Régénération de flottes de systèmes critiques confrontées à l'obsolescence - Modélisation et évaluation des trajectoires multi-niveaux et multi-cycles

Projet ANR : PHENIX – Pérennisation des systèmes critiques à longue durée de vie confrontés à l'obsolescence

Laboratoire d'accueil : CRAN (UMR 7039, CNRS), Université de Lorraine

Direction de thèse : Éric Levrat et Pascale Marangé

Encadrement : Sébastien Remy

Type de contrat : Contrat doctoral (36 mois)

Date de début envisagée : Janvier 2027

Contexte et problématique

Les systèmes critiques à forte valeur d'investissement, notamment dans les secteurs de l'énergie, des transports, de la défense et des infrastructures industrielles, sont exploités pendant plusieurs décennies. Leur durée de vie dépasse fréquemment celle de leurs constituants, les exposant à différentes formes d'obsolescence : arrêt de fabrication de composants, indisponibilité de pièces de rechange, évolution technologique, fonctionnelle ou réglementaire. Ces obsolescences peuvent compromettre leur disponibilité et conduire à des décisions coûteuses de remplacement, de modification ou de retrait.

La fin d'une phase d'exploitation ou d'utilisation d'un système peut résulter de différentes causes, telles que l'usure, l'évolution des besoins, des contraintes économiques ou l'obsolescence de certains constituants. Pour assurer sa pérennisation, différentes stratégies de revalorisation peuvent alors être envisagées : réparation, reconditionnement, refabrication, mise à niveau, réutilisation, réaffectation à de nouveaux usages ou récupération de constituants. La pertinence de ces stratégies dépend de l'état des équipements, de leur architecture, des contraintes rencontrées, des besoins opérationnels et des capacités industrielles disponibles. De plus, lorsque ces systèmes appartiennent à une flotte, les décisions ne peuvent être considérées indépendamment équipement par équipement. Face à l'obsolescence d'un sous-système commun à plusieurs équipements, faut-il tous les mettre à niveau, maintenir certains en service avec des solutions transitoires, ou retirer un équipement pour récupérer des constituants nécessaires à la pérennisation des autres ? Le retrait d'un équipement peut ainsi réduire la disponibilité immédiate de la flotte tout en augmentant les possibilités de maintien en service d'autres équipements. Les décisions prises aujourd'hui modifient donc non seulement l'état des systèmes, mais aussi les ressources et les possibilités de transformation accessibles au cours des cycles d'usage suivants.

Les travaux du CRAN développent le concept de régénération, défini comme une approche holistique qui articule différentes stratégies pour préserver la valeur au fil de cycles d'usage successifs, en considérant l'écosystème d'acteurs, de ressources et de processus nécessaires à ces transformations. La régénération ne constitue donc pas une stratégie supplémentaire, elle vise à organiser la complémentarité des stratégies de revalorisation à différents niveaux des architectures des systèmes, entre plusieurs équipements et au cours du temps. Dans cette perspective, en plus de savoir si un produit est réparable, réutilisable ou refabricable, il s'agit de caractériser comment ces possibilités peuvent être combinées pour assurer la pérennisation de l'ensemble d'une flotte au fil de cycles successifs.

Le projet de recherche ANR PHENIX s'intéresse à la pérennisation des systèmes critiques à longue durée de vie confrontés à l'obsolescence. Il développe des méthodes d'aide à la décision articulant gestion de

l'obsolescence et régénération, afin de préserver l'usage et la valeur des systèmes et de leurs constituants au cours de cycles successifs. Dans ce cadre, la thèse proposée s'intéresse plus particulièrement à la régénération de flottes de systèmes critiques. Lorsque plusieurs équipements partagent des constituants et des ressources, les décisions de revalorisation deviennent interdépendantes. Face à l'obsolescence d'un sous-système commun à plusieurs équipements, faut-il tous les mettre à niveau, maintenir certains en service avec des solutions transitoires ou retirer un équipement pour récupérer des constituants nécessaires à la pérennisation des autres ? Le retrait d'un équipement peut ainsi réduire la disponibilité immédiate de la flotte tout en augmentant les possibilités de maintien en service d'autres équipements. Les décisions prises aujourd'hui modifient donc non seulement l'état des systèmes, mais aussi les ressources et les possibilités de transformation accessibles au cours des cycles d'usage suivants.
L'enjeu de cette thèse est ainsi de dépasser la seule caractérisation des aptitudes individuelles des équipements aux stratégies de revalorisation, pour étudier comment ces stratégies peuvent être articulées à l'échelle d'une flotte confrontée à l'obsolescence. Il s'agira de développer des modèles, méthodes et outils permettant de représenter et d'évaluer les trajectoires de régénération multi-niveaux et multi-cycles, en tenant compte des interdépendances entre équipements et des conséquences des décisions présentes sur les possibilités futures de pérennisation de la flotte.

