

# RegEcoS : Un EcoSystème de Régénération de produits basé sur leurs usages

P. Marangé <sup>a,\*</sup>, H. Ben Rejeb <sup>b</sup>, V. Robin <sup>c</sup>, M. Traore <sup>c</sup>, P. Zwolinski <sup>b</sup>, E. Levrat <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Université de Lorraine, CRAN, UMR 7039, Campus Sciences, BP 70239, 54506 Vandœuvre-lès-Nancy, France

<sup>b</sup> Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP, 46 Avenue Félix Viallet, Grenoble, 38000, France

<sup>c</sup> Université de Bordeaux, Laboratoire IMS – UMR 5218, 351 Cours de la Libération 33405 Talence – Cedex

## 1. INTRODUCTION

Le projet RegEcoS vise la mise en œuvre de l'économie circulaire en se focalisant sur la revalorisation des produits à la fin de leur première phase d'utilisation, ceci afin de limiter la consommation d'énergie et de matières premières. Cette approche impose de concevoir conjointement un produit et son écosystème industriel et informationnel pour le rendre plus robuste, durable, réparable, et d'envisager plusieurs vies pour lui ou ses composants.

Dans ce contexte, les trois laboratoires : CRAN, G-SCOP et IMS ont monté un projet soutenu par S.mart en 2020, puis une ANR qui a débuté en janvier 2023. Ce programme vise le développement de méthodes, modèles et outils pour l'industrialisation de la régénération des produits en fin d'utilisation. Toutes les possibilités permettant de revaloriser un produit après son utilisation et ainsi repousser sa fin de vie (reuse, remanufacturing, recycling, etc.), sont regroupées sous le terme de régénération. La régénération impose une vision globale et intégrée de la revalorisation (en opposition à une vision classique très segmentée et locale), transversale au cycle de vie du produit, puisqu'elle peut être envisagée plusieurs fois dans la vie d'un même produit et de tout ou partie de ses sous-ensembles, composants.

La régénération ne peut être abordée comme un processus de production classique, du fait :

- de la spécificité du flux de produits traités (déchets, flux non constants en quantité et qualité),
- des informations disponibles pour prendre la décision (natures hétérogènes, incomplètes, incertaines, ...)
- de l'effet escompté de la régénération, dépendant de l'état de santé du produit à la fin de son utilisation et de la demande du marché.

De plus, pour envisager plusieurs phases de régénération dans la vie d'un produit, celui-ci doit présenter des aptitudes à la régénération et doit être

conçu pour la régénération (Design for Regeneration). D'autre part, le processus de régénération qui interviendra, plus tard et à plusieurs reprises dans la vie d'un produit, doit être adapté, dimensionné selon les spécificités du produit et des besoins du marché.

Dans cet article, nous proposons de tracer l'évolution de cette collaboration puis de donner les pistes de recherche abordées dans le cadre de l'ANR RegEcos. L'article sera structuré en 3 parties : (i) une description du projet S.mart de 2020 et des résultats obtenus, (ii) une description de l'ANR RegEcos, (iii) conclusions et perspectives.

## 2. DESCRIPTION PROJET S.MART 2020

Dans le cadre de ce projet, nous cherchions à aider les régénérateurs/producteurs à définir le processus de régénération et plus spécifiquement les alternatives possibles de régénération à mettre en place en fonction de l'état de santé de leurs produits-déchets. Pour cela nous cherchions à répondre à plusieurs questions :

- Quels sont les critères pour spécifier l'état de santé d'un produit-déchet en vue de sa régénération ?
- Quelles sont les informations utiles à récupérer au cours des différentes phases de vie du produit à régénérer ?
- Comment établir l'état de santé du produit à partir de l'état de santé des sous-ensembles ou des composants ?
- Comment mettre en place une coopération entre les différentes parties prenantes de l'écosystème pour collecter ces informations ?
- Quelles parties prenantes détiennent l'information ? et quelles sont les informations nécessitant d'être partagées ?
- Comment faire coopérer les parties prenantes ?

