



HAL
open science

La maintenance distribuée au cœur d'une économie circulaire : contribution à sa mise en œuvre et à son évaluation

Rony Djeunang Mezafack

► **To cite this version:**

Rony Djeunang Mezafack. La maintenance distribuée au cœur d'une économie circulaire : contribution à sa mise en œuvre et à son évaluation. Automatique / Robotique. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2023. Français. NNT : 2023GRALT081 . tel-04514328

HAL Id: tel-04514328

<https://theses.hal.science/tel-04514328>

Submitted on 21 Mar 2024

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.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

École doctorale : EEATS

Spécialité : Automatique - Productique

Unité de recherche : Laboratoire G-SCOP

**“ La maintenance distribuée au cœur d'une économie circulaire
: contribution à sa mise en œuvre et à son évaluation ”**

**“ Distributed maintenance at the heart of the circular economy
: contributing to its implementation and evaluation ”**

Présentée par :

Mr Rony DJEUNANG MEZAFACK

Direction de thèse :

Mme Zineb SIMEU-ABAZI Directrice de thèse
PROFESSEUR, Université Grenoble Alpes

Mme Maria DI MASCOLO Co-directrice de thèse
DIRECTEUR DE RECHERCHE, CNRS

Rapporteurs :

Mr Abderrahman EL MHAMED
PROFESSEUR, Université Paris 8

Mr Eric LEVRAT
PROFESSEUR, Université de Lorraine

Thèse soutenue publiquement le 8 décembre 2023, devant le jury composé de :

Mme Zineb SIMEU-ABAZI Directrice de thèse
PROFESSEUR, Université Grenoble Alpes

Mr Noureddine ZERHOUNI Président du jury
PROFESSEUR, École Nationale Supérieure de Mécanique et des
Microtechniques (ENSMM)

Mr Abderrahman EL MHAMED Rapporteur
PROFESSEUR, Université Paris 8

Mr Eric LEVRAT Rapporteur
PROFESSEUR, Université de Lorraine

Mme Maria DI MASCOLO Co-directrice de thèse
DIRECTEUR DE RECHERCHE, CNRS

Mme Rosa ABBOU Examinatrice
MAITRE DE CONFERENCES, Université de Nantes

Mr Van-Dat CUNG Examineur
PROFESSEUR, Université Grenoble Alpes



RÉSUMÉ

Cette thèse se concentre sur le domaine de la maintenance des sites de production géographiquement distribués, dans le contexte de l'économie circulaire. Les sites de production sont confrontés à des défis majeurs en termes de coûts et de disponibilité des équipements. Pour atténuer ces défis, une approche de maintenance distribuée est adoptée, intégrant la centralisation des opérations de maintenance corrective au sein d'un Atelier de Maintenance Central (AMC) et la mise en œuvre d'opérations de maintenance préventive par le biais d'un Atelier de Maintenance Mobile (AMM). Cette approche vise à optimiser les coûts tout en garantissant une disponibilité élevée des équipements.

La première contribution de la thèse réside dans la méthodologie de conception et d'évaluation des performances de l'AMC. En utilisant la théorie des réseaux de files d'attente, un modèle de gestion des stocks de composants est proposé, tenant compte du cycle de vie des équipements/composants et des principes de l'économie circulaire. L'application de ce modèle dans le secteur ferroviaire montre la possibilité de remettre en état 90% des composants en fin de vie, avec une réduction de plus de 6% des coûts de maintenance corrective sur une période de 10 ans.

La deuxième contribution porte sur la conception et l'optimisation des opérations de maintenance préventive et de transport, en intégrant des contraintes environnementales et des limites de capacité des véhicules. Un modèle basé sur la programmation linéaire est développé pour ordonnancer ces opérations sur un horizon stratégique, permettant une réduction significative des coûts de maintenance préventive pouvant atteindre 50%. De plus, une méthode de réordonnement dynamique est proposée pour faire face aux défaillances imprévues.

Les résultats de la thèse sont consolidés par la rédaction de deux articles de journal, dont l'un publié en 2022 et l'autre en cours de révision en novembre 2023, et sept articles de conférences internationales. Cependant, des axes de progression sont identifiés, notamment l'exploration de modèles d'évolution continue de l'état de santé des composants et l'intégration de l'optimisation conjointe des coûts de maintenance distribuée.

En conclusion, cette thèse apporte des méthodologies novatrices pour la conception, l'évaluation de performances et l'optimisation de la maintenance distribuée dans un contexte d'économie circulaire. Ces approches visent à améliorer la disponibilité des sites de production géographiquement distribués tout en réduisant les coûts des opérations de maintenance, ouvrant ainsi la voie à des pratiques de maintenance plus efficaces et respectueuses de l'environnement.

ABSTRACT

This thesis focuses on the field of maintenance for geographically distributed production sites in the context of the circular economy. Production sites face significant challenges in terms of equipment costs and availability. To mitigate these challenges, a distributed maintenance approach is adopted, integrating the centralization of corrective maintenance operations within a Central Maintenance Workshop (CMW) and the implementation of preventive maintenance operations through a Mobile Maintenance Workshop (MMW). This approach aims to optimize costs while ensuring high equipment availability.

The first contribution of the thesis lies in the methodology for the design and performance evaluation of the CMW. Using queueing network theory, a component stock management model is proposed, considering equipment/components lifecycle and circular economy principles. The application of this model in the railway sector demonstrates the possibility of refurbishing 90% of end-of-life components, with a reduction of over 6% in corrective maintenance costs over a 10-year period.

The second contribution focuses on the design and optimization of preventive maintenance and transportation operations, incorporating environmental constraints and vehicle capacity limits. A linear programming-based model is developed to schedule these operations over a strategic horizon, resulting in a significant reduction in preventive maintenance costs of up to 50%. Furthermore, a dynamic rescheduling method is proposed to address unforeseen failures.

The thesis's findings are consolidated by two journal papers, one published in 2022 and the other under review in November 2023, and seven international conference papers. However, areas for progress have been identified, including the exploration of models for the continuous evolution of component health and the integration of joint optimization of distributed maintenance costs.

In conclusion, this thesis introduces innovative methodologies for the design, performance evaluation, and optimization of distributed maintenance in a circular economy context. These approaches aim to enhance the availability of geographically distributed production sites while reducing maintenance operation costs, thus paving the way for more efficient and environmentally friendly maintenance practices.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	1
ABSTRACT	3
TABLE DES MATIÈRES.....	5
LISTE DES TABLEAUX	10
LISTE DES FIGURES.....	10
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	13
i. Contexte et problématique.....	13
ii. Méthodologie de recherche bibliographique.....	16
iii. Contributions de cette thèse.....	18
CHAPITRE 1 : LA MAINTENANCE DES SITES DE PRODUCTION GÉOGRAPHIQUEMENT DISTRIBUÉS.....	21
SOMMAIRE	21
1.1 Introduction.....	22
1.2 La maintenance d'un site de production	24
1.2.1 Définition de la maintenance	24
1.2.2 Evolution historique de la maintenance.....	24
1.2.3 La maintenance corrective	28
1.2.4 La maintenance préventive	29
1.2.5 La maintenance prédictive	30
1.2.6 La maintenance conditionnelle.....	31
1.3 Soutien logistique pour la maintenance.....	33

1.3.1	Actions liées au soutien logistique.....	33
1.3.2	Design d'atelier de maintenance intégré	33
1.4	Les sites de production géographiquement distribués.....	34
1.4.1	Les systèmes de production centralisés	34
1.4.2	Les systèmes de production décentralisés.....	35
1.5	Une maintenance distribuée.....	35
1.5.1	Les ateliers de maintenance intégrés (AMI).....	36
1.5.2	Les ateliers de maintenance centralisés (AMC)	37
1.5.3	Objectif de cette thèse et problématique	37
1.6	Conclusion	39
CHAPITRE 2 : LA MAINTENANCE DISTRIBUÉE AU PROFIT D'UNE ÉCONOMIE CIRCULAIRE		41
SOMMAIRE		41
2.1	Introduction.....	42
2.2	Economie Circulaire.....	43
2.3	Les opérations de maintenance distribuée	44
2.4	Le processus d'une maintenance distribuée	46
2.5	Les indicateurs de performance technique et environnementale.....	49
2.6	Développement d'une méthode d'analyse des indicateurs de performance.....	50
2.7	Analyse des indicateurs de performance pour l'évaluation de la maintenance distribuée dans le cadre de cette thèse	54
2.8	Conclusion	56

CHAPITRE 3 : ATELIER DE MAINTENANCE CENTRALISÉ : MISE EN ŒUVRE D'UNE METHODOLOGIE DE MODELISATION ET D'EVALUATION DE PERFORMANCE	58
SOMMAIRE	58
3.1 Introduction.....	59
3.1.1 Contexte et problématique.....	59
3.1.2 Objectifs et plan.....	63
3.2 Revue de littérature sur les méthodes d'évaluation de performance des AMC	64
3.2.1 Analyse des mots clés.....	64
3.2.2 Les AMC en boucle ouverte.....	68
3.2.3 Les AMC en boucle fermée	71
3.2.4 Synthèse de la revue bibliographique.....	72
3.3 Formulation du problème et modélisation.....	73
3.3.1 Cycle de vie des composants	73
3.3.2 Modélisation de l'AMC	76
3.4 Expérimentation	78
3.4.1 Etude de cas.....	78
3.4.2 Les indicateurs de performance.....	79
3.4.3 Les variables de décision	80
3.5 Résultats.....	81
3.5.1 Dimensionnement des stocks.....	81
3.5.2 Etude de l'impact du cycle de vie des composants	83

3.6	Conclusion	85
CHAPITRE 4 : MAINTENANCE DISTRIBUEE : MISE EN ŒUVRE D'UNE		
METHODOLOGIE DE CONCEPTION ET D'ORDONNANCEMENT		
		89
SOMMAIRE		
		89
4.1	Introduction.....	90
4.2	Revue bibliographique sur l'ordonnancement de la maintenance distribuée.....	93
4.3	Formulation du problème.....	98
4.4	Méthodologie de conception et d'ordonnancement.....	100
4.4.1	Approche générale.....	100
4.4.2	Ordonnancement long-terme des opérations : algorithme d'optimisation.....	101
4.4.3	Introduction des contraintes environnementales.....	107
4.4.4	Positionnement de l'AMC.....	108
4.5	Méthodologie de réordonnancement	109
4.5.1	Approche générale de réordonnancement.....	109
4.5.2	Algorithme de Réordonnancement Dynamique.....	112
4.6	Expériences.....	116
4.6.1	Ordonnancement : long-terme comparé au court-terme	116
4.6.2	Emplacement du dépôt et capacité des véhicules	117
4.6.3	Réordonnancement dynamique	117
4.6.4	Étude de cas.....	118
4.7	Résultats et discussion.....	120
4.7.1	Analyse et interprétation	120

4.7.1.1	Influence des coûts de pénalité.....	120
4.7.1.2	Horizon d'ordonnancement optimal	122
4.7.1.3	Impact environnemental.....	123
4.7.1.4	Influence du positionnement du dépôt	124
4.7.1.5	Influence de la capacité des véhicules.....	125
4.7.1.6	Réordonnancement des opérations en ligne.....	127
4.7.1.6.1	Réordonnancement à perte.....	128
4.7.1.6.2	Réordonnancement rentable.....	128
4.7.1.6.3	Réordonnancement optimal.....	128
4.7.2	Utilité pratique de cette étude.....	128
4.8	Conclusion	130
CONCLUSION ET PERSPECTIVES		133
REFERENCES.....		137

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Historique de la maintenance	27
Tableau 2 Classification des indicateurs de performance d'une maintenance distribuée	51
Tableau 3 Conclusion sur la priorité d'un indicateur	54
Tableau 4 Valeurs des critères d'évaluation des indicateurs de performance.....	55
Tableau 5 Mise en œuvre de l'ACPI pour la sélection des indicateurs de performance.....	57
Tableau 6 Les différentes qualités, coûts et temps de mise en seconde vie.....	81
Tableau 7 Dimensionnement des stocks de composants et d'équipements	82
Tableau 8 Les variables et paramètres de l'AMC	87
Tableau 9 Classification des articles traitant de l'ordonnancement de la maintenance distribuée	97
Tableau 10 Données relatives aux sites et aux équipements de production.....	118
Tableau 11 Données relatives aux véhicules.....	120
Tableau 12 Notations utilisées dans ce chapitre.....	132

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Méthodologie de recherche bibliographique	16
Figure 2 Maintenance Corrective	28
Figure 3 Maintenance Préventive.....	29
Figure 4 Maintenance Prédicative.....	30
Figure 5 Maintenance Conditionnelle.....	31
Figure 6 Points communs des politiques de maintenance	32
Figure 7 Un système de production centralisé	34
Figure 8 Un système de production décentralisé.....	35
Figure 9 Les ateliers de maintenance intégrés.....	37

Figure 10 L'atelier de maintenance centralisé	38
Figure 11 Une économie circulaire.....	43
Figure 12 La maintenance distribuée au profit d'une économie circulaire.....	44
Figure 13 Distribution sectorielle des émissions de <i>CO2</i> en 2020.....	46
Figure 14 Un processus de maintenance dans un site de production.....	47
Figure 15 Un processus de maintenance distribuée.....	48
Figure 16 L'écosystème d'un AMC.....	60
Figure 17 Toutes les stratégies d'extension de vie possible.....	62
Figure 18 Aperçu du réseau de mots clés des AMC (2023).....	65
Figure 19 Evolution du nombre d'articles sur les AMC.....	67
Figure 20 Le processus de réparation dans un AMC.....	68
Figure 21 Réseau de file d'attente d'un AMC en boucle ouverte.....	70
Figure 22 Le cycle de vie d'un composant.....	75
Figure 23 Le réseau de file d'attente proposé pour l'AMC	77
Figure 24 Un bogie d'un train à grande vitesse.....	79
Figure 25 Coût de maintenance en fonction de QL et de QT, au bout de 10 ans	83
Figure 26 Nombre total d'opérations en fonction de QL et de QT, au bout de 10 ans	85
Figure 27 Illustration des coûts de maintenance distribuée pour 3 sites de production ...	100
Figure 28 Approche générale d'optimisation de la maintenance distribuée	101
Figure 29 Algorithme OMTV pour combiner l'optimisation de l'ordonnancement des opérations de maintenance et de la tournée des véhicules	102
Figure 30 Algorithme "Divide-and-Conquer", adapté à l'algorithme AHOL.....	105
Figure 31 Exemple d'ordonnancement pour 4 sites hétérogènes	106
Figure 32 Etat de l'art du réordonnancement de la tournée de véhicules.....	110
Figure 33 Illustration d'une défaillance imprévue	110
Figure 34 Méthode de réordonnancement	111

Figure 35 Définition des paramètres α, δ	113
Figure 36 Impact des coûts de pénalité sur la disponibilité des sites.....	121
Figure 37 Impact des coûts de pénalité sur le nombre d'opérations	122
Figure 38 Influence de l'horizon temporel sur les coûts de maintenance distribuée.....	123
Figure 39 Emissions annuelles de CO_2 de l'étude de cas.....	124
Figure 40 Influence de la méthode de positionnement du dépôt sur l'empreinte carbone	125
Figure 41 Influence de la méthode de positionnement du dépôt sur le temps de calcul ...	125
Figure 42 Influence de la capacité des véhicules : sans contraintes environnementales....	126
Figure 43 Influence de la capacité des véhicules : avec contraintes environnementales....	126
Figure 44 Influence de α et δ sur les coûts : opérateur back-insert.....	129
Figure 45 Influence de α et δ sur les coûts : opérateur swap.....	129

INTRODUCTION GÉNÉRALE

i. Contexte et problématique

Les sites de production occupent une place cruciale dans la société depuis la révolution industrielle du XVIII^e siècle. La consommation mondiale des services et produits manufacturés n'a jamais été aussi élevée, avec une évolution de 2,48 milliards en 1971 à 69.58 milliards en 2021 d'après la banque mondiale ("World Bank Open Data," 2023), soit une progression annuelle moyenne de près de 7%, i.e. une multiplication par 2 tous les 11 ans environ. Par conséquent, tous les moyens possibles devraient être mis sur pied pour assurer une couverture continue des besoins croissants en production. Dans cette optique, les arrêts de production font partie des freins majeurs, de par l'intermittence qu'ils peuvent créer dans l'offre. En plus, pour une entreprise moyenne, un arrêt de production peut représenter entre 100 000€ et 200 000€ de pertes par jour (Holmberg et al., 2004). Heureusement, un site de production possède généralement une équipe de maintenance qui assure la disponibilité des équipements de production. Cependant, les coûts de maintenance représentent près de 15 à 70% des coûts de production (Gackowiec, 2019). Par conséquent, l'un des objectifs majeurs des industriels et des chercheurs dans le domaine de la maintenance, pour la production, est de réduire les coûts tout en assurant une bonne disponibilité des équipements.

La maintenance, au-delà d'assurer des conditions optimales d'opérabilité des systèmes, est au cœur d'une économie circulaire. En effet, le suivi des équipements de production tout au long de leur vie à travers la maintenance, améliore les prises de décision en fin de vie. Au lieu de recycler les composants ou de les mettre au rebut automatiquement, il devient possible d'envisager d'autres stratégies (réutilisation de composants, refabrication, reconversion, etc.) pour une seconde vie. Dans cette thèse, nous nous intéressons à la maintenance des sites de production géographiquement distribués sous le concept de

maintenance distribuée. L'idée est de réduire les coûts et l'impact environnemental de la maintenance, tout en assurant une très bonne disponibilité des équipements de production, via la mutualisation des ressources de remise en état (pièces de rechange, opérateurs, outils, consommables, etc.) dans un Atelier de Maintenance Central (AMC). Un AMC a pour objectif principal de remettre en état les équipements de production défectueux venant de divers sites. Il est donc nécessaire de trouver un moyen d'acheminer ces équipements vers l'AMC, d'où la présence d'un second atelier dit mobile ou tout simplement Atelier de Maintenance Mobile (AMM). L'AMM est chargé de visiter chaque site de production afin d'effectuer des opérations de maintenance préventive, au travers desquelles les équipements défectueux sont remplacés et transportés à l'AMC. Contrairement aux approches classiques de maintenance où chaque site de production possède son propre atelier de maintenance, cette nouvelle approche nécessite, pour l'ordonnancement des opérations de maintenance, une prise en compte du partage de ressources dans l'AMC et des contraintes de trajet de l'AMM.

Le partage de ressources dans l'AMC peut, dans un premier temps, être assimilé à celui d'un atelier de production classique où des machines et des opérateurs transforment la matière première en produits semi-finis, qui sont ensuite assemblés pour former le produit fini. Dans un tel atelier, l'une des difficultés majeures réside dans le dimensionnement des stocks, de matières premières et de produits semi-finis, partagés par tous les ordres de fabrication. Un trop grand niveau de stock peut engendrer des coûts excessifs d'approvisionnement et de stockage, tandis qu'un faible niveau de stock peut engendrer des ruptures et pénalités associées. Dans un AMC, les produits finis sont des équipements remis en état de bon fonctionnement et les produits semi-finis sont des composants/pièces_de_rechange. Le même problème de dimensionnement des stocks se retrouve dans l'AMC avec pour complication le haut niveau d'incertitude lié au phénomène de défaillance des équipements

de production (difficile de prévoir les demandes de remise en état et d'estimer les temps de service sauf en cas de maintenance préventive).

Les contraintes liées au trajet de l'AMM dans un contexte de maintenance distribuée entrent dans le cadre de la recherche opérationnelle. Il est question de réduire les coûts et l'impact environnemental des activités de transport. En effet, comme décrit précédemment, la maintenance distribuée se caractérise principalement par le déplacement des équipements dans une structure multisites, composée de sites de production géographiquement distribués et de l'AMC. Ce problème de déplacement et de transport est largement connu sous le nom de « Vehicle Routing Problem ». Il est possible d'en déduire un modèle sous la forme d'un programme linéaire (une fonction à optimiser et des contraintes à respecter), mais le temps de résolution pourrait être exponentiel, d'où la caractéristique de « NP-Difficile » pour ce type de problème. Sachant que chaque contrainte ajoutée au modèle le rapproche de la réalité mais peut également augmenter le temps d'optimisation, la difficulté majeure pourrait résider en l'intégration de toutes les contraintes propres à la maintenance distribuée dans un seul modèle (incertitude des demandes, disponibilité des ressources, horizon d'ordonnancement, etc.).

Pour faire face aux deux principales problématiques en lien avec la maintenance distribuée (dimensionnement des stocks et optimisation du trajet des véhicules de transport), cette thèse repose sur les études existantes dans la littérature scientifique afin de proposer des approches de résolution. Ainsi, une méthodologie rigoureuse a été mise sur pied afin d'identifier et d'étudier les articles les plus représentatifs de l'état de l'art. L'approche classique consisterait à établir un état de l'art pour toute la thèse, basé sur le sujet de recherche. Cependant la maintenance distribuée est relativement récente. De 1999 à 2022, seules 13 publications dans des revues scientifiques contiennent les mots clés « Distributed Maintenance » ET (« Production » OU « Manufacturing ») dans le titre, les mots clés ou

le résumé, et ce, en ayant exploré plus de 17 bases de données d'articles. Il peut alors être restrictif de se contenter d'un seul état de l'art pour cette thèse. Nous avons choisi de faire une revue bibliographique pour chacune des problématiques rencontrées lors de la mise en œuvre d'une maintenance distribuée : conception et dimensionnement de l'AMC (Chapitre 3), conception et ordonnancement des opérations de l'AMM (Chapitre 4).

ii. Méthodologie de recherche bibliographique

La méthodologie adoptée pour la recherche bibliographique, inspirée des travaux de (Hart, 2007) et (Snyder, 2019), est composée de trois étapes majeures (voir figure 1) : 1) la sélection et la combinaison des mots clés à utiliser, 2) la recherche d'articles dans les bases de données et 3) la filtration des articles obtenus. La première étape consiste à construire une combinaison de mots clés pertinents pour le sujet et majoritairement utilisés dans la littérature. La première partie de cette étape revient à transformer manuellement le sujet en un ensemble de mots clés, combinés par les opérateurs « OR » et « AND ». La deuxième

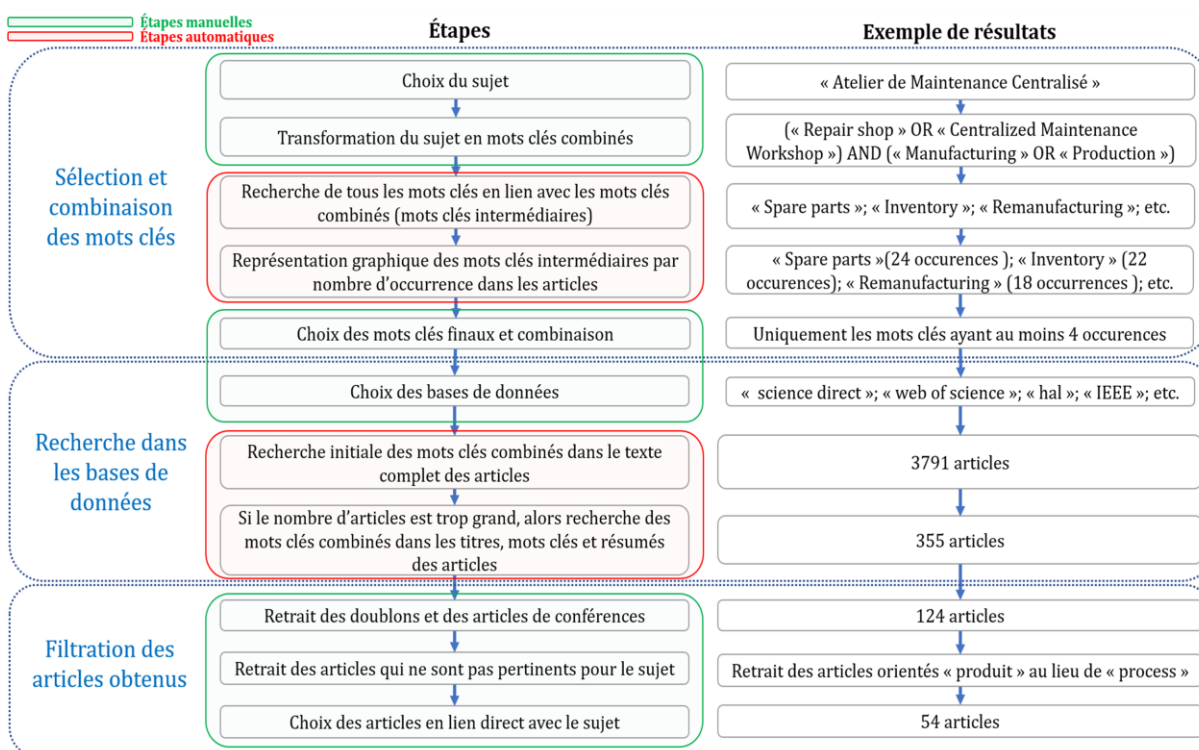


Figure 1 Méthodologie de recherche bibliographique

partie revient à identifier automatiquement les articles contenant la combinaison initiale de mots clés dans leur texte. Pour uniquement cette première étape, les bases de données utilisées devraient avoir une option d'extraction automatique des mots clés d'un article. Après extraction des mots clés propres à chaque article trouvé (mots clés intermédiaires), ils sont triés en fonction de leur nombre d'occurrences dans tous les articles (une occurrence = un article). Ces mots clés intermédiaires peuvent être représentés sous forme de graphe (chaque sommet représentant un mot clé et chaque lien représentant un article). Plusieurs logiciels (BiblioGraph, Gephi, VOSviewer, gnuPlot, etc.) permettent de dessiner ce graphe automatiquement. En effet, la représentation graphique permet de finaliser manuellement la sélection de mots clés, pour la revue bibliographique, et de les combiner ensuite. Nous avons choisi dans cette thèse le logiciel VOSviewer pour la représentation graphique des mots clés intermédiaires. Cette première étape produit une combinaison de mots clés inspirée d'un large échantillon d'articles, différemment de la combinaison initiale qui n'était construite qu'à partir du sujet.

La deuxième étape consiste à rechercher et trier les articles de la littérature contenant la combinaison de mots clés obtenue à l'issue de la première étape. Une première partie revient à choisir manuellement les bases de données où chercher les articles. Nous avons choisi d'utiliser le moteur de recherche BELUGA développé par l'Université de Grenoble Alpes et répertoriant plus de 17 bases de données parmi lesquelles : « science direct », « HAL », « web of science », « Taylor & Francis » et « IEEE ». La deuxième partie, automatique, revient à comptabiliser le nombre d'articles obtenus dans les bases de données. Si le nombre est très grand, i.e. difficile de lire tous les articles dans le temps imparti pour la recherche bibliographique, alors il est nécessaire d'affiner la recherche en ne conservant que les articles dont la combinaison de mots clés se retrouve dans leur titre, leurs mots clés ou leur résumé.

La troisième étape consiste à filtrer les articles obtenus grâce à des critères d'inclusion et d'exclusion. Trois premiers critères, d'exclusion, permettent de retirer manuellement les doublons, les articles de conférences et les articles non-pertinents pour le sujet. Par exemple, certains articles pourraient traiter un problème de maintenance d'un point de vue produit tandis que d'autres pourraient avoir une approche process. Un dernier critère d'inclusion permet de ne retenir que les articles qui sont focalisés sur le sujet d'étude. Il pourrait y avoir des articles qui, bien qu'ayant la même approche (process par exemple) traiteraient le sujet d'étude de façon superficielle ou périphérique (par exemple : traitant du sujet en se référant à d'autres articles sans y apporter une contribution personnelle).

L'un des principaux avantages de cette méthodologie de recherche bibliographique réside dans le fait que nous avons pu l'utiliser pour toutes les revues de littérature de cette thèse, de par sa rigueur, et ainsi gagner en temps. En effet, comme expliqué plus haut, nous avons dû faire plusieurs revues bibliographiques en raison du nombre réduit d'études sur la maintenance distribuée. Nous nous sommes ensuite appuyés sur les résultats des revues bibliographiques pour identifier les questions de recherche qui restaient ouvertes, et de là nous avons pu tirer l'essence de nos contributions majeures dans le cadre de cette thèse.

iii. Contributions de cette thèse

Cette thèse comporte 4 parties principales dont les contributions scientifiques sont : la maintenance des sites de production géographiquement distribués (Chapitre 1) ; La recherche d'indicateurs pour l'évaluation des performances d'une maintenance distribuée dans un contexte d'économie circulaire (Chapitre 2) ; la centralisation des opérations de maintenance distribuée au profit d'une économie circulaire (Chapitre 3) ; la conception et l'ordonnement des opérations de maintenance distribuée (Chapitre 4). Le premier et le deuxième chapitre mettent en évidence les différentes approches de maintenance distribuée et permettent d'en déduire l'axe de recherche pour cette thèse, dans un contexte d'économie circulaire. L'axe de recherche choisi à l'issue de ces deux premiers chapitres est la

centralisation des opérations de maintenance distribuée. A priori une combinaison de la distribution et de la centralisation pourrait prêter à confusion. Mais dans cette thèse les opérations de maintenance préventive sont distribuées tandis que les opérations correctives sont centralisées. L'appellation « Maintenance Distribuée » provient de la distribution géographique des sites de production. Le chapitre 2 a donné lieu à la publication d'un article de conférence intitulé « Environmental impact of operations carried out in the context of distributed maintenance: a literature review » (Kouakep Tchouma et al., 2023).

Le chapitre 3 cherche à modéliser l'AMC en utilisant la théorie des réseaux de files d'attente. Un tel modèle est constitué de deux principales unités élémentaires : une file d'attente et un serveur. Une file d'attente représente un ensemble ordonné d'équipements qui attendent d'être servis et chaque service concourt à remettre les équipements en bon état de fonctionnement. Les équipements sont servis en fonction de leur ordre d'arrivée dans l'AMC, nous avons choisi une règle bien connue (FIFO : First In First Out, ou PAPS : Premier Arrivé Premier Sorti). Bien qu'il existe plusieurs études adoptant cette approche de modélisation, la majorité considère que les équipements ont une durée de vie infinie grâce à une remise en état parfaite dans l'AMC. Cette considération permet de supposer que le nombre moyen d'équipements qui arrivent à l'AMC ne varie pas au cours du temps, et permet de simplifier les calculs analytiques. Cependant les équipements de production ont une durée de vie limitée dans la réalité. Nous avons décidé de traiter cette limitation de durée de vie en intégrant les stratégies de l'économie circulaire, avec la possibilité de mettre les équipements en seconde vie ou de les mettre en rebut, en fonction des performances de l'AMC. Nous avons opté pour une méthode de simulation pour le dimensionnement des stocks du nouveau modèle de l'AMC, sachant qu'il serait très difficile d'employer une approche analytique dans ces nouvelles conditions. Le chapitre 3 a donné lieu à la publication d'un article de revue dans le journal IJPR (International Journal of Production Research), sous l'intitulé « Systematic literature review of repair shops: focus on sustainability »

(Djeunang Mezafack et al., 2022a) et de 2 articles de conférence (Djeunang Mezafack et al., 2023b, 2020).

Le chapitre 4 traite principalement de la conception et de l'amélioration des performances des opérations de maintenance dans les différents sites de production géographiquement distribués. En effet, après avoir modélisé et dimensionné les stocks de l'AMC nous avons cherché à modéliser et améliorer les performances de l'acheminement des équipements de production. Nous nous sommes basés sur la théorie des graphes et la programmation linéaire. Dans le modèle proposé, les deux principales unités élémentaires sont : un sommet/nœud et une arête/arc. Dans la littérature, un sommet représente un site de production ou l'AMC et une arête représente un trajet de l'AMM. L'objectif est de relier les sommets entre eux, grâce aux arêtes, en garantissant une bonne performance de la maintenance distribuée. Cette représentation classique considère que les sites de production sont homogènes et suppose que les opérations des sites sont périodiques. Ainsi, il suffit de trouver le chemin optimal pour une période (correspondant à la visite de tous les sites dans le cadre d'une opération par site) et ensuite d'utiliser le même chemin, reliant les sites, pour le reste des opérations. Bien que cette approche réduise le temps d'optimisation, dans la réalité les sites de production sont hétérogènes (le nombre d'opérations diffère en fonction du site). Par conséquent, dupliquer les opérations amènerait à, soit surestimer le nombre d'opérations pour certains sites, soit à le sous-estimer pour d'autres. Nous avons décidé de tenir compte de l'hétérogénéité des sites de production dans l'optique d'améliorer les performances techniques et environnementales de la maintenance distribuée, sous le concept d'ordonnancement long-terme. De plus, nous avons intégré la possibilité d'avoir des événements imprévus, tels qu'une défaillance inattendue d'un équipement de production, sous le concept de réordonnancement dynamique. Le chapitre 4 a donné lieu à la publication de 4 articles de conférence (Djeunang Mezafack et al., 2023a, 2022b, 2022c, 2022d) et d'un article de revue en révision, en octobre 2023, dans le journal CIE (Computers & Industrial Engineering).

CHAPITRE 1 : LA MAINTENANCE DES SITES DE PRODUCTION GÉOGRAPHIQUEMENT DISTRIBUÉS

L'objectif de ce chapitre est de construire les questions de recherche à aborder dans cette thèse. Premièrement, les différentes politiques de maintenance sont présentées dans un cadre général de production. Deuxièmement, les problématiques liées au cas particulier des sites de production géographiquement distribués sont présentées, donnant lieu au concept de maintenance distribuée. Finalement, des questions de recherche sont construites à partir des problématiques liées à la maintenance distribuée. Une attention particulière est accordée à la mise en lumière des fondements solides de cette thèse, au-delà du nombre réduit de publications scientifiques disponibles dans le domaine de la maintenance distribuée.

SOMMAIRE

1.1 Introduction.....	22
1.2 La maintenance d'un site de production	24
1.3 Soutien logistique pour la maintenance.....	33
1.4 Les sites de production géographiquement distribués	34
1.5 Une maintenance distribuée.....	35
1.6 Conclusion	39

1.1 Introduction

La maintenance est un sujet largement étudié dans la communauté scientifique avec plus de 383.000 publications (depuis les années 1700) référencées sur google scholar. Dans le cadre de la production en particulier, la publication la plus ancienne date de 1916 (Jackson, 1916). Dès lors, les connaissances dans le domaine conjoint de la maintenance et de la production ont évolué avec la complexité des équipements industriels. Le problème majeur rencontré lors de la mise en œuvre d'une maintenance de façon générale réside dans l'aspect aléatoire des défaillances subies par les équipements de production. Face à cette difficulté à connaître précisément l'instant d'occurrence d'une éventuelle défaillance, il existe plusieurs politiques de maintenance. La plus ancienne consiste à tout simplement attendre que l'équipement soit défaillant avant d'agir en conséquence (LEE, 1995). Il s'agit de la maintenance corrective, dite « failure-based ». Bien que cette approche permette aux entreprises d'agir avec certitude contre la défaillance, elle nécessite, soit l'achat d'urgence de pièces de rechange, soit un surstockage et des arrêts imprévisibles de la production. De plus, cette stratégie nécessite un temps non négligeable de recherche de l'origine de la défaillance. L'idéal serait d'agir avant qu'il n'y ait défaillance.

La littérature traitant de la maintenance avant défaillance se regroupe en 3 principales politiques : la maintenance programmée dite « time-based » (Geurtsen et al., 2023), la maintenance prédictive dite « data-based » (Nunes et al., 2023) et la maintenance conditionnelle dite « condition-based » (Li et al., 2022). L'idée générale est d'étudier les équipements de différents points de vue (temps de fonctionnement, données des capteurs, état de santé) afin de déterminer le moment optimal auquel il faudrait effectuer un remplacement préventif (avant que l'équipement ne tombe en panne). Effectuer trop de remplacements représente un coût élevé pour les entreprises (en temps et pièces de rechange) et en faire trop peu augmente la probabilité d'avoir une défaillance. De plus, la maintenance programmée peut être perçue comme antagoniste à la production, i.e. les arrêts exigés par

les différents remplacements dans le cadre de la maintenance programmée pourraient impacter négativement la production. Les problèmes liés à la maintenance dans un cadre général de la production se retrouvent également dans le cas particulier des sites de production géographiquement distribués.

Dans le cas particulier de la maintenance distribuée, plusieurs sites de production, et par conséquent plusieurs équipements géographiquement distribués, sont à prendre en compte simultanément. En plus des contraintes propres à la maintenance (allocation des ressources et planning des opérations) s'ajoutent les distances qui séparent les différents sites de production. Il existe deux principales approches logistiques dans le cadre de la maintenance distribuée : la décentralisation (Allaham and Dalalah, 2022a) et la centralisation (Manco et al., 2022). Dans la première, chaque site de production dispose d'un atelier de maintenance intégré. La deuxième approche consiste à mutualiser les ressources de maintenance dans un seul atelier central. A priori, le choix d'une architecture logistique (centralisée ou décentralisée) a un impact sur les performances de la maintenance distribuée, dès lors que le flux des équipements au sein de la structure multisites n'est plus la même. Les performances peuvent être regroupées en trois grandes catégories : les coûts de maintenance, la disponibilité des sites de production et l'impact environnemental. Qu'il s'agisse de la maintenance en général ou de la maintenance distribuée en particulier il est nécessaire d'optimiser les performances, d'où l'importance de cette thèse. Il va être question dans ce chapitre d'élaborer les questions de recherche à aborder dans cette thèse.

Après cette introduction, la Section 1.2 est dédiée au cas général de la maintenance d'un site de production. La Section 1.3 se focalise sur le problème logistique créé par la maintenance et la Section 1.4 aborde le cas particulier des sites de production géographiquement distribués. Ensuite, la Section 1.5 élabore les questions de recherche qui seront développées dans les chapitres suivants et enfin vient la conclusion.

1.2 La maintenance d'un site de production

1.2.1 Définition de la maintenance

La maintenance est définie par la norme ISO 14224:2016 comme étant la : « combinaison de toutes les actions techniques et administratives, destinées à maintenir ou à remettre une entité dans un état lui permettant d'accomplir la fonction requise » (“ISO 14224:2016,” 2016). Les différentes stratégies de maintenance retrouvées dans la littérature diffèrent en général en fonction de 5 mots clés retrouvés dans la précédente définition : « action », « maintenir », « remettre », « entité » et « état ». Dans un souci d'uniformité, les termes suivants sont utilisés dans cette thèse (chacun provenant de la littérature et correspondant respectivement à l'un des mots clés cités précédemment) : « opérations », « préventif », « correctif », « équipement » et « état de santé ». Par exemple pour faire référence aux actions nous utiliserons le terme « opérations », pour le maintien en bon état de fonctionnement nous utiliserons le terme « préventif », etc.

1.2.2 Evolution historique de la maintenance

Les premiers résultats de l'étude bibliographique¹ sont résumés dans le Tableau 1, et concernent l'évolution de la maintenance à travers le temps. Dès 1929 un article de revue scientifique portant sur la maintenance corrective est publié sur le thème de la réparation (« repair » en anglais) (Mann, 1929). Il s'agissait à cette époque d'une étude menée aux États-Unis sur la variation du nombre d'employés dans les ateliers de réparation de 1920² à 1927. L'objectif de ces ateliers était essentiellement de remettre en état les équipements industriels après défaillance (correctif). En effet, au sortir de la première guerre mondiale, jusqu'à la seconde, les équipements industriels étaient robustes et la demande en production n'était pas aussi importante qu'aujourd'hui au vu de la population (environ $\frac{1}{4}$ de la

¹ La méthodologie employée pour obtenir les mots clés et sélectionner les articles les plus pertinents est présentée à l'Introduction Générale.

² Les États-Unis comptaient plus de 10.752.000 employés dans la production et la maintenance en 1920, soit environ $1/10^{\text{ième}}$ de la population.

population actuelle en 2023). Par conséquent, les pannes étaient gérées au fil de l'eau, sans réelle stratégie.

