

Proposition sujet de thèse de doctorat en CIFRE : GEHC / CentraleSupélec

Durabilité des systèmes médicaux : un modèle et une plateforme d'évaluation et de pilotage intégrant l'éco-circularité à travers la science des données

Sustainability of medical systems: a model and a platform for evaluation and management integrating eco-circularity through data science

Mot clés : Analyse de cycle de vie, indicateurs de circularité, empreinte carbone, science des données, systèmes médicaux, performance environnementale, économie circulaire, maintenance préventive et opportuniste, réutilisation, réparation, reconditionnement, réduction des déchets

Keywords: life cycle assessment, circularity indicators, carbon footprint, data science, medical systems, environmental performance, circular economy, preventive and opportunistic maintenance, reuse, repair, refurbishment, remanufacturing, waste reduction

Encadrants :

Directeur de thèse : Prof. Bernard Yannou (Directeur du Laboratoire Génie Industriel de Centralesupélec et titulaire du Pôle A « recherche amont et formation » de l'alliance CircularIT)

Maîtres de thèse :

- Dr. Ghada Bouillass (Chercheuse au Laboratoire Génie Industriel de Centralesupélec en Economie Circulaire)
- Dr. Michael Saidani (Chercheur au Laboratoire Génie Industriel de Centralesupélec et Illinois University en Economie Circulaire)

Encadrant de l'entreprise :

Robert Heidsieck (Directeur Life Cycle Solutions Product Circularity de General Electric HealthCare)

Résumé/Abstract : GE Healthcare est un leader mondial de conception et maintenance des appareils médicaux. Le rachat des appareils usagés, la réparation et la maintenance préventive étaient jusqu'alors régis par des considérations de continuité de service chez les clients et de coûts. Il s'agit maintenant de prendre en compte des considérations d'économie circulaire et d'impacts environnementaux pour trouver de nouveaux compromis et permettre à GE Healthcare de consolider ses objectifs de trajectoire bas carbone et d'utilisation raisonnée de la matière. Pour cela, il sera développé une approche de « cockpit digital », basée sur la science des données, agrégeant des indicateurs de haut niveau et visualisant les flux de produits pour servir de support aux décisions de pilotage de ces flux. Les données remontant de ce cockpit digital pourront également fournir des conseils pour l'écoconception des familles de produits et pour définir des fonctionnalités avancées de simulation de scénarios, d'optimisation et d'Intelligence Artificielle.

Contexte Industriel

GE HealthCare (GEHC) est un des leaders mondiaux dans les ventes et services des systèmes médicaux notamment ceux d'imagerie médicale (Scanners, IRM, Mammographie...).

Par la nature de ses activités, GEHC a déjà mis en œuvre un modèle d'économie circulaire depuis des années pour maintenir en conditions opérationnelles les appareils médicaux de ses clients. En effet, compte tenu de la criticité de ses produits (appareils médicaux) et de la spécificité technologique de ses composants, GEHC propose un service de maintenance pour ses clients. L'objectif principal de ce service est d'assurer la fiabilité de ses produits (réduire les taux d'occurrence des pannes), de réduire leurs temps d'indisponibilité tout en veillant à réduire l'ensemble des coûts associés à ses interventions.

La disponibilité des pièces détachées est un élément clé de la maintenance des produits. GE HealthCare (GEHC) a développé une chaîne d'approvisionnement dédiée pour des pièces de rechange afin d'atteindre le niveau de performance requis. Cette chaîne d'approvisionnement comprend l'approvisionnement de matières premières et de composants, le stockage et l'acheminement des pièces vers les techniciens de maintenance. L'objectif ultime de cette chaîne est d'assurer la disponibilité des pièces pour la maintenance tout en optimisant le niveau de stock et en réduisant les différentes composantes de coûts (Lazrak, 2015).

Par ailleurs, GEHC a un programme de reprise des équipements dont le client décide de se séparer. Ces équipements peuvent être, soit remis à niveau puis revendus à de nouveaux clients, soit testés puis désassemblés pour la réutilisation de pièces de rechange. Les pièces de rechange réparées et réutilisées permettent de répondre rapidement aux besoins de maintenance et d'offrir une source d'approvisionnement alternative et moins coûteuse à cette chaîne logistique des pièces de rechange (El Garrab et al., 2020).

Dans le cas d'activité de réparation, GEHC cherche à optimiser la durée de vie de la pièce réparée grâce à des techniques de maintenance préventive et opportuniste (Boujarif et al., 2023). Par ailleurs, le lien entre la disponibilité d'équipements repris sur le marché destinés à être désassemblés (Harvest) et la disponibilité de pièces de rechanges réutilisées est central pour optimiser les opportunités (Turki et al., 2022).