Positionnement scientifique et verrou de recherche

La gestion de l'obsolescence des produits et systèmes à longue durée de vie fait l'objet de nombreux travaux. La revue de Liu et Zolghadri [1], couvrant trois décennies de recherche, souligne notamment les difficultés persistantes liées à l'intégration des stratégies de gestion de l'obsolescence, à leur sélection et à leur inscription dans une perspective de long terme. La gestion de l'obsolescence des produits et systèmes à longue durée de vie fait l'objet de nombreux travaux. La revue de littérature de Liu et Zolghadri [1] met en évidence les difficultés persistantes liées à l'intégration et à la sélection des stratégies de gestion de l'obsolescence dans une perspective de long terme. Certaines approches d'ingénierie système intègrent les conséquences de l'obsolescence des constituants dans la gestion de l'évolution des architectures et des configurations tout au long du cycle de vie [2], ou coordonnent les décisions de stockage de pièces de rechange et de mise à niveau pour assurer la continuité d'exploitation [3].
Des travaux articulent déjà obsolescence et stratégies de prolongation de la durée de vie ou de revalorisation. Wakiru et al. [4] étudient l'intégration de politiques de maintenance, de refabrication et de gestion des pièces de rechange pour prolonger l'exploitation d'un système à plusieurs composants. Zaabar et al. [5] proposent un cadre d'aide à la décision multicritères pour sélectionner des stratégies de résolution de l'obsolescence en intégrant des considérations de durabilité. D'autres travaux portent sur la mise à niveau fonctionnelle de produits usagés dans une perspective de cycles d'usage successifs [6]. Ces contributions montrent l'intérêt d'une approche intégrée, mais ne répondent pas nécessairement à la question de l'articulation de transformations interdépendantes entre équipements d'une flotte. Parallèlement, les recherches en conception et en économie circulaire proposent des méthodes pour caractériser les aptitudes aux stratégies de revalorisation : réparabilité, refabricabilité, réutilisabilité ou aptitude à la mise à niveau. Des travaux évaluent notamment le potentiel de refabrication d'un produit et de ses composants à partir de leur intégrité physique et de leur démontabilité [7]. Ces approches fournissent des critères pour apprécier les transformations envisageables, sans être suffisante pour ê déterminer quelles combinaisons de transformations sont conjointement réalisables à l'échelle d'une flotte. Enfin, les travaux sur la régénération développés au CRAN proposent une vision multi-niveaux et multi-cycles de la préservation de la valeur [8, 9]. Ils montrent l'intérêt de dépasser la seule prolongation de l'usage initial d'un produit, notamment lorsque sa valeur peut être préservée à travers ses constituants ou de nouveaux usages.
Les travaux sur la gestion de l'obsolescence, les stratégies de revalorisation et la régénération apportent des contributions complémentaires à la pérennisation des systèmes à longue durée de vie. Toutefois, la question de l'articulation dynamique des stratégies de revalorisation entre plusieurs équipements d'une flotte, en tenant compte de leurs interdépendances, des contraintes d'obsolescence et des conséquences des décisions sur les cycles d'usage futurs, reste à approfondir. En effet, les aptitudes individuelles des équipements ne suffisent pas à déterminer les transformations réalisables pour la flotte. Deux équipements peuvent être techniquement refabricables sans pouvoir être traités simultanément lorsqu'ils nécessitent une même ressource indisponible. Inversement, le retrait d'un équipement peut rendre possible la revalorisation de plusieurs autres grâce à la

récupération de constituants. Le verrou scientifique réside donc dans la formalisation de cette propriété collective et évolutive : comment passer des aptitudes individuelles aux stratégies de revalorisation à la caractérisation des trajectoires de régénération conjointement réalisables pour une flotte, et comment représenter leur évolution sous l'effet des décisions prises face à l'obsolescence ?