Vers 1964 les premiers articles de revue scientifique portant sur la maintenance programmée sont publiés ("Back Material 1," 1964). Cette fois l'objectif était de mener les opérations de maintenance avant l'occurrence d'une défaillance. Cette nouvelle approche a été favorisée par la croissance de la demande en production dès la fin de la seconde guerre mondiale. En effet, une utilisation élevée des équipements de production engendrait de plus en plus de défaillances et, logiquement, des arrêts de production. Pour faire face à cette problématique nouvelle, les industries ont dû adopter une approche préventive. Contrairement à la maintenance corrective, il était dès lors possible de programmer les opérations de façon périodique en cherchant à réduire les coûts sur le long terme. Les coûts étaient liés, d'une part aux ressources à mobiliser pour les interventions et, d'autre part, aux pénalités d'arrêts de production pendant la maintenance. Avec cette nouvelle approche, les entreprises pouvaient désormais acheter à l'avance les pièces de rechange à des coûts moins élevés. De plus il était désormais possible d'établir un planning conjoint de maintenance et de production, réduisant les coûts de pénalité.

Dès 1985 apparaît le concept de maintenance prédictive, avec pour objectif d'utiliser les données historiques des équipements afin de prédire les défaillances (Renwick and Babson, 1985). La nouveauté de cette approche réside dans la nécessité d'effectuer les opérations de maintenance plus intelligemment. En effet, L'évolution technologique des équipements de production suite à la mondialisation les a rendus plus performants et complexes (électronique, mécanique, automatique, etc.) mais avec un risque plus élevé de défaillances. Réduite à une simple activité, secondaire à la production, la maintenance est alors devenue une activité principale pour le maintien en condition opérationnel des équipements et la maîtrise des risques. Contrairement à la maintenance programmée, pour laquelle les

interventions étaient automatiques et périodiques, la maintenance prédictive propose d'agir en fonction de l'état de santé des équipements. L'idée était de collecter les données provenant des capteurs, d'estimer la durée de vie restante des équipements et de choisir le meilleur moment pour les interventions préventives.

Au cours des années 2000 la globalisation de la concurrence pousse les entreprises à vouloir d'avantage réduire leurs coûts de maintenance. Ceci passe par une réduction des opérations programmées tout en gardant une maîtrise de l'état de santé des équipements. Pour ce faire, la maintenance conditionnelle est définie pour mettre sur pied des indicateurs nécessaires au suivi en ligne des équipements de production (Hosseini et al., 2000). Différemment de la maintenance prédictive, les opérations sont menées si et seulement si un indicateur atteint un seuil limite prédéterminé.

L'approche la plus récente concerne la maintenance opportuniste. L'idée est de rendre les opérations de maintenance moins invasives pour la production. L'objectif est d'adapter les actions préventives en fonction des fenêtres temporelles disponibles (périodes programmées de mis à l'arrêt d'un ou de plusieurs équipements) décidées par la production (Mechefske and Zeng, 2006). En effet, la maintenance et la production étaient considérées comme antagonistes. Les opérations préventives nécessitent des arrêts de production, sans certitude de défaillance, au détriment de la production qui nécessite un fonctionnement continu des équipements. Il serait alors question, avec la maintenance opportuniste, d'adapter les opérations de maintenance aux exigences de la production.

Après avoir parcouru l'historique de la maintenance, la suite de cette section va consister à présenter les détails techniques des 4 premières politiques de maintenance évoquées ci-dessus, et ensuite introduire le concept de maintenance distribuée. Chaque politique de maintenance sera décrite techniquement sous 4 points de vue : les évènements, les procédures, les ressources et les opérations.

Tableau 1 Historique de la maintenance

Politique de maintenance (mots clés de la littérature)	ISO 14224:2016	1 ^{ere} Pub.	Avant défaillance	Programmée	Périodique	Invasive
« Repair »	Maintenance Corrective	1929				
« Preventive Maintenance »	Maintenance Programmée	1964	●	●	●	●
« Predictive Maintenance »	Maintenance Prédictive	1985	●	●		●
« Condition-Based Maintenance »	Maintenance Conditionnelle	2000	●			●
« Opportunistic Maintenance »	Maintenance Opportuniste	2006	●			

Un point (●) est mis chaque fois que la réponse correspondant à la colonne est « OUI ». Par exemple : la maintenance prédictive est-elle programmée ? Oui

1.2.3 La maintenance corrective

Tel qu'illustré dans la figure 2, la maintenance corrective est initiée après la détection d'une défaillance (Pandey et al., 2010). Ensuite vient le diagnostic qui permet d'identifier et de localiser l'origine de la panne. Les méthodes principalement utilisées sont, d'une part l'analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leurs criticités (AMDEC) (Lee et al., 2011) et, d'autre part, l'arbre de défaillances (Klos and Patalas-Maliszewska, 2013). Un ordre d'intervention mobilise les ressources nécessaires pour la remise en état de l'équipement (Ding and Kamaruddin, 2015). Les interventions peuvent soit être prises en charge par le service maintenance, soit être sous-traitées à une entreprise extérieure (Ruschel et al., 2017).

Dès que les ressources sont disponibles, les interventions débutent, immobilisant l'équipement de production concerné jusqu'à la fin des réparations. Il existe plusieurs niveaux de maintenance liés à la nature de la défaillance, allant d'une simple réparation par remplacement de composant à une rénovation complète (Ettay et al., 2016). Au terme des

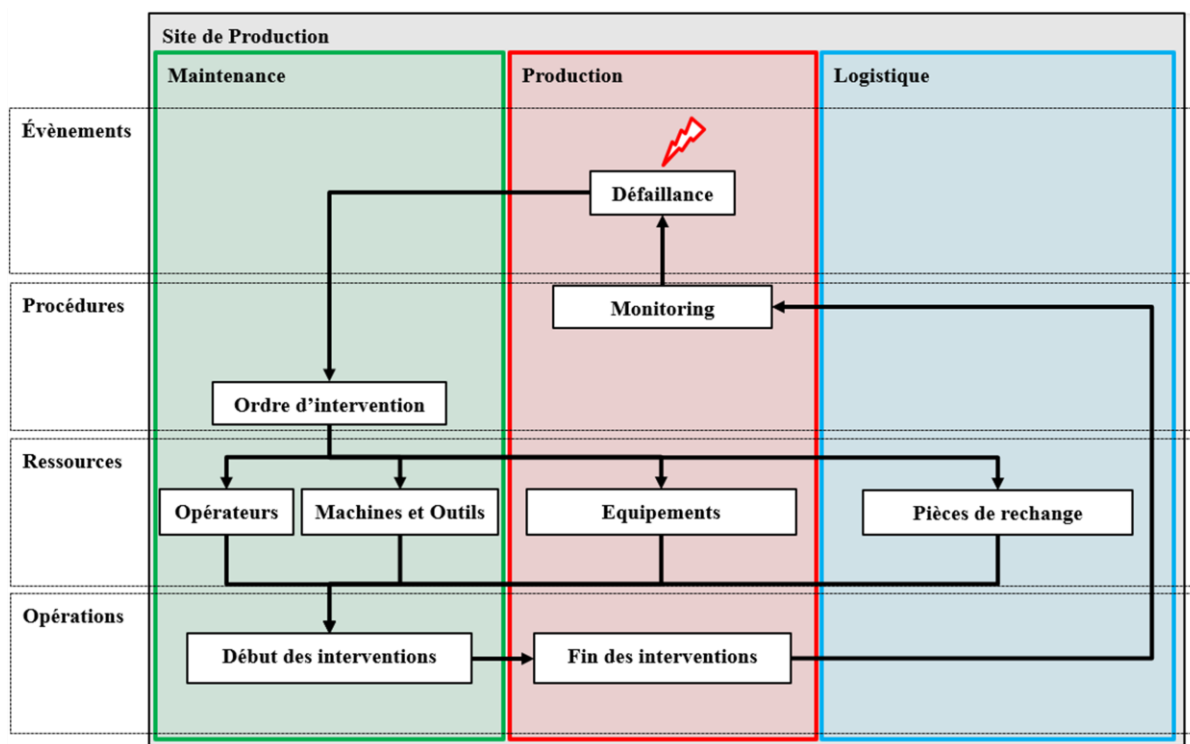


Figure 2 Maintenance Corrective

interventions, le monitoring continu a pour objectif de détecter les prochaines défaillances. L'avantage d'une telle structure repose sur le fait que c'est la production qui initie chaque opération de maintenance. Les interventions sont conduites avec une certitude absolue de défaillance, par conséquent les rapports entre la maintenance et la production sont moins conflictuels. L'inconvénient d'une telle structure provient du fait que si le temps moyen entre les défaillances est très réduit alors il peut avoir un problème au niveau de la logistique, concernant l'approvisionnement en pièces de rechange.

1.2.4 La maintenance préventive

Les ressources sont similaires du correctif au préventif. Mais l'ordre d'intervention est initié par une échéance du planning de maintenance comme le montre la figure 3. Les échéances correspondent à des dates séparées par des intervalles de temps réguliers, prédéterminés (Ierace and Cavalieri, 2013). Les opérations consistent à inspecter, nettoyer/remplacer et tester les équipements (Hadidi et al., 2012). Les interventions se basent soit sur les recommandations du constructeur, soit sur le modèle de distribution du nombre de défaillances des équipements à travers le temps (Poisson, Weibull, loi normale, etc...) (Hwang and Samat, 2019). L'objectif est de réduire la probabilité de défaillance du système. Dans

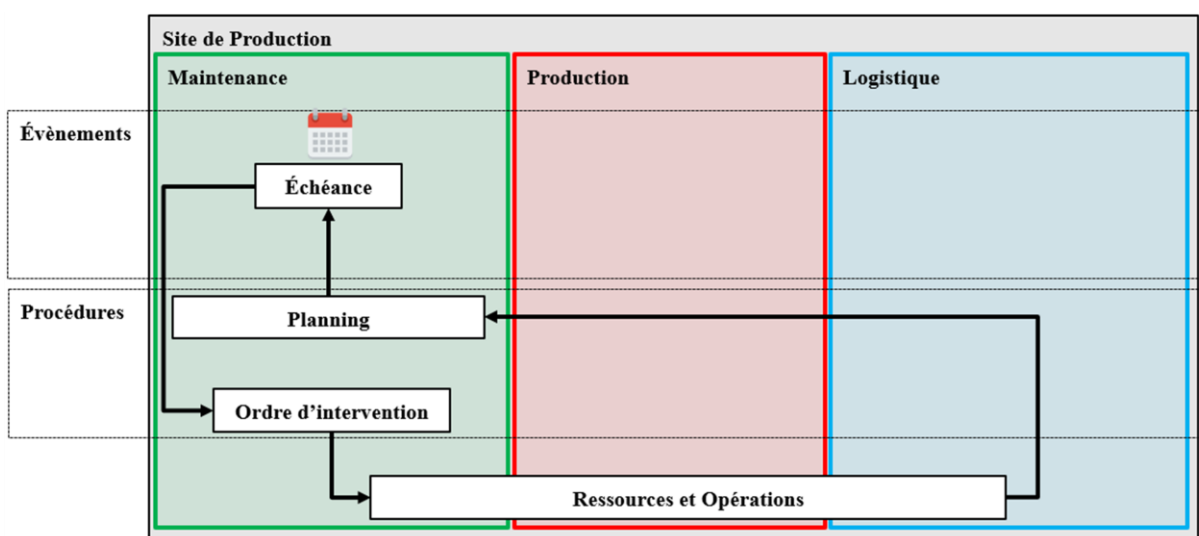


Figure 3 Maintenance Préventive

le cas d'un modèle de distribution, la méthode la plus utilisée consiste à déterminer le temps qui minimise la somme pondérée³ des coûts prévisionnels du correctif et du préventif. Les avantages d'une telle structure reposent sur la maîtrise des besoins en logistique et par conséquent un pouvoir d'anticipation de la demande en pièces de rechange. Les inconvénients d'une telle structure sont liés au fait que c'est la maintenance qui décide de quand arrêter les équipements de production, d'où le rapport conflictuel avec la production qui voudrait garder les équipements en fonctionnement aussi longtemps que possible (sachant que la défaillance n'est pas certaine dans une approche préventive).

1.2.5 La maintenance prédictive

La maintenance prédictive se veut plus intelligente dans le planning des opérations. Des capteurs permettent de recueillir et de collecter les données des équipements en cours de fonctionnement (Cheng et al., 2022). La méthode la plus utilisée consiste à mettre en œuvre des algorithmes d'apprentissage automatique afin de prédire la durée de vie restante d'un équipement ou « Remaining Useful Life » (RUL) en anglais (Leukel et al., 2021). Certaines approches privilégient des modèles analytiques qui permettent une meilleure compréhension

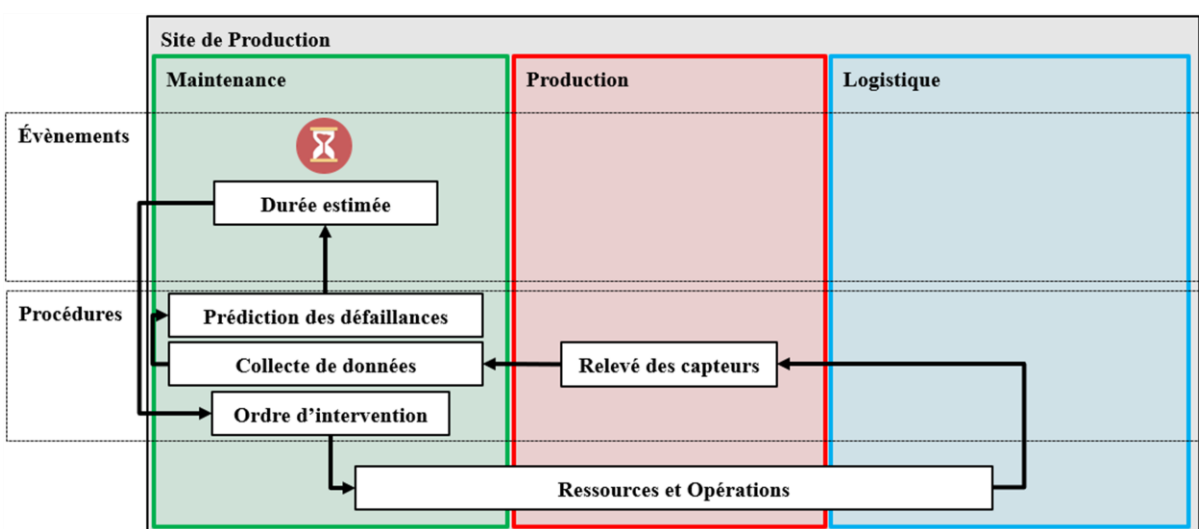


Figure 4 Maintenance Prédictive

³ Le coût de la maintenance corrective est pondéré par la probabilité de défaillance à l'instant t et le coût du préventif est pondéré par la probabilité d'occurrence de l'évènement contraire au même instant.

du phénomène de dégradation des équipements. Comme illustré par la figure 4, la maintenance prédictive est initiée après une durée estimée par le modèle d'apprentissage ou le modèle analytique défini. Les ressources nécessaires et les opérations menées ensuite sont similaires à celles de la maintenance préventive. Les avantages d'une maintenance prédictive concernent la maîtrise des risques de défaillance, suite à l'étude approfondie des modèles permettant de mieux comprendre le processus de défaillance. Les inconvénients d'une telle approche sont similaires à ceux de la maintenance préventive, sauf que cette fois-ci, la production peut avoir accès aux données et à des estimations du risque qu'elle court si elle laisse fonctionner ses équipements malgré la programmation d'une opération de maintenance. Elle peut, en connaissance de cause, décider de repousser une opération de maintenance ou pas en fonction de ses besoins.

1.2.6 La maintenance conditionnelle

Contrairement à la maintenance prédictive, la durée avant la prochaine opération de maintenance n'est pas connue à l'avance i.e. pas de planning prévisionnel (Phogat and Gupta, 2017). En effet Les données issues des capteurs permettent de suivre le comportement des équipements en ligne grâce à des indicateurs d'état de santé (température, vibration,

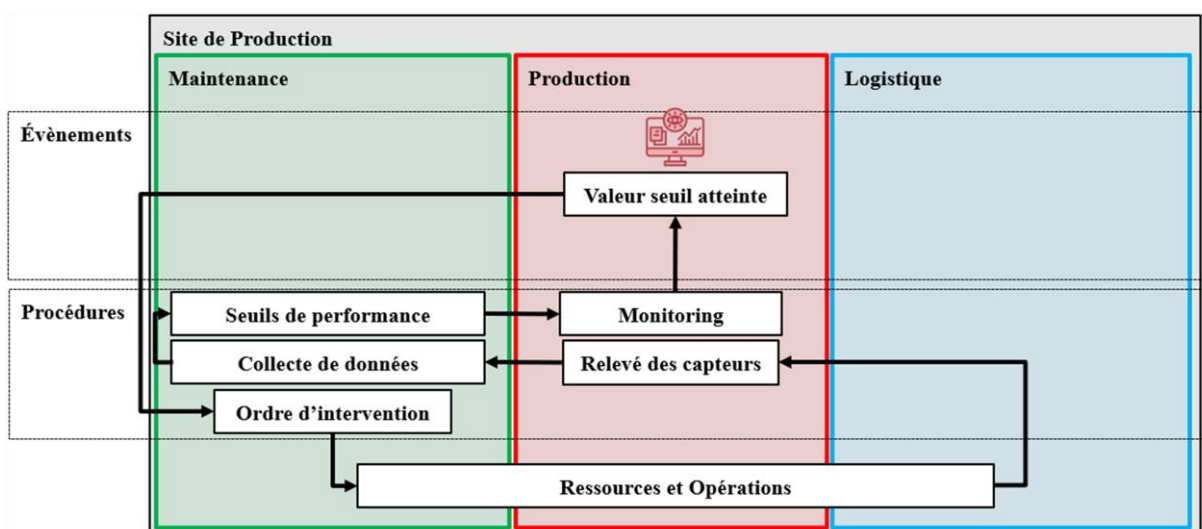


Figure 5 Maintenance Conditionnelle

déformation, etc...) (Van Horenbeek et al., 2013). Des valeurs seuils sont prédéterminées afin d'initier les interventions dès qu'elles sont estimées être atteintes, tel qu'illustré par la figure 5. Les avantages d'une telle approche reposent sur le fait que la production reprend le contrôle des opérations de maintenance. Avec les données des capteurs elle peut décider quand arrêter les équipements ou pas. Cependant, sans la maîtrise du risque que propose la maintenance prédictive, il peut facilement y avoir des défauts de capteurs (fausses alertes, défaillances sans alerte, etc.).

Quelle que soit la politique de maintenance choisie par une entreprise (du correctif au conditionnel) une problématique demeure : la gestion des ressources, tel qu'illustré par la figure 6. Les autres problématiques concernent les méthodes de prévention (hormis la maintenance corrective) et la gestion des données (maintenance prédictive et conditionnelle). La suite de cette section sera dédiée au soutien logistique nécessaire pour la mobilisation efficace des ressources de maintenance.

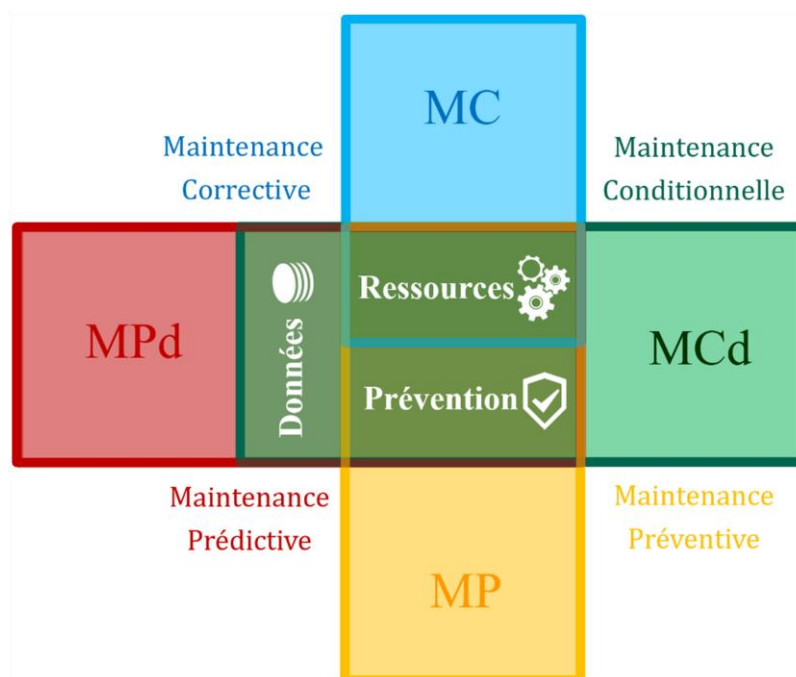


Figure 6 Points communs des politiques de maintenance

1.3 Soutien logistique pour la maintenance

Toutes les politiques de maintenance nécessitent une optimisation du transport, du stockage et de la mise à disposition des ressources requises pendant les opérations.

1.3.1 Actions liées au soutien logistique

Généralement un équipement est un assemblage de composants susceptibles de tomber en panne. Au cours d'une opération de maintenance chaque composant peut nécessiter un remplacement par une pièce de rechange en bon état de fonctionnement. Par conséquent il faudrait en constituer un stock afin d'anticiper la demande et réduire les potentiels coûts de commande d'urgence. La gestion du stock de pièces de rechange requiert une optimisation (Metso et al., 2018). S'il y en a trop, les coûts risquent d'être exorbitants pour l'entreprise, dans le cas contraire il risque d'y avoir des ruptures de stock en cas de haute demande imprévue. De plus, il faudrait un ou plusieurs opérateurs pour effectuer les opérations, d'où les problématiques d'affectation de postes et de compétences.

1.3.2 Design d'atelier de maintenance intégré

Une grande partie des opérations de maintenance a lieu dans des ateliers qui permettent le stockage des pièces de rechange et des autres ressources matérielles et humaines. La conception et le dimensionnement d'un atelier de maintenance est un problème à prendre au sérieux, vu qu'il s'agit d'un investissement amortissable sur une longue durée. Un atelier de maintenance idéal dispose d'un nombre optimal de machines/postes/stations de remise en état d'équipements défectueux, et d'un inventaire optimisé de pièces de rechange. Chaque station possède une fonction/compétence bien déterminée (désassemblage, diagnostic, remise en état, assemblage, etc...). Dans la suite du document le terme « station » sera utilisé pour faire référence à un ensemble machine, opérateur et outils dédié à la réalisation d'une fonction précise.

1.4 Les sites de production géographiquement distribués

Cette thèse se focalise sur la mise en œuvre et l'évaluation de la maintenance de plusieurs sites de production géographiquement distribués. L'objectif (d'un point de vue production) d'une telle structure multisites est de satisfaire la demande en produits de plusieurs clients dispersés dans une certaine zone géographique. Mais en réalité il existe deux principaux types de systèmes de production dans le cadre de cette problématique ; les systèmes de production centralisés et décentralisés

1.4.1 Les systèmes de production centralisés

Un système de production centralisé dispose d'un seul site de production et de plusieurs entrepôts qui servent de relais logistiques entre le site central et les clients dispersés. Les entrepôts sont positionnés à proximité des clients et permettent de stocker les produits, tel qu'illustré par la figure 7. Par conséquent, les produits sont fabriqués dans le site central, transportés vers les entrepôts et ensuite acheminés vers les clients à la demande. Cette architecture logistique est connue sous le nom de « multi-echelon » (Wang et al., 2019). La maintenance des équipements est assurée par un seul atelier intégré dans le site de production central.

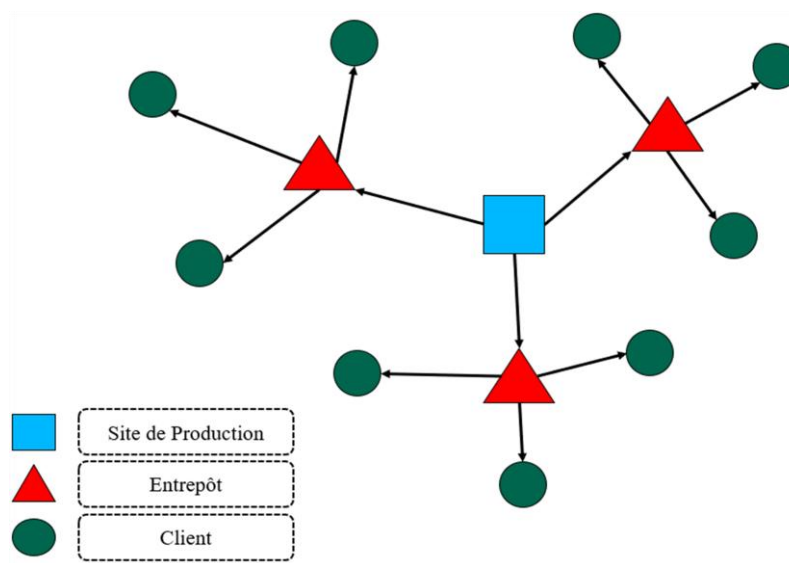


Figure 7 Un système de production centralisé

1.4.2 Les systèmes de production décentralisés

Un système de production décentralisé ne requiert pas d'entrepôts. Plusieurs sites de production sont positionnés à proximité des clients afin d'assurer l'approvisionnement tel qu'illustré par la figure 8. Les clients sont regroupés en clusters et un site de production est affecté à chaque cluster. Il s'agit d'une architecture dite « single-échelon » (Cesaro and Pacciarelli, 2011). Il existe plusieurs autres variantes de systèmes de production comme par exemple les systèmes de production mixtes qui allient à la fois la centralisation et la décentralisation. Par mesure de simplification visuelle, toutes les variantes vont être représentées comme des systèmes de production décentralisés. L'objectif est de se focaliser uniquement sur les sites de production géographiquement distribués et la maintenance des équipements qui y sont installés (sans prendre en compte l'existence éventuelle de plusieurs entrepôts ou le nombre de clients).

1.5 Une maintenance distribuée

Dans cette thèse, la maintenance distribuée est définie comme étant la combinaison des opérations correctives et préventives, destinées à assurer le bon fonctionnement d'un système de production décentralisé. Connue sous le nom de « Distributed Maintenance », la maintenance distribuée semble être un sujet relativement peu étudié. De 1999 à 2022, seules

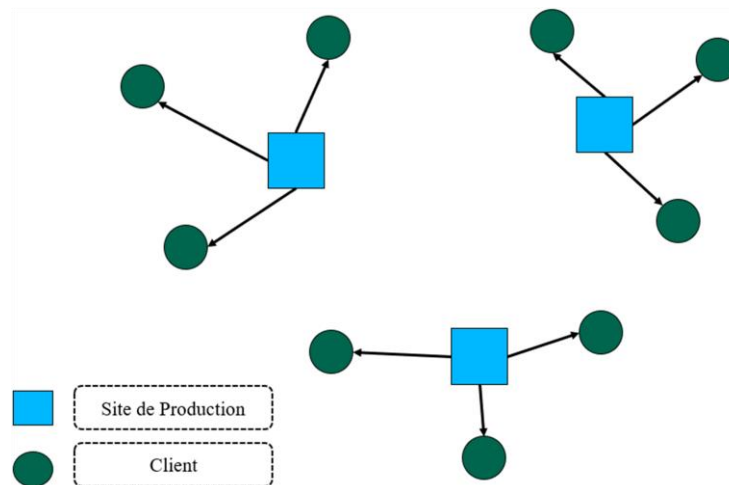


Figure 8 Un système de production décentralisé

13 publications dans des revues scientifiques contiennent « Distributed Maintenance » AND (« Production » OR « Manufacturing ») dans le titre, les mots clés ou le résumé. Les opérateurs « AND » et « OR » ont été ajoutés pour restreindre la recherche bibliographique dans le cadre de la production. 4 des 13 publications traitent la maintenance distribuée d'un point de vue logistique. Le reste des articles utilisent le terme pour décrire la distribution du réseau de communication (Grunewald et al., 2002) ou la distribution du système d'information (Hoffmann and Joan-Arinyo, 2000). Cette thèse adopte un point de vue logistique sur la maintenance distribuée i.e. nous nous intéressons au transport, au stockage et à la mise à disposition des ressources dans le cadre de la maintenance distribuée. Des 4 publications retrouvées portant sur l'aspect logistique (Liao et al., 2022) ; (Miao et al., 2022) ; (Hedjazi et al., 2019) ; (Simeu-Abazi and Alali Alhouaij, 2011), la plus ancienne date de 2011. Les auteurs proposent pour la première fois un modèle adapté à la maintenance distribuée (réseaux de Petri) et une méthode d'évaluation et d'optimisation des performances (coûts de maintenance et disponibilité des sites de production). Les autres publications traitent toutes de la problématique d'ordonnancement dans un contexte de maintenance distribuée, avec comme difficulté de proposer un planning de maintenance qui prennent en compte toutes les demandes prévisionnelles des sites de production géographiquement distribués, dans un environnement incertain (origine et nature des défaillances, qualité et quantité nécessaire de pièces de rechange, disponibilité des ressources partagées, etc.). Les approches et contributions proposées dépendent fortement du type d'atelier de maintenance en jeu.

1.5.1 Les ateliers de maintenance intégrés (AMI)

Dans ce système, chaque site de production possède son propre atelier de maintenance tel qu'illustré par la figure 9. La gestion des stocks de pièces de rechange, des opérateurs et des machines/outils est décentralisée. Par conséquent chaque site de production dispose d'un stock de pièce de rechange et de stations de remise en état intégrés.

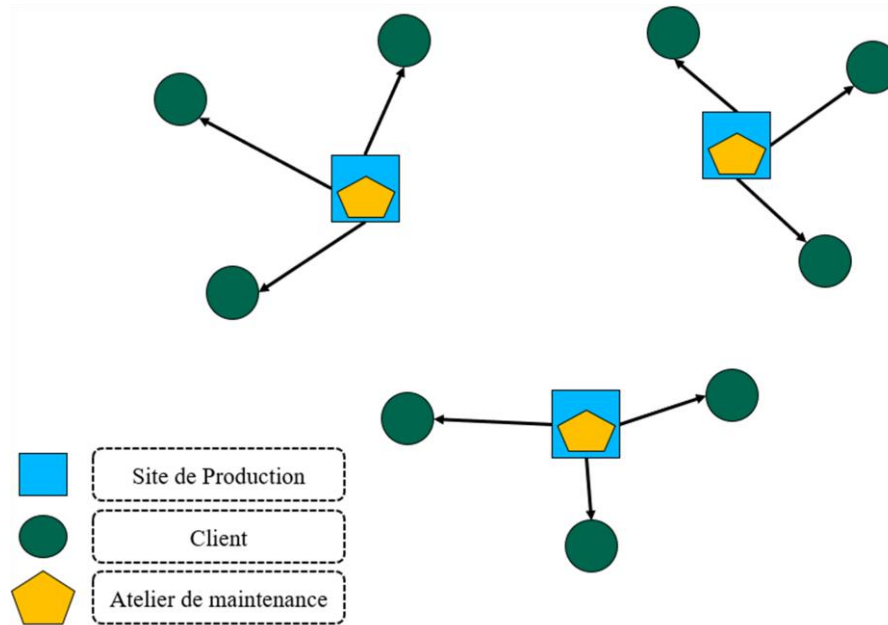


Figure 9 Les ateliers de maintenance intégrés

1.5.2 Les ateliers de maintenance centralisés (AMC)

Dans ce système, les ressources de maintenance sont mutualisées dans un atelier central (Abbou, 2003). Un atelier de maintenance mobile (AMM) est ensuite nécessaire pour acheminer les ressources entre les sites de production et l'atelier central. Il s'agit d'une flotte de véhicules chargés de visiter tous les sites et de mener les opérations de maintenance préventive. Ainsi, les équipements et les pièces de rechange sont transportés des sites de production vers l'atelier central et vice-versa. Par conséquent les actions correctives sont centralisées dans l'AMC et les actions préventives sont assurées par l'AMM. L'idée (voir figure 10) est de réduire le nombre de ressources de maintenance nécessaires au bon fonctionnement des équipements géographiquement distribués, et donc les coûts.

1.5.3 Objectif de cette thèse et problématique

Les travaux de cette thèse ont pour objectif de contribuer à la mise en œuvre et à l'évaluation de la maintenance distribuée dans le cadre d'une économie circulaire. Encore appelée « circular economy » en anglais, cette tendance est un concept dont l'une des portées vise

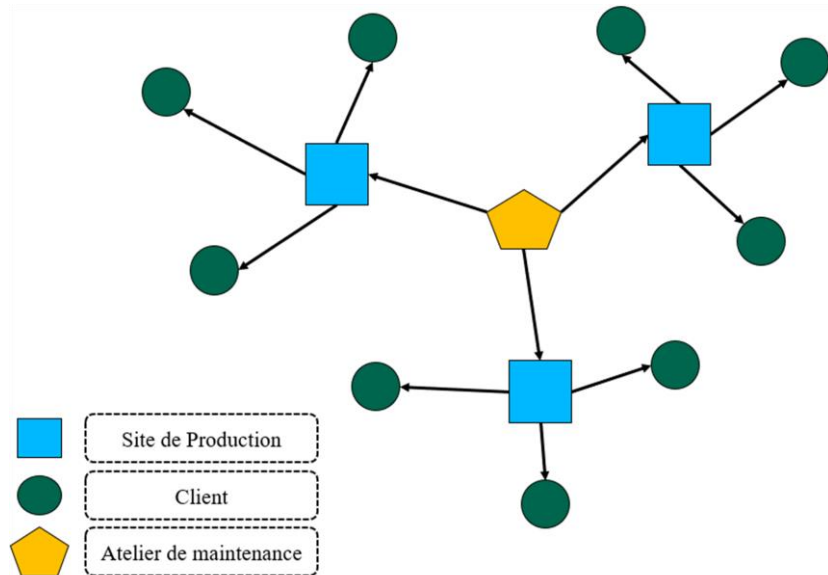


Figure 10 L'atelier de maintenance centralisé

à maximiser l'utilité des équipements de production pendant et après leur vie de fonctionnement (Geisendorf and Pietrulla, 2018). L'idée est de mettre sur pied une structure efficace qui permette, non seulement d'assurer la maintenance de plusieurs équipements de production géographiquement distribués, mais aussi de pouvoir les revaloriser à la fin de leur vie. En effet, tout comme dans la production, la minimisation des déchets/rebuts dans la maintenance est d'un enjeu majeur pour les industriels. Logiquement, moins il y a de déchets, plus les coûts pourraient être réduits, et moins il devrait avoir d'impact environnemental. Parmi les architectures de la maintenance distribuée présentées précédemment, cette thèse se focalise sur les AMC. En effet, les AMC ont deux principaux avantages qui les distinguent des AMI :

- 1) La mutualisation des ressources, qui permet de réduire le nombre de stations de remise en état dans les ateliers, et par conséquent les coûts de maintenance.
- 2) La présence de l'AMM, qui assure un flux continu (plus il y a de sites de production plus le flux est susceptible d'être continu à travers le temps) d'équipements défectueux vers l'AMC. Une des contributions de la thèse est de proposer une chaîne de remise en état

des équipements défaillants complétée par une chaîne de revalorisation des équipements en fin de vie.

Bien évidemment, pour mettre en commun les ressources de maintenance de plusieurs sites de production il faudrait que le planning global soit assez robuste pour tenir compte à la fois des contraintes de chaque site de production (état de santé des équipements, position géographique, etc.) et des imprévus (demande imprévue dans un site S_1 à un instant T et nécessitant une ressource R alors qu'à cet instant T la ressource R était programmée pour un autre site S_2).

Dans cette optique de mise en commun des ressources de maintenance, le travail de thèse apporte une solution aux questions de recherche suivantes :

- 1- De quelle quantité et quelle qualité de pièces de rechange doit-on disposer en stock pour satisfaire les demandes multiples et incertaines des différents sites de production ?
- 2- Quelle capacité de transport et quel ordre de visite choisir pour assurer la fiabilité et la disponibilité des équipements de production géographiquement distribués à moindre coût ?

Le chapitre qui suit permet de définir clairement le cadre d'étude ainsi que les principales hypothèses.

1.6 Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif de construire les questions de recherche à aborder dans cette thèse grâce à l'analyse des politiques de maintenance en général et des stratégies de maintenance pour les sites de production géographiquement distribués en particulier. Il a été ainsi montré que les besoins et connaissances concernant la maintenance des sites de production ont évolué à travers le temps. Cette évolution a donné lieu successivement à différentes politiques qui visaient à assurer la sûreté de fonctionnement des équipements tout en réduisant les coûts impliqués.

Dans le cas particulier de la maintenance distribuée, deux éléments permettent de catégoriser les différentes approches possibles : Le point de vue (logistique, système d'information ou réseaux de communication) et le choix du type d'atelier de maintenance (centralisé ou intégré). Cette section s'est focalisée sur le point de vue logistique (problématique commune à toutes les politiques de maintenance) dont l'objectif est d'assurer le transport et la mise à disposition des ressources de maintenance. Le chapitre suivant va permettre de définir clairement le cadre d'étude de cette thèse et les principales hypothèses. L'objectif est de contribuer à la mise en œuvre et à l'évaluation du processus de remise en état et de revalorisation des équipements défectueux provenant de plusieurs sites géographiquement distribués.

CHAPITRE 2 : LA MAINTENANCE DISTRIBUÉE AU PROFIT D'UNE ÉCONOMIE CIRCULAIRE

L'objectif de ce chapitre est de définir le cadre et la portée de cette thèse. Il est question de montrer l'intérêt du sujet en explorant les potentielles améliorations que pourrait créer une maintenance distribuée centrée sur l'économie circulaire, dans un système de production. Une étude préalable des différentes opérations qui pourraient être en jeu dans une maintenance distribuée est effectuée afin d'identifier des indicateurs qui pourraient permettre de mesurer les performances techniques et environnementales.

SOMMAIRE

2.1	Introduction.....	42
2.2	Economie Circulaire.....	43
2.3	Les opérations de maintenance distribuée	44
2.4	Le processus d'une maintenance distribuée	46
2.5	Les indicateurs de performance technique et environnementale.....	49
2.6	Développement d'une méthode d'analyse des indicateurs de performance.....	50
2.7	Analyse des indicateurs de performance dans le cadre de cette thèse.....	54
2.8	Conclusion	56

2.1 Introduction

La maintenance distribuée est un concept relativement récent, puisque le premier article publié dans une revue scientifique à ce sujet date de 2011 (Simeu-Abazi and Alali Alhouaij, 2011). Le chapitre précédent a permis de distinguer deux principales architectures logistiques dans le cadre d'une maintenance distribuée : les Ateliers de Maintenance Centralisés (AMC) et les Ateliers de Maintenance Intégrés (AMI). Cette thèse est focalisée sur les AMC, avec pour objectif d'assurer non seulement la remise en état d'équipements géographiquement distribués, mais aussi la gestion de leur fin de vie. En effet, plus un équipement va se rapprocher de sa fin de vie, plus les ressources nécessaires à sa remise en état, en cas de défaillance, sont coûteuses. Par conséquent, à partir d'un certain âge les équipements sont mis en rebut en cas de défaillance, faute de rentabilité (ce qui est le cas pour plus de 22% des équipements électriques et électroniques en France, en 2020 ("Equipements électriques et électroniques," 2020) Cependant, les enjeux climatiques et les limites planétaires en matières premières poussent les industriels à vouloir repousser l'âge de « retraite » des équipements. Alors, l'objectif majeur de cette thèse est de chercher, non seulement à minimiser les coûts d'une maintenance distribuée, mais aussi à maximiser la durée de vie des équipements de production grâce à la mutualisation des ressources dans un AMC.

En effet, un AMC est, par définition, un lieu où sont regroupées les ressources de maintenance, afin de réduire les coûts de remise en état des équipements. L'hypothèse majeure de cette thèse repose sur l'idée qu'en disposant d'un minimum de ressources de maintenance pour un maximum d'équipements, par regroupement dans un AMC, il serait possible de remettre en état de façon rentable les équipements non seulement pendant leur période de jeunesse et de maturité mais aussi pendant leur période de vieillesse et de fin de vie. Dans ce cas, le cycle de vie des équipements pourrait devenir circulaire, i.e. au lieu d'un cycle linéaire (utilisation-maintenance-rebut) on aurait plutôt utilisation-maintenance-utilisation. Cette approche de circularité est largement connue sous le nom d'économie

circulaire (“L’économie circulaire,” 2023), avec pour objectif général dans la production, de prolonger au maximum la durée de vie des équipements. Dans un contexte d’économie circulaire, en plus de la réparation traditionnellement effectuée dans un AMC, il est possible d’intégrer d’autres stratégies, telles que la refabrication, le recyclage, la reconversion, etc. La question que nous nous posons ici est de savoir quels indicateurs pourraient permettre d’évaluer les performances d’une maintenance distribuée intégrant les stratégies de l’économie circulaire.

