

Économie circulaire et planification de maintenances pour optimiser la durée de vie d'un produit*

Ernest Foussard^{1,2}, Marie-Laure Espinouse¹, Grégory Mounié², Margaux Nattaf¹

¹ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP[‡] G-SCOP, 38000 Grenoble, France

² Univ. Grenoble Alpes, Inria, CNRS, Grenoble INP[‡] LIG, 38000 Grenoble, France

Mots-clés : *Planification de la maintenance, Économie Circulaire, Allongement de la durée d'usage, Ordonnancement, Programmation Linéaire en Nombres Entiers (PLNE)*

Introduction Depuis plusieurs siècles, les systèmes de production en Europe reposent principalement sur un modèle linéaire : extraire, produire, consommer et jeter. Pour répondre aux enjeux environnementaux du XXIème siècle, de nouveaux modèles économiques plus durables ont été pensés. Parmi eux, l'économie circulaire (EC) — définie par le ministère de la transition écologique comme la production de biens et de services de manière durable en limitant la consommation et le gaspillage des ressources et la production des déchets — fait l'objet d'une attention grandissante de la part des milieux politiques, académiques et industriels. L'allongement de la durée d'usage au moyen de maintenances préventives et de réparations est selon [1] la solution la plus circulaire pour limiter notamment la génération de déchets.

Si de nombreuses études récentes en recherche opérationnelle abordent la problématique de la durabilité [2, 5], à notre connaissance, le problème de la planification de la maintenance dans le cadre de l'EC n'a pas encore été traité. Nous menons ici une étude exploratoire sur l'optimisation de la maintenance dans un contexte d'EC. Pour cela nous considérons dans nos objectifs d'optimisation la minimisation de la consommation des ressources et de la génération des déchets ainsi que la durabilité des produits en maximisant la durée de vie des machines.

Définition du problème Le problème présenté ci-après reprend de nombreuses caractéristiques des problèmes étudiés dans la littérature, et plus particulièrement la santé des équipements [4], l'usure au cours du temps des composants d'une machine et l'inclusion de la consommation d'énergie et de la génération de déchets en tant qu'objectifs [2, 3]. La principale originalité de cette étude par rapport à la littérature de la planification de la maintenance est l'adaptation de ces caractéristiques aux problématiques de l'EC : en particulier, la consommation de ressources, la génération de déchets et les perspectives de réutilisation sont considérées. Le suivi de l'usure composant par composant permet une meilleure gestion de ces aspects de l'EC.

Dans cette étude, une seule machine à plusieurs composants est considérée sur un horizon de temps discret. Chaque composant a un niveau d'usure tel qu'au-delà d'un certain seuil, la machine n'est plus utilisable. À chaque période, une des trois décisions suivantes peut être prise : exploiter la machine, effectuer une ou plusieurs maintenances parmi un ensemble d'opérations possibles et laisser la machine inactive. L'exploitation entraîne l'usure des composants d'un montant fixe, tandis que les maintenances permettent de régénérer, partiellement ou totalement, un ou plusieurs composants. Quatre objectifs sont considérés :

- Maximiser le profit économique, c'est-à-dire maximiser les gains relatifs à l'exploitation de la machine et minimiser les coûts de la maintenance. Un bon niveau de vie des composants en fin de vie permet leur réutilisation ou revente, et donc des profits supplémentaires.
- Maximiser la durée de vie de la machine, i.e. maximiser le nombre de périodes d'exploitation.

*Ce travail a bénéficié d'aides de L'État gérées par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme « Investissements d'avenir » portant les références ANR-15-IDEX-02 et ANR-11-LABX-0025-01

[‡]Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes

- Minimiser la consommation de ressources. Dans cette étude, nous avons considéré une consommation d'énergie et d'eau qui dépend affinement du niveau d'usure des composants. Le coût en ressources des opérations de maintenance est également considéré.
- Minimiser la génération de déchets : seuls les déchets liés aux opérations de maintenance sont considérés ici. Si les composants sont très dégradés lors de la fin de vie de la machine, des déchets supplémentaires sont générés.

Modélisation et expérimentations Le problème est modélisé par un PLNE indexé par le temps, les composants et les maintenances. Le PLNE fournit un planning indiquant les différentes périodes d'exploitation, de maintenance et d'inactivité de la machine. Des coûts en ressources sont considérés, ils sont directement liés au niveau d'usure de chaque composant. Dans un premier modèle, les maintenances peuvent être effectuées à plusieurs reprises sans perte d'efficacité. Dans un deuxième modèle, l'efficacité décroissante des maintenances est modélisée au moyen de chaînes de précedence. Les variables sont indexées par le temps, leur nombre augmente drastiquement quand on améliore la densité d'échantillonnage du temps et par conséquent les temps de résolution augmentent considérablement. Afin d'améliorer les performances, les symétries du modèle ont été étudiées. Le placement des périodes d'inactivité de la machine n'impacte pas la valeur des objectifs : cette symétrie est brisée en introduisant des contraintes afin que les périodes d'inactivité soient repoussées à la fin du planning.

Les lavomatiques étant fréquemment étudiés en EC, nous avons choisi ce cas d'étude pour évaluer les modèles. En raison de la rareté de données sur la maintenance des laveurs automatiques, les jeux de données ont été partiellement construits à partir des données des réparateurs [6] et de valeurs générées aléatoirement quand les données sont inexistantes en s'inspirant de différentes caractéristiques réelles. Des instances de taille variable en nombre de périodes, nombre de composants et nombre de maintenances ont été testées afin d'évaluer le réalisme des solutions proposées et de déterminer les limites des modèles en ce qui concerne les temps de calcul. Les deux versions du problème ont été testées avec prise en considération d'une partie ou de la totalité des objectifs. Lorsque plusieurs objectifs ont été pris en compte, leur somme pondérée a été étudiée. De plus, les deux versions du problème ont été testées avec et sans les inégalités permettant de casser les symétries du modèle. Les premières expérimentations ont permis d'obtenir des plannings de maintenance en accord avec les objectifs d'allongement de durée d'usage et de minimisation des ressources et des déchets. Une analyse détaillée des performances des modèles ainsi que des caractéristiques des solutions a donné de premiers résultats prometteurs et permis d'identifier de nouvelles pistes de recherche.

Références

- [1] Aggeri F, Beulque R and Micheaux H. Mettre en place une démarche d'économie circulaire. *Mines ParisTech - PSL Research University - Centre de Gestion Scientifique, Rapport de Recherche*, 2019, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02094669/>.
- [2] Barbosa-Póvoa AP, da Silva C and Carvalho A. Opportunities and challenges in sustainable supply chain : An operations research perspective. *EJOR*, 268(2) :399–431, 2018.
- [3] Moghaddam KS and Usher JS. Preventive maintenance and replacement scheduling for repairable and maintainable systems using dynamic programming. *Computers & Industrial Engineering*, 60(4) :654–665, 2021.
- [4] Nattaf M and Dauzère-Pérès S. Problème d'ordonnancement sur machines parallèles avec prise en compte de la santé des équipements : analyse et résolution. *20ème édition du congrès annuel de la ROADEF*, 2019.
- [5] Suzanne E, Absi N and Borodin V. Towards circular economy in production planning : Challenges and opportunities. *EJOR*, 287(1) :168–190, 2020.
- [6] Tecchio P, Ardente F and Matthieu F. Understanding lifetimes and failure modes of defective washing machines and dishwashers. *J. Clean. Prod.*, 215 :1112–1122, 2019.