Question de recherche et contributions visées

La question centrale de la thèse est la suivante : Comment modéliser et évaluer les trajectoires de régénération d'une flotte de systèmes critiques confrontée à l'obsolescence, en tenant compte des dépendances entre équipements et des conséquences des décisions présentes sur ses possibilités futures de pérennisation ?
Les travaux exploreront l'hypothèse selon laquelle la capacité à la régénération d'une flotte, que l'on dénomme régénérabilité, ne peut être déduite de la seule agrégation des aptitudes individuelles de ses équipements aux stratégies de revalorisation. Elle dépend des compatibilités entre transformations, des ressources partagées, des contraintes d'obsolescence, des besoins opérationnels et des capacités de l'écosystème industriel. La régénérabilité sera ainsi étudiée comme une propriété contextuelle, collective et évolutive, dont la définition et la formalisation constituent une première contribution de la thèse. L'objectif général est de développer un cadre de modélisation et d'évaluation des trajectoires de régénération permettant d'accompagner les décisions de pérennisation d'une flotte de systèmes critiques confrontée à l'obsolescence, via les contributions suivantes :

- Contribution 1 – Définition et formalisation de la régénérabilité des systèmes et des flottes : Définir et formaliser la régénérabilité à partir des aptitudes aux stratégies de revalorisation, en tenant compte de l'état et de l'architecture des équipements, des contraintes d'obsolescence et des ressources disponibles. Il s'agira notamment de caractériser les interdépendances entre équipements et les combinaisons de stratégies réalisables à l'échelle d'une flotte.
- Contribution 2 – Modélisation des trajectoires de régénération multi-niveaux et multi-cycles : Développer un modèle dynamique des trajectoires de régénération d'une flotte, représentant les transformations des équipements et de leurs constituants, ainsi que les transferts de ressources entre équipements. Ce modèle permettra d'étudier les conséquences des décisions présentes sur les possibilités de régénération au cours des cycles d'usage futurs.
- Contribution 3 – Évaluation multicritère et inter-cycles des trajectoires de régénération : Développer une méthode d'évaluation permettant de comparer les trajectoires de régénération selon la disponibilité de la flotte, la valeur préservée, les coûts et ressources mobilisés, ainsi que les possibilités futures de revalorisation. L'objectif sera d'analyser les compromis entre performances immédiates et pérennisation à long terme.

Démarche méthodologique

La démarche de recherche s'organisera autour de trois étapes complémentaires :

- Formalisation de la régénérabilité. Une analyse ciblée de la littérature permettra de préciser les notions d'aptitude aux stratégies de revalorisation et de régénérabilité. Un cadre de représentation sera ensuite construit pour relier les architectures des équipements, leurs états, les obsolescences identifiées, les transformations envisageables et les ressources partagées. Les contraintes techniques, opérationnelles et industrielles permettront de déterminer les combinaisons de stratégies réalisables.
- Modélisation dynamique des trajectoires. Les décisions de revalorisation seront représentées comme des transformations d'état affectant les équipements, leurs constituants et les ressources disponibles. Une attention particulière sera portée aux décisions interdépendantes, aux transferts de constituants et aux transitions entre cycles d'usage. Des formalismes à états et transitions, des réseaux de Petri ou des approches de simulation pourront être étudiés selon leur capacité à représenter ces mécanismes. Le choix des modèles sera guidé par les propriétés à formaliser, sans imposer a priori un outil unique.
- Évaluation des trajectoires. Des scénarios alternatifs seront construits à partir de situations d'obsolescence données. Leur comparaison reposera sur des critères de disponibilité, de valeur préservée, de coûts, de mobilisation des ressources et de possibilités futures de revalorisation. L'analyse permettra d'étudier la sensibilité des décisions aux besoins opérationnels, aux contraintes de ressources et aux hypothèses d'évolution de la flotte.

- Validation des modèles et méthodes. Les approches développées seront mises à l'épreuve sur des scénarios représentatifs de flottes de systèmes critiques, notamment lorsqu'une obsolescence affecte plusieurs équipements partageant des constituants. Cette validation permettra d'évaluer leur capacité à représenter les interdépendances entre équipements et à comparer différentes trajectoires de régénération. Les résultats pourront contribuer aux méthodes d'aide à la décision du projet PHENIX et à leur intégration dans la plateforme COBRA+.