Ce chapitre a pour objectif de proposer des indicateurs techniques et environnementaux pour la maîtrise des opérations de maintenance distribuée dans un contexte d’économie circulaire.

2.2 Economie Circulaire

L’économie circulaire traite du changement climatique et d’autres défis mondiaux tels que les déchets et la pollution, en découplant l’activité économique de la consommation de ressources finies. Comme le montre la figure 11, connue sous le nom de diagramme papillon (“The butterfly diagram,” 2023), le flux de matières dans une économie circulaire est

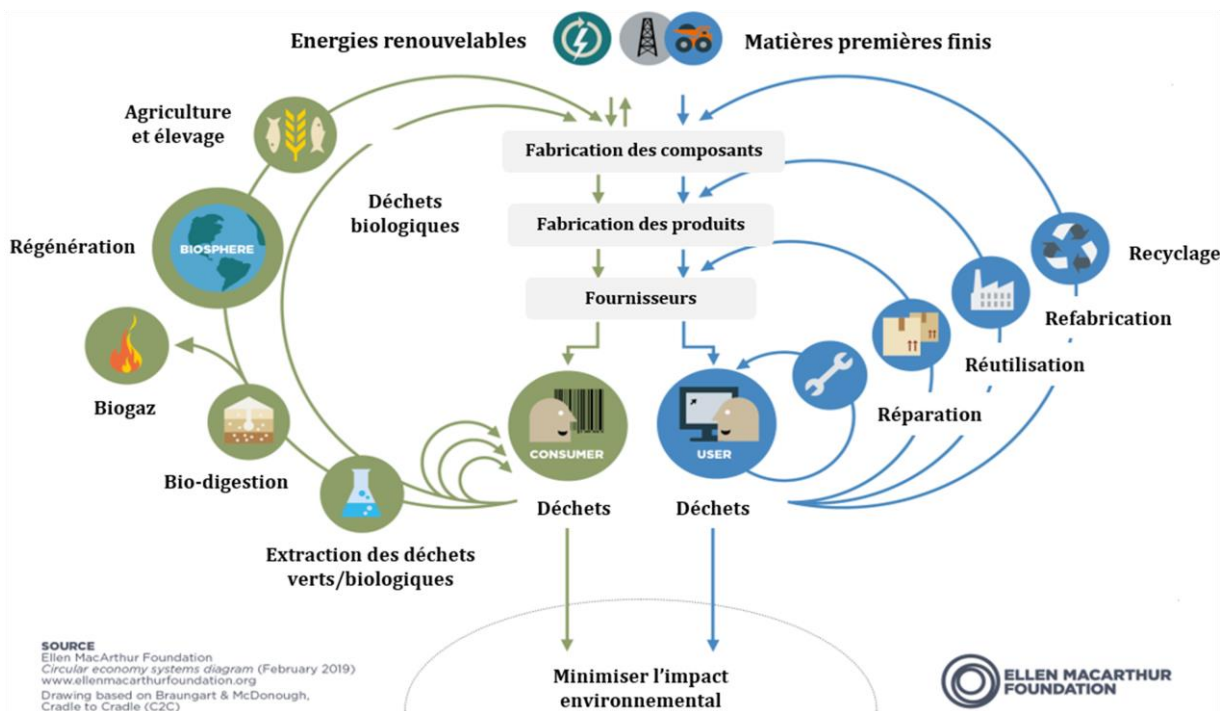


Figure 11 Une économie circulaire

constitué de plusieurs boucles de transformation, ou de remise en état (réutilisation, réparation, refabrication, recyclage) dans le cas des équipements de production. Les différentes boucles de l'économie circulaire (en bleu) s'inspirent des cycles biologiques (en vert). Plus un équipement va être âgé, plus il va passer par une plus grande boucle (proportionnelle au temps de remise en état). Par exemple un jeune équipement de production pourrait être directement réutilisé tandis qu'un plus vieux devrait être refabriqué.

2.3 Les opérations de maintenance distribuée

Comme introduit précédemment, une maintenance distribuée est constituée de 3 principaux acteurs : les sites de production, l'AMC pour la remise en état, et les véhicules pour le transport. La figure 12 illustre les différents flux d'équipements entre ces 3 acteurs. On distingue ainsi des flux d'équipements défectueux, des flux d'équipements en bon état de fonctionnement et des flux d'équipements en seconde vie. Une opération de maintenance distribuée peut être considérée comme un flux d'équipements faisant intervenir un ou

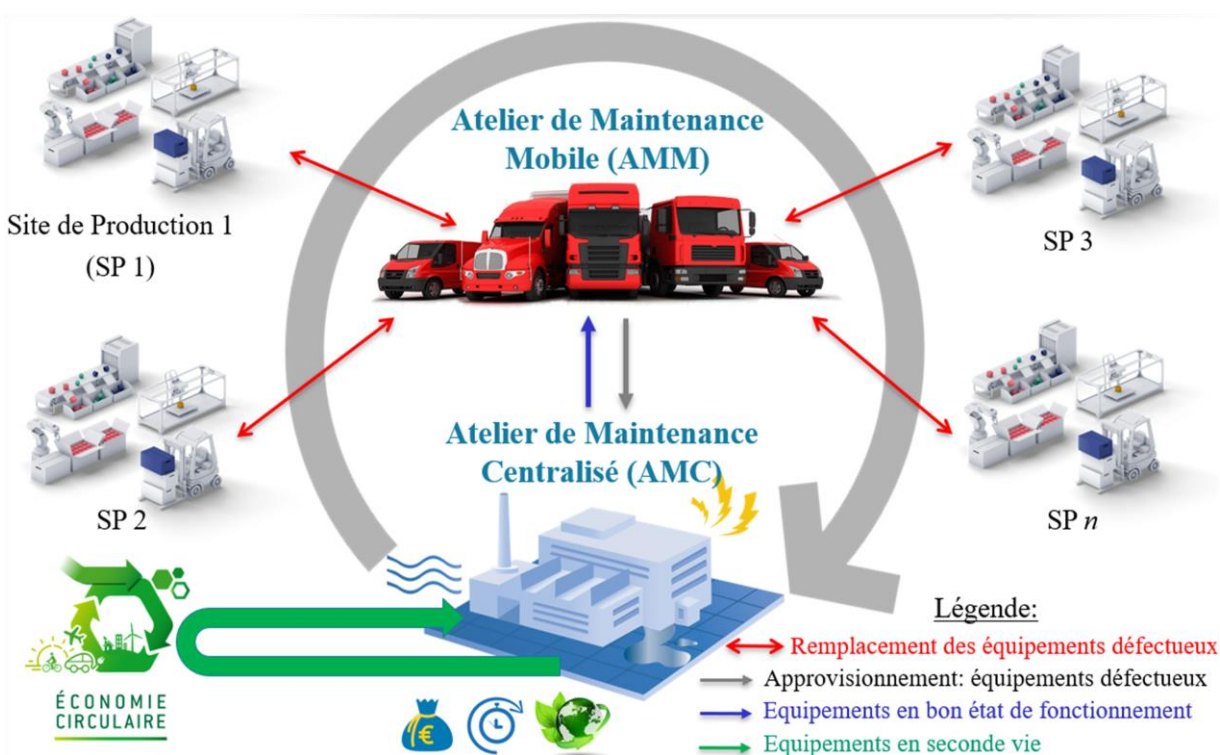


Figure 12 La maintenance distribuée au profit d'une économie circulaire

plusieurs acteurs. Une observation du modèle générique de la figure 12 permet de diviser les opérations de maintenance distribuée en deux grandes parties : les opérations de maintenance et les opérations de transport.

La maintenance des équipements peut être soit préventive soit corrective. Les opérations préventives correspondent au flux d'équipements entre les sites de production et les véhicules. Les équipements sont préventivement remplacés pour anticiper l'occurrence d'éventuelles défaillances. Les opérations correctives correspondent au flux d'équipements entre les véhicules et l'AMC. Il faudrait remarquer ici qu'un équipement peut très bien être remplacé par mesure préventive mais être ensuite remis en état, suite à un diagnostic, dans l'AMC. Il est alors nécessaire de connaître le moment auquel il faudrait remplacer les équipements au niveau des sites et comment il faudrait les remettre en état dans l'AMC. En plus de la réparation traditionnellement effectuée dans un AMC, pour la remise en état des équipements défectueux, il est possible d'intégrer d'autres stratégies de l'économie circulaire telles que la refabrication, le recyclage, la reconversion, etc., que nous allons regrouper dans la suite sous le terme « mise en seconde vie ». Bien que la maintenance distribuée puisse être au cœur d'une économie circulaire, pour une réduction des impacts environnementaux des opérations maintenance grâce à la mise en seconde vie, elle nécessite des opérations de transport qui peuvent poser d'autres problèmes environnementaux.

Les véhicules transportent les équipements et des opérateurs qui se chargent du remplacement préventif. Les opérations de transport permettent de disposer d'un seul atelier pour tous les sites de production. En effet, l'hypothèse majeure de cette thèse repose sur l'idée qu'en disposant d'un minimum de ressources de maintenance pour un maximum d'équipements, par mutualisation dans un AMC, il serait possible de réduire les coûts de remise en état des équipements non seulement pendant leur période de jeunesse et de maturité mais aussi pendant leur période de vieillesse et de fin de vie. Cet aspect mobilité

représente l'une des contraintes majeures dans l'étude de la maintenance distribuée. En effet, chaque véhicule dispose a priori d'une capacité de transport limitée, et il est nécessaire de trouver le meilleur trajet à emprunter pour acheminer les équipements entre les sites et l'AMC. En plus, chaque kilomètre parcouru par un véhicule nécessite un chauffeur, consomme du carburant et émet du CO_2 . Comme le montre la figure 13, le transport représentait 29% des émissions de CO_2 dans l'Union Européenne (UE) et 41% en France, en 2020. Face au réchauffement climatique qu'entraîne un excès de CO_2 dans l'atmosphère, et aux autres conséquences de la pollution, l'UE a dû définir des standards pour limiter la quantité de CO_2 émise par kilomètre à 147g ("CO₂ émission performance standards for cars and vans," 2023). Conscient des enjeux climatiques mais aussi de la raréfaction des matières premières, il serait nécessaire de mettre sur pied des indicateurs permettant de maîtriser l'impact des opérations de maintenance distribuée, dans un contexte d'économie circulaire.

2.4 Le processus d'une maintenance distribuée

Traditionnellement, la maintenance s'est développée avec une vision interne au site de production comme illustré par la figure 14. Comme décrit au Chapitre 1, le processus de

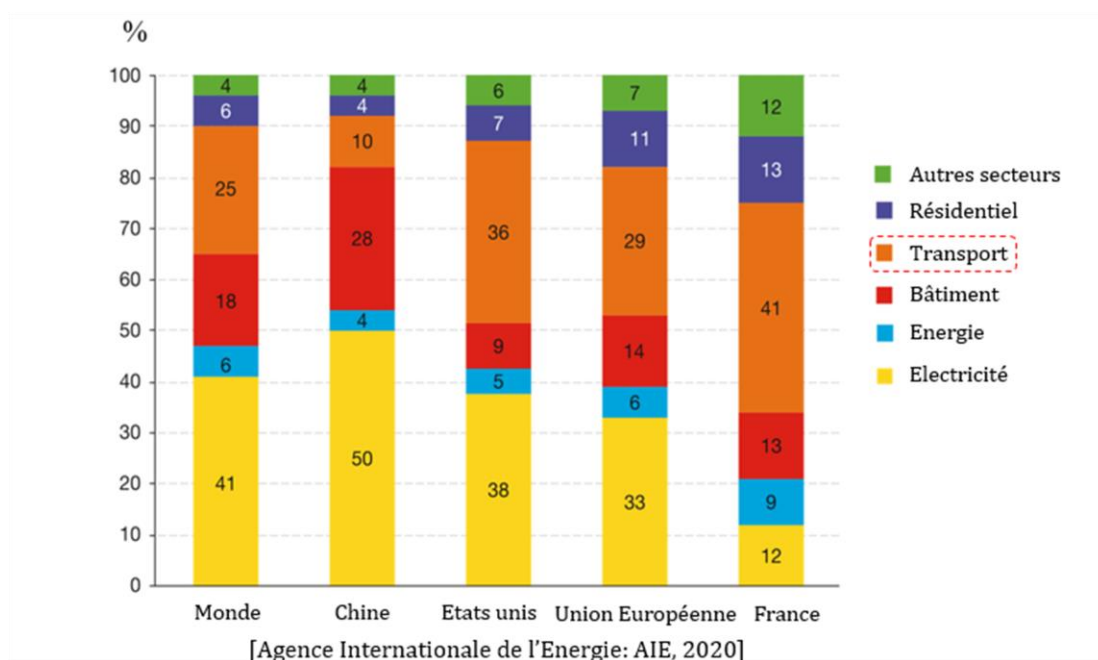


Figure 13 Distribution sectorielle des émissions de CO_2 en 2020

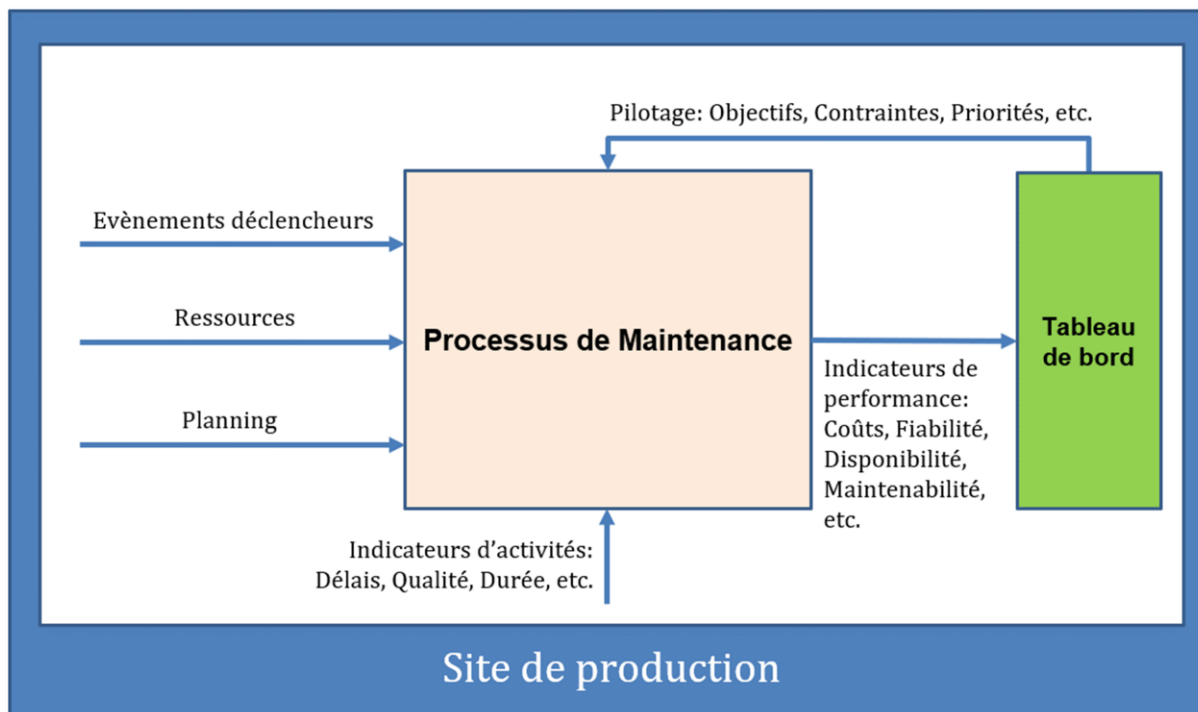


Figure 14 Un processus de maintenance dans un site de production

maintenance était à la base conçu pour un seule site de production. Par conséquent, les seuls éléments susceptibles d'impacter les activités de maintenance (ressources, planning, évènements déclencheurs, pilotage et indicateurs) étaient internes au site de production. Tant qu'un site avait les ressources et les compétences nécessaires au bon fonctionnement des opérations de maintenance et à la maîtrise des indicateurs, cet approche traditionnelle pouvait fonctionner. Cependant, l'avènement des technologies de l'industrie 4.0 (Zheng et al., 2021) rend les équipements de production de plus en plus complexes (électronique, mécanique, automatique, science des données, etc.). Par conséquent, il devient de plus en plus difficile pour un site d'assurer entièrement ses besoins en maintenance, d'où la naissance des concepts tel que la sous-traitance, l'externalisation et la mise en réseau dans le processus de maintenance. Dans cette vague de changement, la maintenance distribuée permet d'aborder la conception d'un système de maintenance d'une manière nouvelle et structurée (Alali Alhouaij and Simeu-Abazi, 2008).

En effet, le concept de maintenance distribuée exploite la connaissance de la maintenance et de l'organisation du réseau de transport (Kaffel, 2001). L'architecture du système qui en résulte comprend un ensemble de ressources (humaines, matérielles et informationnelles), internes ou externes aux sites de production, qualifiées pour exécuter un ensemble de processus tel qu'illustré par la figure 15. Contrairement à la maintenance traditionnelle où le préventif et le correctif sont effectués sur site, dans une maintenance distribuée le préventif est géré par un Atelier de Maintenance Mobile (AMM), constitué d'une flotte de véhicules comme décrit à la section 1.3, et le correctif est géré par un Atelier de Maintenance Central (AMC). Chacun de ces deux processus prend en entrée les informations sur les ressources disponibles, les indicateurs d'activités et les éléments de pilotage pour fournir en sortie des indicateurs de performance après le processus de maintenance corrective pour l'AMC ou de maintenance préventive pour l'AMM. On retient ainsi 2 grandes catégories d'indicateurs : les indicateurs d'activités et les indicateurs de performance.

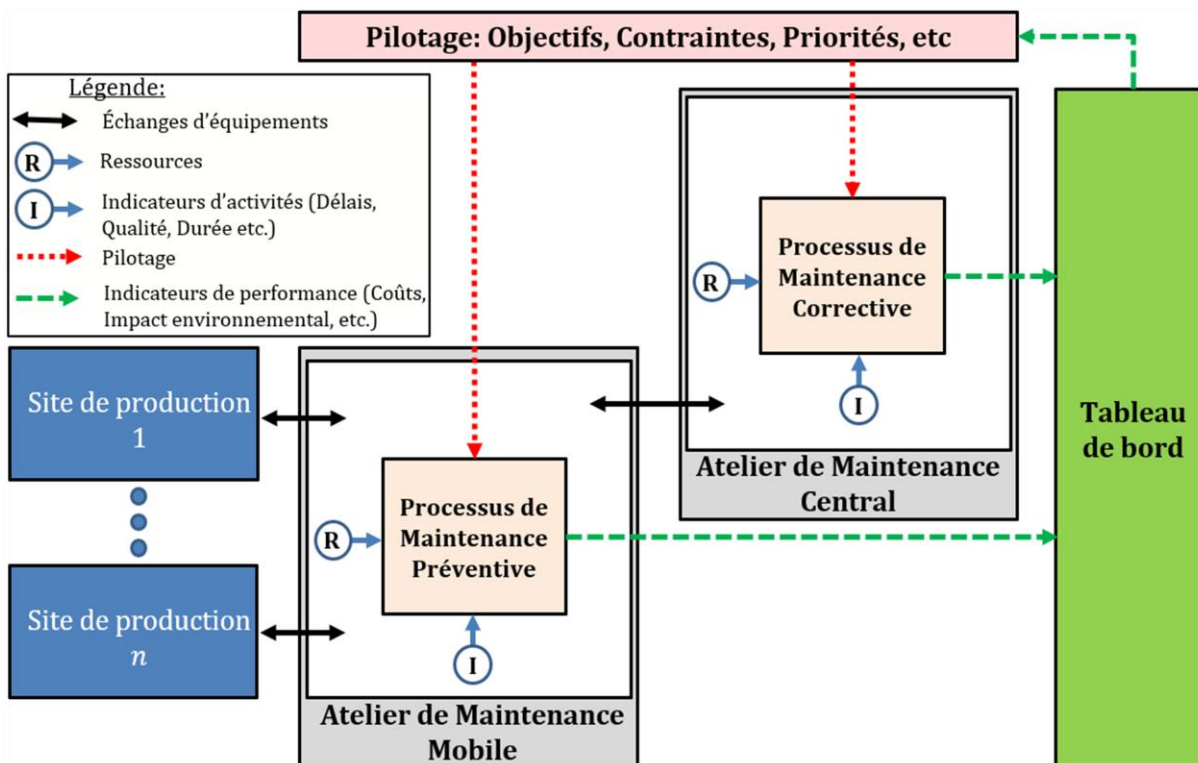


Figure 15 Un processus de maintenance distribuée

Un indicateur est défini par la norme ISO 14050:2020 comme : « variable quantitative, qualitative ou binaire qui peut être mesurée ou décrite, représentant le statut des opérations, du management, des conditions ou des impacts » (“ISO 14050:2020,” 2020). Ainsi, les indicateurs d’activités permettent de mesurer ou de décrire un processus tandis que les indicateurs de performance concernent les résultats du processus. Comme exemple d’indicateurs d’activités, dans le cadre de la maintenance traditionnelle, nous avons les délais, les qualités et les durées des interventions, tandis que pour les indicateurs de performance nous avons les coûts, les impacts environnementaux, les temps moyens d’intervention ou encore les temps moyens entre les interventions. Par la suite nous allons nous focaliser sur la recherche d’indicateurs de performance adaptés à la maintenance distribuée, sous deux sous-catégories : les Indicateurs de Performance Technique (IPT) et les Indicateurs de Performance Environnementale (IPE).

2.5 Les indicateurs de performance technique et environnementale

Chaque opération de maintenance distribuée nécessite du temps, des ressources financières et peut produire des déchets. L’idée est de mettre sur pied un ensemble d’indicateurs de performance permettant de maîtriser l’impact économique et environnemental de ces opérations. Comme déjà précisé à la section 1.3, les opérations de maintenance distribuée peuvent être divisées en deux grands groupes : les opérations de maintenance et les opérations de transport. Chacun de ces deux groupes est, séparément, largement étudié dans la littérature. En effet, en comptabilisant juste les publications de 2022 qui traitent de l’impact environnemental on obtient plus de 120 articles de revues concernant la maintenance (mots clés « environmental impact » et « maintenance » dans le sujet) et plus de 366 articles de revues concernant le transport (mots clés « environmental impact » et « transport » dans le sujet). Les chiffres sont logiquement plus grands pour l’impact économique. Par conséquent, il existe une multitude d’indicateurs de performance qui

pourraient être liés aux opérations de maintenance distribuée. Nous allons chercher à les classer pour une meilleure compréhension de leur utilité.

Les Indicateurs de Performance Technique (IPT) peuvent être divisés en 3 groupes, selon la portée de l'impact mesuré : le coût, le temps et la qualité. Les Indicateurs de Performance Environnementale (IPE) peuvent également être divisés en 3 groupes selon le mode d'impact/pollution : l'eau, le sol et l'air. Chacun des deux types d'opérations d'une maintenance distribuée (transport et maintenance) peut être relié aux 6 groupes d'impact précédents, comme le montre le tableau 2. Par exemple, les opérations de transport peuvent avoir un impact sur le coût à travers la distance parcourue par unité de temps ou encore la quantité de carburant consommé par unité de distance. Comme autre exemple, les opérations de maintenance peuvent avoir un impact sur le sol à travers la quantité de rebuts enfouis. Avec cette multitude d'indicateurs il semble nécessaire de mettre sur pied une méthode d'analyse permettant de les trier et de les sélectionner en fonction des critères à définir.

2.6 Développement d'une méthode d'analyse des indicateurs de performance

Cette méthode, développée sous le nom de l'ACPI (Analyse des Critères de Priorité des Indicateurs), a été conçue initialement pendant le stage de master recherche de Merveille KOUAKEP TCHOUMA (Kouakep Tchouma et al., 2023) dont nous étions les superviseurs, et a été par la suite complétée et améliorée. Elle s'appuie sur 5 étapes :

- (1) **Décomposition du problème** : l'objectif est de réduire le problème de mesure en parties plus petites et plus spécifiques afin d'obtenir des variables quantifiables. Par exemple on peut avoir au départ ce problème : « mesure de la disponibilité des sites de production ». On obtiendra par décomposition : « calcul de la MTTF (Mean Time To Failure), de la MTTR (Mean Time To Repair), et ensuite de la Disponibilité ».
- (2) **Paramétrage des indicateurs** : l'objectif est de fixer l'échelle de mesure (définir les seuils minimum et maximum acceptables), définir le sens de l'optimisation (maximisation ou

Tableau 2 Classification des indicateurs de performance d'une maintenance distribuée

		Opérations de transport	Opérations de maintenance
Performance	Impact	<i>Exemples d'indicateurs</i>	
IPT Indicateurs de Performance Technique	Coût	Coût de transport d'une unité de charge, distance parcourue par unité de temps, quantité de carburant consommé par unité de distance, etc.	Coût de maintenance, coût de stockage des pièces de rechange, coût des opérations préventives, etc.
	Temps	Temps de transport d'une unité de charge, temps moyen de chargement, temps moyen de déchargement, délai moyen de livraison, etc.	Temps moyen de réparation, temps moyen entre les défaillances, etc.
	Qualité	Sécurité, nombre d'accidents, fréquence des accidents, fiabilité des véhicules de transport, etc.	Fiabilité, maintenabilité, disponibilité, etc.
IPE Indicateurs de Performance Environnementale	Eau	Quantité de carburant retrouvé dans les eaux à proximité du réseau de transport, niveau de pollution des nappes phréatiques, etc.	pH des eaux rejetées dans la nature, quantité d'eau rejetée, etc.
	Sol	Surface totale des routes bitumées, quantité d'hydrocarbures et métaux lourds retrouvée dans le sol, etc.	Quantité de rebuts enfouis, quantité de métaux lourds retrouvée dans le sol, etc.
	Air	Quantité de CO ₂ , quantité de NO ₂ , nuisances sonores, etc.	Quantité de CO ₂ , quantité de CH ₄ , quantité de N ₂ O, quantité de gaz fluorés, etc.

minimisation) et les méthodes d'obtention du résultat (mesure, formule, algorithme, etc.).

- (3) **Evaluation des indicateurs** : l'objectif est d'attribuer un poids à chaque indicateur, qui montre comment la performance de cet indicateur contribue à la performance globale du système.
- (4) **Classification des indicateurs** : l'objectif est de hiérarchiser les indicateurs en fonction de leur niveau d'importance et de leur degré d'urgence.
- (5) **Sélection des indicateurs** : l'objectif est de choisir les indicateurs prioritaires pour la réalisation de l'évaluation des performances du système.

Au regard de ce qui précède, nous pouvons approfondir l'étape d'évaluation des indicateurs car le tri et la section des indicateurs sont basés principalement sur cette étape. Par définition, un indicateur se doit d'être quantifiable et mesurable, mais aussi il doit pouvoir ressortir des informations spécifiques et ainsi fournir des éventuelles pistes d'optimisation. Afin de mettre sur pied notre système d'évaluation, nous décidons de nous inspirer de l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leur Effets et de leur Criticité) ou FMEA en anglais (Wu et al., 2021). En effet, nous faisons ici une similitude entre la criticité (dans l'AMDEC) et les poids à attribuer aux indicateurs à évaluer. Notre système d'évaluation portera ainsi le nom d'Analyse des Critères de Priorité des Indicateurs (ACPI). Les éléments de l'ACPI dans un contexte de maintenance distribuée sont les suivants :

- **Les fonctions** : il s'agit des fonctions de transport (des pièces de rechange et des outils) et de maintenance (opérations de rechange des pièces et de réparation des pièces défectueuses).
- **Les modes d'impact** : il s'agit des 6 groupes d'impact présentés à la section 1.5 (coût, temps, qualité, eau, sol et air).
- **Les effets des impacts** (associés aux modes d'impact) : baisse de la rentabilité, augmentation de la quantité de carburant consommé, baisse du temps de service, etc.

- **Les indicateurs associés** : il s'agit d'indicateurs tels que les émissions de gaz à effet de serre, le volume de déchets produits, la consommation de matériaux non renouvelables, etc.
- **Les actions préventives** : il s'agit d'actions à mettre en place dès la mise sur pied du système afin de prévenir d'éventuels impacts encore à venir. En d'autres termes, cela consiste à anticiper les modes d'impact du système afin d'être préparés à y faire face, ou tout simplement dans le but de les optimiser. La prévention peut par exemple passer par l'optimisation des trajets de transport.
- **L'évaluation des indicateurs** : cet élément de la grille représente la partie phare des informations recherchées concernant les indicateurs. Elle sera subdivisée en quatre parties, chacune d'entre elles correspondant à un critère bien défini pour l'évaluation de l'indicateur. Ces critères sont les suivants :
 - **L'importance (I)** : l'importance d'un indicateur désigne à la fois son influence et son efficience vis-à-vis de ce que nous souhaitons évaluer. Plus un indicateur va influencer l'évaluation de performance d'un système et va permettre d'être efficient dans l'optimisation des performances, plus il peut être considéré comme important.
 - **La mesurabilité (M)** : définit l'aptitude de l'indicateur à être mesuré. En d'autres termes, l'idéal pour un indicateur serait que l'on puisse l'évaluer de par des données numériques. Les indicateurs à caractère purement qualitatif ne seraient donc pas adéquats pour une étude telle que celle-ci. La mesurabilité désignera ici la facilité de prise de la mesure de l'indicateur (facilité de calcul, d'exécution dans un algorithme, etc.).
 - **L'urgence (U)** : définit le niveau d'urgence de l'indicateur concerné, dans l'évaluation du processus global en considérant des contraintes de temps d'optimisation de l'impact associé.

- **La priorité (P)** : il s'agit de la donnée que nous souhaitons calculer. Par similitude avec le calcul de la criticité dans une grille AMDEC, la priorité d'un indicateur sera le produit de ses critères d'importance, de mesurabilité et d'urgence. Autrement dit :

$$P = I.M.U \quad (1)$$

Avec P la Priorité, I l'Importance, M la Mesurabilité et U l'Urgence.

Les valeurs que peuvent prendre les critères d'évaluation des indicateurs sont consignées dans le tableau 3. Les conclusions sur la priorité sont répertoriées dans le tableau 4. Les indicateurs les plus intéressants seront donc ceux qui posséderont le meilleur indice de priorité i.e. l'indice le plus élevé.

2.7 Analyse des indicateurs de performance pour l'évaluation de la maintenance distribuée dans le cadre de cette thèse

La première étape de l'ACPI a déjà été mis en œuvre à travers le tableau 2 où étaient répertoriés tous les indicateurs de performance pouvant être en lien avec la maintenance distribuée. La deuxième étape, concernant le paramétrage des indicateurs, nécessite un cas d'étude pour fixer les valeurs seuils des indicateurs et les sens d'optimisation. Nous allons alors passer directement à la troisième étape qui concerne l'évaluation des indicateurs. Par conséquent, il suffit juste de compléter le tableau 2, en y ajoutant les effets des différents

Tableau 3 Conclusion sur la priorité d'un indicateur

Priorité de l'indicateur	Intervalle de données	Conclusions
Très élevée	$100 < P \leq 125$	Indicateur d'impact majeur : à surveiller
Elevée	$75 < P \leq 100$	Indicateur important
Moyenne	$50 < P \leq 75$	Indicateur d'efficacité notable
Basse	$25 < P \leq 50$	Utilité / impact discutable
Très basse	$1 < P \leq 25$	Indicateur de très faible valeur

Tableau 4 Valeurs des critères d'évaluation des indicateurs de performance

Importance	Mesurabilité	Niveau d'urgence	Valeurs
Très faible	Impossible	Très bas	1
Faible	Faible	Bas	2
Moyenne	Moyenne	Moyen	3
Elevée	Elevée	Haut	4
Très élevée	Très élevée	Majeur	5

impacts, l'évaluation des indicateurs et les actions préventives. Le tableau 5 illustre la mise en œuvre de la grille d'analyse de l'ACPI. Nous avons choisi de n'y représenter qu'un seul indicateur par mode d'impact et certains modes d'impacts n'y sont pas représentés pour faciliter la lecture de la grille. Après analyse nous retenons les indicateurs et les mesures préventives dont la priorité est strictement supérieure à 50 (priorité moyenne) i.e. optimisation des trajets et charge des véhicules, positionnement optimal de l'AMC, l'ordonnancement optimal des opérations, dimensionnement optimal des stocks et la mise en seconde vie. Certaines autres mesures préventives, bien qu'évaluées comme prioritaires, ne seront pas considérées dans la suite (hors du champ d'étude de cette thèse) : l'autonomisation des véhicules et le traitement des eaux.

Nous avons ainsi proposé un modèle d'évaluation des indicateurs d'impact environnemental basé sur le principe de fonctionnement de l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité). Ceci permet de mettre en exergue une évaluation quantifiable des indicateurs de performance. Cette grille d'analyse reste néanmoins théorique et provisoire, dans la mesure où elle n'a pas été expérimentée ou appliquée sur un cas particulier en vue de vérifications et de tests. L'outil demeure également très subjectif car il dépend presque entièrement du jugement de la personne qui s'en sert. Cependant il faudrait noter que plus les utilisateurs de la grille seront expérimentés dans le domaine de la maintenance et du transport, plus l'évaluation sera pertinente. Dans la suite de cette thèse nous allons supposer, avec un risque d'erreur, que les indicateurs sélectionnés précédemment,

en nous basant sur notre expérience, sont assez représentatifs dans la cadre de la maintenance distribuée.

Après avoir recherché des indicateurs de performance pour une maintenance distribuée, la suite va consister à proposer une méthodologie permettant d'améliorer les performances de la phase de conception à la phase d'opérations. Le chapitre 3 va concerner essentiellement l'AMC et les opérations de maintenance corrective tandis que le chapitre 4 va concerner l'AMM/véhicules, les opérations de transport et de maintenance préventive.

2.8 Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif de rechercher des indicateurs de performance technique et environnementale pour la maîtrise des opérations de maintenance distribuée. Les opérations ont été regroupées en deux grandes catégories : la maintenance d'une part, et le transport d'autre part. Le point commun entre ces catégories d'opérations repose sur les véhicules nécessaires au transport des équipements (en bon état, défectueux et en seconde vie) entre les sites de production et l'AMC. Nous avons mis sur pied une grille d'analyse permettant de trier et de sélectionner les indicateurs de performance par ordre de priorité. Par ailleurs, nous avons pu identifier les mesures préventives, liées aux priorités des indicateurs, pour l'amélioration des performances d'une maintenance distribuée : l'optimisation des trajets et la charge des véhicules, le positionnement optimal de l'AMC, l'ordonnancement optimal des opérations, le dimensionnement optimal des stocks et la mise en seconde vie des équipements. Jusqu'ici nous avons répondu à la question « pourquoi et avec quoi évaluer les performances d'une maintenance distribuée ? ». La suite va consister à répondre à la question « comment ? », premièrement pour les opérations de maintenance corrective de l'AMC, ensuite pour les opérations de maintenance préventive et les opérations de transport de l'AMM/véhicules.

Tableau 5 Mise en œuvre de l'ACPI pour la sélection des indicateurs de performance

Fonction	Mode d'impact	Effet de l'impact	Indicateurs associés	Evaluation des indicateurs				Actions préventives
				I	M	U	P	
Transport	Coût	Augmentation de la consommation de carburant	Coût de transport	5	5	5	125	Trajets optimaux
	Temps	Augmentation des délais de transport	Délai moyen de livraison	4	5	4	80	Positionnement optimal de l'AMC
	Qualité	Augmentation du nombre d'accidents	Fréquence des accidents	5	5	5	125	Véhicules autonomes
	Air	Augmentation de la quantité de CO ₂ émis	Quantité de CO ₂ émis par an	5	3	4	60	Optimisation des charges
Maintenance	Coût	Baisse de la rentabilité	Coût des opérations	5	4	5	100	Ordonnancement optimal
	Temps	Augmentation des délais de maintenance	Temps moyen de réparation	4	5	4	80	Dimensionnement optimal des stocks
	Qualité	Réduction de la durée de vie des équipements	Fiabilité	5	3	4	60	Mise en seconde vie
	Eau	Augmentation du pH des eaux usées	pH des eaux usées	5	5	5	125	Traitement des eaux
	Sol	Augmentation de la concentration de métaux lourds	Quantité de rebuts enfouis	4	5	2	40	Recyclage
	Air	Baisse de la durée de vie des équipements du froid dû aux fuites de gaz fluorés	Quantité de gaz fluorés émis	4	2	3	24	Inspection régulière des équipements

CHAPITRE 3 : ATELIER DE MAINTENANCE CENTRALISÉ : MISE EN ŒUVRE D'UNE METHODOLOGIE DE MODELISATION ET D'EVALUATION DE PERFORMANCE

L'objectif de ce chapitre est de concevoir un modèle d'atelier de maintenance centralisé et d'évaluer ses performances. L'idée est de proposer une méthodologie qui permette de maîtriser les coûts des opérations de maintenance malgré le haut niveau d'incertitude lié au processus de remise en état des équipements défectueux. La contribution scientifique majeure de ce chapitre, par rapport à la littérature, s'appuie sur l'intégration des stratégies de l'économie circulaire dans la méthodologie de conception de l'atelier de maintenance.

SOMMAIRE

3.1 Introduction.....	59
3.2 Revue de littérature sur les méthodes d'évaluation de performance des AMC.....	64
3.3 Formulation du problème et modélisation.....	73
3.4 Expérimentation	78
3.5 Résultats.....	81
3.6 Conclusion	85

3.1 Introduction

3.1.1 Contexte et problématique

Les sites de production deviennent de plus en plus complexes en raison d'une vague de transformations technologiques (Cloud Computing, Internet des Objets, Big Data, etc.) résultant du concept d'industrie 4.0 (Shukla et al., 2019). L'augmentation de la complexité d'un système conduit logiquement à une augmentation de la sensibilité de son bon fonctionnement. Par conséquent, la maintenance devient de plus en plus importante dans les entreprises qui veulent garantir des performances optimales pour leurs équipements de production (Cárcel-Carrasco and Gómez-Gómez, 2021).

Comme introduit dans les chapitres précédents, les ateliers de maintenance centraux (AMC) contribuent à la maintenance des sites de production géographiquement distribués, en étant des lieux de remise en état d'équipements défectueux. Ils sont assez similaires aux ateliers de production classiques, mais l'objectif des opérateurs et des machines est de remplacer les composants défectueux des équipements, par des pièces de rechange et ensuite de réparer ces composants défectueux. Les AMC sont conçus principalement pour réduire les coûts de réparation tout en garantissant une bonne disponibilité des sites de production.

La maîtrise des coûts de réparation au sein d'un AMC passe par le développement d'un modèle fiable et hautement représentatif du système réel. Cependant, les AMC sont plus complexes à modéliser que les ateliers de production ou d'assemblage traditionnels (Guide et al., 2000). En effet la nature incertaine des défaillances traitées par les AMC crée des durées d'interventions (diagnostic, désassemblage, remplacement, réassemblage) hautement variables et difficiles à estimer. Cette particularité entraîne une complication dans l'évaluation, non seulement des coûts en particulier mais aussi de toute performance (Les performances sont liées ici aux indicateurs techniques et environnementaux de la maintenance distribuée, voir Chapitre 2) en général.

Comme illustré dans la figure 16, les équipements de production sont fabriqués et installés dans des sites par un OEM (« Original Equipment Manufacturer » ou « Fabricant d'Équipement d'Origine » en français) qui garantit un nombre négligeable de pannes au début de leur vie, ainsi que des pièces de rechange à l'AMC en cas de défaillance. L'AMC assure la réparation des composants défectueux, démontés des équipements, et produit lui-même d'autres pièces de rechange. Après des réparations successives au fil du temps, les composants réparés finissent par se détériorer complètement et atteindre leur fin de vie. L'AMC confie alors certains composants usés à l'OEM qui se charge de leur donner une seconde vie. C'est là qu'intervient l'économie circulaire avec ses différentes stratégies/opérations de mise en seconde vie (reconditionnement, remanufacturing, etc.). Si un composant ne peut subir aucune des opérations mentionnées ci-dessus, il est soit recyclé en tant que matériau de fabrication, soit enfoui dans une décharge.

