing dans chaque endroit de ramassage [26].

4 Stratégies de décision du mode de désassemblage des produits en fin de vie

La prise de décision concernant les modes de désassemblage peut être basée sur les modes de valorisation des produits en fin de vie choisis. En effet on propose une stratégie de décision, représentée par la figure 1. Cette stratégie est définie comme suit : on choisit le mode de valorisation du produit en fin de vie en fonction de l'impact environnemental, des paramètres techniques du produit et de son état en fin de vie, puis on choisit le mode de désassemblage qui facilitera le chemin au mode de valorisation choisis. Les modes de traitement d'un produit en fin de vie dépendent largement de la nature du produit.

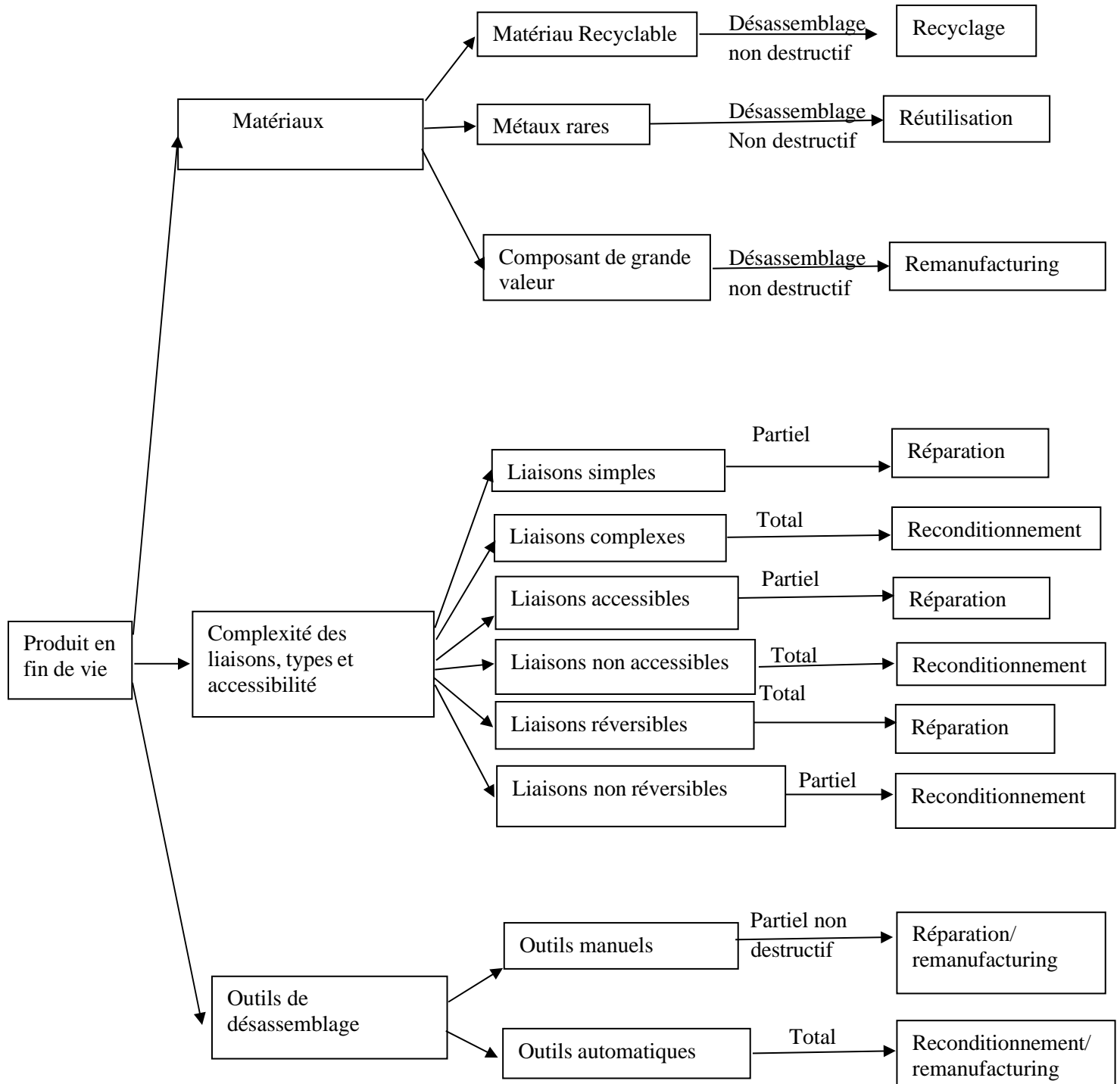


Figure1. Stratégie de décision des modes de désassemblage en fonction des paramètres techniques du produit et des modes de valorisation