Afin de répondre aux questions identifiées, le projet a été découpé en trois lots (workpackages) :

*WP1: Identification des informations utiles à la génération de l'état de santé:* Lors de la phase de conception d'un produit, l'usage et la régénération sont pris en compte. Pour que le produit neuf réponde aux besoins clients, il y a des exigences à satisfaire et si nous souhaitons que les produits régénérés puissent être réutilisés, il faut que certaines exigences soient toujours satisfaites. Si ce n'est pas le cas, la régénération à mettre en place doit être choisie en fonction de l'état de santé du produit-déchet. L'objectif de ce workpackage était d'identifier les informations à surveiller et à analyser pour vérifier la satisfaction des exigences.

*WP2: Identification des parties prenantes pouvant remonter l'information et formalisation de la coopération entre elles:* Une fois que les informations sont identifiées pour établir l'état de santé, les parties prenantes peuvent les capter, les observer, les enregistrer et les faire remonter pour alimenter les décisions de régénération. Ici, il s'agit de définir une bonne coopération entre les parties prenantes, c'est-à-dire qu'il faut spécifier les informations à échanger afin qu'en fin de vie du produit, il soit possible d'établir plus précisément son état de santé en prenant en compte l'usage qui en a été fait.

*WP3: Identification et quantification/qualification l'état de santé des produits déchets:* La définition d'une solution de régénération va s'appuyer sur l'état de santé de produits-déchets. Il s'agit de définir les éléments de l'état de santé de produits-déchets, composés de différents sous-ensembles et composants, ayant chacun un état de santé propre. Pour répondre à ce point, il est nécessaire de déterminer les critères spécifiant l'état de santé, les interactions existantes entre eux, ce qui peut se faire par des opérateurs d'agrégation multicritère par exemple.

Ce projet a été réalisé à l'aide du financement de 2 stages de master recherche et d'un stage d'ingénieur. Les résultats que nous avons obtenus :

- Une revue de la littérature afin de caractériser la notion d'état de santé. Une étude bibliographique systématique a été réalisée grâce à la méthode PRISMA [5]. Elle a permis de déterminer les différentes approches existantes pour la détection, le diagnostic et le pronostic des défaillances des systèmes complexes. Elle a aussi permis de montrer les différents résultats obtenus pour des systèmes spécifiques ou des domaines d'application, ainsi que les approches courantes pour améliorer la fiabilité des systèmes en utilisant l'analyse de l'état de santé [11].
- Développement d'un cadre général pour l'estimation des états de santé et des scénarios circulaire : L'objectif de ce cadre est de permettre l'estimation de l'état de santé d'un système complexe afin d'optimiser les scénarios de fin de vie de ses composants, ce qui consiste à déterminer le scénario circulaire qu'ils devraient suivre [11]. Le cadre général proposé par le travail de master est basé sur les méthodes CBM

(Condition Based Maintenance) et PHM (Prognostic Health Management). L'approche PHM a été choisie parce qu'elle intègre les principes de la CBM, et qu'elle est recommandée pour la prédiction de la durée de vie restante des produits à l'aide de l'évaluation de la santé. La méthode CBM comporte plusieurs étapes qui commencent par la sélection de variables pertinentes liées à chaque composant. Ensuite, sur la base des données de fonctionnement, un indicateur de santé est caractérisé, ce qui permet de suivre et de modéliser la dégradation du composant. Ceci permet de déterminer les composants les plus critiques du système. L'état de santé peut être estimé par différentes approches de modélisation grâce à la méthode PHM [6]. L'application de CBM et PHM est suivie par l'étape de prise de décision sur les scénarios circulaires du produit en fin de vie.