Les composants qui viennent d'être fabriqués et assemblés par l'OEM sont considérés être neufs. Mais dès qu'ils tombent en panne, leur état de santé devient incertain i.e. qu'il n'est

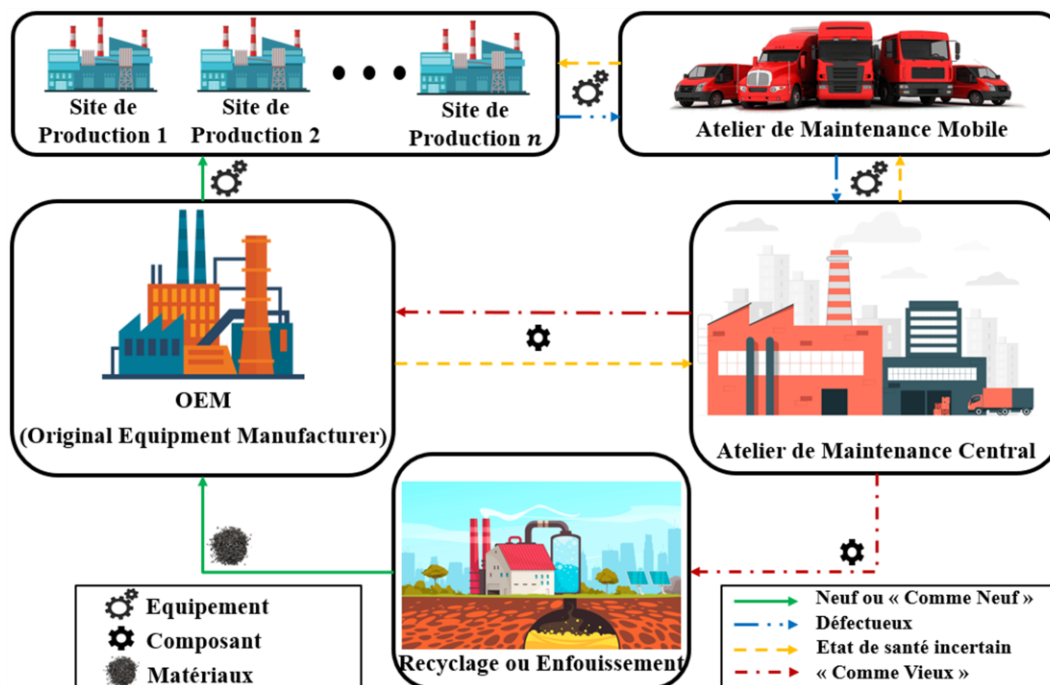


Figure 16 L'écosystème d'un AMC

plus certain de garantir que ces composants sont « Comme Neuf » ou « As Good As New » en anglais, même après réparation au sein de l'AMC. Dans ce cas, seul l'OEM ou une entreprise tierce agréée par l'OEM peut redonner une garantie après une remise à neuf (Chakraborty et al., 2021), si nécessaire. Si un composant est en fin de vie il est considéré « Comme Vieux » ou « As Bad As Old » en anglais. Les applications industrielles des AMC intégrant les stratégies d'économie circulaire se retrouvent dans les industries aéronautique (Sanchez et al., 2020), ferroviaire (Hani et al., 2007), pétrolière (Kleber et al., 2011) et gazière (Azadeh et al., 2013).

La littérature propose plusieurs approches de modélisation des AMC (Djeunang Mezafack et al., 2022a). Les approches reposant sur une modélisation, par réseaux de files d'attente et réseaux de Petri (Spanjers et al., 2005) (Li et al., 2013), et sur une analyse des chaînes de Markov (Wang et al., 2008) sous-jacentes sont les plus largement utilisées, permettant de représenter le caractère aléatoire des paramètres en jeu dans la remise en état : MTBF (Mean Time Between Failure) pour la demande de remise en état et MTTR (Mean Time To Repair) pour le service de remise en état. Ces approches reposent sur ce qu'on appelle des modèles à événements discrets car elles considèrent l'AMC comme un système constitué d'états finis (E) et d'une matrice de probabilités (ExE) décrivant les différentes transitions d'état. Une transition représente un événement qui change l'état discret de l'AMC (arrivée d'un équipement, réparation d'un équipement, départ d'un équipement, etc.). Chaque état correspond à une combinaison de variables décrivant l'AMC (quantité de pièces de rechange en stock, nombre d'équipements en attente de réparation, etc.).

Bien que les modèles actuels en réseaux de files d'attente et en réseaux de Petri permettent d'évaluer les performances d'un AMC, avec comme hypothèse majeure l'invariance de la matrice des probabilités de transition d'état de l'AMC par rapport au temps, ils considèrent pour la plupart un processus linéaire où tous les composants réparés sont systématiquement

« Comme Neuf » (réparation parfaite). Mais en réalité, l'état de santé d'un composant reste dégradé à un certain niveau après une réparation. Certains auteurs abordent ce problème en considérant un AMC en boucle fermée (Assadi et al., 2019) (Akbari Haghghi et al., 2021). L'idée est de faire varier l'état de santé d'un composant, i.e. son taux de panne une fois qu'il a été réparé, et de lui permettre de retourner à l'AMC à la prochaine panne, jusqu'à la fin de sa vie.

Malgré la modélisation de l'AMC en boucle fermée, l'une des hypothèses majeures prise dans la littérature est que lorsqu'un composant est en fin de vie, il est automatiquement remanufacturé (Wakiru et al., 2021) (Ouaret et al., 2018) et par conséquent considéré « Comme Neuf ». Cependant, il existe une gamme plus large d'opérations qui peuvent donner à un composant une deuxième vie sans pour autant garantir un état de santé « Comme Neuf ». Comme le montre la figure 17, les opérations possibles varient selon le temps, le coût et l'état de santé final du composant transformé. En effet, entre les

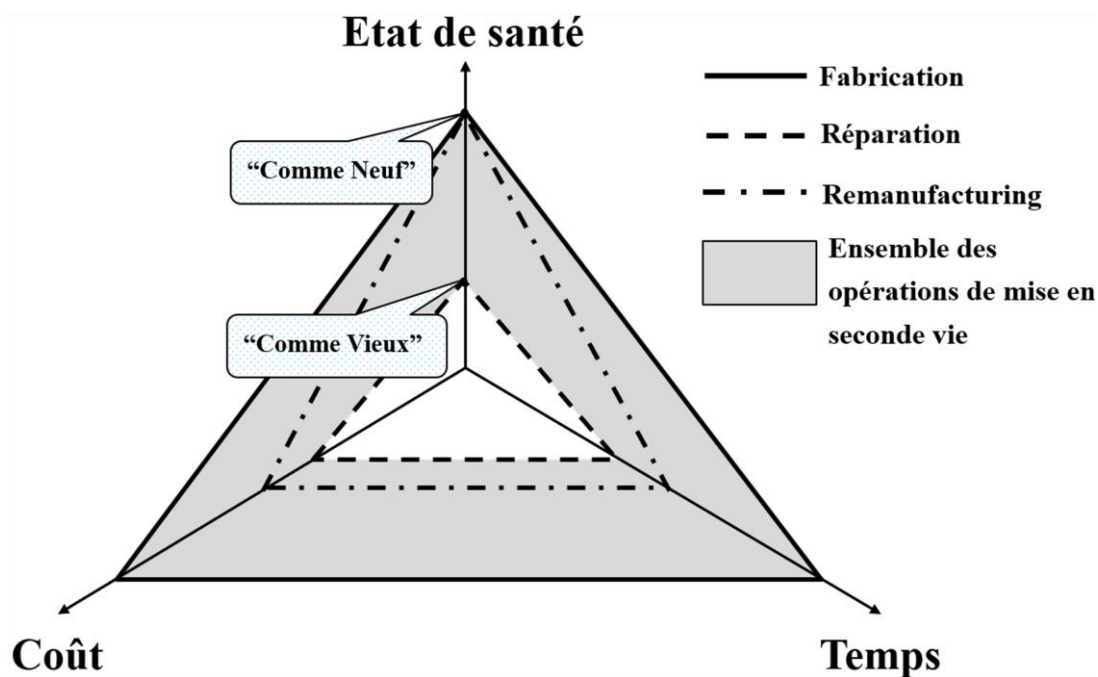


Figure 17 Toutes les stratégies d'extension de vie possible

composants « Comme Neuf » fournis par le remanufacturing et les composants « Comme

Vieux » en fin de vie, il existe d'autres états de santé possibles liés à la diversité des stratégies de l'économie circulaire (réutilisation, reconditionnement, rénovation, recyclage, etc.).

En plus de l'état de santé, comme précisé précédemment, toutes ces stratégies d'économie circulaire diffèrent également par le coût et le temps requis pour les interventions. Par exemple, le remanufacturing prend plus de temps que la réparation, qui prend plus de temps qu'un simple reconditionnement. Ce chapitre considère qu'il faudrait choisir la stratégie d'économie circulaire qui permettrait aux AMC d'obtenir de meilleures performances. Par conséquent, la nouveauté de ce chapitre réside dans la mesure de l'impact de la proportion et de l'état de santé des composants mis en seconde vie, par rapport aux composants automatiquement recyclés, sur les performances d'un AMC. Ainsi, la problématique se résume comme suit :

- Comment modéliser un AMC en considérant diverses stratégies d'économie circulaire de mise en seconde vie ?
- Quel est l'impact de la proportion et de l'état de santé des composants mis en seconde vie, par rapport aux composants automatiquement recyclés, sur les performances d'un AMC ?

3.1.2 Objectifs et plan

Le but de ce chapitre est d'étudier l'impact de la proportion et de l'état de santé des composants mis en seconde vie, par rapport aux composants automatiquement recyclés, sur les performances d'un AMC. L'idée est de proposer un modèle d'AMC intégrant les stratégies de l'économie circulaire via la mise en seconde vie, ensuite, d'utiliser le modèle pour évaluer les performances de l'AMC. La modélisation d'un AMC passe premièrement par la définition d'une politique de gestion de ses stocks. En effet, les performances d'un AMC sont fortement corrélées à la taille de ses stocks (Zhu et al., 2020). Un nombre trop grand de pièces de rechange en stock engendre un coût élevé (acquisition et stockage), par contre un faible

niveau de stock peut créer des ruptures de stock. Le modèle de l'AMC devrait normalement être capable de représenter fidèlement le fonctionnement de la politique de gestion de stocks. En y intégrant l'économie circulaire via les composants en seconde vie, le modèle devrait également pouvoir reproduire le cycle de vie complet des composants. Par conséquent un modèle en boucle fermée devrait être approprié pour l'évaluation de performance de l'AMC. Au vu de ce qui précède, les objectifs de ce chapitre peuvent se décliner en deux grandes parties :

1. Modélisation et dimensionnement des stocks de pièces de rechange d'un AMC.
2. Etude de l'AMC en boucle fermée, prenant en compte le cycle de vie des composants.

Ce chapitre est structuré en six sections. Après cette introduction sur le contexte et la problématique, la section 3.2 est consacrée à la revue de littérature sur les méthodes d'évaluation de performance des AMC. La formulation du problème et la modélisation sont présentées dans la section 3.3. La section 3.4 décrit le cas d'étude et les expériences menées. Les résultats obtenus sont analysés et interprétés dans la section 3.5. La dernière section contient les conclusions et développements futurs.

3.2 Revue de littérature sur les méthodes d'évaluation de performance des AMC

3.2.1 Analyse des mots clés

La méthode de recherche bibliographique employée dans cette section est celle présentée à l'introduction générale. On recherche tous les articles concernant les AMC sans restriction sur ce qu'on y fait. Une recherche préliminaire des mots clés les plus pertinents a donc été menée. L'idée est de retrouver les mots clés des articles qui traitent des AMC (« repair shop » ou « centralised maintenance workshops » en anglais). La figure 18 présente les différents mots clés trouvés (représentés par des cercles) et les liens existants entre ceux-ci (un lien joint deux mots clés contenus dans le même article). Le rayon de chaque cercle est

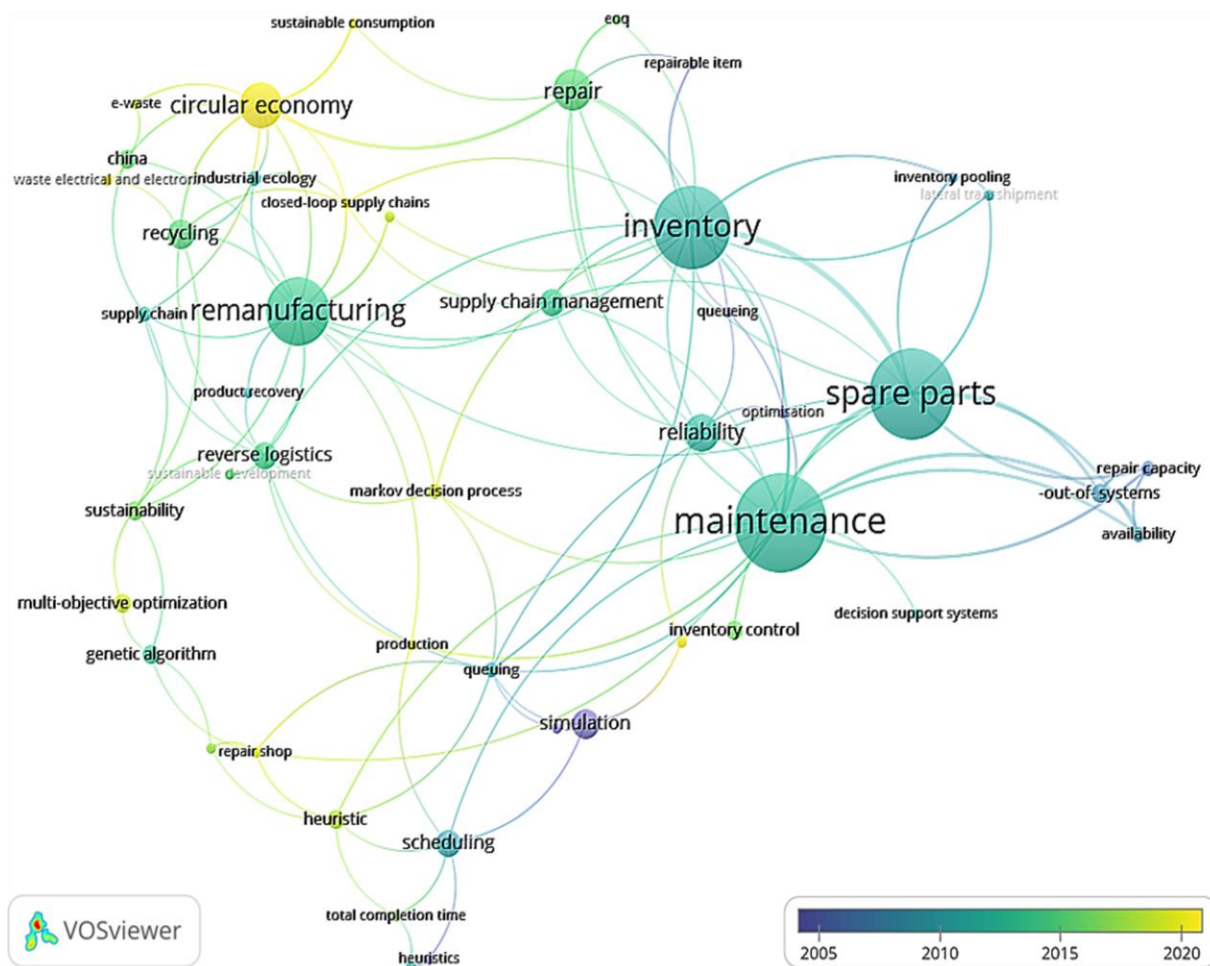


Figure 18 Aperçu du réseau de mots clés des AMC (2023)

proportionnel au nombre d'articles utilisant le mot clé en question (Les plus utilisés sont : « maintenance », « spare parts », « inventory » et « remanufacturing », respectivement trouvés comme mots clés de 26, 24, 22 et 18 articles). Dans un souci de lisibilité du graphique⁴ seuls les mots clés apparaissant dans au moins 3 articles sont représentés.

Des deux objectifs énoncés à la fin de l'introduction, le premier concerne la modélisation et le dimensionnement des stocks de pièces de rechange. Nous allons nous intéresser pour ce premier objectif à tous les articles qui traitent des stocks de pièces de rechange en lien avec les AMC. La figure 18 permet de constater que cette première partie du sujet est largement

⁴ 120 mots clés apparaissent dans au moins 2 articles contre 49 dans au moins 3 articles

étudiée dans la littérature sous les mots clés : « spare part », « inventory », « supply chain », « logistic », « repairable » et « Economic Order Quantity (EOQ) ». Le deuxième objectif portant sur le modèle de l'AMC en boucle fermée est plus récent, connu sous une plus grande diversité de mots clés : « circular economy », « remanufacturing », « recycling », « reverse logistic », « closed-loop », « sustainability », « product recovery », « waste » et « industrial ecology ». Nous nous intéressons ainsi pour ce deuxième objectif à tous les articles qui traitent de l'économie circulaire en lien avec les AMC. Afin d'obtenir des articles pertinents pour cette revue de littérature, les mots clés retrouvés vont être combinés comme suit :

1. (« spare part » OR « inventory » OR « supply chain » OR « logistic » OR « repairable » OR « EOQ ») AND (« repair shop » OR « centralis(z)ed maintenance workshop »)
2. (« circular economy » OR « remanufacturing » OR « recycling » OR « reverse logistic » OR « closed-loop » OR « sustain » OR « product recovery » OR « waste » OR « industrial ecology ») AND (« repair shop » OR « centralis(z)ed maintenance workshop »)

Le nombre d'articles retrouvés à travers le moteur de recherche BELUGA, contenant les combinaisons de mots clés dans leur titre, leur résumé ou leurs mots clés, permet de construire la figure 19 (ne sont pris en compte que les articles de revues scientifiques). L'évolution quantitative du nombre de publications pertinentes à travers le temps est ainsi étudiée, un total de 147 articles allant de 1960 à 2022). Trois périodes majeures peuvent être déduites de cette figure 19.

- De 1960 à 1981 peu d'articles (4 au total sur 21 ans) sont publiés en lien avec le stockage des pièces de rechange. Aucun article ne traite de l'AMC en boucle fermée, à travers l'économie circulaire.

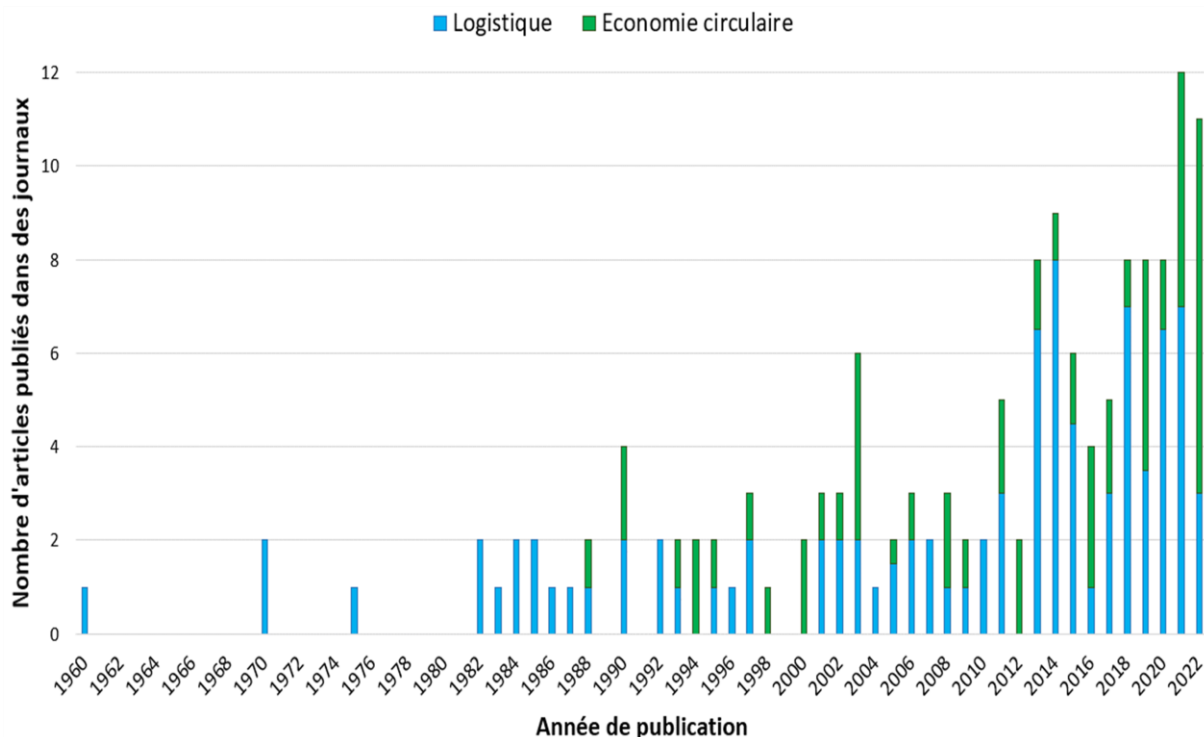


Figure 19 Evolution du nombre d'articles sur les AMC

- De 1982 à 1999 le nombre de publications sur le sujet augmente (en moyenne 2 articles par an). Cette période comprend à la fois des articles traitant des stocks de pièces de rechange et ceux de l'AMC en boucle fermée⁵
- De 2000 à 2022 la croissance du nombre d'article s'accélère considérablement (au moins 2 articles sont publiés chaque année avec une moyenne de 5 par an)

Cette première partie de la revue de littérature consistait à effectuer l'analyse des différents mots clés retrouvés dans la littérature et l'analyse quantitative des résultats obtenus par combinaison des mots clés. La suite est dédiée à l'analyse qualitative des articles trouvés, pour une meilleure compréhension des contributions existantes et des limites rencontrées par les auteurs, d'une part sur le dimensionnement des AMC en boucle ouverte et d'autre part sur l'étude des AMC en boucle fermée.

⁵ Le premier article utilisant des mots clés liés à l'économie circulaire a été publié en 1988.

3.2.2 Les AMC en boucle ouverte

En 1982, l'AMC est défini comme étant un atelier où sont réparés des équipements provenant de divers sites (Scudder and Hausman, 1982). Le processus de réparation consiste à désassembler l'équipement défaillant, à remplacer les composants défaillants par des pièces de rechange et à assembler l'équipement. Les composants défaillants quant à eux passent par le même processus de désassemblage-remplacement-assemblage pour produire d'autres pièces de rechange. Il existe plusieurs niveaux⁶ de composants tel qu'illustré par la figure 20. Des composants de niveaux $n - 1$ sont assemblés pour former un composant de niveau n . Le composant de dernier niveau est ensuite « réparé » ou « reworked » en anglais, grâce à une station dédiée. En général les auteurs considèrent un seul niveau de composant pour simplifier le modèle. Dans la suite lorsqu'on parlera de réparer un composant il s'agira de la

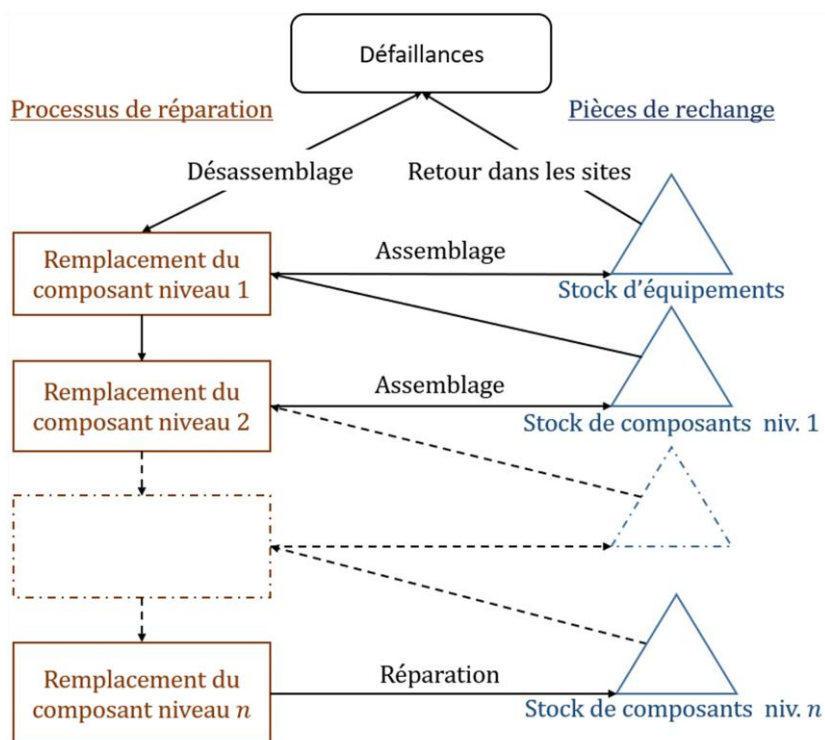


Figure 20 Le processus de réparation dans un AMC

⁶ Un équipement qui a au moins un niveau de composant est généralement qualifié de « indentured » ou « hierarchical » en anglais. La structure formée par l'équipement, ses composants et sous composants est appelée « arborescence logistique ».

« réparation » tandis que lorsqu'on parlera de réparer un équipement il s'agira de la « réparation par remplacement » qui est l'ensemble des opérations désassemblage-remplacement-assemblage par lesquelles passent les équipements défailants.

De 1960 à 1987 les modèles d'AMC sont dits en boucle ouverte car les réparations sont considérées systématiquement parfaites. En d'autres termes les équipements/composants réparés sont identiques quel que soit le nombre de passages dans l'AMC. Par conséquent un AMC peut être assimilé à un système où les paramètres d'entrée n'évoluent pas. Cependant certains équipements/composants peuvent rester dégradés malgré une réparation, ou dans le pire des cas devenir irréparables. La prochaine section reviendra plus en profondeur sur cette hypothèse majeure de réparation parfaite.

Dans un AMC en boucle ouverte, seul l'aspect quantitatif des stocks de pièces de rechanges est considéré. Il est question de fournir un modèle permettant de décrire l'évolution de la quantité des stocks en fonction des entrées de l'AMC (arrivée des équipements défailants et approvisionnement en pièces de rechange), afin d'en déduire le niveau optimal qui garantit de bonnes performances. L'un des premiers modèles à être développé utilise les chaînes de Markov (Gross, 1970). Dans un tel modèle, l'évolution du niveau d'un stock (quantité de pièces de rechange) est considérée discrète et peut prendre un nombre fini de valeurs appelées états. Si l'on considère qu'un AMC a un nombre fini d'états possibles (E) alors il existe une matrice de probabilités ($E \times E$) décrivant les différentes transitions d'état. Une transition représente un événement qui change l'état discret de l'AMC (arrivée d'un équipement, réparation d'un équipement, départ d'un équipement, etc.).

L'hypothèse majeure d'un modèle reposant sur les chaînes de Markov est que la matrice de transition est constante à travers le temps. Le modèle est dit « sans mémoire ». Pour un AMC en boucle ouverte cette hypothèse est valide si le taux de défaillance des équipements et les temps de réparation suivent des distributions exponentielles (Lawrence and Schaefer,

1984). Dans ce cas, la matrice de transition est construite à partir des différents taux de défaillance et taux de réparation. Vu que ces taux ne varient pas en fonction du temps, la matrice est constante et donc valide. Il est alors possible de déterminer analytiquement ou numériquement la probabilité qu'une quantité précise de pièces de rechange soit détenue en stock et de dimensionner l'approvisionnement en conséquence (en cas d'estimation de rupture de stock ou de stockage excessif).

Plusieurs autres modèles sont retrouvés dans la littérature. La majorité se base sur le même principe d'analyse que les chaînes de Markov et propose une représentation graphique plus intuitive : réseau de Petri (Li et al., 2013), réseau de files d'attente (Mani and Sarma, 1984), etc. Nous utiliserons par la suite la représentation en réseau de files d'attente sachant qu'elle mène à la même chaîne de Markov que toutes les autres représentations. La figure 21 illustre un réseau de files d'attente pour un AMC qui répare des équipements constitués d'un seul niveau de composants et dispose de deux stocks : une pour les composants et l'autre pour les équipements. Dans ce modèle classique, l'arrivée des équipements dans l'AMC est décrite par une distribution exponentielle avec un taux moyen λ . Comme expliqué précédemment, l'équipement va passer par la réparation par remplacement tandis que le composant va être

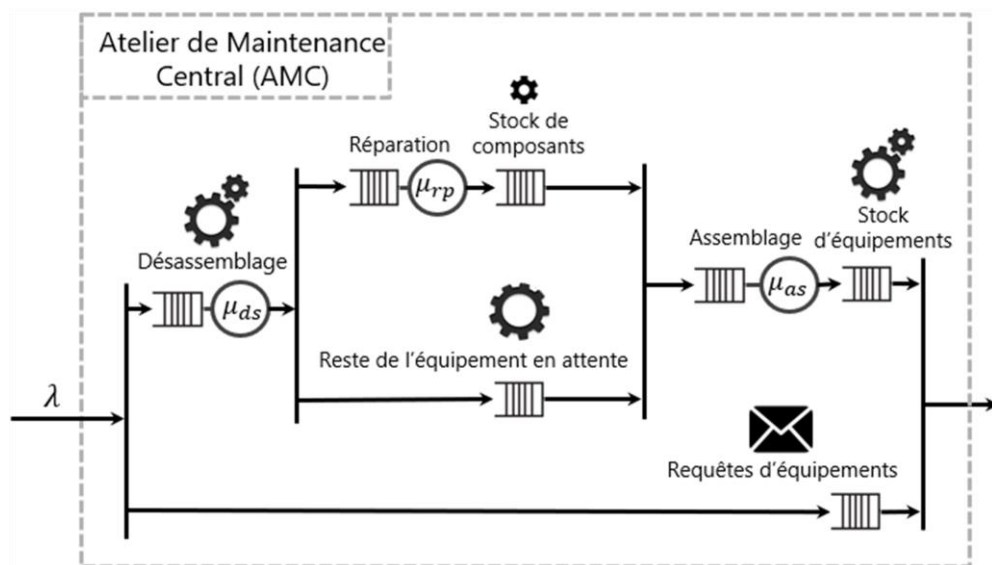


Figure 21 Réseau de file d'attente d'un AMC en boucle ouverte

réparé. Chaque opération est représentée par une station. Une station peut contenir un ou plusieurs serveurs munis de taux moyen de service μ . Pour ce modèle simplifié, une station est constituée d'un seul serveur, mais pour améliorer les performances de l'AMC il est possible de dupliquer soit le serveur soit la station entière (Abbou, 2003).

3.2.3 Les AMC en boucle fermée

Comme découvert pendant l'étude quantitative, le concept d'AMC en boucle fermée est très lié à l'économie circulaire et à ses différentes stratégies (réparation imparfaite, remanufacturing, recyclage, etc.) (Djeunang Mezafack et al., 2022a). En effet, à la différence des AMC en boucle ouverte où la réparation est obligatoirement parfaite, dans une boucle fermée les composants réparés peuvent conserver un niveau de dégradation non négligeable et peuvent dans certains cas être irréparables. En cas d'irréparabilité, les autres stratégies de l'économie circulaire (hors réparation) peuvent être intégrées dans le modèle.

Dès 2005 un premier réseau de file d'attente en boucle fermée est proposé (Spanjers et al., 2005), mais la réparation reste parfaite. La nouveauté de cette contribution réside dans la modélisation du retour des composants réparés vers l'AMC après un temps moyen de défaillance. Ce n'est qu'en 2021 qu'un modèle est proposé pour les réparations imparfaites (Akbari Haghghi et al., 2021). Les auteurs se sont basés, a priori, sur une approche datant de 1985 qui consiste à modéliser la dégradation des composants par une augmentation de leur taux de défaillance (Smith and Schaefer, 1985). La limite de cette contribution est qu'une fois les composants irréparables, ils sont automatiquement remanufacturés et considérés « Comme Neuf ». Cependant la grande variété des stratégies de l'économie circulaire offre un plus large choix sur la stratégie la plus performante pour donner une seconde vie aux composants.

3.2.4 Synthèse de la revue bibliographique

Les études de la littérature proposent des modèles qui permettent d'étudier l'évolution des stocks d'un AMC en fonction de la demande et du service. La demande concerne l'arrivée des équipements défaillants provenant des sites géographiquement distribués. Le service concerne d'une part la réparation par remplacement des équipements et d'autre part la réparation des composants défaillants. Grâce à un modèle, il est possible de tester plusieurs structures possibles d'AMC. L'évaluation des performances de chaque structure possible permet ensuite de dimensionner les stocks. La majorité des modèles est dit « en boucle ouverte » et nécessite des réparations parfaites au sein de l'AMC. Dans un contexte d'économie circulaire, les réparations ne sont pas parfaites. Il est donc nécessaire d'adopter un modèle en boucle fermée. Contrairement aux modèles en boucle ouverte, il est plus difficile d'utiliser des méthodes analytiques pour l'étude des modèles en boucle fermée, en raison de la variation des paramètres d'entrée de l'AMC. L'approche par simulation reste cependant accessible.

Bien que les modèles en boucle fermée de la littérature permettent d'évaluer les performances de l'AMC numériquement, ils ne permettent pas de mesurer l'impact des stratégies de l'économie circulaire. Une fois qu'un composant est irréparable il est automatiquement remis « Comme Neuf ». Or, un composant irréparable pourrait très bien être remis dans un état se situant entre « Comme Neuf » et « Comme Vieux », dépendamment du temps, du coût et de la qualité de l'opération nécessaire. En effet, chaque opération de l'économie circulaire est liée à une certaine valeur du triplet (coût, temps, qualité). Par exemple l'achat/fabrication d'un composant prend plus de temps que le remanufacturing et est plus coûteux or les composants neufs sont de meilleure qualité que les composants remanufacturés (Guelle, 2023). L'idée est de modéliser toutes les opérations/stratégies de l'économie circulaire et d'en mesurer l'impact.

Dans la suite de ce chapitre nous allons proposer une méthodologie d'aide à la décision sur le choix de l'opération la plus performante pour la remise en état des composants irréparables (mise en seconde vie). En guise de rappel, la nouveauté de cette étude repose sur l'évaluation de l'impact de la proportion et du taux de défaillance des composants en seconde vie sur les performances de l'AMC.

3.3 Formulation du problème et modélisation

3.3.1 Cycle de vie des composants

Le cycle de vie d'un composant commence lorsqu'il est fabriqué et ensuite assemblé avec un ou plusieurs autres composants pour former un équipement. Pendant la vie du composant, il est réparé dans un AMC, à chaque défaillance, jusqu'à ce qu'il ne soit plus réparable. En fin de vie, le composant est renvoyé à l'OEM (Original Equipment Manufacturer) pour une mise en seconde vie. Dans l'objectif de représenter le cycle de vie d'un composant, considérons r_{max} le nombre maximal de fois qu'il peut être réparé au cours d'une vie, sachant qu'il peut avoir au maximum v_{max} vies. Considérons également θ une variable discrète qui à tout instant associe l'état de santé du composant au nombre de réparations qu'il a déjà subies au cours de sa vie actuelle et au nombre de vies qu'il a déjà vécues. Par exemple $\theta = (3,1)$ veut dire que ce composant a déjà été réparé 3 fois et est à sa première vie. Lorsque le premier élément de θ essaie de dépasser r_{max} en valeur il repart automatiquement à 1 et c'est plutôt le deuxième élément de θ qui s'incrémente.

Ainsi, le cycle de vie d'un composant peut être décrit par l'ensemble Θ tel que :

$$\Theta = \{ \theta = (r, v) / r \in [1; r_{max}]; v \in [1; v_{max}] \} \quad (1)$$

Dans le cas d'une réparation parfaite, r_{max} tend vers l'infini. Dans le cas d'une réparation imparfaite, r_{max} est fini. Si la mise en seconde vie est parfaite alors r_{max} ne dépend pas de v , i.e. le nombre maximal de réparations d'un composant ne dépend pas du nombre de vies qu'il a déjà vécues, en d'autres termes, la mise en seconde vie ne détériore pas le composant.

Nous allons considérer un cycle de vie où la mise en seconde vie n'est pas parfaite, i.e. r_{max} dépend de v , donc plus complexe que les deux cas précédents mais plus proche du réel.

En réalité, si nous revenons au niveau de l'équipement, il peut être constitué de plusieurs composants (N). Il est considéré être défaillant si et seulement si il existe au moins k composants défaillants parmi les N le constituant (Abada and Boushaba, 2023). En plus, les composants sont généralement hétérogènes, i.e. de fonctions différentes, par conséquent ils ont des cycles de vie a priori différents. Dans cette étude nous nous sommes concentrés sur l'étude d'un seul type de composant, i.e. nous considérons que tous les composants impactant les performances de l'AMC ont le même cycle de vie, bien évidemment en restant focalisé sur la mise en seconde vie imparfaite. Il s'agit là de la première hypothèse majeure de ce chapitre. Ainsi, cette étude concerne beaucoup plus les équipements qui ont un seul composant critique à étudier.

Dans cette étude nous éliminons les deux hypothèses généralement adoptées dans la littérature : réparation parfaite ou mise en seconde vie parfaite. Dans une mise en seconde vie imparfaite il est nécessaire d'introduire une autre variable liée à l'OEM (Original Equipment Manufacturer) qui fournit le service de mise en seconde vie à l'AMC : la qualité de mise en seconde vie (QL). QL représente le nombre de réparations maximal que peut subir un composant en seconde vie. Pour simplifier l'étude de QL nous allons supposer qu'un composant peut avoir au maximum 2 vies, i.e. $v_{max} = 2$. Il s'agit là de la deuxième hypothèse majeure de ce chapitre. $QL < r_{max}$ dans le cas d'une mise en seconde vie imparfaite. A la fin de sa dernière vie le composant est automatiquement recyclé et un composant neuf est acheté pour le remplacer. Cette deuxième hypothèse reste valide dans les cas où les normes de sécurité et de qualité sont strictes, comme par exemple le secteur ferroviaire ou aéronautique ou spatiale. Les composants pourraient bien avoir plus de 2 vies, grâce à une simple extension

du modèle proposé, mais cela impliquerait de trouver les données permettant d'étudier ces cas.

La troisième hypothèse majeure de cette thèse repose sur l'évolution du taux de défaillance des composants. Nous supposons qu'à chaque valeur de r (nombre de réparations qu'un composant a déjà subies durant sa vie actuelle) correspond un taux de défaillance associé λ_r . Cette idée s'inspire d'une étude faite en 1985 qui consiste à modéliser la dégradation des composants par une augmentation discrète de leur taux de défaillance (Smith and Schaefer, 1985). La figure 22 résume le cycle de vie ainsi défini, des composants. A chaque défaillance, un composant a une probabilité ξ_r d'être réparé. Ceci permet de prendre en compte le fait qu'un composant, bien que supposé être réparable à un état donné $\theta = (r, v)$, peut très bien s'avérer irréparable. Ainsi est prise en compte l'incertitude lié au processus de réparation.