GE HealthCare s'est aussi engagé à atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 avec un point intermédiaire d'une réduction de 50% d'ici 2030. Le sujet de thèse ici proposé doit contribuer à orienter la stratégie d'économie circulaire et d'éco-conception en identifiant les alternatives les plus prometteuses pour l'atteinte de cet objectif.

Dans ce contexte, le département « Life Cycle Solutions » (LCS) est en charge des activités de réparation et de réutilisation (Harvest) ainsi que du désassemblage et du reconditionnement des équipements repris du marché. C'est au sein de ce département que sera mené ce travail de collaboration recherche avec le LGI (Laboratoire Génie Industriel) de CentraleSupélec.

Motivation et sujet de thèse

Bien que GEHC ait déjà mis en œuvre un modèle circulaire présentant plusieurs boucles de réparation et réemploi au centre de ses activités de maintenance, il manque une vision holistique de ces activités qui permettrait d'assurer l'usage optimal des ressources utilisées. A cela s'ajoute, la complexité particulière des systèmes médicaux s'intégrant dans un environnement régulé par les directives des organismes de la santé. En effet, plusieurs enjeux technico-économiques, stratégiques et environnementaux sont relevés quant à l'intégration des boucles de réparation, de réemploi et de revalorisation. L'impact environnemental associé à ces boucles est encore peu mesuré dans les systèmes industriels complexes (Schaubroeck et al. 2021). Celui-ci n'est pas systématiquement corrélé avec l'augmentation de la circularité, et devrait être davantage investigué (15, 25). GEHC se trouve ainsi confronté à plusieurs compromis entre les performances environnementales, technologiques, économiques et de circularité. Or cette maîtrise et régulation des compromis est primordiale pour s'assurer de la soutenabilité des décisions prises sur le long-terme.



Figure 1 Illustration des phases de cycle de vie des systèmes médicaux et des boucles de circularité

GEHC dispose d'un portefeuille de produits extrêmement riche (plusieurs centaines de milliers), d'une base installée large (plusieurs millions d'unités) et très diversifiée pour différentes familles de produits qui ont des cycles de vie très différents. Par conséquent, le contexte est celui d'une profusion de produits et de pièces détachées.

Il est stratégique de mettre en œuvre les indicateurs environnementaux et de circularité adaptés à l'ensemble des activités liées à chacun des produits de GE HealthCare. Cela étant, les données associées à l'usage des équipements médicaux peuvent être manquantes pour mener des évaluations complètes. Au vu de la complexité du portefeuille de produits et de l'étendue de sa base installée, il est nécessaire de trouver un équilibre entre les analyses détaillées de l'empreinte environnementale de certains produits et l'utilisation d'estimateurs pour le reste des produits. A cet effet, GEHC doit se munir de modèles robustes d'évaluation et de pilotage de son niveau de circularité en corrélation avec les indicateurs environnementaux, adaptés à son portefeuille de produits.

La mise en œuvre d'une plateforme d'évaluation et de pilotage permettrait de ne pas prendre des décisions de conception, de production, de maintenance et de réparation sur les seules bases de fiabilité et de coûts, mais réaliser un compromis avec la performance environnementale et de circularité.

Il est stratégique pour GE HealthCare d'identifier les opportunités relevant des boucles de revalorisation en termes d'économie des ressources et de suivre l'amélioration effective du taux de circularité des systèmes médicaux.

L'entreprise se trouve confrontée aux décisions suivantes dans le cadre de la gestion de cycle de vie de ces produits :

- Quel est le niveau de circularité de chacune de ses lignes de produits ? sur l'ensemble du portefeuille ?

- Comment établir des modèles de données robustes dans le cas d'informations incomplètes ou manquantes ?
- Quels sont les points critiques et les opportunités d'amélioration au niveau des produits ? sur l'ensemble du portefeuille ?
- Quel est l'impact environnemental (empreinte carbone) lié à ces améliorations ?
- Comment mesurer / certifier la qualité des données et des estimateurs sur l'ensemble des indicateurs et outils associés ?
- Comment s'assurer a posteriori que les objectifs sont atteints (vérification, validation, certification) ?