D'après Mann et al. (2022) le remanufacturing est le procédé préféré dans la valorisation des ordinateurs fixes et portables dans leur fin de vie, de point de vue impact sur l'environnement. En effet il a un retour écologique plus important que celui du recyclage [26]. Les produits électroniques comportent généralement des métaux rares, en fin de vie ils se trouvent face à deux choix de valorisation le premier c'est le reconditionnement, il est préféré dans le cas où seulement quelques composants du produit sont usés. Pour cela on associe un désassemblage complet car le reconditionnement nécessite un désassemblage complet.

Le deuxième mode c'est le recyclage, dans le cas où tous les composants sont usés. Le recyclage nous permettra d'extraire les métaux rares dans les composants électroniques. On associe une opération de désassemblage non destructif pour avoir moins de déchets capables d'être mélangés avec les métaux rares extraits et par suite ces métaux seront purs. De point de vue impact environnemental le reconditionnement nécessite moins d'énergie donc présente un impact environnemental plus faible par rapport au recyclage. La réutilisation est la plus petite boucle de récupération et possède l'effet le plus faible sur l'environnement par rapport aux autres méthodes de valorisation des produits [2], alors c'est le choix qui sera adapté en premier lieu si l'état du produit le permet. Pour l'opération de réparation le désassemblage qu'on propose est le désassemblage partiel, il donne moins de déchets et prend moins de temps, donc s'il est fait manuellement, la personne sera moins exposée aux déchets et substrats produits lors du désassemblage, et s'il est automatique il consommera moins d'énergie que le désassemblage total.

Conclusion

Cet article présente une étude bibliographique qui analyse les différents modes de valorisation des produits en fin de vie et montre quelques critères de choix du mode de désassemblage le plus appropriés à chaque mode de valorisation en fonction des paramètres techniques et environnementaux. Le sujet de l'environnement reste toujours un point important dans tous les domaines et il est toujours en évolution dans le domaine de la mécanique et production vu que la production est le premier facteur de l'impact environnemental. La valorisation des produits en fin de vie est l'une des solutions les plus adaptées et la plus reconnue mais il y a beaucoup de critères qui affecte le choix du mode convenable, dans cet article les critères étudiés sont les modes de désassemblage et les paramètres technique des produits. Un schéma récapitulatif de la stratégie de décision adaptée dans cet article est présenté ci-joint pour résumer ce travail.

Références

- [1] Favi C, Germani M, Mandolini M, Marconi M (2016). Includes knowledge of dismantling centers in the early design phase: a knowledge-based design for disassembly approach. *Procedia Cirp* 2016; 48:401-406.
- [2] Vanson, G., Marangé, P., & Levrat, E. (2022). End-of-Life Decision making in circular economy using generalized colored stochastic Petri nets. *Autonomous Intelligent Systems*, 2(1), 1-18.
- [3] Hugo D. (2006), stratégies d'assemblage et de désassemblage dans un contexte de développement durable, mémoire, Faculté des études supérieures de l'Université Laval, 2006.
- [4] Suhariyanto, T. T., D. A. Wahab, and MN Ab Rahman. "Multi-Life Cycle Assessment for sustainable products: A systematic review." *Journal of Cleaner Production* 165 (2017): 677-696.
- [5] Zhou, Z., Liu, J., Pham, D. T., Xu, W., Ramirez, F. J., Ji, C., & Liu, Q. (2019). Disassembly sequence planning: Recent developments and future trends. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 233(5), 1450–1471. <https://doi.org/10.1177/0954405418789975>.