Evaluer l'impact du cycle de vie des composants sur l'AMC a pour réel but de vouloir améliorer ses performances. Ainsi, nous définissons une variable de décision grâce à laquelle il est possible d'influencer l'impact du cycle de vie des composants sur l'AMC (QT). Il s'agit

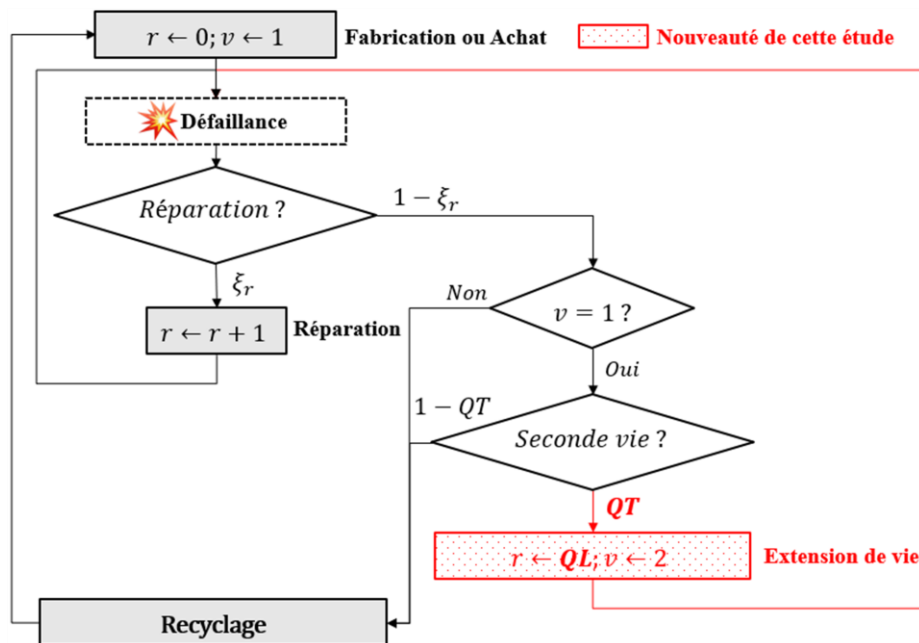


Figure 22 Le cycle de vie d'un composant

de la proportion de composants mis en seconde vie. Cette proportion détermine la quantité de composants confiés à l'OEM. Par exemple $QT = 0,5$ signifie que 1 composant sur 2 est mis en seconde vie. Il faudrait noter ici que si la qualité de mise en seconde vie (QL) n'est pas intéressante, i.e. proche de r_{max} , alors il pourrait s'avérer plus intéressant de prendre un QT faible pour privilégier un recyclage complet, supposé être l'opération la plus qualitative. Finalement, les deux variables de décision les plus importantes sont QL et QT pour, respectivement, le choix de la qualité de mise en seconde vie ou d'extension de vie des composants, et la quantité de composants mis en seconde vie. Dans la suite, l'AMC sera modélisé en tenant compte du cycle de vie des composants et des variables de décision présentés précédemment.

3.3.2 Modélisation de l'AMC

L'AMC est composé de postes de remise en état et de stocks. L'objectif global de la structure est de pouvoir proposer des équipements prêts à l'emploi le plus rapidement possible et au moindre coût lorsque des équipements en panne arrivent des sites de production.

Comme le montre la figure 23, l'AMC est modélisé comme un réseau de files d'attente en boucle fermée, multi-classes (des composants à des états de santé différents sont pris en compte dans le modèle, types de composant). Il existe cinq classes, correspondant aux différents types de composants : neufs (λ_0 : taux de défaillance des composants neufs), réparés ($\lambda_i \mid i = 1:i_{max}$), et ceux qui viennent de subir une opération de seconde vie (λ_{QL}). Pour simplifier la représentation, nous choisissons un nombre maximal de 3 réparations ($\xi_3 = 0$). Le modèle est assez similaire à un modèle classique « base stock » où les stocks ont un nombre initial d'équipements/ pièces_de_rechange/ et ensuite sont approvisionnés ou consommés au fur et à mesure des demandes et des opérations dans l'atelier (Zijm and Avşar, 2003). La nouveauté dans cette section réside dans l'échange entre l'AMC et les sites de production, d'équipements intégrant différents types de composants.

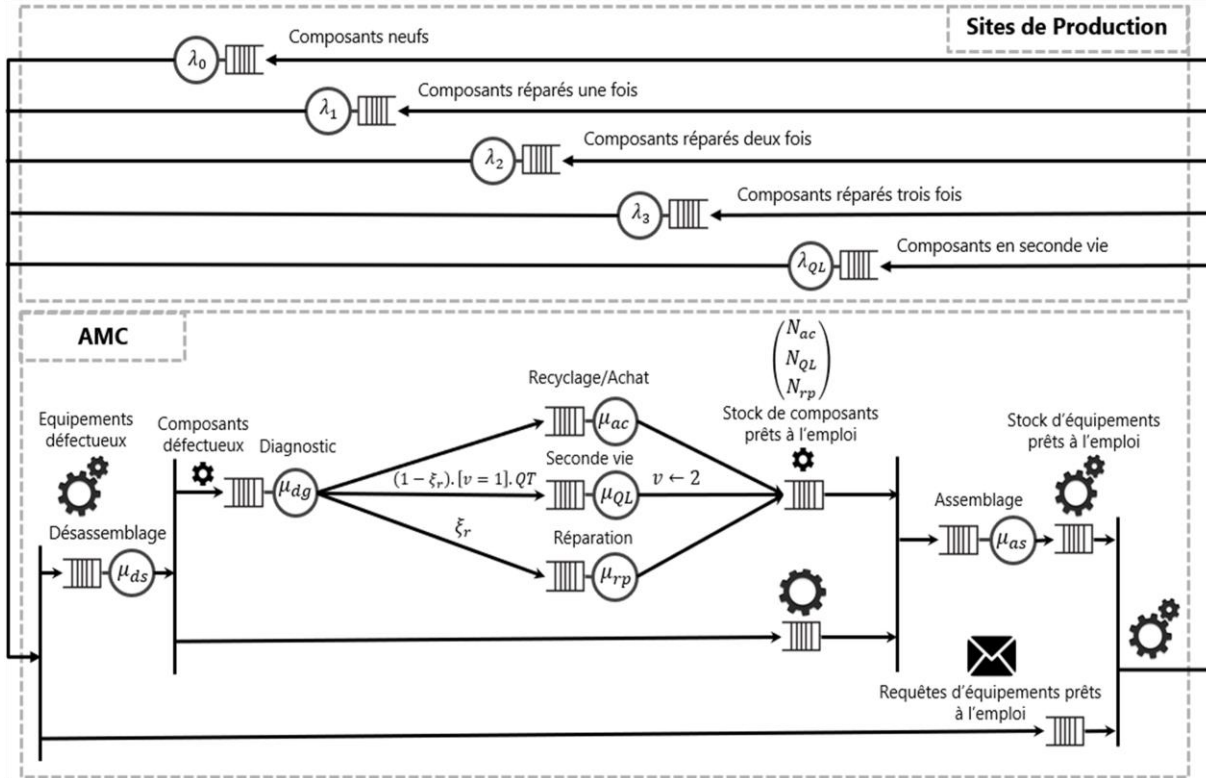


Figure 23 Le réseau de file d'attente proposé pour l'AMC

Après le désassemblage des équipements défaillants et le diagnostic, les composants défaillants ont une probabilité ξ_r d'être réparés. Une proportion QT des composants irréparables ($1 - \xi_r$) et en première vie ($v = 1$) sont mis en seconde vie ($v \leftarrow 2$). Les composants en seconde vie et irréparables sont automatiquement recyclés. Les autres variables et paramètres sont décrits dans le tableau 8.

Dans la Section 4, le modèle proposé sera utilisé pour l'évaluation de performance d'un AMC dans le domaine ferroviaire. Nous utiliserons une méthode par simulation via le logiciel Arena qui permet de construire des modèles en réseaux de files d'attentes et d'évaluer leur performance. L'approche par simulation est complémentaire à l'approche analytique proposée par (Zijm and Avşar, 2003). Nous allons alors chercher à tester différentes valeurs des variables de décision QL et QT pour un modèle, que nous allons au préalable paramétrer (valeurs des taux moyens de défaillance, des taux moyens de service et des coûts unitaires), afin d'analyser leur impact sur les performances du dit modèle.

3.4 Expérimentation

3.4.1 Etude de cas

Nous avons choisi de nous inspirer des données d'un cas d'étude réel provenant du domaine ferroviaire et présenté dans l'article (Li et al., 2013). Bien que l'idée d'un cas d'étude ferroviaire soit maintenue pour la suite, aucune des données utilisées dans ce chapitre ne provient directement de l'article cité précédemment. Il s'agit de la maintenance des trains à grande vitesse. Les équipements qui arrivent à l'AMC pour être réparés sont des bogies (Ling et al., 2014), munis de différents composants (roues, amortisseurs, suspensions, etc.), comme le montre la figure 24. La roue est considérée comme le composant le plus susceptible de tomber en panne. Le nombre de défaillances au fil du temps suit une distribution exponentielle.

- Une roue neuve est considérée être défaillante après une moyenne de 732 jours (*2ans*) : $\lambda_0 = 0,0014$
- Une roue réparée pour la première fois est considérée être défaillante après une moyenne de 549 jours (*~1an 6mois*) : $\lambda_1 = 0,0018$
- Une roue réparée pour la deuxième fois est considérée être défaillante après une moyenne de 366 jours (*~1an*) : $\lambda_2 = 0,0027$
- Une roue réparée pour la troisième fois est considérée être défaillante après une moyenne de 183 jours (*~6mois*) : $\lambda_3 = 0,0055$
- 9 roues neuves sur 10 peuvent être réparées une première fois. 7 roues réparées pour la première fois sur 10 peuvent être réparées une seconde fois. 5 roues réparées une seconde fois sur 10 peuvent être réparées une troisième fois. $(\xi_0; \xi_1; \xi_2) = (0,9; 0,7; 0,5)$
- Le désassemblage et l'assemblage de deux bogies prennent 3 jours environ chacun ($\mu_{as} = \mu_{as} = 2/3$). La réparation et l'achat d'une roue prennent successivement 4 jours et 16 jours environ ($\mu_{rp} = 1/4; \mu_{ac} = 1/16$).

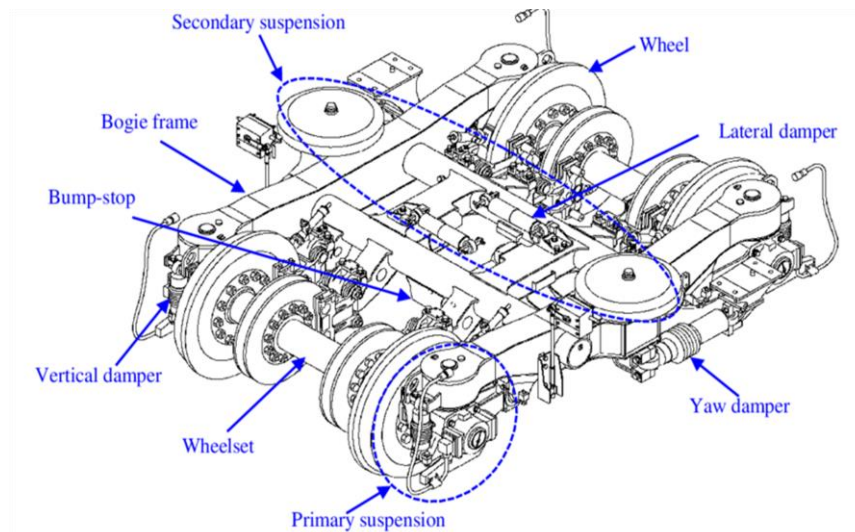


Figure 24 Un bogie d'un train à grande vitesse

- L'AMC a deux choix à faire : un premier sur la stratégie de l'économie circulaire la plus performante pour donner une seconde vie aux composants et un deuxième sur la quantité de composants à mettre en seconde vie.
- L'opération permettant de donner une seconde vie aux composants a deux paramètres : le temps moyen ($1/\mu_{QL}$) et le coût moyen (c_{QL}).

Pour implémenter le modèle, nous avons choisi d'utiliser le logiciel Arena, adapté pour une simulation à événements discrets. Au début de l'expérience, 50 bogies sont en service pour une période de 10 ans et les files d'attente de l'AMC sont vides. Nous nous intéressons principalement aux nombres d'opérations pour chaque type (achat, réparation, seconde vie) effectuées dans l'atelier au bout de 10 ans, représentés par N_{ac} , N_{rp} et N_{QL} . Chaque instance de l'expérience a été répliquée jusqu'à ce qu'un intervalle de confiance à 95% des résultats soit atteint.

3.4.2 Les indicateurs de performance

Le temps moyen qui s'écoule entre l'arrivée d'un équipement défaillant et la disponibilité d'un autre équipement prêt à l'emploi dans l'AMC, est considéré comme premier indicateur de performance (noté « *Temps de service* »).

Les quantités de roues achetées, réparées et mises en seconde vie sont utilisées pour calculer le *coût des opérations* de l'AMC, second indicateur de performance. Utilisant une simple combinaison linéaire, cet indicateur est obtenu de la façon suivante :

$$\text{Coût des opérations} = c_{ac}N_{ac} + c_{rp}N_{rp} + c_{QL}N_{QL} \quad (2)$$

Où $c_{rp}, c_{QL} \in]0; 1]$ sont des coûts relatifs des opérations de réparation et de mise en seconde vie comparés au coût d'achat d'un composant ($c_{ac} = 1$). On prendra par la suite $c_{rp} = 0,25$ i.e. réparer un composant coûte 4 fois moins cher que l'acheter.

Pour améliorer les performances de l'AMC, il est question de minimiser le coût des opérations ainsi défini en choisissant le meilleur rapport qualité/prix des opérations de mise en seconde vie.

3.4.3 Les variables de décision

Comme décrit plus haut, les variables de décision sont QL et QT . Le choix de $QT \in [0; 1]$ influence la quantité de composants mis en seconde vie et a priori les performances de l'AMC sur le long terme. Le choix de QL influence la qualité, le coût et le temps des opérations de mise en seconde vie et par conséquent les performances de l'atelier. Nous avons considéré précédemment que $QL \in \{0,1,2,3\}$ sachant que si $QL = 0$ alors le composant est remis « Comme Neuf » et que si $QL = 3$ alors le composant est remis « Comme Vieux ». Nous allons par la suite considérer que le coût moyen de mise en seconde vie (c_{QL}) et le temps moyen de mise en seconde vie ($1/\mu_{QL}$) sont inversement proportionnels à QL . En d'autres termes, plus le composant obtenu est proche du neuf, plus l'opération est coûteuse et chronophage.

On définit les équations suivantes :

$$c_{QL} = \left(\frac{1}{1 + QL} \right) \cdot c_{ac} \quad (3)$$

$$1/\mu_{QL} = \left(\frac{1}{1 + QL}\right) \cdot 1/\mu_{ac} \quad (4)$$

En remplaçant QL par ses différentes valeurs possibles dans les équations (3) et (4) sachant que $c_{ac}=1$ (coût relatif d'achat d'un composant) et $1/\mu_{ac} \approx 16\text{jours}$ (temps moyen d'achat d'un composant), on obtient le tableau 6. Par exemple un composant est remis à neuf en 16 jours, contre 4 jours comme s'il avait été réparé 3 fois, et est 4 fois plus coûteux.

3.5 Résultats

Nous avons premièrement optimisé les stocks initiaux de l'AMC sans tenir compte de la deuxième vie des composants ($QT = 0$). Ensuite, l'impact du cycle de vie des composants a pu être étudié en faisant varier QT et QL . La limite de cette approche est que les stocks initiaux sont considérés rester optimaux quelle que soit la quantité de composants mis en seconde vie. Il aurait été possible d'ajuster les stocks initiaux en fonction de différentes valeurs de QT . Mais la nouveauté de cette étude est de montrer l'impact des stratégies de l'économie circulaire sur l'AMC. Nous avons donc choisi de nous focaliser sur l'analyse de l'impact des variables de cycle de vie des composants définies (QT et QL), en considérant un AMC avec des stocks initiaux identiques, avec ou sans stratégie de mise en seconde vie.

3.5.1 Dimensionnement des stocks

L'objectif principal d'un AMC est de réduire les coûts des opérations en mettant en commun les ressources, notamment les stocks. Le modèle proposé permet de dimensionner les stocks de composants et d'équipements grâce à la maîtrise du temps de service de l'atelier. En effet,

Tableau 6 Les différentes qualités, coûts et temps de mise en seconde vie

Qualité du composant	Valeurs			
	« Comme Neuf »	« Comme réparé une fois »	« Comme réparé deux fois »	« Comme réparé trois fois »
QL	0	1	2	3
c_{QL}	1.00	0.50	0.33	0.25
$1/\mu_{QL}$ (jours)	16.00	8.00	5.33	4.00

tel que présenté dans le tableau 7, sans stocks, l'atelier prend une quinzaine de jours pour mettre à disposition un équipement prêt à l'emploi à l'arrivée d'un équipement défaillant provenant des sites de production. Cette durée provient de la nécessité absolue de désassembler, réparer et assembler les équipements, entraînant des temps d'attente très longs au niveau des différentes stations. Mais dès que les stocks sont mis en place, on constate une réduction progressive du temps de service. Il serait, a priori, plus intéressant de s'occuper d'abord du stock des composants et ensuite du stock des équipements, sachant évidemment qu'un composant coûte moins cher qu'un équipement entier.

En considérant uniquement le stock de composants (B_c), un composant défaillant est directement remplacé par un autre, prêt à l'emploi et disponible en stock. Ainsi, plus il y a de composants/pièces_de_rechange en stock, plus rapide est le service. Les équipements n'ont donc plus besoin d'attendre que leur composant défaillant soit réparé, le temps de service est ainsi divisé par plus de 4. On constate que le nombre optimal de composants à détenir initialement en stock pour ce cas d'étude est de 7, ce qui permet de réduire le temps de service à 3,46 jours. A plus de 7 composants en stock, le temps de service ne se réduit

Tableau 7 Dimensionnement des stocks de composants et d'équipements

B_c	B_e	Temps de service (jours)
0	0	15,34
1	0	10,23
2	0	6,36
3	0	4,75
4	0	4,33
5	0	4,00
6	0	3,52
7	0	3,46
7	1	0,99
7	2	0,14
7	3	0,04
7	4	0,00

plus considérablement (moins de 1%). Ceci est dû au temps de désassemblage et d'assemblage qui sont des opérations incontournables pour cette configuration de stock.

En considérant le stock d'équipements (B_e), un équipement défaillant est directement remplacé par un autre, prêt à l'emploi et disponible en stock. Ainsi, plus il y a d'équipements en stock plus rapide est le service. Avec cette configuration des stocks, le désassemblage et l'assemblage ne sont plus incontournables. Par conséquent le temps de service est réduit jusqu'à 0 jour avec 4 équipements initialement détenus en stock. En conclusion, pour ce cas d'étude il faudrait disposer de 4 bogies et 7 roues en stock pour un service instantané, de mise à disposition d'équipements prêts à l'emploi, pendant 10 ans d'opérations.

Avec ces stocks initiaux, nous allons dans la suite analyser l'impact du cycle de vie des composants sur les coûts des opérations.

3.5.2 Etude de l'impact du cycle de vie des composants

Nous allons analyser l'impact du cycle de vie des composants d'un point de vue qualité de mise en seconde vie (QL) et d'un point de vue quantité de composants mis en seconde vie (QT). La figure 25 représente l'évolution du coût des opérations en fonction de QL et de QT .

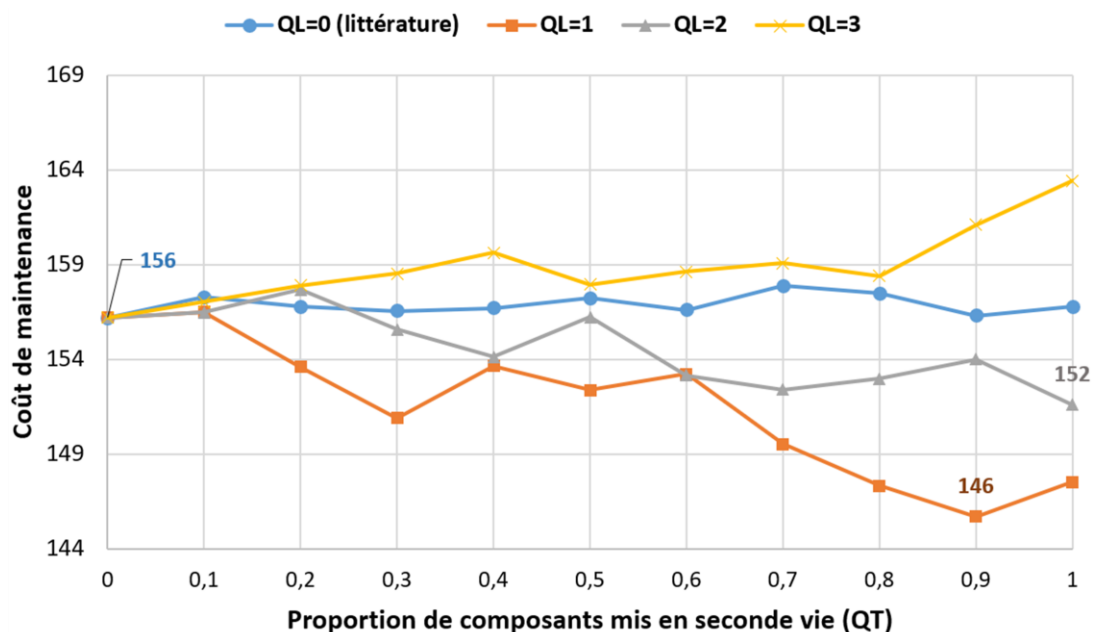


Figure 25 Coût de maintenance en fonction de QL et de QT , au bout de 10 ans

Si les composants mis en seconde vie sont « Comme Neuf » ($QL = 0$), on retrouve le modèle le plus récent de la littérature, alors la quantité de composants mis en seconde vie n'a pas d'influence considérable sur les coûts (près de 1%). Ceci s'explique par le fait que si aucun des composants n'est mis en seconde vie alors ils sont tous remplacés par des composants neufs. Et, si au contraire tous sont mis en seconde vie alors ils sont transformés « Comme Neuf », ce qui revient au même résultat. En effet, l'une des hypothèses de départ était qu'acheter un composant neuf ou transformer un composant en « Comme Neuf » représente le même coût ($c_{QL=0} = c_{ac}$). Par conséquent, quelle que soit la valeur de QT , le coût ne change pas considérablement au bout de 10 ans d'opérations pour $QL = 0$.

Si les composants mis en seconde vie sont « Comme Vieux » ($QL = 3$) alors plus QT est grand plus le coût est élevé. Cette tendance se justifie par le fait que des composants trop dégradés reviennent plus fréquemment dans l'AMC que ceux de bonne qualité. Par conséquent le nombre d'opérations effectuées au bout de 10 ans est plus élevé. Dans ce scénario extrême de cette étude de cas, les coûts peuvent augmenter jusqu'à 5% en fonction de la quantité de composants mis en seconde vie. Il faudrait également noter que cette valeur pourrait s'avérer être sous-estimée si d'autres critères entrent en compte tel que l'impact environnemental.

Pour les autres qualités choisis entre « Comme Neuf » et « Comme Vieux », les coûts des opérations sont réduits en augmentant la quantité QT . Par exemple pour $QL = 2$, le coût des opérations décroît de 156 à 152 (de $QT = 0$ à $QT = 1$), une réduction de 3%. Logiquement on se dirait que plus la qualité des composants mis en seconde vie est mauvaise et plus la quantité est élevée, alors plus le nombre total d'opérations effectuées au bout de 10 ans sera grand. Ce raisonnement est confirmé par la figure 26, qui présente l'évolution du nombre d'opérations en fonction de QL et de QT . Cependant, avec les paragraphes précédents, on constate que les coûts ne suivent pas la même logique. En effet, il est possible

de choisir des valeurs de QL et de QT qui garantissent une réduction du coût des opérations malgré l'augmentation du nombre total des opérations au sein de l'atelier. Pour ce cas d'étude il faudrait choisir, pour une réduction maximale : $QL = 1$ et $QT = 0,9$. Pour ce scénario, les coûts sont réduits de plus de 6% malgré l'augmentation du nombre total d'opérations de 8%.

3.6 Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif principal de mesurer l'impact de la proportion et de l'état de santé des composants mis en seconde vie, par rapport aux composants automatiquement recyclés, sur les performances d'un AMC. Pour ce faire nous avons proposé une structure à plusieurs niveaux, basée sur la réparation par remplacement, et une nouvelle méthodologie de modélisation et d'évaluation des performances d'un AMC. Le but final était de réduire les coûts tout en améliorant la disponibilité des équipements de production provenant de sites géographiquement distribués. La principale difficulté concernait la prise en compte à la fois de l'imperfection des réparations au sein d'un AMC, de l'imperfection de la mise en

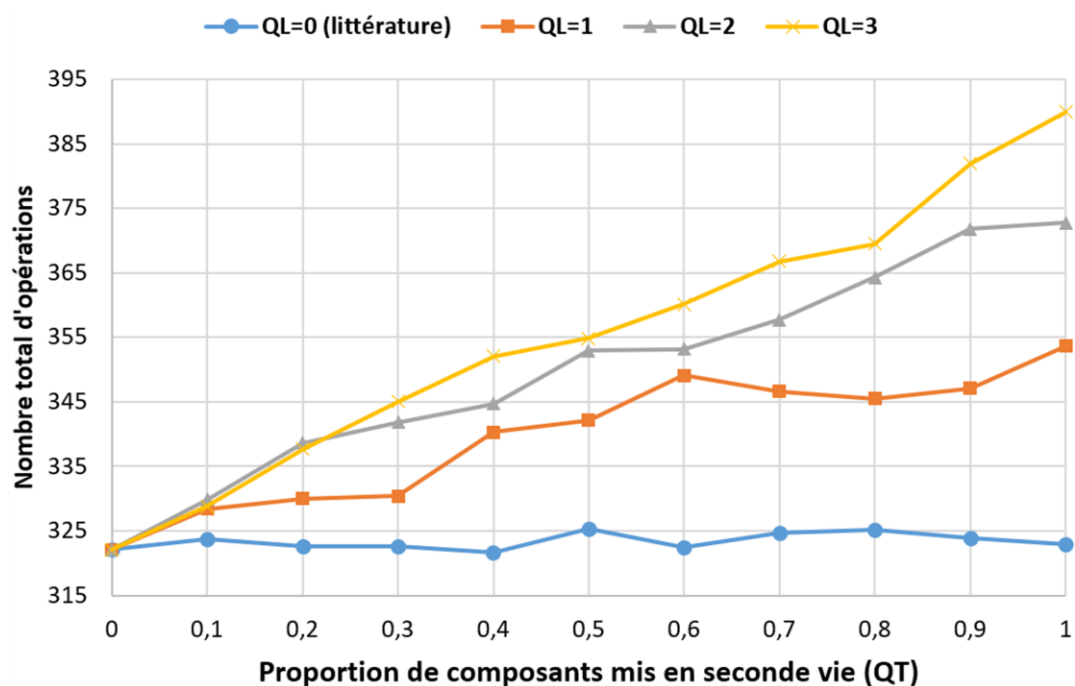


Figure 26 Nombre total d'opérations en fonction de QL et de QT , au bout de 10 ans

seconde vie dans le cadre de l'économie circulaire et des incertitudes liées aux opérations de remise en état. L'idée était de combler le gap retrouvé dans la littérature en considérant plusieurs niveaux de dégradation des composants durant leur cycle de vie et non juste l'état « Comme Neuf ». Chaque niveau de dégradation correspondait à la qualité de l'opération par laquelle est passé un composant pour sa remise en état. Le champ des opérations possible a été fixé dans le cadre des stratégies de l'économie circulaire. Il y a d'une part la réparation conventionnelle qui intervient chaque fois que le composant est défaillant, et d'autre part les autres stratégies telles que le remanufacturing et le recyclage qui interviennent à la fin de vie du composant. Par conséquent, il a été proposé une méthodologie de choix de la stratégie de mise en seconde vie qui offrirait de meilleures performances à un AMC.

Dans un premier temps, les stocks ont été dimensionnés afin de garantir un service instantané de l'AMC pour la mise à disposition d'un équipement prêt à l'emploi dès l'arrivée d'un équipement défaillant. Il en ressort que grâce aux stocks de composants, le temps de service peut être divisé par plus de 4. En y ajoutant un stock d'équipements, le service peut devenir instantané. Pour l'étude de cas dans le domaine ferroviaire, notre recherche a montré qu'il était possible de définir un niveau de stock pour les composants et les équipements (ici 4 bogies et 7 roues) permettant une réparation par remplacement instantanée. Dans un deuxième temps, deux variables de décision ont été proposées afin de déterminer la qualité et la quantité de composants à mettre en seconde vie, permettant de réduire le coût des opérations.

Le coût des opérations considéré dans cette étude est issu de la combinaison linéaire du nombre d'opérations de chaque type (réparation, achat, autres stratégies de l'économie circulaire) effectuées pendant 10 ans dans l'AMC. Le nombre d'opérations est logiquement corrélé à la fréquence de défaillance des composants et, par conséquent, à la quantité et à la qualité de composants mis en seconde vie. Par conséquent il a été montré qu'il est possible

Tableau 8 Les variables et paramètres de l'AMC

	Description	Variable de décision	Paramètres	
			Entrées	Sorties
QT	Proportion de composants permis d'avoir une seconde vie	•		
QL	Indice représentant l'état de santé des composants mis en seconde vie	•		
θ	Etat de santé d'un composant (considéré discret)		•	
λ_r	Taux de défaillance des composants après r réparations		•	
ξ_r	Probabilité de réparation d'un composant		•	
μ_{ds}	Taux de service des stations de désassemblage, de diagnostic ou d'assemblage (distribution exponentielle)		•	
μ_{dg}				
μ_{as}				
μ_{ac}	Taux de service des stations d'achat, de réparation ou de mise en seconde vie (distribution exponentielle)		•	
μ_{rp}				
μ_{QL}				
B_c	Stock initial de composants neufs		•	
B_e	Stock initial d'équipements		•	
N_0	Nombre total de composants achetés en 10 ans			•
N_i	Nombre total de composants réparés			•
N_{QL}	Nombre total de composants mis en seconde vie			•

de réduire le coût des opérations en choisissant la bonne stratégie de mise en seconde vie. Pour l'étude de cas, il ressort que faire passer 90% des composants en fin de vie, par une opération de mise en seconde vie de bonne qualité peut permettre de réduire les coûts de plus de 6% au bout de 10 ans d'opérations. Dans ce scénario, les coûts sont réduits malgré l'augmentation du nombre total d'opérations, au sein de l'AMC, de 8%.

Le chapitre suivant va consister à mettre en œuvre une méthodologie permettant d'améliorer les performances de l'acheminement des équipements défaillants, des sites de production géographiquement distribués vers l'AMC. Ainsi sera étudié le positionnement géographique de l'AMC, la capacité des véhicules de transport de l'AMM et l'ordonnancement des opérations de maintenance préventive au travers desquelles s'opère l'échange d'équipements

entre les sites et l'AMC. Le but sera de réduire les coûts et l'impact environnemental des opérations de transport et de maintenance préventive tout en optimisant la disponibilité des sites de production.

CHAPITRE 4 : MAINTENANCE DISTRIBUEE : MISE EN ŒUVRE D'UNE METHODOLOGIE DE CONCEPTION ET D'ORDONNANCEMENT

L'objectif de ce chapitre est de proposer un ensemble de méthodes scientifiques permettant le choix de la position géographique d'un AMC (Atelier de Maintenance Central), la capacité des véhicules d'un AMM (Atelier de Maintenance Mobile), l'ordonnancement des opérations préventives et la prise en compte des évènements imprévus dans un contexte de maintenance distribuée. L'idée principale est de chercher une méthodologie qui permette de minimiser les coûts et l'empreinte carbone des activités de maintenance distribuée. Les contributions majeures s'appuient sur une meilleure estimation des indicateurs de performance de la maintenance distribuée sur une période de temps longue/stratégique et la prise en compte des contraintes environnementales grâce à la programmation linéaire et à des algorithmes heuristiques.

SOMMAIRE

4.1 Introduction.....	90
4.2 Revue bibliographique sur l'ordonnancement de la maintenance distribuée.....	93
4.3 Formulation du problème.....	98
4.4 Méthodologie de conception et d'ordonnancement.....	100
4.5 Méthodologie de réordonnancement.....	109
4.6 Expériences.....	116
4.7 Résultats et discussion.....	120
4.8 Conclusion.....	130

4.1 Introduction

L'ordonnancement efficace des opérations de maintenance a toujours conduit à une amélioration significative de la fiabilité des systèmes industriels (Sedghi et al., 2021). L'idée est d'établir un planning des tâches de maintenance permettant non seulement de prévenir efficacement les défaillances mais aussi de garantir un nombre minimal d'opérations nécessaires. Comme présenté dans les chapitres précédents, chaque opération nécessite des ressources (opérateurs, pièces de rechange, outils, etc.) et par conséquent engendre des coûts. Logiquement, plus une entreprise possède d'équipements de production, plus les coûts de maintenance risquent d'être élevés. Dans le cas des sites de production géographiquement distribués, ce facteur d'échelle est généralement aggravé par la distance entre les équipements de production. Heureusement, la mise en commun des ressources dans un AMC peut permettre de surmonter ces problèmes (Lidén et al., 2018). Ce chapitre propose une méthodologie de conception et d'ordonnancement des opérations de maintenance sous le concept innovant de maintenance distribuée.

A titre de rappel, une maintenance distribuée fait intervenir 3 principaux acteurs : des sites de production géographiquement distribués, un AMC et une flotte de véhicules de transport. Les véhicules servent de lien physique entre l'AMC et les différents sites. Chaque véhicule est programmé pour suivre un planning prédéterminé afin que tous les sites soient visités dans un horizon de temps donné. L'objectif est de maximiser la fiabilité et la disponibilité des équipements installés dans les sites de production. Il existe dans la littérature plusieurs approches qui pourraient être utiles à la mise en œuvre de la maintenance distribuée. La plupart d'entre elles traitent, soit de l'ordonnancement des opérations de maintenance sans tenir compte de l'aspect mobilité, soit de l'optimisation des itinéraires des véhicules sans la prise en compte des contraintes liées à la maintenance.

D'une part, l'ordonnancement est un problème bien connu dans la gestion de la maintenance (Hu et al., 2022). La principale difficulté rencontrée est de trouver le nombre optimal d'opérations de maintenance à effectuer dans le bon ordre au cours d'une période donnée. Un trop grand nombre d'opérations entraînerait un temps d'inactivité élevé des équipements et un nombre insuffisant d'opérations augmenterait le risque de défaillance des équipements. D'autre part, l'optimisation du routage est un problème familier en recherche opérationnelle. Il s'agit d'un problème d'optimisation combinatoire généralement connu sous le nom de VRP (Vehicle Routing Problem) dans lequel une flotte de véhicule doit servir plusieurs clients en s'approvisionnant dans un dépôt. La principale difficulté rencontrée est le temps de calcul exponentiel, nécessaire pour trouver le trajet optimal des véhicules, d'où le qualificatif de « NP-hard » ou NP difficile en français (Konstantakopoulos et al., 2020).

Certains articles de la littérature permettent la mise en œuvre de la maintenance distribuée en combinant les deux approches mentionnées précédemment (ordonnancement des opérations et routage des véhicules) (Ayala et al., 2021). Mais ces approches classiques n'optimisent les coûts que d'un point de vue opérationnel (planning journalier). D'un point de vue stratégique (planning annuel), aucune étude n'a encore proposé une optimisation de l'ordonnancement en particulier et une méthode de conception de la maintenance distribuée en général (choix de la position géographique de l'AMC, choix de la capacité des véhicules, etc.). Ces paramètres macro sont généralement fixés arbitrairement sinon la résolution demanderait probablement plusieurs années de calcul avec les méthodes standards. En plus, un planning à long terme est nécessaire pour avoir une bonne estimation des coûts de maintenance sur la longue période de vie des équipements. Sur la base de cette observation, ce chapitre propose une méthodologie pour :

i) l'ordonnancement de la maintenance distribuée à long terme

ii) la conception des deux principaux éléments de la maintenance distribuée : emplacement géographique de l'AMC et capacité des véhicules de transport

iii) la mise en œuvre de la maintenance distribuée en temps réel, tenant compte des perturbations imprévues.

Le premier objectif est de fournir une nouvelle heuristique permettant de résoudre le problème du temps de calcul lié à l'aspect long terme. En effet, la majorité des études actuelles visant à réduire le temps de calcul proposent un ordonnancement cyclique court (Manco et al., 2022). Ensuite, pour un horizon temporel plus large, le cycle proposé est répété. Bien que cette méthode garantisse une grande fiabilité des équipements, les coûts de maintenance restent élevés en raison de la surestimation du nombre d'opérations à effectuer si les cycles sont considérés être identiques. Contrairement aux approches connues, ce chapitre propose une heuristique qui permet d'étudier les coûts de la maintenance distribuée sur un horizon plus large. L'approche utilisée est basée sur la maintenance prédictive et la programmation linéaire. L'idée est d'identifier et d'agréger tous les jours auxquels les équipements devraient être préventivement remplacés au cours de leur vie et d'en déduire un routage optimal des véhicules sur cette longue période.

Le deuxième objectif est d'optimiser l'emplacement de l'AMC et la capacité des véhicules. Les études actuelles considèrent que l'AMC devrait être situé à proximité de l'un des sites de production pour un coût optimal (Simeu-Abazi and Gascard, 2020). Mais plus il y a de sites, plus il est difficile de choisir le meilleur. Il manque donc une description précise de l'emplacement de l'AMC à choisir pour réduire les coûts de maintenance, indépendamment du nombre de sites concernés. Dans cette recherche, nous proposons une deuxième heuristique permettant de positionner l'AMC au barycentre pondéré des sites. Ensuite, la capacité des véhicules de transport est choisie dans un ensemble prédéfini. En effet, les

véhicules peuvent être regroupés en trois grandes catégories : véhicules légers, moyens et lourds.

Le troisième objectif est de proposer une méthode robuste permettant de réduire l'impact des événements imprévus sur les coûts, lors de la mise en œuvre de la maintenance distribuée. En effet, après la conception et l'ordonnancement, effectués hors ligne, un nouveau problème se pose : que faire en cas de perturbation inattendue en ligne ? L'occurrence de perturbations imprévues pourrait se justifier par le fait que les solutions proposées par des heuristiques ne sont pas totalement optimales, par définition. Par conséquent malgré l'anticipation hors ligne des défaillances, des événements imprévus pourraient apparaître en ligne. Ce chapitre traite également ce problème, connu sous le nom de « Vehicle Rescheduling Problem » (Spliet et al., 2014), mais qui n'a pas encore été résolu dans la littérature sur la maintenance distribuée.

Après cette introduction (section 4.1), une revue de la littérature est présentée dans la section 4.2. La section suivante propose une formulation du problème avec des hypothèses pertinentes. Les sections 4.4 et 4.5 présentent le cadre général d'optimisation et les étapes détaillées du processus. Ensuite, la section 4.6 met en œuvre l'ensemble des méthodes proposées dans une étude de cas. La section 4.7 présente et analyse les résultats obtenus. La dernière section conclut cette étude et fournit quelques perspectives pour la recherche future.

4.2 Revue bibliographique sur l'ordonnancement de la maintenance distribuée

L'approche la plus simple pour une maintenance distribuée consiste à attendre que des pannes se produisent au niveau des sites de production avant de procéder aux actions correctives. Dans ce cas, il suffirait de disposer de la liste des sites défaillants et de trouver le meilleur trajet des véhicules entre ces sites. Ce premier problème est traité dans la littérature en tant qu'optimisation conjointe de l'ordonnancement journalier des opérations de maintenance corrective et du routage des techniciens/opérateurs, pour la restauration des

sites géographiquement distribués (Yulong et al., 2019). Ainsi, un algorithme de recuit simulé (Gupta, 2003), un algorithme génétique (Drake et al., 2020) et un programme linéaire (Allaham and Dalalah, 2022a) sont proposés pour maximiser le nombre de sites remis en état et minimiser la distance totale parcourue par les opérateurs. En outre, la combinaison d'un programme linéaire et d'une métaheuristique à recherche locale («Variable Neighborhood Search») permet d'intégrer l'hétérogénéité des opérateurs et de définir une politique de priorité entre les différentes tâches à réaliser (Cakirgil et al., 2020). Et pour prendre en compte un retard possible de ces interventions de maintenance corrective, un système multi-agents est développé (Hedjazi et al., 2019). Bien que cette première approche soit simple et bien documentée, chaque seconde d'indisponibilité d'un équipement, dans la plupart des entreprises, représente une perte importante. De plus, la maintenance corrective n'est pas adaptée pour une stratégie à long terme, car les opérations sont réalisées après défaillance. Il serait intéressant de pouvoir agir avant que les pannes ne se produisent.