Objectifs de la thèse

Les objectifs de la thèse sont de :

1. Définir des indicateurs de circularité adaptés à la famille de produits de GEHC et de ses activités,
2. Proposer des modèles simplifiés pour une évaluation systématique d'impacts environnementaux de la famille de produits GEHC.
3. Complémenter la base de données GEHC avec les indicateurs de circularité et de performance environnementale mesurés tout en s'assurant de la fiabilité et la qualité des données.
4. Développer des outils d'aide à la décision pour assurer une gestion efficace du cycle de vie des produits - de la conception à la fin de vie – tenant compte des compromis en termes de d'impacts environnementaux tout en minimisant les coûts sur le cycle de vie.
5. Etablir des feuilles de routes et recommandations sur les techniques d'éco-conception permettant une utilisation optimale de ressources sur l'ensemble du cycle de vie des produits du portefeuille de GEHC.

Pour répondre aux objectifs décrits ci-dessus, la thèse fera appel à la connaissance des flux de matière, de l'usage de ressources prévu ou constaté dans les phases de vie de produit, de la base installée, des techniques d'analyse d'impact écologiques et des méthodes de science des données. De plus, les approches déployées prendront en compte l'état courant du cycle de vie du produit considéré : (i) conception, en phase de lancement et de croissance, mature ou déclinant, (ii) utilisation et maintenance, (iii) collecte et reconditionnement/fin de vie.

Axes de recherche scientifiques

Ainsi, ce sujet de thèse propose d'aborder et d'intégrer les axes de recherche suivants :

- Performance environnementale et circularité des équipements de santé : Cet axe de recherche est dédié au développement de méthodes et d'outils d'évaluation basés sur l'Analyse de Cycle de Vie et les indicateurs de circularité pour contribuer à l'éco-conception des systèmes industriels médicaux complexes.
- L'identification des axes d'amélioration et des approches d'aide à la décision pour les choix opérationnels et stratégiques dans la gestion du portefeuille des produits.
- Celui de l'impact de la qualité des données ou de leur estimateur lorsqu'elles sont manquantes ou incomplètes pour assurer la consistance des décisions et la robustesse aux incertitudes inhérentes à

un environnement réel complexe et varié. Cette analyse permettra de choisir les stratégies les plus pertinentes en fonction du contexte réel du produit.

- Analyse multicritère de prise de décision (Multicriteria decision analysis) : cet axe de recherche a comme pour objectif d'explorer les méthodes existantes d'aide à la prise de décision pour identifier les alternatives les plus prometteuses conciliant la performance environnementale et de circularité.

Découpage du projet scientifique

1. **Analyse terrain** du flux de production et de réparation des appareils médicaux. Cette analyse intègre la compréhension des modes de défaillance des appareils existants, des logiques de fiabilité et de maintenance préventive et opportuniste utilisées, des modèles de coûts, de la gestion des déchets, d'une compréhension des attentes des clients et des performances environnementales et sociales affichées par GE Healthcare.
2. **Etat de l'art** sur les domaines de connaissance au service de la production d'un cockpit digital pour piloter l'éco-circularité d'appareils médicaux, à savoir : indicateurs de circularité, l'analyse de cycle de vie, l'écoconception, la gestion des flux, la réduction des déchets, le pilotage économie circulaire, science des données, aide à la décision technico-économique.
3. **Modèle d'indicateurs de circularité** adaptés aux produits médicaux, incluant les outils et méthodes pour leur mesure.
4. **Modèles paramétrés simplifiés d'ACV** : identifier les paramètres d'entrée influents sur les résultats finaux d'impacts environnementaux (analyse inventaire du cycle de vie), modéliser le cycle de vie des produits médicaux sur la base de scénarios à degré de circularité variable.
5. **Modèle de cockpit digital** pour piloter l'éco-circularité d'appareils médicaux, en développant les aspects cycle de vie des données (modèle de données réutilisable/transférable permettant une gestion efficace du cycle de vie des produits dans une optique d'économie circulaire durable), agrégation des données en indicateurs de haut niveau (économie circulaire, coûts, soutenabilité, performance de fiabilité, délai), tableau de bord des flux matière. Ce cockpit digital accumulera des données temporelles de flux de produits et composants et permettra de prendre des décisions à plusieurs échelles de temps.
6. **Modèle d'aide à la décision** incluant les mécanismes de compromis multicritères (voir [20] par exemple) et permettant d'automatiser les décisions au sein du cockpit digital.
7. **Propositions de conseils en écoconception par familles de produits** à partir des données temporelles et des décisions stockées dans le cockpit digital. Il est ici envisagé qu'un produit médical mal conçu génère trop de réparations coûteuses et que celles-ci puissent être détectées et signalées pour une amélioration du produit ou encore que la conception n'optimise pas la réparation ou la réutilisation des composants dans les diverses phases du cycle de vie.
8. **Propositions de fonctionnalités avancées de simulation de scénarios, d'optimisation et d'Intelligence Artificielle** qui auraient avantage à être développées au sein du cockpit digital. Il s'agit ici de formuler des ouvertures utiles mais pas de les développer.