- [6] Dong, J., & Arndt, G. (2003). A review of current research on disassembly sequence generation and computer aided design for disassembly. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 217(3), 299–312. <https://doi.org/10.1243/095440503321590479>
- [7] F. Touzanne, J. M. Henrioud, and C. Perrard. "Method of disassembly sequence generation for recycling system design." *Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP2001). Assembly and Disassembly in the Twenty-first Century. (Cat. No. 01TH8560)*. IEEE, 2001.
- [8] N. Haoues, A. Cornier, ; P. Zwolinski, Influence des choix de conception sur le désassemblage pour l'environnement, (2003).
- [9] Guo, X., Zhou, M., Liu, S., & Qi, L. (2020). Multiresource-constrained selective disassembly with maximal profit and minimal energy consumption. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 18(2), 804-816.
- [10] MILOUDI, M. (2012). Application de la charge par effet triboélectrique des matériaux granulaires dans la séparation électrostatique (Doctoral dissertation).
- [11] Chung, Y. J., Kim, K., Lee, B. I., & Park, C. B. (2017). Carbon Nanodot-Sensitized Modulation of Alzheimer's β -Amyloid Self-Assembly, Disassembly, and Toxicity. *Small*, 13(34), 1700983.
- [12] Villalba, G., Segarra, M., Chimenos, J. M., & Espiell, F. (2004). Using the recyclability index of materials as a tool for design for disassembly. *Ecological Economics*, 50(3-4), 195-200.
- [13] Yadav, D. P., Patel, D. N., & Morkos, B. W. (2018). Development of product recyclability index utilizing design for assembly and disassembly principles. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 140(3).
- [14] Belhadj, I., Hammadi, M., & Aifaoui, N. (2021). Parallel disassembly approach with recycling rate calculation of industrial products. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113(9), 2969-2984.
- [15] Shetty, D., & Xu, J. (2017, November). Design for Disassembly Method As Sustainable Product Evaluation Tool: Example of Underground Escalator. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Vol. 58462, p. V011T15A015)*. American Society of Mechanical Engineers.
- [16] Hallack, E., Peris, N. M., Lindahl, M., & Sundin, E. (2022). Systematic Design for Recycling Approach—Automotive Exterior Plastics. *Procedia CIRP*, 105, 204-209.
- [17] Jiang, Z., Wang, H., Zhang, H., Mendis, G., & Sutherland, J. W. (2019). Value recovery options portfolio optimization for remanufacturing end of life product. *Journal of cleaner production*, 210, 419-431.
- [18] Joshi, A. D., & Gupta, S. M. (2021). Managing Uncertainties in Design Alternatives of EOL Products With Fractional Disassembly Yields. *International Journal of Quality Control and Standards in Science and Engineering (IJQCSSE)*, 8(1), 1-23.
- [19] Kim, J., Park, S., & Kim, H. M. (2022). Optimal modular remanufactured product configuration and harvesting planning for end-of-life products. *Journal of Mechanical Design*, 144(4).
- [20] Bracquene, E., Peeters, J., Alfieri, F., Sanfelix, J., Duflou, J., Dewulf, W., & Cordella, M. (2021). Analysis of evaluation systems for product reparability: A case study for washing machines. *Journal of Cleaner Production*, 281, 125122.
- [21] Rodríguez, N. B., & Favi, C. (2022). Eco-design guidelines takeaways from the analysis of product reparability and ease of disassembly: a case study for electric ovens. *Procedia CIRP*, 105, 595-600.
- [22] Cordella, M., Sanfelix, J., & Alfieri, F. (2018). Development of an Approach for Assessing the Reparability and Upgradability of Energy-related Products. *Procedia Cirp*, 69, 888-892.
- [23] Bracquené, E. (2018) "Reparability criteria for energy related products." *Study in the BeNeLux Context to Evaluate the Options to Extend the Product Life Time Final Report* (2018).

- [24] Mandolini, M. (2018) "Time-based disassembly method: how to assess the best disassembly sequence and time of target components in complex products." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 95.1 (2018): 409-430.
- [25] Vanegas Pena, P., Peeters, J., Cattrysse, D., Duflou, J., Tecchio, P., Mathieux, F., & Ardente, F. (2016). Study for a method to assess the ease of disassembly of electrical and electronic equipment. Method development and application to a flat panel display case study.
- [26] Mann, A., Saxena, P., Almani, M., Okorie, O., & Salonitis, K. (2022). Environmental Impact Assessment of Different Strategies for the Remanufacturing of User Electronics. *Energies* 2022, 15, 2376.