- Les prises de décision de régénération tout au long du cycle de vie d'un produit obligent d'avoir un grand nombre de données fiables aux formats et origines divers sur l'ensemble du cycle et donc d'être en mesure de les collecter, visualiser, manipuler et exploiter [1]. L'objectif des travaux de master était d'estimer la faisabilité de la prise en compte d'une telle complexité, en considérant tous les niveaux d'évolution d'un produit ainsi que l'ensemble des différentes parties prenantes tout au long du cycle de vie [1][10]. Une cartographie des parties prenantes et des typologies de données potentiellement générées au cours du cycle ont été proposées. Nous avons ensuite étudié les modèles et outils susceptibles de supporter la collecte, le suivi et l'exploitation de ces données. Nous avons retenu le concept de « jumeaux numériques » [3][7] qui sont des représentations virtuelles des produits, des processus ou des systèmes physiques, car ils participent de la meilleure compréhension, offre une capacité d'anticipation accrue du comportement des systèmes [2] et la possibilité d'intégrer des facteurs sociaux et environnementaux du système technique [4].
- Développement d'un système d'aide à décision qui permet d'évaluer les différentes stratégies de régénération en fonction de l'état de santé du produit d'un point de vue de la probabilité de réussite de celle-ci. En effet en fonction de l'état de santé du produit, il est possible qu'une action de régénération n'ait pas l'effet escompté. Par exemple, lors d'un désassemblage d'un carter en plastique, si le plastique a été exposé au soleil, il y a un risque au désassemblage de casser une interface. Nous avons donc choisi de modéliser les différentes stratégies de régénération par un réseau de Petri stochastique, ce qui permet d'introduire des incertitudes sur l'exécution des différentes actions. Pour que ces incertitudes tiennent compte de l'état de santé du produit, nous avons utilisé des jetons de couleurs dans le réseau de Petri coloré stochastique. Afin d'évaluer la probabilité de réussite d'une stratégie de régénération, nous avons effectué une simulation de Monte-Carlo [8,9].

- Conception d'un système d'information pour un processus de régénération. A partir de l'analyse de flux de produits dans un système de régénération l'ensemble, nous avons pu déterminer les données que nous devons prendre en compte sur le procédé de régénération, sur le produit et sur l'usage de celui. Ce travail a été réalisé par un stagiaire de 2<sup>ème</sup> année d'école d'ingénieur et a conduit à un diagramme de classe représentant l'ensemble des informations.

A la fin de ce projet financé par le réseau S.mart, nous avons pu formaliser de nouveaux axes de recherche et nous avons alors déposé un projet ANR en 2022, le projet ANR RegEcoS, qui a débuté en janvier 2023.

### 3. LES OBJECTIFS ET VERROUS SCIENTIFIQUES DU PROJET ANR REGECOS ET SA STRUCTURATION

Le projet RegEcoS a pour objectif de choisir la solution de régénération d'un produit, en répondant aux difficultés de la prise de décision de la régénération à mettre en place, qui résident (i) dans la méconnaissance de la vie du produit lors de la phase d'utilisation et (ii) dans le fait que le produit et les processus de régénération sont conçus séparément. Les originalités de ce projet sont d'adopter cette vision globale et transverse de la conception des produits et des processus de régénération et de s'appuyer sur plusieurs jumeaux numériques permettant ainsi (i) d'avoir la vue des processus de régénération et (ii) d'avoir une observation/prédiction de l'utilisation du produit et l'impact sur son état de santé. Afin de prendre en compte les besoins des industriels, nous avons intégré le partenaire Décathlon, qui cherche actuellement à mettre en place des dispositifs pour la régénération des équipements sportifs en fin d'utilisation, afin de répondre à la loi AGECE de février 2020. Une autre originalité forte est la mise en œuvre des propositions scientifiques sur deux cas d'application, un démonstrateur académique (ProGreSS 4.0) et sur un problème industriel. Ces deux cas d'étude viendront alimenter en amont la réflexion sur les approches proposées et l'applicabilité de celles-ci. Le projet RegEcoS a pour ambition de lever trois verrous scientifiques majeurs :

- (Verrou 1) Nécessité d'intégrer tous les paramètres de l'écosystème des produits dès leur conception conjointement au processus de régénération, pour favoriser la mise en œuvre des meilleures alternatives de régénération possibles tout au long de la vie du produit,
- (Verrou 2) Manque d'une approche d'aide à la décision de la stratégie de régénération basée sur des sources

d'informations hétérogènes, incomplètes et incertaines, provenant de phases de vie différentes et de différents processus,

- (Verrou 3) Nécessité de remonter, capitaliser de l'information sur l'ensemble des phases de vie d'un produit et en particulier son utilisation (conditions opérationnelles, contraintes, etc.) pour pouvoir anticiper ses usages ultérieurs. Face à ces verrous, le projet RegEcoS a pour objectif de proposer une méthodologie pour la conception intégrée d'un produit et de son écosystème de régénération. L'écosystème de régénération regroupe les supports au suivi de l'usage d'un produit durant son utilisation (système d'information, jumeau numérique...), et les méthodes pour aider lors de la prise de décision de régénération, en vue de prolonger la durée de vie du produit.