Les livrables s'échelonneront selon le diagramme Gantt ci-dessous. Trois publications de revues internationales indexées sont envisagées ainsi que la participation à deux ou trois conférences internationales.

Bibliographie

1. Lazrak, Adnane. Amélioration des processus de prévision et de gestion des stocks dans le cas d'une chaîne logistique des pièces de rechange. 2015. Thèse de doctorat. Nantes, Ecole des Mines. CIFRE GE Healthcare.
2. El Garrab, Hamza, CASTANIER, Bruno, LEMOINE, David, *et al.* 2020. Towards hybrid machine learning models in decision support systems for predicting the spare parts reverse flow in a complex supply chain. In: *Information system, Logistics & Supply Chain-ILS 2020*. p. 188-195.
3. Turki, E., Jouini, O., Jemai, Z., Urie, L., Lazrak, A., Valot, P., & Heidsieck, R. (2022, February). Forecasting Extractions in a Closed Loop Supply Chain of Spare Parts: An Industrial Case Study.
4. In *11th International Conference on Operations Research and Enterprise Systems (pp. 236-243)*. SCITEPRESS-Science and Technology Publications.
5. Boujarif, A.; Coit, D.; Jouini, O.; Zeng, Z. and Heidsieck, R. (2023). Opportunistic Maintenance of Multi-Component Systems Under Structure and Economic Dependencies: A Healthcare System Case Study.. In: *ICORES 2023 Conference – Poster - Feb 2023*.
6. Schaubroeck, Thomas, Thomas Gibon, Elorri Igos, et Enrico Benetto. 2021. « Sustainability Assessment of Circular Economy over Time: Modelling of Finite and Variable Loops & Impact Distribution among Related Products ». *Resources, Conservation and Recycling* 168 (mai): 105319. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105319>.
1. Huiskonen, J. Maintenance spare parts logistics: Special characteristics and strategic choices. *International journal of production economics*, 2001, vol. 71, no 1, p. 125-133.
2. Saccani, N., Johansson, P., & Perona, M. Economics, 110(1), 52-69. Configuring the after-sales service supply chain: A multiple case study. *International Journal of Production Economics*, 2007, vol. 110, no 1, p. 5269.
3. Peng, Hui, et al. "Uncertainty factors, methods, and solutions of closed-loop supply chain—A review for current situation and future prospects." *Journal of Cleaner Production* (2020): 120032.
4. Pascual, Rodrigo, et al. 2017. Optimal repairable spare-parts procurement policy under total business volume discount environment. *Reliability Engineering & System Safety*, 159: 276-282.
5. Wong, Hartanto, Dirk Cattrysse, and Dirk Van Oudheusden. 2005. Stocking decisions for repairable spare parts pooling in a multi-hub system. *International Journal of Production Economics*, 93 : 309-317.
6. Bouzenad, A. 2017. Gestion optimale des pièces de rechange dans un réseau logistique multi-échelon flexible. Mémoire de maîtrise en Génie Mécanique. Université de Laval.
7. Pham, H., & Wang, H. 1996. Imperfect maintenance. *European Journal of Operational Research*, vol. 94(3), pp. 425-438.
8. Do Van, P., Voisin, A., Levrat, E., & Iung, B. 2015. A proactive condition-based maintenance strategy with both perfect and imperfect maintenance actions. *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 133, pp. 22-32.
9. Saidani M., Yannou B., Leroy Y., Cluzel F., Kendall A. A taxonomy of circular economy indicators. *Journal of Cleaner Production*, Vol 207 (2019) pp 542-559
10. Saidani M., Yannou B., Lepochat S., Monteil A. Benchmark des indicateurs de circularité et liens avec l'ACV, étude pour ScoreLCA de juin 2021
11. Shevchenko T., Yannou B., Saidani M., Cluzel F., Ranjbari M., Esfandabadi Z.S., Danko Y., Leroy Y., 2022. Product-level circularity metrics based on the "Closing-Slowing Future-Past" quadrant model. *Sustainable Production and Consumption*, doi: 10.1016/j.spc.2022.09.024.
12. Saidani M. (2018) 'Monitoring and advancing the circular economy transition – Circularity indicators and tools applied to the heavy vehicle industry', PhD thesis, Université Paris-Saclay
13. Saidani M., Yannou B., Leroy Y., Cluzel F., (2018) 'Circularity Indicators: The Advisor', Proceedings of IDETC/CIE 2018: International Design Engineering Technical Conferences / CIE: Computers and Information in Engineering, Quebec City, Quebec, Canada, August 26-29
14. Saidani M., Kim H.M., Yannou B., Leroy Y., Cluzel F. (2019) 'Testing the robustness of circularity indicators: empirical insights from workshops on an industrial product', in 22nd International Conference on Engineering Design (ICED), Delft, The Netherlands
15. Saidani M., Kim H.M., Yannou B., Leroy Y., Cluzel F., (2019) 'Framing Product Circularity Performance For Optimized Green Profit', Proceedings of IDETC/CIE 2019: International Design Engineering Technical Conferences / CIE: Computers and Information in Engineering, Anaheim, CA, USA, August 18-21