La maintenance préventive permet de planifier des opérations périodiques visant à éviter toute défaillance susceptible d'entraîner des arrêts de production. Des programmes linéaires (López-Santana et al., 2016), des heuristiques (Fontecha et al., 2020), des métaheuristiques (recherche tabou à mémoire adaptative (Tang et al., 2007), algorithme de recuit simulé (Jia and Zhang, 2020), etc.) et des algorithmes hybrides (Nguyen et al., 2019) sont proposés pour déterminer l'intervalle de temps optimal entre deux opérations de maintenance préventive et d'en déduire le trajet périodique des véhicules de transport à un coût estimé proche du minimum par unité de temps. Le cas spécial de la mutualisation des ressources dans un AMC, qui nous concerne dans ce chapitre, est traité dans 2 articles qui proposent une approche modulaire basée sur les réseaux de Petri (Simeu-Abazi and Alali Alhouaij, 2011) et une simulation à événements discrets (Wang and Djurdjanovic, 2018). Les contraintes de capacité de transport des pièces de rechange sont prises en compte dans un programme linéaire proposé en 2022 (Allaham and Dalalah, 2022b). Cependant, dans le cas de la

maintenance préventive, l'ordonnancement est cyclique et ne permet d'évaluer les coûts de maintenance que sur un horizon temporel court. En effet, les cycles de maintenance préventive ne prennent pas en compte la dégradation des équipements dans le temps.

La maintenance prédictive vise à utiliser les informations pronostiques des équipements pour établir un planning de maintenance adapté à l'évolution de leur état de santé (Camci, 2015). Des méthodes similaires à celles présentées précédemment sont proposées pour l'ordonnancement des opérations de maintenance prédictive : programmes linéaires, heuristiques et métaheuristiques. Il est alors possible d'estimer, à un instant donné, la probabilité qu'un équipement tombe en panne connaissant la fonction de répartition des défaillances. Ainsi il revient de déterminer, pour chaque équipement, le meilleur instant pour procéder à un remplacement préventif. Ensuite, les meilleurs temps de remplacement de tous les équipements géographiquement distribués sont agrégés et, quotidiennement, une liste de sites concernés permet d'optimiser le trajet des véhicules de transport. Nous utiliserons une politique de maintenance prédictive dans ce chapitre. Contrairement aux approches actuelles qui considèrent l'ordonnancement d'un point de vue opérationnel (planning journalier), nous allons adopter une approche plus stratégique (planning annuel) dans l'optique d'améliorer l'estimation des coûts de maintenance à long terme et d'évaluer l'influence de certains paramètres stratégiques tel que l'emplacement de l'AMC et la capacité des véhicules.

La conception et l'ordonnancement tels que présentés plus haut sont effectués hors ligne i.e. avant le début des activités de maintenance distribuée. Lors de la mise en œuvre des opérations, il peut surgir des événements imprévus. Que faire dans ce cas ? Faut-il conserver le programme initial malgré les perturbations ou faut-il le mettre à jour ? Ce problème peut être traité sous le nom de « réordonnancement ». En général, il existe plusieurs méthodes de réordonnancement (Visentini et al., 2014). La première question à se poser est de savoir s'il est possible de modéliser les scénarios de perturbation. Si la réponse est positive alors les

perturbations sont intégrées dans l'algorithme d'optimisation, hors ligne, pour un ordonnancement robuste. Sinon, les perturbations du planning ne peuvent être gérées qu'en ligne. Nous allons nous concentrer sur le cas où les perturbations peuvent être anticipées et modélisées hors ligne. La nouveauté de notre approche va être de définir des règles simples pour un réordonnancement rapide en cas d'événements imprévus.

Le tableau 9 présente un résumé de cette analyse bibliographique. Nous adopterons une approche préventive avec un focus sur la maintenance prédictive pour une meilleure estimation du nombre d'opérations préventives à effectuer sur un horizon de temps long (annuel) et par conséquent une meilleure évaluation des indicateurs de performance. Les contraintes stratégiques considérées concernent d'une part les véhicules de transport (capacité limitée de transport d'équipements) et d'autre part l'atelier de maintenance (centralisation des ressources et choix de la localisation géographique). La suite de ce chapitre va consister à formuler clairement le problème en jeu et proposer une méthodologie de résolution adaptée, en suivant les trois objectifs énoncés à l'introduction : Ordonnancement – Conception – Réordonnancement.

Tableau 9 Classification des articles traitant de l'ordonnancement de la maintenance distribuée

Auteurs	Politique de maintenance			Véhicules de transport			Atelier	
	Corrective	Préventive	Prédictive	Contrainte de capacité	Ordonnancement long terme	Réordonnancement	AMC	Position
(Gupta, 2003); (Hedjazi et al., 2019); (Yulong et al., 2019); (Cakirgil et al., 2020); (Drake et al., 2020); (Allaham and Dalalah, 2022)	•							
(Tang et al., 2007); (López-Santana et al., 2016); (Fontecha et al., 2020); (Nguyen et al., 2019); (Jia and Zhang, 2020)		•						
(Simeu-Abazi and Ahmad, 2011); (Wang and Djurdjanovic, 2018)		•					•	
(Allaham and Dalalah, 2022)		•		•				
(Camci, 2015) ; (Rashidnejad et al., 2018)			•					
(Si et al., 2022)			•	•				
(Manco et al., 2022)			•	•			•	
Ce chapitre			•	•	•	•	•	•

4.3 Formulation du problème

Comme introduit plus haut, l'objectif de ce chapitre est de proposer un outil d'aide à la décision pour le choix de l'emplacement géographique d'un AMC et de la capacité des véhicules de transport via l'ordonnancement à long terme des opérations de maintenance distribuée. Considérons un ensemble de N sites de production hétérogènes. Chaque site dispose d'un équipement sujet à d'éventuelles défaillances.

En suivant un planning, les véhicules sont chargés de transporter les ressources de maintenance (opérateurs, équipements de rechange et outils) pour visiter tous les sites dans un délai donné. L'AMC vérifie les fonctionnalités de chaque équipement, remet en état les équipements défaillants si besoin et stocke les équipements de rechange prêtes à être utilisées. Les véhicules commencent leur trajet depuis l'AMC avec une capacité limitée d'équipement de rechange. A l'échéance de la maintenance préventive, le véhicule arrive dans un site, et l'équipement qui s'y trouve est remplacé par un équipement de rechange.

Les principales hypothèses du problème sont les suivantes :

- 1) Chaque site de production a un seul équipement en fonctionnement et la défaillance d'un équipement rend le site indisponible.
- 2) L'AMC dispose d'un dépôt d'équipements de rechange, de capacité illimitée.
- 3) La flotte de véhicules est homogène et chaque véhicule a une capacité de transport limitée d'équipements de rechange, Q .
- 4) Un véhicule transporte également un opérateur en charge de remplacer les équipements par des équipements de rechange.
- 5) Le temps de trajet t_{ij} et la distance d_{ij} entre deux sites i et j sont considérés invariables au cours de l'horizon d'ordonnancement τ .
- 6) Chaque fois qu'un véhicule quitte un site i , il a un nombre y_i d'équipements de rechange et dès que le stock est vide, il retourne au dépôt pour être réapprovisionné. Il est à noter

qu'il peut arriver qu'un véhicule retourne se réapprovisionner au dépôt sans que son stock ne soit vide, si cela permet de minimiser les coûts.

- 7) Tous les équipements sont mutuellement indépendants d'un point de vue défaillance. Cela signifie que l'état de santé d'un équipement n'affecte pas celui d'un autre. Nous considérons donc qu'il est possible d'optimiser le nombre d'opérations de maintenance pour chaque site séparément.
- 8) La probabilité qu'un équipement e tombe en panne à l'instant t est égale à la fonction de répartition $F_e(T \leq t)$ où T est une variable aléatoire du temps écoulé avant les pannes.
- 9) Chaque site i est soumis à une fenêtre temporelle $[a_i; b_i]$ en dehors de laquelle une opération de maintenance ne peut être effectuée.
- 10) Pendant la mise en œuvre de la maintenance distribuée, en ligne, la seule perturbation considérée est la défaillance d'un équipement d'un site de production plus tôt que prévu. Dans ce cas, la prochaine opération planifiée pour le site défaillant devient une opération corrective avec un coût de pénalité c_w , associé à chaque unité de temps d'indisponibilité du site.

L'une des difficultés majeures rencontrées lors de la mise en œuvre d'une maintenance distribuée réside dans le choix d'un modèle hautement représentatif, permettant d'évaluer et d'optimiser les coûts. Les coûts ont trois principales origines tel qu'illustré dans la figure 27 : le transport ($E[CT]$), les opérations ($E[CO]$) et les indisponibilités ($E[CI]$). Le coût de transport $E[CT]$ peut être modélisé comme une combinaison linéaire de la distance et du temps de déplacement. Le coût des opérations $E[CO]$ est proportionnel au nombre d'opérations de maintenance. Le coût lié aux temps d'arrêt $E[CI]$ est plus complexe que les deux coûts précédents mais peut être déterminé à partir des travaux de López-Santana et al. de 2016 (López-Santana et al., 2016). En effet, pour un équipement donné, ces travaux montrent que le temps qui s'écoule entre deux opérations de maintenance successives génère un coût lié à la probabilité que l'équipement tombe en panne. Ainsi, à partir de l'équation

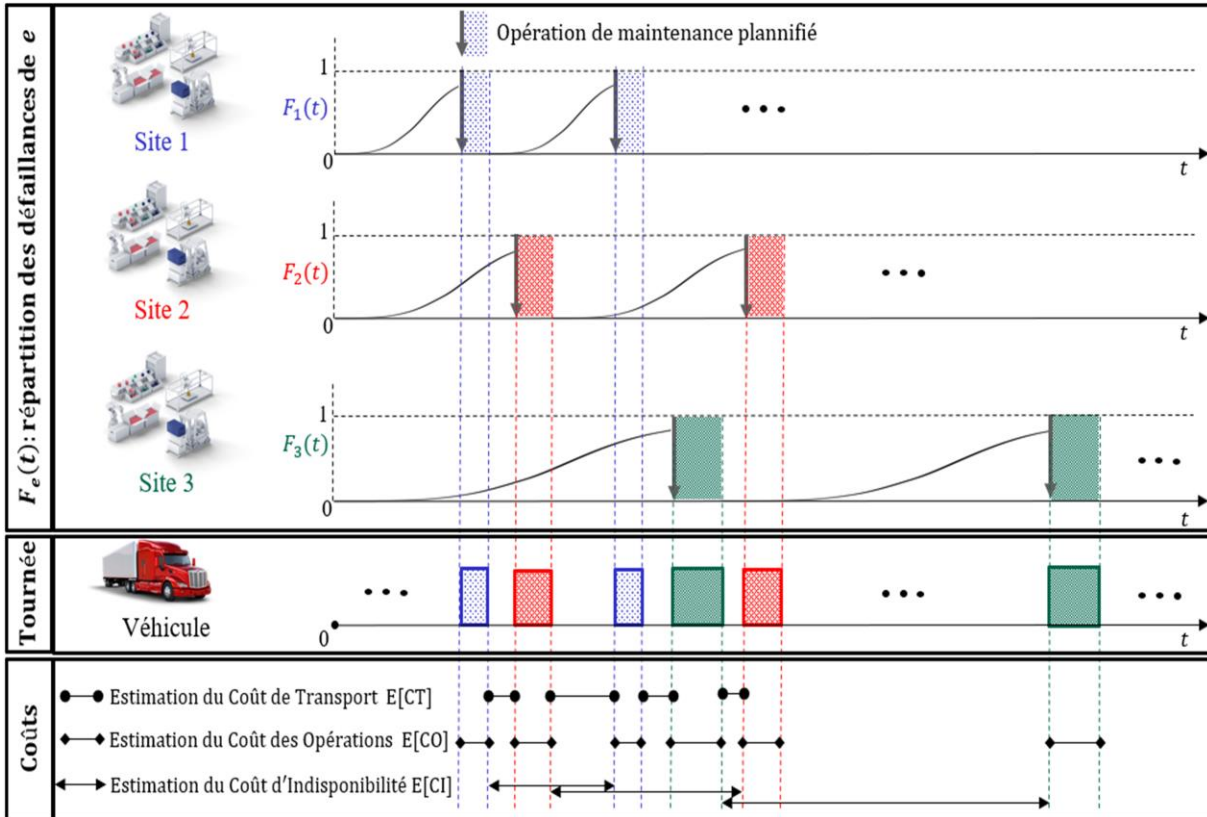


Figure 27 Illustration des coûts de maintenance distribuée pour 3 sites de production

(31) de cet article, il suffit de disposer de l'heure de fin d'une opération et de l'heure de début de l'opération suivante pour calculer $E[CI]$. La somme de ces trois différents coûts donne le coût de maintenance distribuée $E[CMD]$ à optimiser.

$$E[CMD] = E[CT] + E[CO] + E[CI] \quad (1)$$

Les principales notations utilisées dans cette étude sont résumées dans le tableau 12. La Section 4.4 présente l'approche générale et les détails de l'algorithme proposé pour résoudre le problème défini.

4.4 Méthodologie de conception et d'ordonnancement

4.4.1 Approche générale

L'ordonnancement long-terme, la capacité des véhicules (Q^*) et l'emplacement du dépôt (Φ_k^*) qui minimisent $E[CMD]$ sont obtenus grâce à l'approche générale illustrée par la figure 28. En effet, il s'agit d'une approche itérative qui prend en entrée les données géographiques

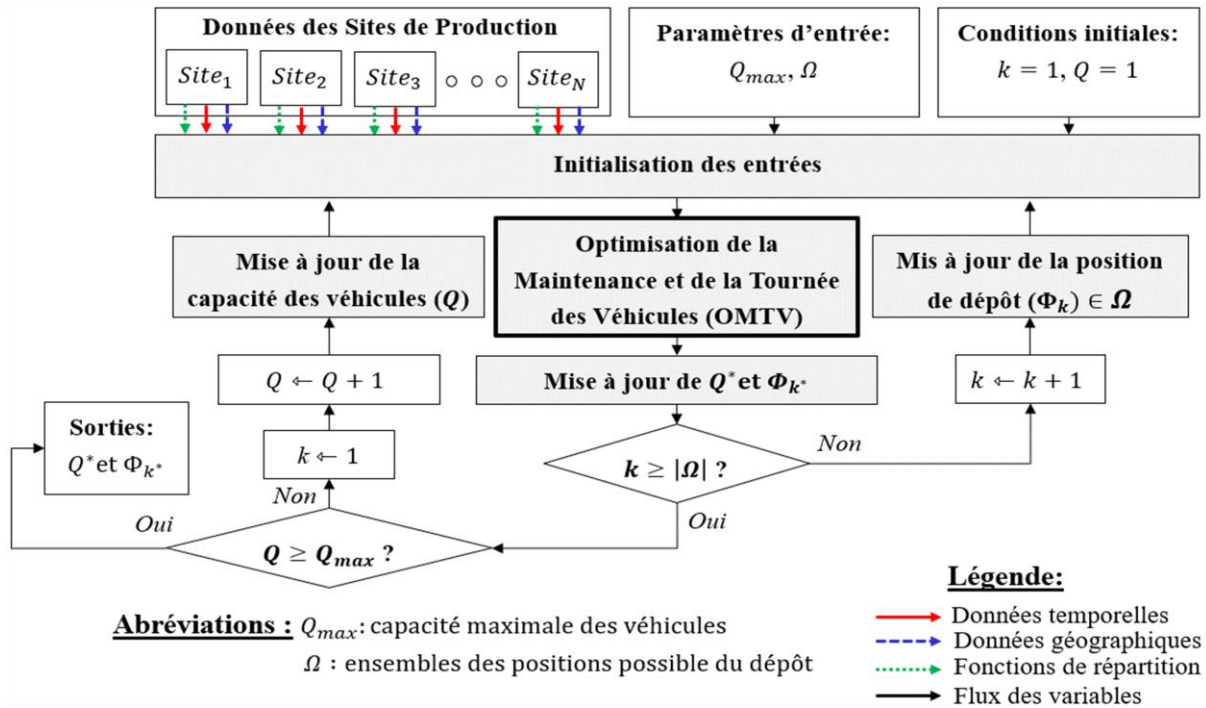


Figure 28 Approche générale d'optimisation de la maintenance distribuée

des sites ($[d_{ij}]; [t_{ij}]$), l'état de santé des équipements de production (F_e), et un ensemble de positions probables du dépôt (Ω). L'objectif est de développer un algorithme appelé OMTV (Optimisation de la Maintenance et de la Tournée des Véhicules) pour déterminer le meilleur coût de maintenance distribuée possible pour chacune des valeurs de $Q \in [Q_{min}; Q_{max}]$ et $\Phi_k \in \Omega$ pour un ordonnancement long-terme. Par conséquent, deux boucles itératives sont créées pour tester toutes les valeurs de Q et Φ_k . Ainsi, chaque itération met à jour la valeur du coût la plus basse et les paramètres associés. Dans la suite, les deux parties les plus innovantes de cette approche seront développées plus en détail : l'algorithme OMTV (Section 4.4.2) et l'ensemble Ω (Section 4.4.4).

4.4.2 Ordonnancement long-terme des opérations : algorithme d'optimisation

Comme présenté plus haut, les coûts estimés de la maintenance distribuée ($E[CMD]$) sont divisés en trois catégories : les coûts de transport ($E[CT]$), les coûts des opérations ($E[CO]$) et les coûts d'immobilisation ($E[CI]$). L'algorithme OMTV vise à déterminer les coûts optimaux grâce à une boucle d'itération composé de deux étapes : la planification et

l'ordonnancement comme le montre la figure 29. La planification consiste à déterminer le nombre optimal d'opérations de maintenance dans l'horizon choisi et l'ordonnancement consiste à préciser les heures de début de ces opérations et par conséquent le trajet des véhicules.

- (1) Algorithme de Planification de la Maintenance (APM) : L'objectif est de minimiser $E[CO]$ et $E[CI]$. Ce premier sous-algorithme est entièrement inspiré du modèle CMR (Combined Maintenance and Routing) présenté dans (López-Santana et al., 2016). Il permet de prédire le nombre optimal d'opérations de maintenance pour chaque équipement dans un horizon temporel donné. La sortie de cet algorithme est un ensemble de fenêtres temporelles, pour chaque équipement, dans lesquelles les opérations doivent être effectuées. Les coûts à optimiser à ce stade sont les suivants :

$$E[CO] = \sum_{i=1:N} CR_i \cdot nop_i \quad (2)$$

$$E[CI] \propto ([s_{o+1}]_i - [s_o]_i - MTTF(i)), o = 1:nop_i - 1, i = 1:N \quad (3.1)$$

$$MTTF(i) \propto F_e(T \leq [s_{o+1}]_i - [s_o]_i) \quad (3.2)$$

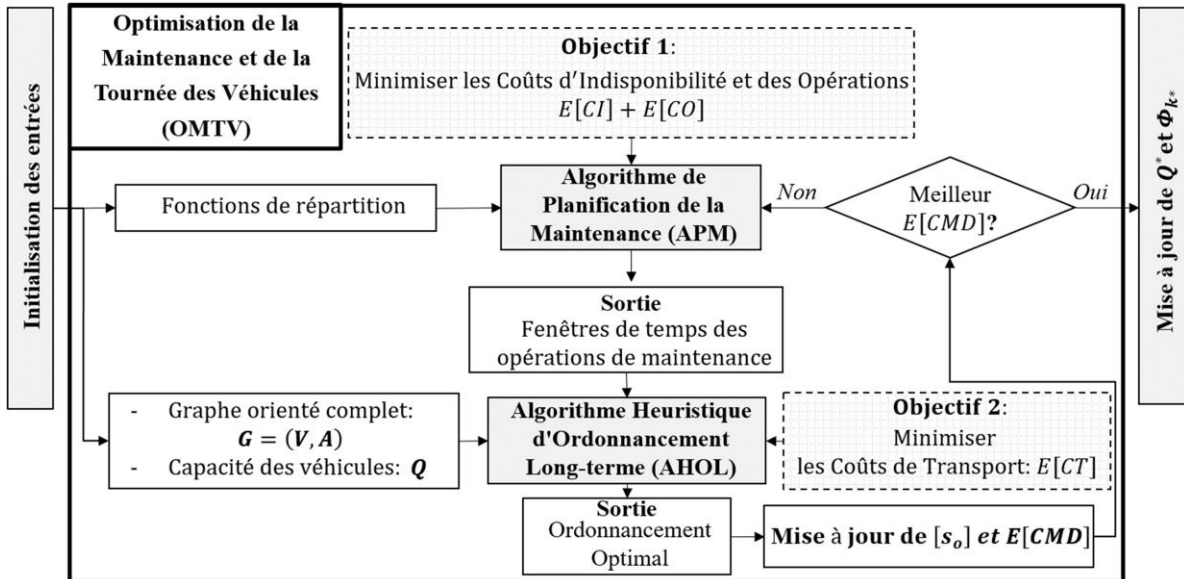


Figure 29 Algorithme OMTV pour combiner l'optimisation de l'ordonnancement des opérations de maintenance et de la tournée des véhicules

Où nop_i est le nombre d'opérations de maintenance à effectuer sur le site i au cours de l'horizon d'ordonnancement et CR_i est le coût de maintenance/remplacement de l'équipement du site. $[s_o]_i$ est le vecteur des heures de début de toutes les opérations planifiées du site i . $MTTF(i)$ est le temps moyen avant une défaillance de l'équipement du site i .

- (2) Algorithme Heuristique d'Ordonnancement Long-terme (AHOL) : L'objectif est de minimiser $E[CT]$. Ce deuxième sous-algorithme est la première nouveauté de cette étude. Il résout le célèbre problème connu sous le nom de CVRPTW (Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows) en recherche opérationnelle, mais dans le cadre d'un ordonnancement long terme (annuel) plutôt que court terme (journalier). Dans un CVRPTW classique, une flotte de véhicules homogènes doit desservir des clients dont la demande et les heures d'ouverture sont connues (Konstantakopoulos et al., 2020). Sur la base du modèle mathématique généralement utilisé pour résoudre ce problème, AHOL propose l'ordonnancement optimal de la maintenance. A la fin de ce deuxième sous-algorithme, les vecteurs $[s_o]_i$ sont mis à jour dans APM pour la prochaine itération d'optimisation.

À chaque itération, la somme de tous les coûts ($E[CMD]$) est mise à jour jusqu'à ce qu'elle converge dans un intervalle de confiance défini. Ce qui suit se concentre sur le sous-algorithme AHOL avec pour objectif d'optimiser les coûts de transport. Considérons en entrée un graphe $G = (V, A)$ où $V = \{0, 1, 2, \dots, N\}$ est un ensemble de nœuds avec un dépôt 0 et $V_s = V \setminus \{0\}$ le sous-ensemble de sites. $A = \{(i, j) : i, j \in V\}$ représente l'ensemble des liens entre toutes les paires de nœuds. L'ensemble des véhicules est défini par $K = \{1, 2, \dots, m\}$, chacun ayant une capacité Q . Chaque site $i \in V_s$ est associé à une certaine demande positive $D_i < Q$ et à un temps de service/remplacement sur site TR_i . Des temps de déplacement non négatifs t_{ij} et des distances d_{ij} sont associés à chaque arc $(i, j) \in A$.

Chaque site $i \in V_s$ a nop_i opérations de maintenance sur l'horizon d'ordonnancement τ . Le sous-algorithme MPA fournit des fenêtres temporelles pour chaque opération $[e_o, l_o]_i: o = 1, 2, \dots, nop_i$. Un ensemble $V' = \{0, 1, 2, \dots, n\}$ qui agrège toutes les opérations est donc considéré, où 0 est le dépôt et $n = \sum nop_i$ représente la somme de toutes les opérations de maintenance de tous les sites dans l'horizon τ . On définit alors un nouveau graphe $G' = (V', A')$, où $A' = \{(i', j'): i', j' \in V'\}$ désigne l'ensemble des arcs. Chaque nœud $i' \in V'$ du nouveau graphe agrégé est équivalent à un nœud $i \in V$ de l'ancien graphe tel que $D_{i'} = D_i$. Et chaque arc $(i', j') \in A'$ est équivalent à un arc $(i, j) \in A$ tel que $t_{i'j'} = t_{ij}$ et $d_{i'j'} = d_{ij}$. Le graphe agrégé G' ainsi construit, le problème consiste maintenant à déterminer l'itinéraire optimal entre toutes les opérations de maintenance i' de telle sorte que :

- Chaque opération $i' \in V' \setminus \{0\}$ est effectuée exactement une fois.
- Un véhicule ne peut pas transporter des équipements de rechange au-delà de sa capacité Q
- La fenêtre temporelle $[e_{i'}, l_{i'}]$ de l'opération i' est équivalente à une seule fenêtre temporelle $[e_o, l_o]_i: i \in V_s, o = 1, 2, \dots, nop_i$ fournie par le sous-algorithme d'MPA et vice versa.

Dans la suite de ce document, l'indice i est utilisé à la place de i' ou o pour désigner chaque opération de maintenance. Ce problème formulé est dit difficile ou « NP-hard », nécessitant un temps de calcul exponentiel. Seules les petites instances peuvent être résolues analytiquement. Un modèle analytique est donc défini pour résoudre les petites instances et une heuristique pour les instances plus importantes du problème. On choisit d'abord un modèle de programmation linéaire en nombres entiers mixtes (MILP), qui est le plus utilisé dans la littérature (Borcinova, 2017). Ensuite, un algorithme appelé « Divide-and-Conquer » (Mariescu-Istodor et al., 2021) est adapté et mis en œuvre pour résoudre le problème du temps de calcul, comme illustré dans la figure 30. Cette méthode devrait permettre de traiter

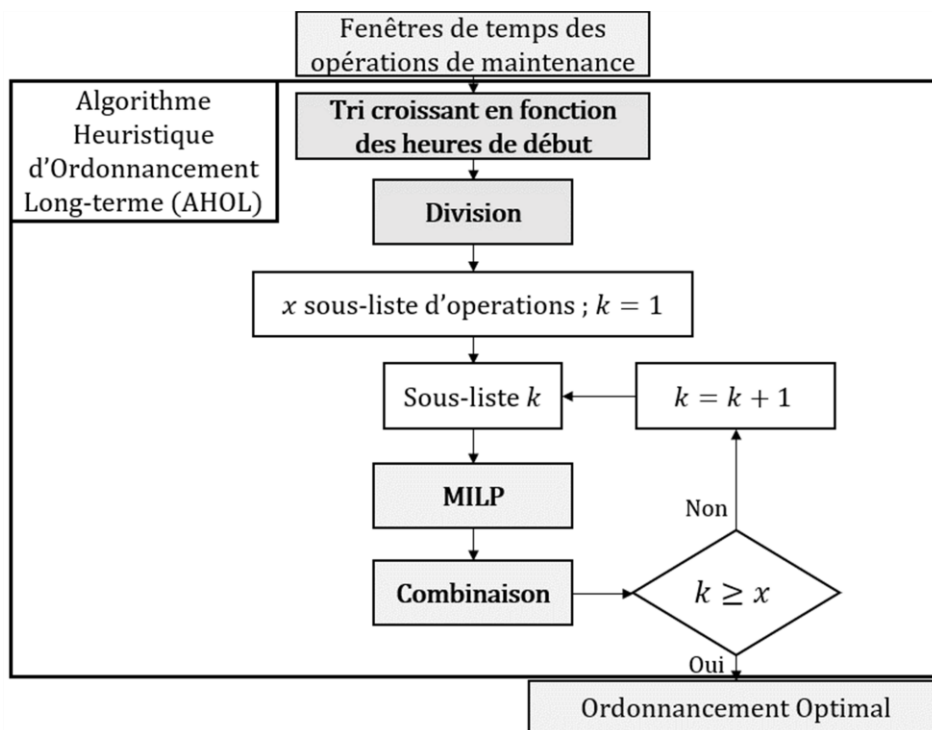


Figure 30 Algorithme "Divide-and-Conquer", adapté à l'algorithme AHOL

le temps de calcul en divisant la liste de toutes les opérations de maintenance en sous-listes ordonnées. Tout d'abord, la liste agrégée des opérations de maintenance est triée de la plus ancienne à la plus récente et divisée en sous-listes plus petites. Le nombre maximum d'éléments dans une sous-liste est égal à Q . Ensuite, chaque sous-liste est résolue par le programme linéaire proposé et les résultats sont combinés pour obtenir l'ordonnancement de la maintenance.

L'accent est maintenant mis sur la formulation du programme linéaire. Une variable de décision binaire x_{ij} est définie pour indiquer si un véhicule traverse un arc (i, j) dans l'ordonnancement optimal. Un véhicule arrive pour une opération i à un moment indiqué par s_i et avec une charge y_i . Le programme linéaire du sous-algorithme AHOL peut être formulé comme suit :

Minimiser

$$E[CT] = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n (Q \cdot CD \cdot d_{ij} + CT \cdot t_{ij}) \cdot x_{ij} \quad (4)$$

Tel que

$$-Q \cdot m \leq -\sum_{i=1}^n D_i; \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{0j} - m = 0; \quad (6)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ii} = 0; \quad (7)$$

$$\sum_{i=0, i \neq j}^n x_{ij} = 1, \forall j \in V' \setminus \{0\}; \quad (8)$$

$$\sum_{j=1, j \neq i}^n x_{ij} \leq 1, \forall i \in V' \setminus \{0\}; \quad (9)$$

$$y_i - y_j + (D_j + Q) \cdot x_{ij} \leq Q, \forall i, j \in V' \setminus \{0\}, i \neq j; \quad (10)$$

$$s_i - s_j + (TR_i + t_{ij} + \tau) \cdot x_{ij} \leq \tau, \forall i, j \in V' \setminus \{0\}, i \neq j; \quad (11)$$

$$D_i \leq y_i \leq Q, \forall i \in V' \setminus \{0\}; \quad (12)$$

$$e_i \leq s_i \leq l_i, \forall i \in V' \setminus \{0\}; \quad (13)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in V', i \neq j; \quad (14)$$

Ce programme minimise les coûts de transport $E[CT]$ par le biais de la fonction objectif (4)

avec $\begin{cases} CD: \text{Coût unitaire de transport par unité de distance et de charge} \\ CT: \text{Coût unitaire de transport par unité de temps} \end{cases}$

La contrainte (5) représente le nombre minimum de véhicules requis pour effectuer toutes les opérations. Dans le programme linéaire un véhicule est assimilé à un trajet qui part du

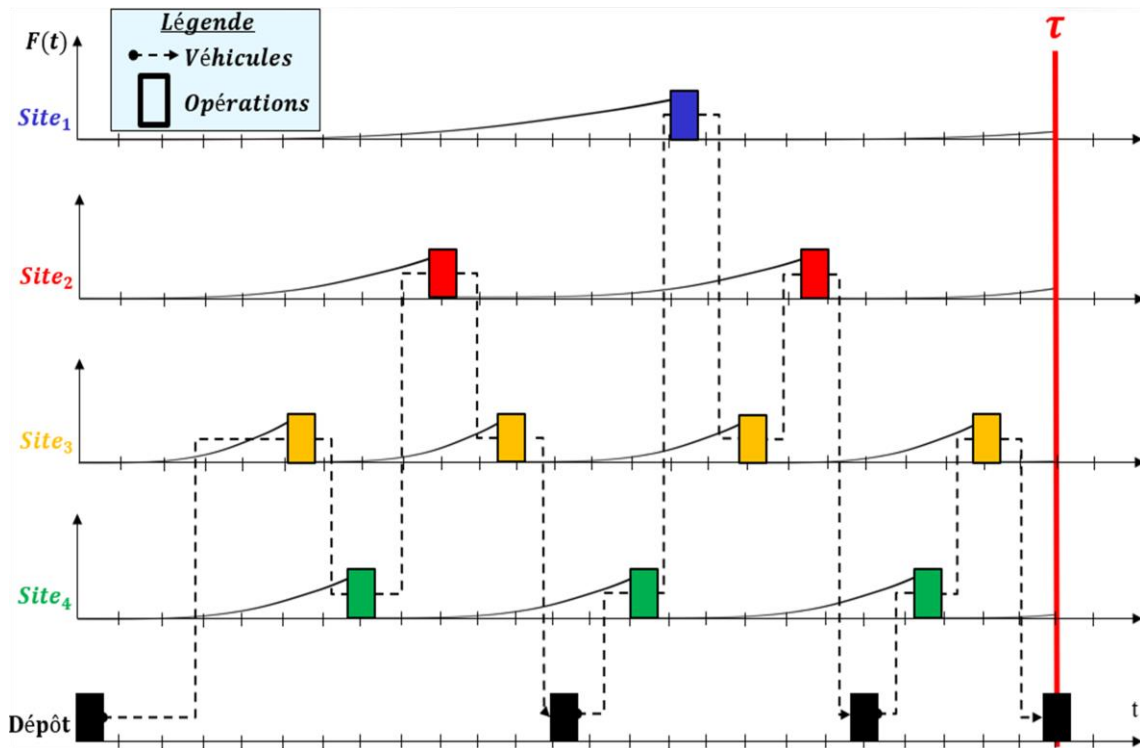


Figure 31 Exemple d'ordonnancement pour 4 sites hétérogènes

dépôt, parcourt un certain nombre de sites et retourne au dépôt, comme illustré dans la figure 31. La contrainte (6) exige qu'exactly m véhicules quittent le dépôt. Les contraintes classiques de flux (7), (8) et (9) assurent que chaque véhicule peut quitter le dépôt une fois exactement et que chaque opération de maintenance est effectuée une fois exactement. Dans la contrainte (10), la capacité des véhicules est définie de façon à ce que la différence de charge d'un véhicule entre deux opérations successives i et j n'excède pas la demande de j . La contrainte (11) assure que le temps entre deux opérations successives i et j n'excède pas $TR_i + t_{ij}$. Les contraintes (12), (13) et (14) restreignent les bornes supérieures et inférieures des variables de décision.

Après avoir conçu l'algorithme AHOL utilisé pour optimiser l'ordonnement des opérations de maintenance, l'étape suivante consiste à tenir compte des contraintes environnementales liées au transport.

4.4.3 Introduction des contraintes environnementales

Il est question ici de s'assurer que les émissions de CO_2 , dans le cadre de la maintenance distribuée, soient limitées. Nous avons choisi de mettre en œuvre les standards fixés par l'Union Européenne tel que présenté au Chapitre 2. La quantité de CO_2 émis par km ne devrait pas dépasser 147g ("CO₂ emission performance standards for cars and vans," 2023). Une formule est proposée par L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie en France (ADEME) ("Information GES des prestations de transport," 2020) pour estimer les émissions de CO_2 (empreinte carbone : $E[EC]$) d'une activité de transport sur une distance d_{ij} :

$$E[EC] = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n FE \cdot RC \cdot \frac{y_i}{Q} \cdot d_{ij} \quad (15)$$

$$\text{Avec } \left\{ \begin{array}{l} FE: \text{Facteur d'Emission (kgCO}_2\text{/l)} \\ RC: \text{Ratio de Consommation (l/km)} \\ y_i: \text{la charge d'un véhicule au départ de l'opération } i \\ Q: \text{la capacité maximale du véhicule} \end{array} \right.$$

Afin de respecter les standard Européens, comme énoncé précédemment, nous formulons une contrainte, inspirée de l'équation (15), ajoutée au programme linéaire proposé plus haut :

$$FE.RC.\frac{y_i}{Q} \leq 0,147 \quad \forall i \in V' \quad (16)$$

L'équation (16), ainsi construite, impose une charge maximale d'équipements à transporter $(\frac{0,147.Q}{FE.RC})$ aux véhicules pour chaque opération de maintenance distribuée programmée. Par exemple si les véhicules sont légers et fonctionnent au gazole, i.e. $RC = 0,087l/km$ et $FE = 3,16kgCO_2/l$ ("Information GES des prestations de transport," 2020), alors il ne pourront transporter qu'au maximum 53,47% de leur capacité maximale pour respecter les standards de $147gCO_2/km$. Evidemment, cette contrainte devrait probablement avoir un impact négatif sur les coûts de transport vu qu'il faudrait plus de distance pour transporter la même quantité d'équipements, si une comparaison est faite avec le cas où les véhicules sont automatiquement chargés au maximum. Après avoir construit la méthode d'ordonnement passons maintenant au positionnement de l'atelier/dépôt.

4.4.4 Positionnement de l'AMC

L'emplacement optimal du dépôt (Φ_k) est choisi parmi un ensemble de positions possibles (Ω). La taille de Ω est un facteur déterminant dans le calcul du minimum $E[CMD]$. Plus Ω est grand, plus il est difficile, voire impossible, de calculer et de comparer les coûts de tous les éléments de l'ensemble. L'objectif est donc de proposer une heuristique qui garantisse une petite taille de Ω . Une étude empirique aborde ce problème en proposant de construire Ω à partir de la localisation des sites (Simeu-Abazi and Gascard, 2020). L'idée est de positionner le dépôt à proximité de l'un des sites. Cependant, plus il y a de sites, plus la taille de Ω devient grande. L'objectif est donc de proposer une méthode où $|\Omega|$ est indépendant du nombre de sites. Une nouveauté de ce chapitre est de positionner le dépôt au barycentre pondéré des sites. L'idée est que le dépôt soit plus proche du site le plus

critique sans être trop éloigné des sites moins critiques. Dans cette étude, plus un équipement aura une probabilité élevée de tomber en panne, plus son site sera considéré comme critique. Dans la suite, les deux approches sont comparées de manière empirique. Comme expliqué précédemment, la première approche est basée sur le choix du meilleur site pour l'implantation du dépôt ("*proche d'un site*"). La seconde approche est basée sur le barycentre des sites, pondéré par les probabilités de défaillance ("*barycentre*"). En choisissant un référentiel orthonormé $(0, x, y)$ pour les emplacements géographiques, nous avons :

- "*proche d'un site*": $(depot(x), depot(y)) \in \{(site_e(x), site_e(y))\}$
- "*barycentre*":
$$\begin{cases} depot(x) = \sum \frac{site_e(x).F_e(T \leq \tau)}{\sum F_e(T \leq \tau)} \\ depot(y) = \sum \frac{site_e(y).F_e(T \leq \tau)}{\sum F_e(T \leq \tau)} \end{cases}$$

4.5 Méthodologie de réordonnancement

Après la conception et l'ordonnancement hors ligne de la maintenance distribuée, que faire en cas d'occurrence d'une défaillance en ligne ? Il est question de proposer une méthodologie de réordonnancement qui permettrait d'avoir des opérations de maintenance distribuée robustes.

4.5.1 Approche générale de réordonnancement

Comme introduit plus haut, il existe en général plusieurs approches de réordonnancement. La figure 32 illustre les étapes communément utilisées. La première question à se poser est de savoir s'il est possible de modéliser hors ligne les scénarios de perturbation. Si la réponse est négative alors les perturbations ne peuvent être gérées qu'en ligne, sinon un modèle peut permettre d'adopter une approche anticipatrice. Anticiper va consister soit à introduire les perturbations pendant l'ordonnancement, pour une optimisation robuste, soit après l'ordonnancement. Dans la première approche le réordonnancement est fait en parallèle de l'ordonnancement tandis que dans la deuxième il est fait en série. Un planning hors ligne

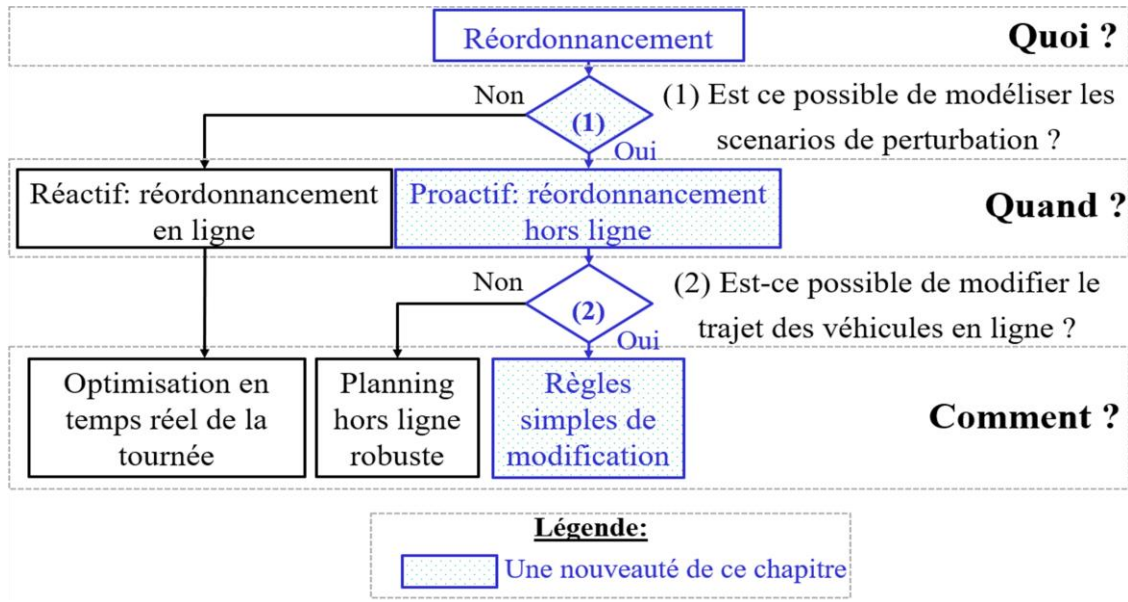


Figure 32 Etat de l'art du réordonnement de la tournée de véhicules

robuste nécessite d'introduire de nouvelles notions tels que les véhicules de secours ou « backup vehicle » en anglais, les tolérances sur les temps de début des opérations, etc. Nous allons nous focaliser dans un premier temps sur la deuxième approche avec pour objectif de proposer des règles simples permettant de modifier rapidement le trajet des véhicules en cas d'imprévu.