L'originalité scientifique de ce projet réside dans l'investigation simultanée et intégrée de plusieurs pistes de recherche telles que :

- La conception intégrée produit/écosystème de régénération pour identifier les paramètres clés à mesurer au niveau de l'écosystème, pour l'aide à la décision sur la stratégie de régénération. Cette orientation apporte une réponse au verrou 1 en proposant une approche de conception conjointe produit-processus.
- Le jumeau numérique du produit et des processus pour adapter la prise de décision de régénération aux usages d'un produit et aux évolutions du processus de régénération. Cette orientation aborde le verrou 3 pour limiter la myopie sur l'état de santé effectif du produit lors de l'utilisation et pour adapter le système d'aide à la décision au système de régénération.
- L'aide à la décision de régénération à appliquer en fonction des paramètres du produit, des processus et des potentielles régénérations du produit. Cet axe apporte des éléments de réponse au verrou 2 en proposant des travaux autour de la définition de l'état de santé du produit exploitant les sources d'information disponibles, une approche d'aide à la décision globale tenant compte de plusieurs cycles de vie du produit, de l'incertitude sur certaines informations du produit et sur l'efficacité des actions de régénération.

Afin d'apporter des réponses aux verrous identifiés, le projet RegEcoS est structuré en 5 lots (Figure 1).

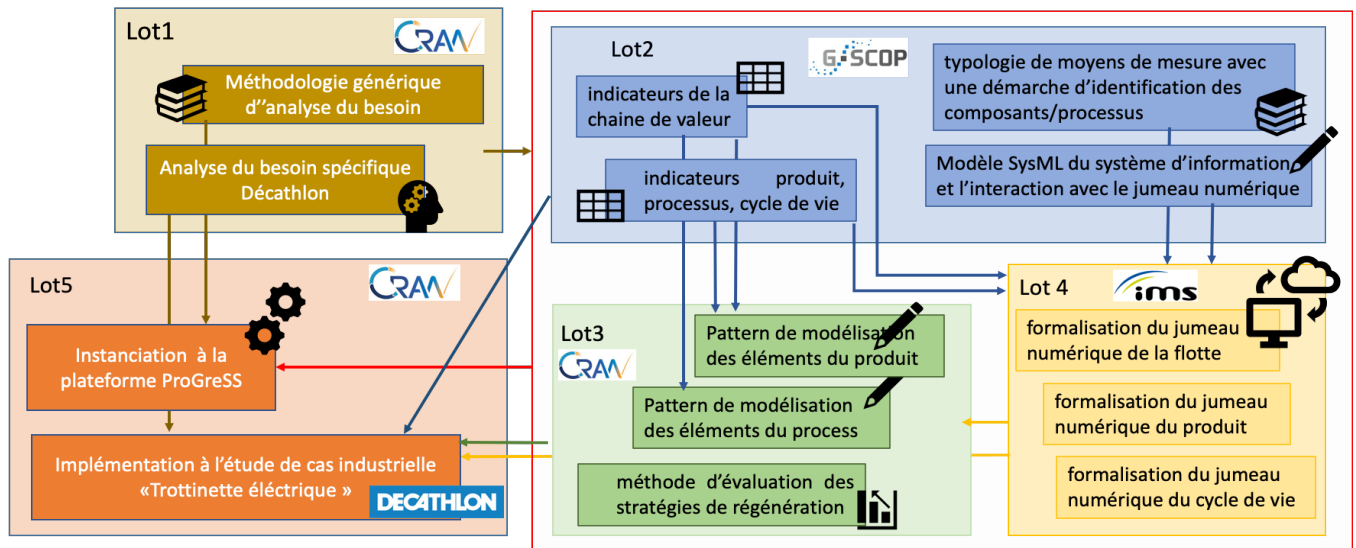


Figure 1 – Structuration et activités principales des 5 lots du projet RegEcoS

#### 4. CONCLUSION

La transition vers une société plus économe en ressources est un objectif central en Europe et les systèmes industriels doivent faire face aux principaux défis de l'Industrie du Futur : la rareté des ressources, l'efficacité énergétique, la décarbonation, les attentes en matière de personnalisation, etc.