16. Saidani M., Kim H.M., Yannou B., Leroy Y., Cluzel F. (2019) 'Testing the robustness of circularity indicators: empirical insights from workshops on an industrial product', in 22nd International Conference on Engineering Design (ICED), Delft, The Netherlands
17. Saidani M., Yannou B., Cluzel F., Leroy Y., (2019) 'C-Indicators: A Web-Based Platform To Monitor And Improve The Circularity Potential Of Products', Proceedings of IDETC/CIE 2019: International Design Engineering Technical Conferences / CIE: Computers and Information in Engineering, Anaheim, CA, USA, August 18-21
18. Saidani M., Kim H., Cluzel F., Leroy Y., Yannou B. (2020) 'Product circularity indicators: what contributions in designing for circular economy?', in Design Conference, Dubrovnik, Croatia
19. Saidani M., Kim H., Yannou B. (2021) 'Circularity indicators and tools for product design: A web-based visualization and selection tool', in IDETC-CIE 2021 - International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, Virtual Conference
20. Saidani M., Lepochat S., Monteil A., Yannou B., Garcia J., Osset P. (2022) 'Benchmark of circularity indicators and links with life cycle assessment', in LCM 2022: The 10th International Conference on Life Cycle Management, Stuttgart, Germany
21. Shevchenko T., Yannou B., Saidani M., Cluzel F., Ranjbari M., Esfandabadi Z.S., Danko Y., Leroy Y. (2022) 'Product-level circularity metrics based on the "Closing-Slowing Future-Past" quadrant model', Sustainable Production and Consumption, doi: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.09.024>

Le Laboratoire Génie Industriel de CentraleSupélec

Le Génie Industriel est la science du diagnostic, de la modélisation, de la simulation, de la conception, de l'exploitation et de la conduite du changement des systèmes d'activités des organisations (notamment des entreprises). Le Laboratoire Génie Industriel (LGI, <http://www.lgi.centralesupelec.fr/>) de CentraleSupélec a donc pour objets d'étude (1) les systèmes de produits-services mis sur le marché par les entreprises et (b) les systèmes de production ou d'activité des entreprises. Ces systèmes, et les processus qui en découlent, sont déclinés tout au long de leur cycle de vie. Il s'agit de savoir les observer, diagnostiquer, concevoir ou améliorer, opérer (exploiter, réguler, maintenir) et recycler. Le LGI est composé de 90 personnes, dont 30 enseignants-chercheurs et 45 doctorants, couvrant les disciplines des sciences de la conception, du génie industriel, de l'automatique, des sciences informatiques, des sciences économiques et de gestion. Le LGI (voir son [rapport d'activités](#)) est organisé en 4 équipes de recherche, 5 thèmes transversaux et 10 chaires industrielles. Les 4 équipes sont (IC) Ingénierie de la Conception, (MO) Management des Opérations, (SR) Sureté et Risques, (ED) Economie Durable. Les 5 thèmes transverses industriels et sociétaux sont : systèmes de mobilité, systèmes énergétiques, systèmes de santé, industrie du futur et économie circulaire.

La présente thèse s'inscrit au sein des 2 équipes de recherche (IC) Ingénierie de la Conception, et (MO) Management des Opérations, ainsi que sur le thème Economie Circulaire (EC) :

- En économie Circulaire (EC), le LGI a développé une expertise reconnue en Analyse de Cycle de Vie, Analyse de Flux Matière, écoconception, indicateurs d'économie circulaire, solutions en économie circulaire
- En Ingénierie de la Conception (IC), le LGI a acquis une expertise en optimisation de famille de produits, modèles de Coût Global de Possession (Total Cost of Ownership), plateformes, MBSE (model-based system engineering), automatisation de la conception, optimisation multicritère et multi-disciplinaire, ingénierie concourante.
- En Management des Opérations (MO), le LGI a développé une expertise reconnue en Supply Chain Management, en dimensionnement de système industriel, et en analyse coûts-bénéfices.