Considérons l'ordonnement des opérations de maintenance distribuée fourni par l'algorithme OMTV. Toutes les opérations sont initialement préventives. Chaque véhicule $k \in \{1, 2, \dots, m\}$ a besoin de savoir où et quand effectuer ses opérations. La réponse au « quand » est fournie par le vecteur $[s]_k$. Définissons le vecteur $[u]_k$ qui répond à la question

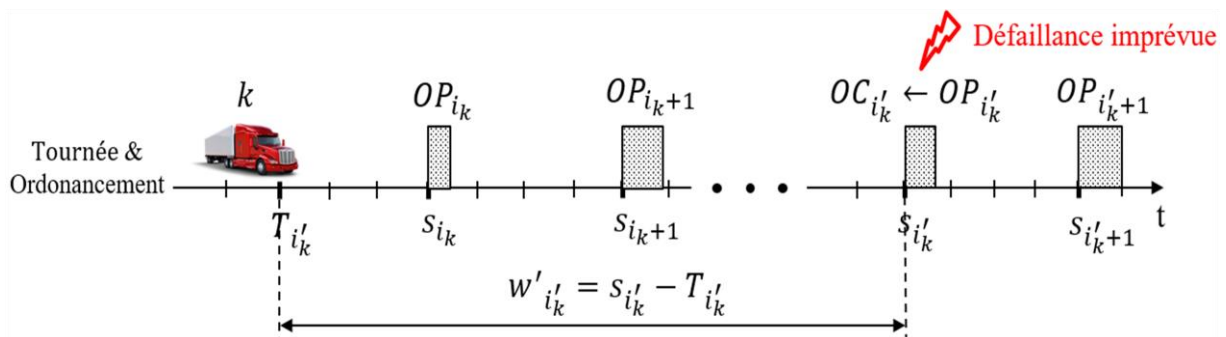


Figure 33 Illustration d'une défaillance imprévue

« où ». Chaque élément de $[u]_k$ est l'indice d'un site de production. En guise d'exemple, pour un véhicule 1 on peut avoir initialement $[u]_1 = (8; 5; 10; 2; \dots)$ et $[s]_1 = (5; 7; 11; 14; \dots)$ où la première opération aura lieu au site de production 8 dans 5 unités de temps, la deuxième opération au site 5 dans 7 unités de temps, etc. Une fois en ligne, l'indice du prochain site concerné par une opération préventive du véhicule k est contenu dans la variable i_k . Comme le montre la figure 33, la défaillance d'un équipement transforme l'Opération Préventive (OP) planifiée en Opération Corrective (OC) et la valeur qui devait correspondre à i_k , en temps normal, est affectée à la variable i'_k . Le temps d'occurrence de la défaillance est enregistré dans la variable $T_{i'_k}$. Si la défaillance n'est pas prise en compte, i.e. l'ordonnancement de départ est maintenu, alors le site i'_k concerné est pénalisé pendant une durée $w_{i'_k}$ avec un coût associé à chaque unité de temps d'indisponibilité.

La figure 34 montre l'approche générale proposée pour le réordonnancement. En effet, une première étape hors ligne va consister à utiliser l'algorithme OMTV pour l'ordonnancement et à construire un algorithme constitué de règles simples pour la gestion des perturbations. Nous l'appelons Algorithme de Réordonnancement Dynamique (ARD). La deuxième étape se fait en ligne pendant l'exécution des opérations par chaque véhicule k . Un tableau de

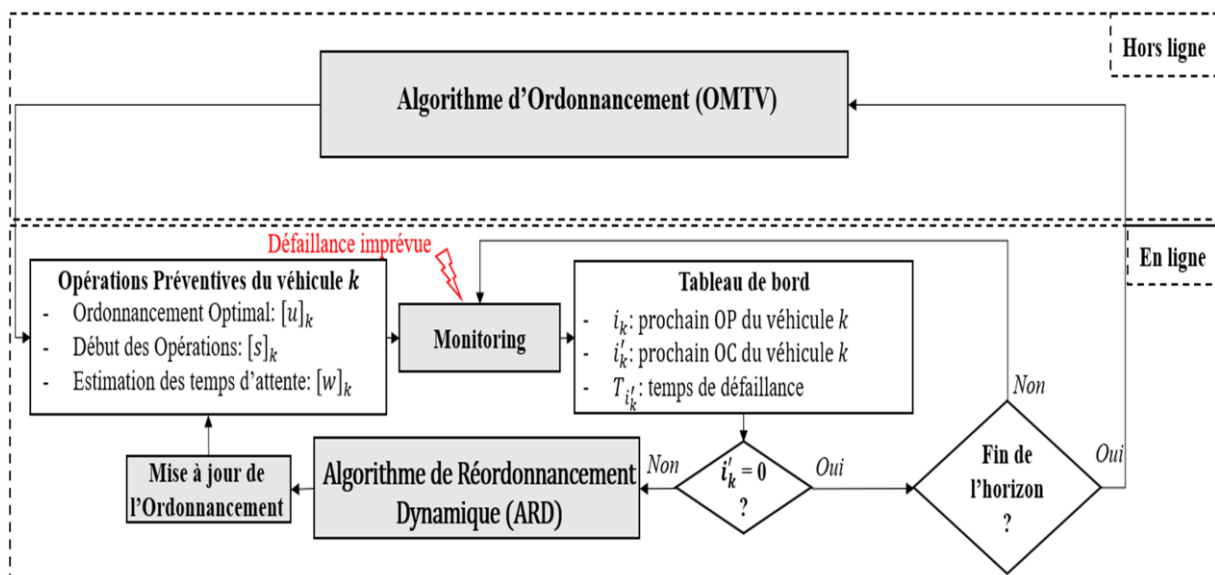


Figure 34 Méthode de réordonnancement

bord fournit, à chaque instant, la prochaine opération préventive i_k , la prochaine opération corrective i'_k ($i'_k \geq i_k$ si défaillance ; 0 sinon) et l'instant auquel la défaillance a eu lieu $T_{i'_k}$. Nous allons nous focaliser sur la construction de l'ARD avec pour objectif de déterminer le juste compromis entre l'indisponibilité d'un site défaillant et les potentiels coûts de modification de l'ordonnancement initial.

4.5.2 Algorithme de Réordonnancement Dynamique

Il s'agit d'un ensemble de deux algorithmes inspirés des opérateurs « back-insert » et « swap », qui ont déjà fait leurs preuves de performance en recherche opérationnelle (Harzi and Krichen, 2017). L'idée est de permuter intelligemment quelques éléments d'une liste d'opérations tels que la liste d'entrée et la liste de sortie contiennent les mêmes éléments mais pas dans le même ordre. L'opérateur « swap » conduit à un échange de position de deux éléments d'une paire (i, j) de la liste tandis que l'opérateur « back-insert » consiste à prendre un élément à la position j et à l'insérer à la position i ($i < j$). Ce sont des heuristiques avec des règles simples qui peuvent être utilisées pour modifier l'ordonnancement des opérations en cas de défaillance imprévue.

L'objectif est de s'assurer que i'_k puisse être priorisé par rapport à i_k en cas de défaillance. Ainsi, le site défaillant pourrait voir sa durée d'indisponibilité être réduite en rendant son opération corrective prioritaire face aux autres opérations. Mais une attention particulière devrait être accordée au potentiel coût de réordonnancement. Par conséquent, il est nécessaire de définir un cadre dans lequel le réordonnancement est bénéfique d'un point de vue coût. La première question qu'on se pose est celle de savoir si la durée d'indisponibilité du site défaillant est assez considérable pour nécessiter une modification du trajet des véhicules. La deuxième question revient à savoir si, en cas de réordonnancement pour prioriser l'action corrective, les autres opérations préventives ne seraient pas trop perturbées. Ainsi, nous définissons deux paramètres (α, δ) , respectivement pour les deux

questions, à déterminer hors ligne, afin d'explorer quand est ce que changer l'ordre des opérations est rentable en cas de défaillance.

Les opérateurs utilisés en cas de réordonnancement, back-insert et swap, conservent le nombre d'opérations i.e. le coût des opérations ($E[CO]$) reste le même avant et après un réordonnancement. Par conséquent pour évaluer la rentabilité du réordonnancement nous n'allons considérer que le coût d'indisponibilité des sites ($E[CI]$). Comme le montre la figure 35, le premier paramètre α représente la durée d'indisponibilité en dessous de laquelle un réordonnancement ne devrait pas être effectué. C'est la valeur minimale admissible du ratio entre l'indisponibilité réelle d'un site en cas de défaillance et l'indisponibilité qui était normalement attendue après ordonnancement. On définit ainsi :

$$\frac{w'_{i'_k}}{w_{i'_k}} \geq \alpha \quad (17)$$

Où : $w_{i'_k}$ est la durée d'indisponibilité attendue du site i'_k après l'optimisation hors ligne et $w'_{i'_k} = s_{i'_k} - T_{i'_k}$ est l'indisponibilité réelle après défaillance.

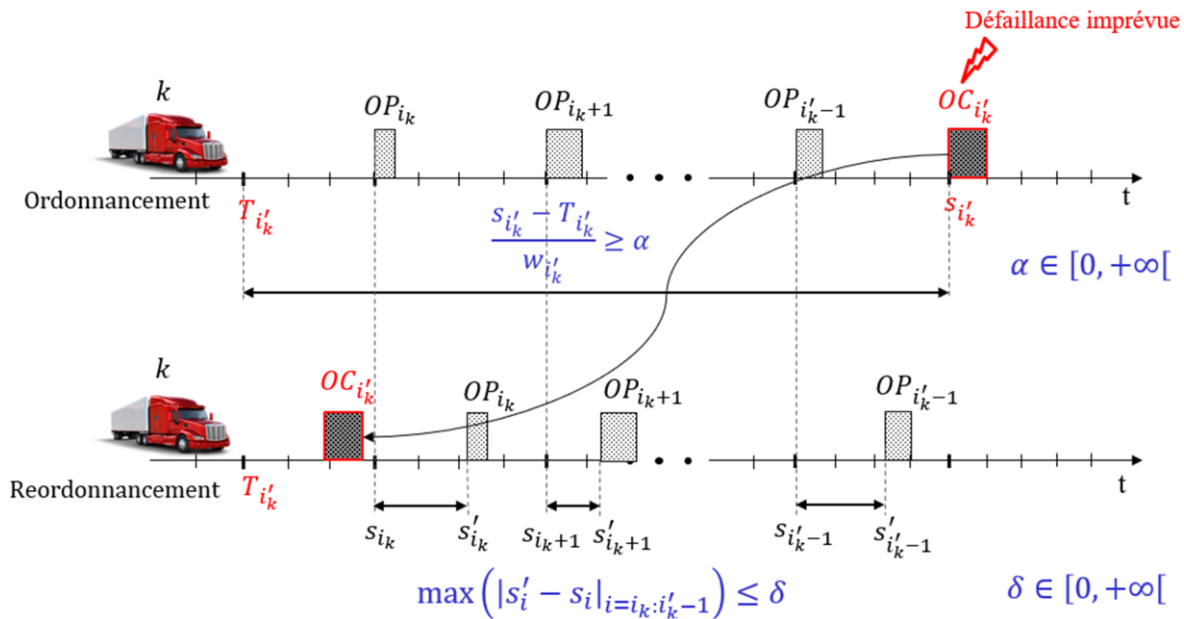


Figure 35 Définition des paramètres (α, δ)

Le deuxième paramètre δ représente la perturbation maximale admissible depuis l'instant de début des opérations suite à un réordonnement. C'est la différence maximale entre le début des opérations après réordonnement et avant. On définit ainsi :

$$\max_{i=i_k:i'_k-1} (|s'_i - s_i|) \leq \delta \quad (18)$$

Plus α est petit, plus les défaillances arrivées plus tôt que prévu devraient être négligées. Pour illustrer ces propos, supposons par exemple qu'à T , correspondant à l'instant $t = 0$, une défaillance intervient dans un site. La prochaine opération préventive i de ce site est programmée dans x mois. L'algorithme OMTV a estimé que le MTTF (temps moyen avant une défaillance) du site est de 4 mois et la différence de temps entre la prochaine opération préventive et la dernière effectuée est de 5 mois. Dans ce cas, on obtient $w_i = 1 \text{ mois}$. Si $\alpha = 2$ alors $\forall x < 2 \text{ mois}$, la défaillance n'est pas prise en compte et il n'y a pas réordonnement. Même raisonnement pour $\alpha = 0,5$ et $x < 2 \text{ semaines}$, sachant que cette borne minimale de x est obtenue en multipliant les valeurs de α et w_i .

Plus δ est grand, plus les écarts créés par le réordonnement devraient être tolérés. En reprenant l'exemple précédent, si ($\alpha = 2$ et $x \geq 2 \text{ mois}$) ou ($\alpha = 0,5$ et $x \geq 2 \text{ semaines}$) alors, pour $\delta = 1 \text{ semaine}$, un réordonnement qui rapprocherait ou éloignerait les prochaines opérations préventives de maximum 1 semaine est convenable. Une fois que les valeurs de α et δ sont fixées hors ligne, il est simple et rapide pour un véhicule de déterminer quand il peut changer d'ordre d'exécution des opérations en cas de défaillance, et comment le faire.

La procédure ci-dessous présente le pseudo code de l'algorithme ARD. Une fois α et δ estimées hors ligne par simulation, et en cas de défaillance en ligne, l'indisponibilité réelle du site défaillant ($s'_{i'_k} - T'_{i'_k}$), notée x dans l'exemple précédent, est calculée. Si le ratio entre la valeur obtenue et l'indisponibilité attendue $w'_{i'_k}$ est supérieure ou égale à α , alors le réordonnement peut être effectué. Ensuite, si la valeur maximale des différences entre les

temps de début des opérations préventives des autres sites après le réordonnement et avant est inférieure ou égale à δ alors le réordonnement est effectué.

Les variables utilisées pour l'algorithme ARD peuvent être résumées comme suit :

- i_k : prochaine OP du véhicule k
- i'_k : prochaine OC du véhicule k
- $T_{i'_k}$: instant auquel est apparue la défaillance
- s_i : instant de début de l'OP i avant réordonnement
- s'_i : instant de début de OP i après réordonnement
- w_i : indisponibilité estimée, hors ligne, avant l'OP i
- w'_i : indisponibilité réelle, en ligne, avant l'OC i
- (α, δ) : paramètres de décision de réordonnement

Dans la section suivante nous allons mener des expériences afin de tester la pertinence de l'approche générale et des algorithmes OMTV et ARD proposés pour, respectivement, la conception, l'ordonnement et le réordonnement dans un contexte de maintenance distribuée.

Algorithme : ARD

- **Entrées** : $i_k; i'_k; T_{i'_k}; s_{i'_k}; w_{i'_k}; \alpha; \delta$

- **Sorties** : $\{s_i\} \forall i = i_k; i'_k$

1. $w'_{i'_k} = s_{i'_k} - T_{i'_k}$; // Calcul de la durée réelle d'indisponibilité
2. **if** $w'_{i'_k}/w_{i'_k} \geq \alpha$ **then**
3. $\{s'_i\} = \text{Operation}(i_k; i'_k)$; // Operation $\in \{\text{Back_Insert}; \text{Swap}\}$
4. **for** $i = i_k; i'_k - 1$
5. **if** $|s'_i - s_i| > \delta$ **then**
6. **break**;
7. **end if**
8. **end for**
9. **if** $i = i'_k - 1$ **then**
10. $\{s_i\} = \{s'_i\}$; // Réordonnement
11. **end if**
12. **end if**
13. $i'_k = 0$

4.6 Expériences

En guise de rappel, l'objectif de ce chapitre est de réduire les coûts de maintenance distribuée grâce à l'optimisation de l'emplacement de l'AMC, de la capacité des véhicules de transport via l'ordonnancement long-terme des opérations de maintenance. Un cadre général et des algorithmes heuristiques ont été proposés dans les sections précédentes. Des expériences sont maintenant nécessaires pour étudier la pertinence des contributions faites.

4.6.1 Ordonnancement : long-terme comparé au court-terme

La première contribution de ce chapitre concerne l'ordonnancement long terme tel que décrit plus haut. L'idée de cette première partie de l'expérience est de déterminer l'évolution du coût de maintenance ($E[CMD]$) en fonction de l'horizon d'ordonnancement (τ). Cette expérience concerne un équipement dont le nombre de défaillances suit une distribution de Weibull avec pour fonction de répartition :

$$F_e(T \leq t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (19)$$

Où η est le paramètre d'échelle en *années* et β est le paramètre de forme.

Il est nécessaire d'étudier plusieurs scénarios pour deux raisons : étendre la portée de cette expérience et sélectionner les scénarios les plus pertinents pour l'analyse. Un scénario est considéré pertinent lorsqu'il permet d'étudier l'influence de l'horizon d'ordonnancement (τ), et par conséquent de l'ordonnancement long-terme i.e. lorsque τ est grand, sur les performances de la maintenance distribuée. En supposant qu'en fonction du cas d'application (aéronautique, ferroviaire, énergie, etc...), le coût des pénalités d'indisponibilité d'un équipement peut être l'une des variables clés dans la prise de décision stratégique de maintenance, un scénario est représenté par CP_e . Par conséquent, la suite consistera à comprendre l'impact de CP_e sur l'influence de τ . Ainsi, nous faisons varier τ de *2 mois (61 jours)* à *2 ans (732 jours)*. La question suivante servira de guide pour la suite : comment évolue l'influence de l'horizon d'ordonnancement, sur les performances de la

maintenance distribuée, lorsque le coût des pénalités d'indisponibilité est relativement faible ou élevé par rapport au coût de remplacement d'un équipement défaillant ?

4.6.2 Emplacement du dépôt et capacité des véhicules

Après avoir déterminé l'horizon optimal d'ordonnancement, la deuxième partie de cette expérience concerne la localisation du dépôt et le choix de la capacité des véhicules de transport. Le premier objectif est d'évaluer si le positionnement du dépôt au barycentre des sites est plus intéressant que la méthode la plus pertinente dans la littérature, qui positionne le dépôt à proximité de l'un des sites. Le deuxième objectif est d'évaluer l'impact de la capacité des véhicules sur les performances de la maintenance distribuée. Le troisième objectif est d'étudier l'impact d'une éventuelle extension du nombre de sites après le choix de la position géographique du dépôt. L'idée de ce dernier est d'évaluer les performances de la maintenance distribuée si des sites supplémentaires étaient ajoutés après la construction du dépôt au barycentre proposé. Les questions qui serviront de guide sont les suivantes : est-il pertinent, d'un point de vue coût et impact environnemental, de positionner le dépôt au barycentre des sites ? Quel est l'impact de la capacité des véhicules sur les performances ? Que se passerait-il si la position du dépôt était choisie pour un premier nombre de sites N et que d'autres sites sont ajoutés par la suite sans que le dépôt ne soit modifié ?

4.6.3 Réordonnancement dynamique

Une fois la conception terminée et l'ordonnancement optimisé hors ligne, la troisième partie de cette expérience consiste à simuler la mise en œuvre, en ligne, de la maintenance distribuée. L'objectif est d'évaluer l'impact des défaillances imprévues sur les performances, sans et avec l'algorithme de réordonnancement proposé. Comme expliqué plus haut, les paramètres de décision (α, δ) vont être déterminés hors ligne et le réordonnancement sera fait en fonction de ces paramètres grâce au logiciel de simulation à événements discrets, Arena. En effet il est possible de simuler le trajet des véhicules, connaissant l'ensemble des instants de début de toutes les opérations de maintenance distribuée pendant l'horizon

déterminé auparavant. Ensuite, des défaillances sont injectées, suivant la distribution de Weibull choisie pour cette expérience, et les trajets des véhicules sont automatiquement mis à jour conformément à l'algorithme ARD. Cela impliquerait dans la réalité qu'en cas de défaillances, les véhicules modifient leur trajet ou pas, suivant le process simple de permutation (swap) ou d'insertion (back-insert), en fonction de la valeur du couple (α, δ) déterminée hors ligne.

4.6.4 Étude de cas

Cette expérience considère 10 sites géographiquement distribués sur un rayon de 50 kilomètres, correspondant approximativement à une superficie comme celle du département de l'Isère en France. Chaque site dispose d'un équipement soumis à de potentielles défaillances et dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau 10. Contrairement à la distribution exponentielle habituellement utilisée dans la littérature, le choix de la distribution de Weibull permet d'étudier des équipements dont le taux de défaillance varie

Tableau 10 Données relatives aux sites et aux équipements de production

Symboles	Valeurs	Commentaires	Unités
N	10	N sites de production dispersés	-
$F_e(T \leq t)$	$1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$	Fonction de répartition de Weibull avec les paramètres η et β	-
η	1	Paramètre d'échelle de Weibull	<i>année</i>
β	{2; 3}	Paramètre de forme de Weibull	-
R	50	Les sites sont répartis de manière aléatoire dans un rayon de R	<i>km</i>
v	80	Vitesse moyenne de transport	<i>km/h</i>
τ]0; 2]	Horizon pour les opérations de maintenance	<i>année</i>
TR_e	3	Temps de maintenance/remplacement d'un équipement défaillant	<i>h</i>
CR_e	100,000	Coût de remplacement d'un équipement défaillant	€
CP_e	[10; 1000]	Coût de pénalité lié à l'attente du remplacement d'un équipement défaillant	€/h

dans le temps. Cette expérience se concentrera sur des équipements qui arrivent en fin de vie et qui nécessitent donc une plus grande attention en termes de maintenance en raison de l'augmentation du nombre de pannes. De plus, les coûts de maintenance/remplacement sont généralement élevés dans certains domaines d'application de la maintenance distribuée (ferroviaire, aéronautique, énergie, naval, etc.). Nous avons retenu une valeur de 100.000€ par opération, ce qui représente moins de 0,33 % du prix d'un TGV ("Alstom," 2016) ou 0,02% du prix d'un Airbus A380 ("Airbus," 2019).

Un seul équipement de rechange est nécessaire pour chaque opération. Les positions géographiques des 10 sites sont choisis aléatoirement dans un plan cartésien $(0, x, y)$. Ce choix aléatoire correspondrait par exemple à un cas d'application dans le domaine ferroviaire où les technicentres pourraient être considérés aléatoirement distribués ("Sites de livraison des Technicentres SNCF," 2023). Ensuite, les distances séparant les sites sont considérées Euclidiennes. La flotte des véhicules est homogène et la capacité doit être optimisée. Les caractéristiques ("Information GES des prestations de transport," 2020) de chaque véhicule sont présentées dans le tableau 11. Trois types de véhicules sont ainsi considérés, chacun ayant une vitesse nominale de 80 km/h .

- Véhicules légers : $Q = 4 \text{ équipements}$;
- Véhicules utilitaires : $Q = 6 \text{ équipements}$;
- Véhicules lourds : $Q = 8 \text{ équipements}$.

Pour chaque scénario étudié, l'expérience est répétée jusqu'à ce qu'un intervalle de confiance des résultats soit atteint, 95% pour l'ordonnancement et 99% pour le réordonnancement.

Nous avons choisi Scilab 5.5.2, un logiciel open source (Campbell et al., 2010), pour la mise en œuvre de l'algorithme OMTV. Tous les tests ont été effectués en utilisant la bibliothèque "FOSSEE Optimisation Toolbox" adaptée au MILP. Nous avons réalisé les expériences sur

Tableau 11 Données relatives aux véhicules

Symboles	Valeurs	Commentaires	Unités
<i>véhicules</i>	<i>{legers; utilitaires; lourds}</i>	Les types de véhicules	-
<i>Q</i>	{4; 6; 8}	Capacité de transport maximale	<i>Equipement</i>
<i>FE</i>	3,16	Facteur d'Emission	<i>kgCO₂/l</i>
<i>RC</i>	{0,087; 0,210; 0,330}	Ratio de Consommation	<i>l/km</i>
<i>CD</i>	2	Coût par unité de distance de transport	<i>€/km</i>
<i>CT</i>	30	Coût par unité de temps de transport	<i>€/h</i>

une machine Windows 8, 64-bit avec un Intel(R) Core (TM) i7-10850H, 2.70 GHz CPU et 32 GB RAM. Au final, plus de 2000 expériences ont été menées.

4.7 Résultats et discussion

4.7.1 Analyse et interprétation

Les résultats expérimentaux montrent que l'ordonnancement à long terme est plus intéressant en termes de coûts que les approches traditionnelles à court terme. Avec l'algorithme OMTV proposé, les coûts de maintenance ont pu être optimisés sur un horizon de deux ans. Par conséquent, l'influence des paramètres stratégiques tels que l'emplacement du dépôt et les capacités des véhicules ont été étudiés. Il a été possible pour ce cas d'étude de réduire les coûts de maintenance distribuée de plus de 50 % et les émissions de CO_2 ont été divisées par 3 environ par le choix de planifier les opérations préventives toutes les années (long-terme) au lieu de tous les 2 mois (court-terme).

4.7.1.1 Influence des coûts de pénalité

Le coût de pénalité représente la perte de revenus lorsqu'un équipement est indisponible, en raison d'une défaillance. La figure 36 illustre l'influence de ce coût sur la disponibilité moyenne des sites de production. On constate que lorsque $CP_e = 10€/h$, plus l'horizon d'ordonnancement est grand, plus la disponibilité est faible (de 0,98 si $\tau = 2$ mois à 0,01 si

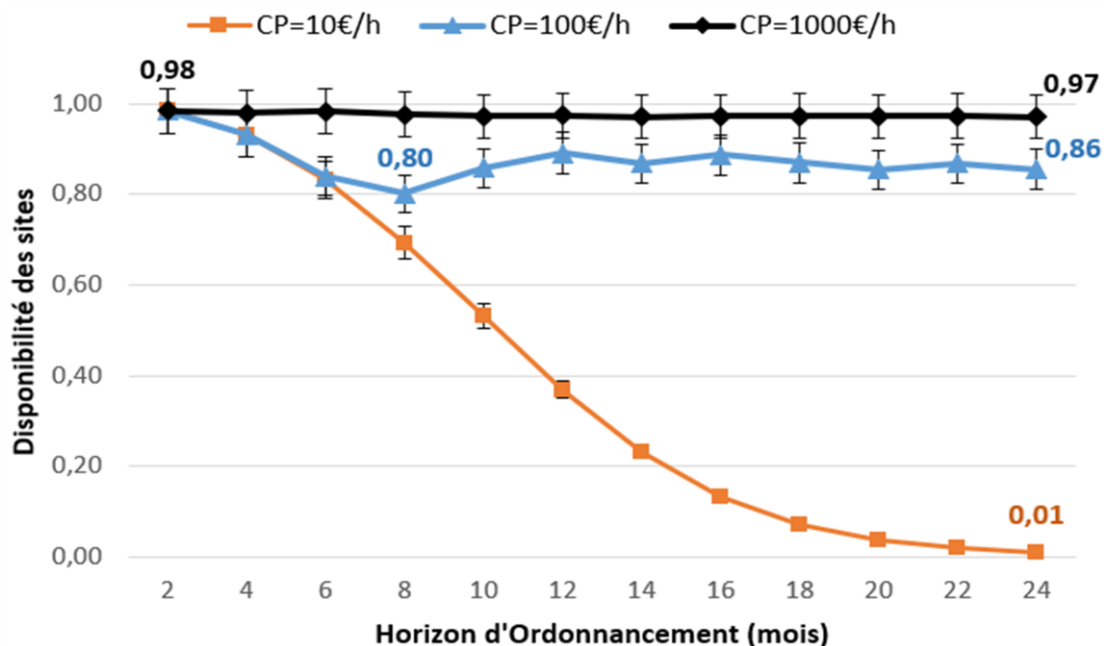


Figure 36 Impact des coûts de pénalité sur la disponibilité des sites

$\tau = 2$ années). Dans ce cas, l'ordonnancement long-terme n'a pas d'influence sur la disponibilité des sites de production. Le coût de pénalité n'est pas suffisamment élevé pour permettre à l'algorithme d'adapter le nombre d'opérations en fonction de l'horizon. En effet, comme le montre la figure 37, le nombre d'opérations par an, proposé par l'algorithme OMTV, est strictement décroissant pour $CP_e = 10\text{€/h}$. Avec un coût de pénalité plus élevé, il devrait y avoir des phases de croissance dans l'évolution du nombre d'opérations.

Si $CP_e = 1000\text{€/h}$ la disponibilité reste presque constante ($0,98 \pm 0,05$) malgré l'augmentation de l'horizon d'ordonnancement. Cela peut s'expliquer par le fait que le coût de pénalité est très élevé. L'algorithme OMTV propose un nombre élevé d'opérations préventives afin de maintenir les sites de production dans une disponibilité maximale quel que soit l'horizon choisi. Ce scénario est similaire à celui étudié par López-Santana et al., 2016 (López-Santana et al., 2016). Bien qu'il garantisse une haute disponibilité des sites de production, cette valeur du coût de pénalité ne met pas en évidence l'influence du choix de l'horizon d'ordonnancement.

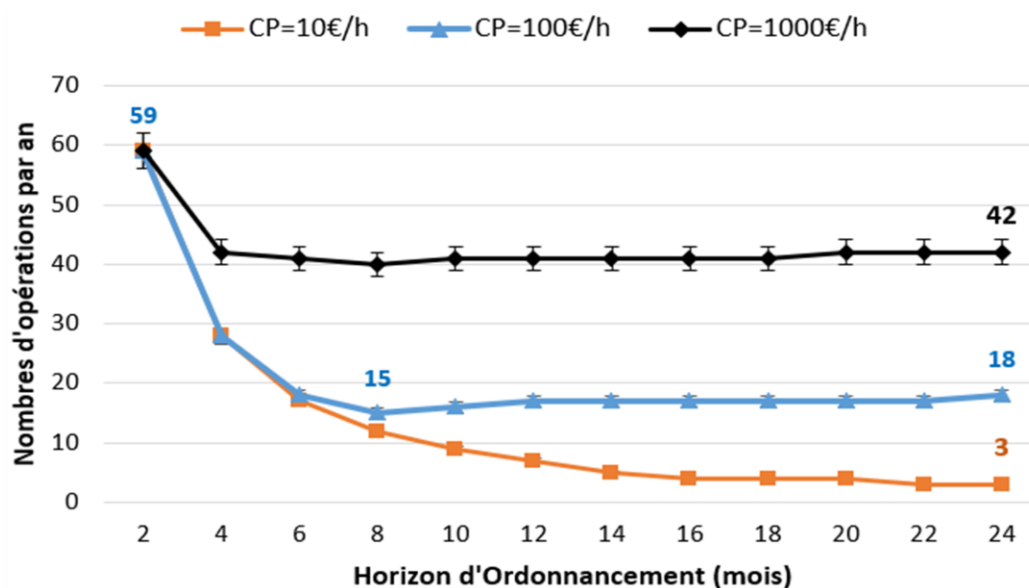


Figure 37 Impact des coûts de pénalité sur le nombre d'opérations

Si $CP_e = 100\text{€/h}$ on observe deux phases d'évolution de la disponibilité. De l'horizon 2 mois à l'horizon 8 mois, la disponibilité diminue de 0,98 à 0,80 puis augmente lentement de 0,80 à 0,86. Dans ce cas, la valeur du coût de pénalité est intéressante pour l'observation de l'influence de l'horizon de planification. Le paragraphe suivant fournit une interprétation plus approfondie de ce scénario.

4.7.1.2 Horizon d'ordonnancement optimal

La figure 38 montre l'évolution des coûts en fonction de l'horizon d'ordonnancement pour le scénario $CP_e = 100\text{€/h}$. Les 4 types de coûts peuvent ainsi être distingués : les coûts de transport $E[CT]$, les coûts des opérations $E[CO]$, les coûts d'immobilisation $E[CI]$ et les coûts totaux $E[CMD]$. On constate que les coûts de transport sont minoritaires face aux autres coûts. Les deux phases décrites ci-dessus (phase de décroissance et phase de croissance progressive) ont des effets différents sur les coûts. De 2 à 8 mois, les coûts des opérations diminuent tandis que les coûts d'immobilisation augmentent, puis les tendances s'inversent. Ces évolutions permettent aux coûts totaux d'atteindre un minimum global pour un horizon d'ordonnancement de 6 mois (de 700€/h à 350€/h), soit une réduction de 50 %. Par

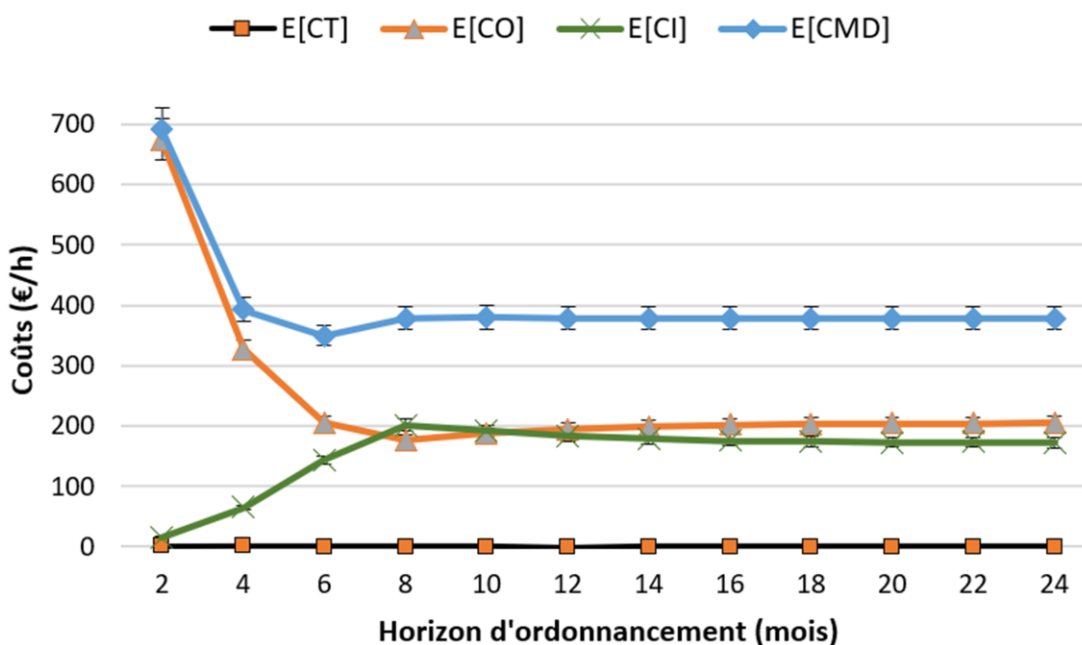


Figure 38 Influence de l'horizon temporel sur les coûts de maintenance distribuée

conséquent, pour ce scénario, il est efficace d'un point de vue coût, d'effectuer le planning des opérations de maintenance distribuée tous les six mois.

4.7.1.3 Impact environnemental

L'analyse précédente a montré que les coûts de transport sont minoritaires face aux autres coûts. Cependant, d'un point de vue émission de CO_2 il est intéressant d'étudier l'influence de l'horizon d'ordonnancement sur le transport. La figure 39 illustre l'évolution de l'empreinte carbone. On constate que si les plannings de maintenance distribuée sont faits chaque année, l'émission de CO_2 est minimale (34kg/an). De 2 mois à 12 mois d'horizon, il y a une décroissance de l'empreinte carbone (de 98kg à 34kg), puis une croissance progressive (de 34kg à 52kg). Il serait donc intéressant d'un point de vue environnemental de planifier les opérations de maintenance distribuée chaque année, pour ce cas d'étude. Il est à noter que la prise en compte des contraintes environnementales, notamment l'empreinte carbone, augmente les coûts de transport de 61% environ (2300€/an à 3800€/an). Mais comme les coûts de transports restent minoritaires vis-à-vis des autres coûts, cette augmentation pourrait être tolérée. Pour la suite de l'étude, nous avons choisi de mettre une priorité sur

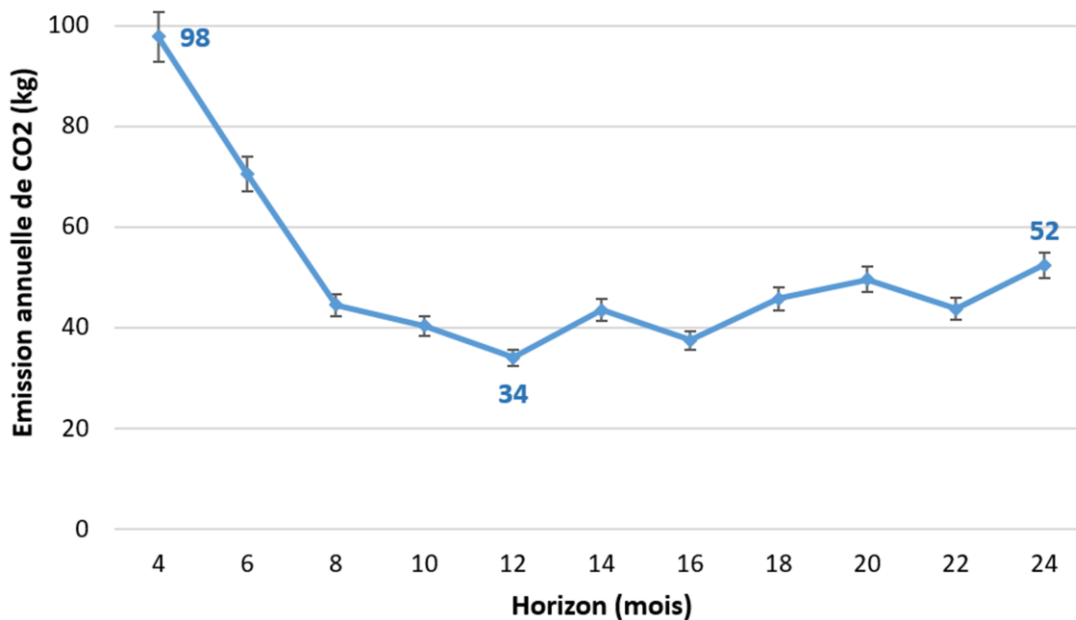


Figure 39 Emissions annuelles de CO₂ de l'étude de cas

l'impact environnemental au détriment des coûts de transport. Par conséquent, les opérations sont planifiées chaque année au lieu de tous les 6 mois.

4.7.1.4 Influence du positionnement du dépôt

Les figures 40 et 41 permettent d'observer l'influence du positionnement géographique du dépôt sur l'empreinte carbone des véhicules (figure 40) et le temps d'optimisation de la tournée annuelle (figure 41). Pour rappel, la première approche consiste à positionner le dépôt proche de l'un des sites de production, tandis que la deuxième méthode revient à le positionner au barycentre des sites. On constate que la deuxième méthode est plus performante d'un point de vue impact environnemental. Cette différence de performance devient de plus en plus accentuée si plusieurs autres sites sont rajoutés à la structure après le choix du dépôt. On obtient ainsi une différence de 12% environ après un ajout de 30 sites de production. Le temps nécessaire à l'optimisation de la tournée des véhicules est divisé par 10 environ avec la méthode proposée (la deuxième : barycentre). Par conséquent, pour ce cas d'étude il est plus pertinent, des points de vue émission de carbone et temps de calcul, de positionner le dépôt au barycentre des sites de production.