Les travaux viseront à définir des modèles explicites et interprétables, permettant de comprendre les conséquences des décisions et de justifier les arbitrages. Ils ne porteront ni sur le développement de méthodes de prédiction de l'obsolescence, ni sur l'optimisation exhaustive de la maintenance d'une flotte.

Profil recherché et modalités de candidature

Le ou la candidate devra être titulaire d'un diplôme d'ingénieur ou d'un Master 2 en ingénierie des systèmes complexes, génie industriel, automatique ou dans un domaine connexe.
De bonnes connaissances en modélisation et simulation des systèmes complexes, notamment des systèmes à événements discrets, sont attendues. Des compétences en programmation, en développement d'outils numériques ou en aide à la décision seront appréciées. Un goût pour la recherche, une curiosité intellectuelle et un intérêt marqué pour les problématiques de développement durable, d'économie circulaire et de préservation des ressources sont particulièrement souhaités.
Le travail de thèse nécessitera de bonnes capacités d'analyse et de formalisation, de l'autonomie, de la rigueur scientifique ainsi qu'une aptitude au travail en équipe et aux approches interdisciplinaires. De bonnes capacités rédactionnelles et relationnelles sont également indispensables pour participer aux activités scientifiques et aux échanges avec les partenaires du projet ANR PHENIX. Une bonne maîtrise du français et de l'anglais, à l'oral comme à l'écrit, est requise.

Les personnes intéressées sont invitées à transmettre un dossier comprenant :

- un curriculum vitæ détaillé ;
- une lettre de motivation présentant leur intérêt pour le sujet et leur projet professionnel ;
- les relevés de notes du cursus de Master ou d'ingénieur ;
- une copie du dernier diplôme obtenu ou une attestation de réussite ;
- une lettre de recommandation d'un ou d'une encadrante des travaux de recherche
- un rapport de stage, un mémoire de recherche ou tout autre document permettant d'apprécier leurs compétences scientifiques.

Candidatures à adresser à : pascale.marange@univ-lorraine.fr et eric.levrat@univ-lorraine.fr
Date limite de candidature : 20 novembre 2026

Références bibliographiques

[1] Liu, Y., & Zolghadri, M. (2026). *What is happening in product obsolescence management? Three decades of review from 1993 to 2023*. Research in Engineering Design. https://doi.org/10.1007/s00163-026-00470-8
[2] Herald, T. E. (2009). *An obsolescence management framework for system baseline evolution—Perspectives through the system life cycle*. Systems Engineering, 12(1), 1–20. https://doi.org/10.1002/sys.20106
[3] Shi, J., & Liu, Y. (2020). *Optimal inventory control and design refresh selection in managing part obsolescence*. European Journal of Operational Research. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.04.038
[4] Wakiru, J., Pintelon, L., Muchiri, P. N., & Chemweno, P. K. (2021). *Integrated remanufacturing, maintenance and spares policies towards life extension of a multi-component system*. Reliability Engineering & System Safety, 215, 107872. https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107872
[5] Zaabar, I., Arango-Miranda, R., Beauregard, Y., & Paquet, M. (2021). *A Sustainable Multicriteria Decision Framework for Obsolescence Resolution Strategy Selection*. Sustainability, 13(15), 8601. https://doi.org/10.3390/su13158601
[6] Wu et al. (2022). *Data-Driven Decision-Making Method for Functional Upgrade Remanufacturing of Used Products Based on Multi-Life Customization Scenarios*. Journal of Cleaner Production, 334, 130238. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130238
[7] Sierra-Fontalvo et al. (2024). *Diagnosing remanufacture potential at product-component level: A disassemblability and integrity approach*. Resources, Conservation & Recycling, 205, 107529. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107529
[8] Diez, L., Marangé, P., Mayer, F., & Levrat, E. (2016). *Maintenance as a Cornerstone for the Application of Regeneration Paradigm in Systems Lifecycle*.
[9] Vanson, G., Marangé, P., & Levrat, E. (2022). *End-of-Life Decision Making in Circular Economy Using Generalized Colored Stochastic Petri Nets*.