Les scénarios industriels associés à la régénération des produits constituent des pistes de solutions pouvant contribuer à répondre à ces enjeux. Pour cela, ils doivent se développer et s'ancrer dans les pratiques industrielles et des consommateurs, pour répondre à la fois aux exigences de disponibilité de ressources et de limitation des impacts environnementaux. L'Europe au travers de sa feuille de route sur l'économie circulaire et Green Deal, des associations telles que la fondation Ellen MacArthur ou des fédérations telles que Rcube en France, permettent la mise en lumière des scénarios d'économie circulaire. Il reste néanmoins un travail non négligeable à mener pour implémenter ces scénarios dans l'industrie et assurer une réelle transition des systèmes industriels vers la circularité.

Le projet ANR RegEcos vise donc à développer et faire connaître les méthodes et outils pouvant supporter l'implémentation de scénarios de régénération. Pour ce faire nous travaillerons sur la définition d'une démarche de mise en place d'un jumeau numérique de chaîne de valeur circulaire pour permettre l'optimisation de son pilotage en intégrant le point de vue environnemental.

#### REMERCIEMENTS

Les trois laboratoires remercient le réseau S.mart pour le soutien lors du projet S.mart 2020, ce qui permis de lancer le projet ANR RegEcos, et notre nouveau partenaire industriel Décathlon pour les perspectives

d'expérimentation et de collaboration durant le projet RegEcos.

#### REFERENCES

- [1] Acerbi F.; Sassanelli C.; Terzi S.; Taisch M., 2021. A Systematic Literature Review on Data and Information Required for Circular Manufacturing Strategies Adoption. Sustainability, 13, 2047. <https://doi.org/10.3390/su13042047..>
- [2] Grieves M., Vickers J., 2016. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems, in Trans-Disciplinary Perspectives on System Complexity, F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, and A. Alves, Editors., Springer: Switzerland. p. 85-114.
- [3] Grieves M., 2005. Product Lifecycle Management: the new paradigm for enterprises. Int. J. Product Development, 2 (Nos. 1/2), 71-84.
- [4] Lee S., Jain S.; Zhang, Y., Liu, J., et Son, Y.J. A Multi-Paradigm Simulation for the Implementation of Digital Twins in Surveillance Applications. In Proceedings of the 2020 IISE Annual Conference, New Orleans, LA, USA, 30 May–2 June 2
- [5] Moher D., Liberati A., Tetzlaff J., and Altman D. G., "Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement," doi: 10.1136/bmj.b2535
- [6] Pecht M. (2009). Prognostics and Health Management of Electronics. In Encyclopedia of Structural Health Monitoring (eds C. Boller, F.-K. Chang and Y. Fujino). <https://doi.org/10.1002/9780470061626.shm118>
- [7] Traoré M.K. 2021. Unifying Digital Twin Framework: Simulation-Based Proof-of-Concept. In Proceedings of the 17th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing–June 7-9, Budapest, Hungary.
- [8] Vanson G., Marangé P., Levrat E., End-of-life decision making in circular economy using generalized colored stochastic Petri nets. Autonomous Intelligent Systems, 2022, 2 (1), pp.3.
- [9] Vanson G., Marangé P., Levrat E., Product and process assessment of end-of-life product using generalized colored stochastic Petri nets. 17th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, INCOM 2021, Jun 2021, Budapest (virtual), Hungary. pp.677-682,
- [10] Vila C., Abellán-Nebot, J.V., Albiñana, J.V, Hernández, G., 2015. An Approach to Sustainable Product Lifecycle Management (Green PLM), Procedia Engineering, Volume 132, Pages 585-592.
- [11] Wandji C., Ben Rejeb H., Zwolinski P. (2022), Characterization of the state of health of a complex system at the end of use. Procedia CIRP;105:49-54.