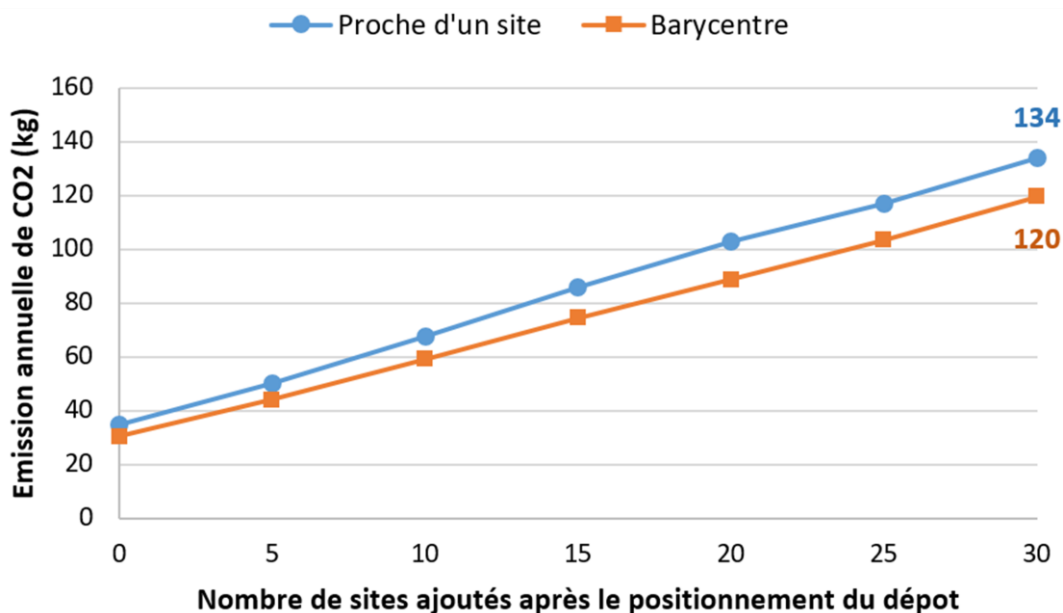


Figure 40 Influence de la méthode de positionnement du dépôt sur l'empreinte carbone

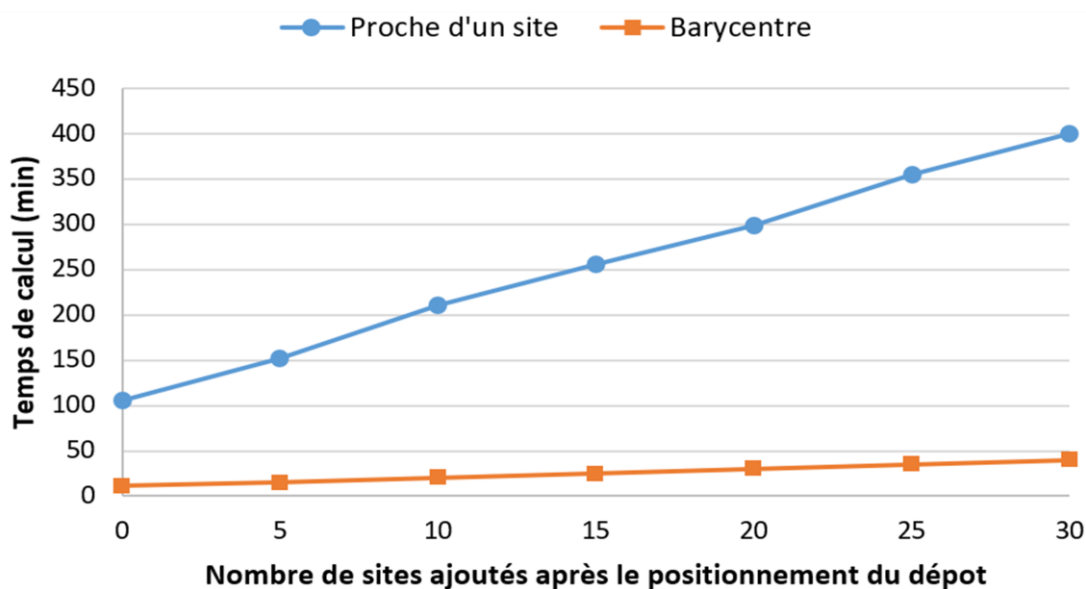


Figure 41 Influence de la méthode de positionnement du dépôt sur le temps de calcul

4.7.1.5 Influence de la capacité des véhicules

Le choix de la capacité des véhicules de transport a un impact considérable sur les émissions de CO₂ et la distance parcourue chaque année. La figure 42 représente l'évolution de ces deux indicateurs en fonction du nombre de sites de production en jeu dans la maintenance distribuée, sans tenir compte des contraintes environnementales. On constate logiquement que plus il y a de sites de production, plus grandes sont les distances et les émissions de CO₂

annuelles. Par exemple, pour 10 sites, correspondant à 0 site ajouté après le choix du dépôt, les véhicules légers parcourent 271km/an et émettent 43kg/an de CO₂ tandis que pour 40 sites ces véhicules parcourent près de 1000km/an en émettant 171kg/an. La figure 43 illustre l'influence de la capacité des véhicules en tenant compte des contraintes environnementales, i.e. de la limite maximale (147g/km) d'émission de CO₂ proposée par l'Union Européenne. On constate en moyenne une réduction de 40% de la quantité de CO₂ émis contre une augmentation de 67% de la distance parcourue, par an. Les véhicules légers sont ceux qui permettent de parcourir le moins de distance et d'émettre le moins, pour ce cas d'étude.

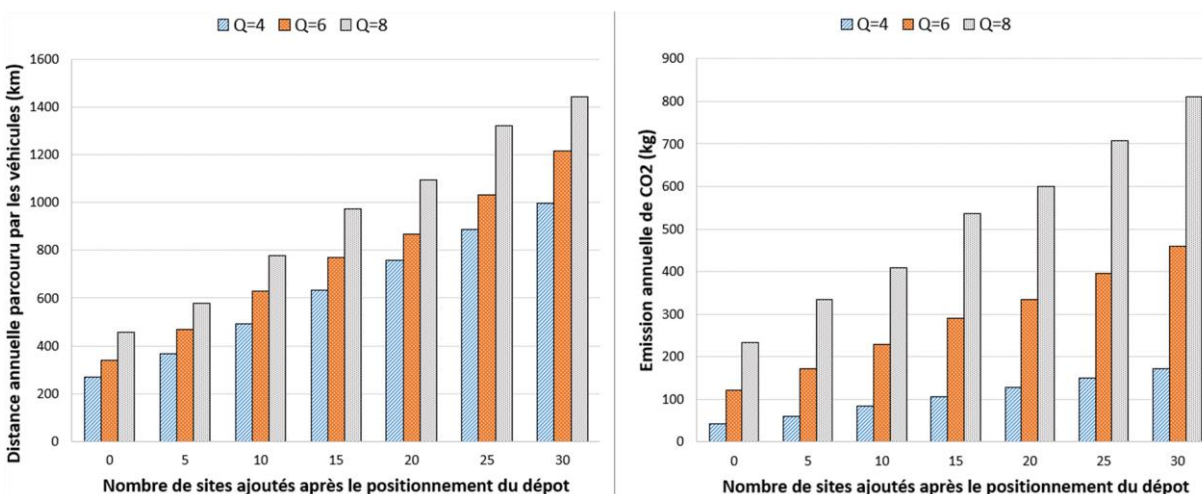


Figure 42 Influence de la capacité des véhicules : sans contraintes environnementales

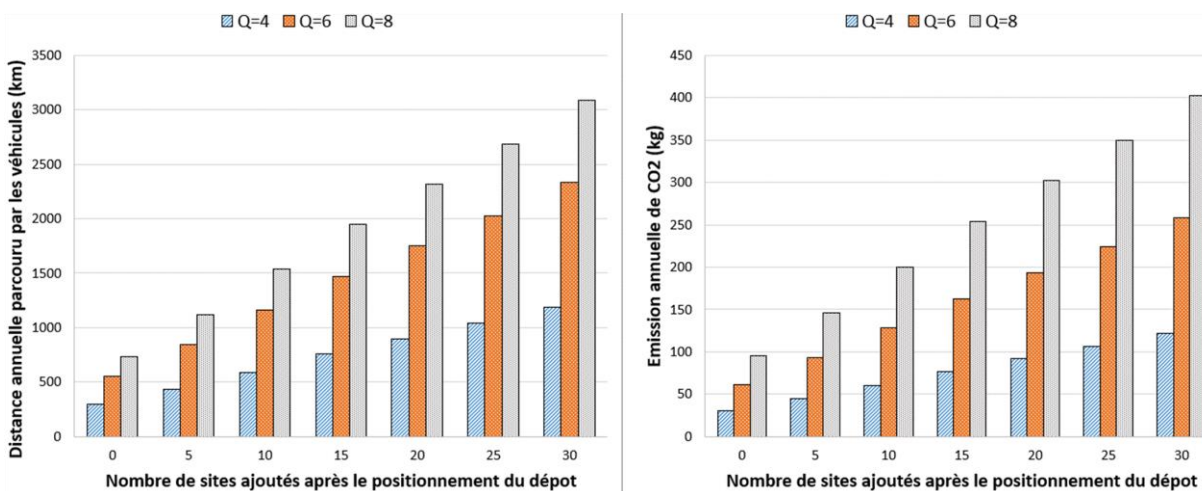


Figure 43 Influence de la capacité des véhicules : avec contraintes environnementales

4.7.1.6 Réordonnement des opérations en ligne

Une fois l'ordonnement connu hors ligne, l'implémentation de l'algorithme ARD pour le réordonnement en cas de défaillance imprévue permet d'observer l'importance des deux paramètres définis (α, δ) . Pour rappel, α permet de décider à partir de quel moment une panne peut être prise en compte ou pas. Le paramètre δ permet quant à lui de s'assurer que la modification du planning prévisionnel, suite à une panne, soit rentable. Les figures 44 et 45 illustrent l'évolution des coûts d'indisponibilité en fonction de α et δ , la première en utilisant l'opérateur back-insert, dans l'ARD, et l'opérateur swap pour le deuxième. On constate à première vue que les courbes ont les mêmes allures pour les deux opérateurs. Ceci revient à dire que pour ce cas d'étude les opérateurs swap et back-insert ont des influences similaires sur le réordonnement.

Au-delà de ce premier constat il peut être remarqué que parmi les deux paramètres choisis, pour savoir quand faire du réordonnement ou pas, l'un a plus d'influence que l'autre. En effet, les courbes à gauche des deux figures précédentes résultent des cas où $\alpha = 0$ i.e. tout imprévu/défaillance est pris en compte quel que soit son instant d'occurrence. Dans ces premiers cas, seule la valeur de δ détermine si le planning est modifié suite à un imprévu. Les courbes à droites résultent des cas où $\delta = 2000h$ (2 mois environ) sachant que cette valeur est assez grande pour considérer que seule la valeur de α devrait déterminer s'il faut modifier le planning en cas de défaillance. On remarque que δ influence grandement les coûts tandis que α presque pas. Les coûts d'indisponibilité oscillent autour de 450,000€/an environ quelle que soit la valeur de α tandis qu'ils chutent de 540,000€/an à 450,000€/an environ en fonction de δ . Pour ce cas d'étude il serait alors intéressant de prêter plus d'attention aux perturbations des heures de début des opérations préventives en cas de réordonnement qu'à l'instant d'occurrence de la défaillance. L'influence de δ permet de distinguer les 3 types de réordonnement possibles : réordonnement à perte ; réordonnement rentable et réordonnement optimal.

4.7.1.6.1 Réordonnement à perte

Un réordonnement est considéré à perte lorsqu'il ne permet pas de réduire les coûts et engendre probablement des coûts cachés liés aux perturbations des opérations (coûts qui n'ont pas été pris en compte dans cette étude). Ainsi, on remarque que pour les valeurs de δ situées entre 0h et 800h (1 mois environ) le réordonnement n'améliore pas considérablement les coûts qui oscillent toujours autour de 540,000€/an environ. Pour ces valeurs de δ il n'est pas intéressant de faire du réordonnement. En d'autres termes, le réordonnement est à perte si la limite maximale admissible de perturbation des instants de début des opérations préventives, suite à un réordonnement, est de 1 mois.

4.7.1.6.2 Réordonnement rentable

Un réordonnement est considéré rentable lorsqu'il permet de réduire les coûts. Pour les valeurs de δ strictement supérieures à 1 mois environ les coûts chutent à 450,000€/an (20% de réduction). Par conséquent, dès que la limite maximale de perturbation des opérations préventives est supérieure à 1 mois alors il est intéressant de faire du réordonnement pour toute défaillance imprévue vérifiant cette condition, concernant ce cas d'étude.

4.7.1.6.3 Réordonnement optimal

Un réordonnement est considéré optimal lorsqu'il permet de réduire les coûts avec la limite de perturbation la plus basse possible. En effet plus la limite est proche de zéro plus le nombre de défaillances pris en compte est réduit et moins pourraient entrer en jeu de potentiels coûts cachés. Pour ce cas d'étude, le réordonnement optimal correspond à la valeur de $\delta = 900h$. Par conséquent, il serait optimal de ne considérer que les défaillances qui perturbent les temps de début des opérations préventives d'au plus 900h.

4.7.2 Utilité pratique de cette étude

Comme indiqué dans l'introduction, la maintenance distribuée peut être appliquée dans plusieurs domaines, dont, par exemple le pétrole et le gaz, le ferroviaire et l'aviation. La clé est d'avoir plusieurs sites de production géographiquement distribués et une entité

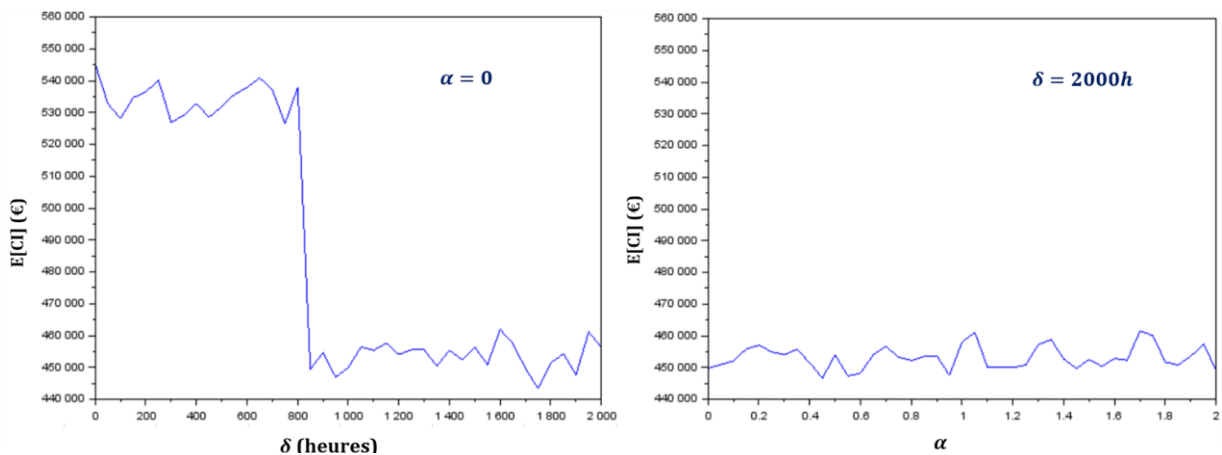


Figure 44 Influence de α et δ sur les coûts : opérateur back-insert

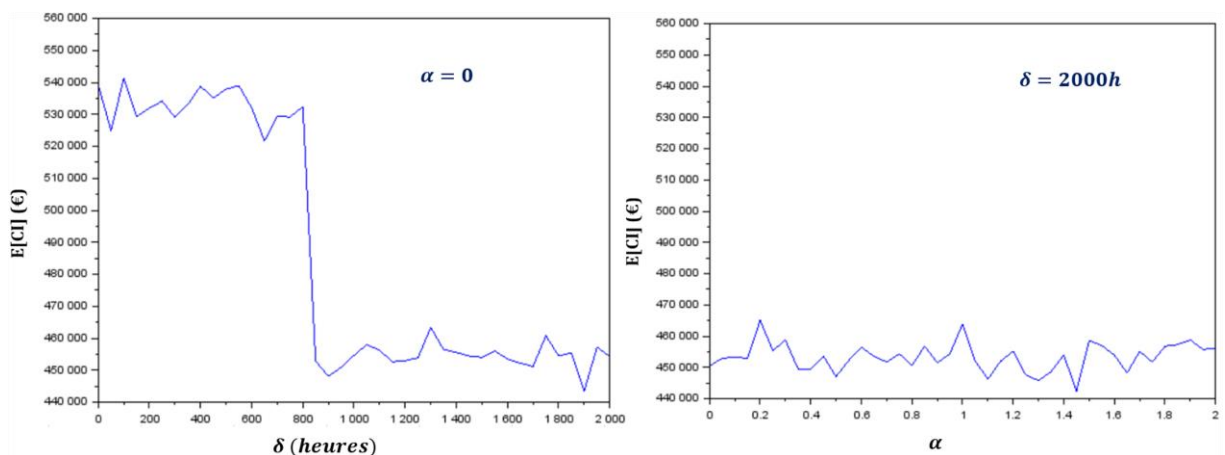


Figure 45 Influence de α et δ sur les coûts : opérateur swap

centralisée responsable de la maintenance de tous les sites. Les résultats des expériences menées mettent en évidence la pertinence de l'approche proposée pour la mise en œuvre de la maintenance distribuée. Un cas de 10 sites de production a été étudié et notre approche peut être appliquée à beaucoup plus (30 sites supplémentaires ont été testés) grâce aux heuristiques proposées pour résoudre le problème du temps de calcul.

Les sites de production ont été considérés comme hétérogènes, c'est-à-dire que chaque site dispose d'équipements différents. Cette hypothèse est proche de la réalité industrielle où les sites géographiquement distribués ont généralement des installations différentes dans des états de santé différents. Toutefois, cette étude suppose que chaque site ne possède qu'un seul équipement de production. Dans d'autres applications où il y aurait plus d'un

équipement par site, cette méthode pourrait être adaptée en ne considérant que l'équipement le plus critique par site.

La flotte de véhicules est considérée comme homogène, c'est-à-dire que tous les véhicules ont la même capacité de transport. Bien que cette hypothèse permette de prendre en compte la contrainte de capacité de la flotte, elle reste limitée pour certaines applications. Dans un cas d'étude de flotte hétérogène, l'ensemble des méthodes proposées pourrait alors être appliqué séparément à chaque type de véhicule. Une moyenne pondérée des coûts pourrait alors être utilisée pour obtenir un résultat approximatif en l'absence d'une approche plus avancée.

Dans cette étude, les résultats montrent qu'il est possible d'estimer les coûts de maintenance sur un horizon stratégique (plus de 2 ans). Cette approche permettrait aux praticiens de comparer différentes politiques de maintenance sur le long terme. Une vision large dans le temps offre la possibilité de prendre des décisions efficaces bien avant que les défaillances ne se produisent.

4.8 Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de concevoir et optimiser les opérations de maintenance distribuée. Cela impliquait plusieurs sites de production géographiquement distribués dont les équipements devaient être maintenus en bonne condition de fonctionnement. L'approche générale consistait à centraliser les opérations dans un atelier de maintenance. Ensuite une flotte de véhicules, transportant des équipements de rechange et opérateurs, était chargée de remplacer les équipements défaillants au niveau des sites et de les transporter vers l'atelier central pour une remise en état. L'originalité de ce chapitre réside dans l'ordonnancement des opérations de maintenance distribuée sur un horizon de temps long (années), le positionnement géographique de l'atelier central, le dimensionnement de la capacité des véhicules et la prise en compte d'évènements imprévus. Un ensemble de méthodes basées

sur la programmation linéaire et des heuristiques a été proposé pour assurer l'optimisation des coûts et de l'impact environnemental de la maintenance distribuée.

Une étude de cas a permis d'observer que faire de bons choix pour l'ordonnancement à long terme de la maintenance distribuée pourrait réduire les coûts jusqu'à 50 %. Cette réduction est le résultat d'une évaluation précise du nombre d'opérations nécessaires pour assurer la disponibilité des sites de production sur une longue période. Par exemple, pour l'étude menée, il était plus intéressant d'établir un planning des opérations de maintenance distribuée chaque année, que de le faire chaque jour ou tous les mois. Le positionnement de l'atelier central au barycentre pondéré des sites de production a permis de réduire le temps de calcul d'un facteur équivalent au nombre de sites de production impliqués. Les véhicules légers se sont avérés être le meilleur choix pour l'étude de cas. La prise en compte des contraintes environnementales a permis de réduire de près de 40% la quantité de CO_2 émis chaque année contre une augmentation de près de 67% des coûts de transport.

Tableau 12 Notations utilisées dans ce chapitre

Acronymes	Description	Unités
Terminologie		
AMC	Atelier de Maintenance Central	-
$E[CMD]$	Estimation des Coûts de Maintenance Distribuée	€/h
Sites de production		
N	Nombre de sites de production	-
R	Rayon de distribution des sites	km
t_{ij}, d_{ij}	Temps et distance de transport entre les sites i et j	h, km
nop_i	Nombre d'opérations de maintenance à effectuer au site i	-
D_i	Nombre d'équipements de rechange requises au site i	-
$s_o, [a_o, b_o]$	Temps de début et fenêtre temporelle de l'opération o	-
TR_e, CR_e	Durée et Coûts de remplacement/maintenance d'un équipement	h
CP_e	Coût de pénalité d'indisponibilité d'un équipement par unité de temps	€/h
F_e	Fonction de répartition des défaillances d'un équipement	-
AMC		
Ω	Ensemble des positions possibles du dépôt	-
Φ_k	Position du dépôt à l'itération k de l'optimisation	-
AMM		
Q	Capacité maximale de transport d'un véhicule	-
CD, CT	Coût unitaire de transport par km et par heure	€/km, €/h
m	Nombre de véhicules	-
y_i	Nombre d'équipements de rechange restant en stock après la visite de i	-
x_{ij}	Variable binaire de décision indiquant si un véhicule traverse un arc (i, j) dans l'ordonnancement optimal	-
$E[DMC]$		
τ	Horizon d'ordonnancement	mois
$E[CT], E[CO], E[CI]$	Estimation des Coûts de Transport, des Opérations et d'Indisponibilité	€
Autres notations		
$OMTV$	Optimisation de la Maintenance et de la Tournée des Véhicules	-
APM	Algorithme de Planification de la Maintenance	-
$AHOL$	Algorithme Heuristique d'Ordonnancement Long-terme	-

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette thèse avait pour objectif principal de proposer un ensemble de méthodologies de conception, d'évaluation de performances et d'optimisation d'une maintenance distribuée au profit d'une économie circulaire. Le but était d'améliorer la disponibilité des sites de production géographiquement distribués tout en réduisant les coûts des opérations de maintenance nécessaires. En effet, contrairement aux études sur la maintenance classique où un seul site de production est en jeu, la maintenance distribuée, traitée dans cette thèse, fait intervenir un ensemble de plusieurs sites de production géographiquement distribués. Dans le cas classique d'un seul site de production, il pourrait être évident d'affirmer qu'un seul atelier de maintenance pourrait être nécessaire et suffisant pour assurer optimalement la disponibilité du dit site. Mais qu'en est-il de plusieurs sites de production plus ou moins proches les uns des autres ? Face à cette première question, l'hypothèse majeure de cette thèse s'est reposée sur l'idée que disposer d'un seul atelier de maintenance, malgré la multitude des sites de production, permettrait de réduire les coûts tout en assurant une bonne disponibilité, grâce au principe de mutualisation.

Nous avons ainsi considéré un seul atelier de maintenance dit central ou tout simplement Atelier de Maintenance Central (AMC) qui était chargé de remettre en état les équipements provenant des différents sites de production i.e. chargé de la maintenance corrective. Pour l'acheminement des équipements, des sites de production vers l'AMC et vice versa, nous avons proposé un second atelier dit mobile (AMM). En plus du transport des équipements, L'AMM s'est vu confier la réalisation des opérations de maintenance préventive i.e. le remplacement préventif des équipements de production. Au-delà de la mutualisation des ressources à travers l'AMC et l'AMM nous avons voulu véritablement nous intéresser à l'impact environnemental des opérations de maintenance. Ainsi, l'idée a été de profiter du flux inverse créé par le transport des équipements de production, des sites de production

vers l'AMC, pour développer des stratégies d'économie circulaire. L'économie circulaire devait a priori permettre de réduire l'impact environnemental via la revalorisation des équipements irréparables ou arrivés en fin de vie.

Premièrement, nous avons recherché et développé une méthodologie de conception et d'évaluation des performances d'un AMC. Cette contribution scientifique repose sur la théorie des réseaux de files d'attente et propose un modèle d'atelier central qui prend en compte le cycle de vie des composants/équipements dans un contexte d'économie circulaire. En utilisant le modèle proposé, il a été possible de dimensionner les stocks d'un AMC et de définir une politique de mise en seconde vie des composants, dans un cas d'étude du secteur ferroviaire. Nous avons ainsi pu montrer au Chapitre 3, sur un cas d'étude, qu'il est possible de remettre en état 90% des composants en fin de vie, tout en réduisant le coût des opérations correctives de plus de 6% au bout de 10 ans. La difficulté majeure rencontrée a été l'intégration de l'évolution de l'état de santé des composants, pendant leur cycle de vie, dans le modèle de réseaux de file d'attente, sachant que ce type de modèle est conçu à la base pour des processus sans mémoire (ne s'adapte pas en fonction de l'historique des états du système modélisé).

Deuxièmement, nous avons proposé une méthodologie de conception et d'optimisation des opérations de maintenance préventive et des opérations de transport. En effet, nous avons pu concevoir un modèle prenant en compte la limite de capacité des véhicules de transport, l'état de santé des équipements de production et les contraintes environnementales (standards de l'Union Européenne), en nous basant sur la programmation linéaire et des heuristiques. Ce modèle permet d'ordonnancer les opérations de maintenance préventive et d'évaluer les coûts sur un horizon stratégique (annuel) au lieu d'un horizon opérationnel (journalier) comme le plus souvent rencontré dans la littérature. En plus, une méthode de modification du trajet des véhicules a été proposée afin de gérer les cas de défaillances

imprévues lors de la mise en œuvre du planning de maintenance préventive. Une étude de cas au Chapitre 4 a pu montrer qu'il était possible de réduire les coûts de maintenance préventive jusqu'à 50% grâce à l'évaluation précise du nombre d'opérations nécessaires pour assurer la disponibilité des sites de production sur une longue période de temps (1 an et plus). La prise en compte des contraintes environnementales a permis de réduire de près de 40% la quantité de CO_2 émis chaque année par les opérations de transport contre une augmentation de près de 67% des coûts de transport.

Les résultats obtenus dans cette thèse ont donné lieu à la rédaction de deux articles de journal, dont l'un a été publié en 2022 dans le journal IJPR (International Journal of Production Research) (Djeunang Mezafack et al., 2022a) et l'autre est dans le journal CIE (Computers & Industrial Engineering), et de 7 articles de conférences internationales, publiés de 2020 à 2023. En plus de ces contributions scientifiques majeures, cette thèse présente certains axes de progression d'un point de vue modélisation, évaluation de performances et optimisation. Ainsi, des perspectives peuvent être envisagées pour la suite de la recherche. En effet, lors de l'étude du cycle de vie des composants/équipements au Chapitre 3, il a été considéré une évolution discrète de leur état de santé dans le temps (un modèle en escalier). Une telle considération impose que pendant une certaine durée les composants gardent le même état de dégradation malgré leur utilisation. Cette hypothèse peut ne pas être convenable pour certains types de composants dont la dégradation pourrait évoluer de façon continue. Il serait donc intéressant de chercher à proposer un modèle qui représente l'évolution de l'état de santé des composants de façon continue. Par exemple, la distribution du nombre de défaillances des composants pourrait suivre une loi de Weibull au lieu de la loi exponentielle utilisée dans cette thèse. Dans cette approche continue, un modèle en réseaux de files d'attente ne pourrait plus être adapté pour l'évaluation des performances. Par conséquent, il faudrait rechercher d'autres outils de gestion de flux.

Les limites du Chapitre 4 concernent d'une part les hypothèses choisies pour la modélisation des opérations de maintenance préventive et des opérations de transport, et d'autre part les heuristiques utilisées pour l'optimisation. Tout d'abord, l'approche adoptée considère que chaque fois qu'un équipement est remis en état, il retourne à son état d'avant défaillance. Cependant, dans certains cas, la remise en état peut être imparfaite. Les recherches futures pourraient donc prendre en compte l'impact de la qualité de remise en état sur les coûts de maintenance distribuée. Deuxièmement, les coûts ont été divisés en deux parties (opérations de maintenance et opérations de transport) et deux algorithmes différents ont été appliqués pour chaque partie. Dans les futures recherches, il serait intéressant de proposer une méthode qui aborde l'optimisation conjointe de ces deux critères. Dans cette approche, un modèle linéaire pourrait être utilisé pour construire une fonction objectif combinant tous les coûts de maintenance distribuée. Dans l'avenir, les études basées sur cette thèse pourraient chercher à comparer l'architecture centralisée proposée ici avec une architecture décentralisée où chaque site de production possède son propre atelier de maintenance.

Cette thèse se positionne dans un contexte industriel où les concepts de sous-traitance, d'externalisation et de mise en réseau dans les processus de maintenance sont de plus en plus d'actualité. La maintenance distribuée, telle que nous l'avons adoptée, utilise ces concepts mais en considérant que les sites de production, l'AMC et l'AMM pourraient être des filiales d'une même entreprise. Cependant on pourrait imaginer d'autres scénarios où les sites de production appartiennent à des entreprises différentes qui externalisent le service de maintenance à une même sous-traitance. Dans ce cas, les fenêtres de temps des opérations de maintenance préventive pourraient être grandement influencées par les politiques de production des différents sites. Dans ce cas, il pourrait être intéressant d'intégrer le concept de maintenance opportuniste dans la maintenance distribuée pour rendre les opérations de la sous-traitance moins invasive pour les différentes productions et ainsi réduire les potentiels conflits d'intérêt.

Il serait également intéressant de valider les résultats obtenus dans le cadre de cette thèse grâce à des cas d'étude réels. Les domaines ferroviaire, aéronautique, pétrolier et naval sont ceux les plus évoqués dans la littérature scientifique. Les données les plus essentielles pourraient se résumer au positionnement géographique des sites de production, à l'historique des arrêts de production et au coût annuel moyen des opérations de maintenance.

REFERENCES

- 15 TGV pour Alstom [WWW Document], 2016. . Eur. 1. URL <https://www.europe1.fr/economie/15-tgv-pour-alstom-une-commande-au-prix-fort-pour-letat-2864806> (accessed 6.19.23).
- Abada, L., Boushaba, M., 2023. kn-out-of-n: F System with a Random Number of Components. *Int. J. Reliab. Qual. Saf. Eng.* 2350022. <https://doi.org/10.1142/S0218539323500225>
- Abbou, R., 2003. Contribution à la mise en oeuvre d'une maintenance centralisée: Conception et Optimisation d'un Atelier de Maintenance. PhD Diss Univ. Joseph-Fourier-Grenoble I.
- Airbus [WWW Document], 2019. . Investir. URL <https://investir.lesechos.fr/actu-des-valeurs/la-vie-des-actions/airbus-devra-baisser-le-prix-de-la380-pour-en-vendre-plus-iag-1825402> (accessed 6.19.23).
- Akbari Haghghi, S., Di Mascolo, M., Simeu-Abazi, Z., 2021. Performance evaluation of a centralized maintenance workshop with remanufacturing. Presented at the CIGI-Qualita 21 : conférence internationale Génie Industriel QUALITA 2021.
- Alali Alhouaij, A., Simeu-Abazi, Z., 2008. Modular Modeling of Maintenance Activities for Multi-Sites Structure. *IFAC Proc. Vol.* 41, 269–277. <https://doi.org/10.3182/20081205-2-CL-4009.00048>
- Allaham, H., Dalalah, D., 2022a. Optimization of maintenance tasks of spatially distributed assets with non-preemptive overtime. *Int. J. Manag. Sci. Eng. Manag.* 17, 279–294. <https://doi.org/10.1080/17509653.2021.2005701>
- Allaham, H., Dalalah, D., 2022b. MILP of multitask scheduling of geographically distributed maintenance tasks. *Int. J. Ind. Eng. Comput.* 13, 119–134.
- Assadi, M., Mobin, M., Cheraghi, H., Li, Z., 2019. An Algorithm for Performance Evaluation of Closed-Loop Spare Supply Systems With Generally Distributed Failure and Repair Times. *IEEE Trans. Reliab.* 68, 678–688. <https://doi.org/10.1109/TR.2018.2881378>
- Ayala, C.A.L., Valbuena, W.J., Santana, E.R.L., 2021. Proposal of a Dynamic Algorithm for the Maintenance and Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Ingeniería* 26, 436–449. <https://doi.org/10.14483/23448393.18482>

- Azadeh, A., Motevali Haghghi, S., Asadzadeh, S.M., Saedi, H., 2013. A new approach for layout optimization in maintenance workshops with safety factors: The case of a gas transmission unit. *J. Loss Prev. Process Ind.* 26, 1457–1465. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.09.014>
- Back Material 1, 1964. *Manag. Sci.* 10, III-
- Borcinova, Z., 2017. Two models of the capacitated vehicle routing problem. *Croat. Oper. Res. Rev.* 8, 463–469. <https://doi.org/10.17535/croorr.2017.0029>
- Cakirgil, S., Yucel, E., Kuyzu, G., 2020. An integrated solution approach for multi-objective, multi-skill workforce scheduling and routing problems. *Comput. Oper. Res.* <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.104908>
- Camci, F., 2015. Maintenance scheduling of geographically distributed assets with prognostics information. *Eur. J. Oper. Res.* <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.03.023>
- Campbell, S.L., Chancelier, J.-P., Nikoukhah, R., 2010. Modeling and Simulation in Scilab, in: Campbell, S.L., Chancelier, J.-P., Nikoukhah, R. (Eds.), *Modeling and Simulation in Scilab/Scicos with ScicosLab 4.4*. Springer, New York, NY, pp. 73–106. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5527-2_3
- Cárcel-Carrasco, J., Gómez-Gómez, C., 2021. Qualitative Analysis of the Perception of Company Managers in Knowledge Management in the Maintenance Activity in the Era of Industry 4.0. *Processes* 9, 121. <https://doi.org/10.3390/pr9010121>
- Cesaro, A., Pacciarelli, D., 2011. Performance assessment for single echelon airport spare part management. *Comput. Ind. Eng.* 61, 150–160. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.03.005>
- Chakraborty, K., Mukherjee, K., Mondal, S., Mitra, S., 2021. A systematic literature review and bibliometric analysis based on pricing related decisions in remanufacturing. *J. Clean. Prod.* 310, 127265. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127265>
- Cheng, X., Chaw, J.K., Goh, K.M., Ting, T.T., Sahrani, S., Ahmad, M.N., Abdul Kadir, R., Ang, M.C., 2022. Systematic Literature Review on Visual Analytics of Predictive Maintenance in the Manufacturing Industry. *Sensors* 22, 6321. <https://doi.org/10.3390/s22176321>
- CO₂ emission performance standards for cars and vans [WWW Document], 2023. URL https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-emissions/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/co2-emission-performance-standards-cars-and-vans_en (accessed 7.24.23).
- Ding, S.-H., Kamaruddin, S., 2015. Maintenance policy optimization—literature review and directions. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 76, 1263–1283. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6341-2>
- Djeunang Mezafack, R.A., Di Mascolo, M., Simeu-Abazi, Z., 2023a. Dynamic Rescheduling in the Context of Distributed Maintenance, in: 2023 International Conference on

- Control, Automation and Diagnosis (ICCAD). IEEE, Rome, Italy, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICCAD57653.2023.10152406>
- Djeunang Mezafack, R.A., Di Mascolo, M., Simeu-Abazi, Z., 2022a. Systematic literature review of repair shops: focus on sustainability. *Int. J. Prod. Res.* 60, 7093–7112. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.2002965>
- Djeunang Mezafack, R.A., Di Mascolo, M., Simeu-Abazi, Z., Akbari Haghghi, S., 2020. Performance evaluation of centralized maintenance workshop in the circular economy context, in: *MOSIM 2020 - 13th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation, MOSIM 2020 - 13th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation*. Agadir, Morocco.
- Djeunang Mezafack, R.A., Simeu-Abazi, Z., Di Mascolo, M., 2023b. Performance Assessment of a Closed Loop Repair Process in the Circular Economy Context, in: *IFAC 2023: The 22nd World Congress of the International Federation of Automatic Control*. International Federation of Automatic Control, Yokohama, Japan.
- Djeunang Mezafack, R.A., Simeu-Abazi, Z., Di Mascolo, M., 2022b. Distributed Maintenance: Design, Scheduling and Capacitated Routing Problem, in: *2022 8th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*. IEEE, Istanbul, Turkey, pp. 1138–1143. <https://doi.org/10.1109/CoDIT55151.2022.9804067>
- Djeunang Mezafack, R.A., Simeu-Abazi, Z., Di Mascolo, M., 2022c. Optimization of Distributed Maintenance: Design, Scheduling and Capacitated Routing Problem, in: *International Conference on Advanced Maintenance Engineering, Services and Technology (AMEST)*. Bogota, Colombia.
- Djeunang Mezafack, R.A., Simeu-Abazi, Z., Di Mascolo, M., 2022d. An approach for mastering Carbon Footprint in the context of Distributed Maintenance, in: *2022 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD)*. IEEE, Lisbon, Portugal, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICCAD55197.2022.9854037>
- Drake, J.H., Starkey, A., Owusu, G., Burke, E.K., 2020. Multiobjective evolutionary algorithms for strategic deployment of resources in operational units. *Eur. J. Oper. Res.* 282, 729–740. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.02.002>
- Equipements électriques et électroniques : données 2020 [WWW Document], 2020. . Libr. ADEME. URL <https://bibliothèque.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/5191-equipements-electriques-et-electroniques-donnees-2020.html> (accessed 5.31.23).
- Ettaye, G., Barkany, A.E., Khalfi, A.E., 2016. The integration of maintenance plans and production scheduling for a degradable multi-state system: a literature review. *Int. J. Product. Qual. Manag.* 19, 74–97. <https://doi.org/10.1504/IJPQM.2016.078017>
- Fontecha, J.E., Guaje, O.O., Duque, D., Akhavan-Tabatabaei, R., Rodriguez, J.P., Medaglia, A.L., 2020. Combined maintenance and routing optimization for large-scale sewage cleaning. *Ann. Oper. Res.* <https://doi.org/10.1007/s10479-019-03342-8>

- Gackowicz, P., 2019. General overview of maintenance strategies – concepts and approaches. *Multidiscip. Asp. Prod. Eng.* 2, 126–139. <https://doi.org/10.2478/mape-2019-0013>
- Geisendorf, S., Pietrulla, F., 2018. The circular economy and circular economic concepts—a literature analysis and redefinition. *Thunderbird Int. Bus. Rev.* 60, 771–782. <https://doi.org/10.1002/tie.21924>
- Geurtsen, M., Didden, J.B., Adan, J., Atan, Z., Adan, I., 2023. Production, maintenance and resource scheduling: A review. *Eur. J. Oper. Res.* 305, 501–529. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.03.045>
- Gross, A.J., 1970. An Approach to the Minimization of Misclassification in the Repair of Equipment. *IEEE Trans. Reliab.* R-19, 10–13. <https://doi.org/10.1109/TR.1970.5216371>
- Grunewald, M., Lukovszki, T., Schindelhauer, C., Volbert, K., 2002. Distributed maintenance of resource efficient wireless network topologies. *EURO-PAR 2002 PARALLEL Process. Proc., Lecture Notes in Computer Science.*
- Guelle, K., 2023. L'activité de remanufacturing: de la construction des repères sur les potentiels au développement des compétences pour anticiper le travail futur. (These de doctorat). Université Grenoble Alpes.
- Guide, V.D.R., Srivastava, R., Kraus, M.E., 2000. Priority scheduling policies for repair shops. *Int. J. Prod. Res.* 38, 929–950. <https://doi.org/10.1080/002075400189220>
- Gupta, D., 2003. A new algorithm to solve Vehicle Routing Problems (VRPs). *Int. J. Comput. Math.* <https://doi.org/10.1080/0020716022000005537>
- Hadidi, L.A., Al-Turki, U.M., Rahim, A., 2012. Integrated models in production planning and scheduling, maintenance and quality: a review. *Int. J. Ind. Syst. Eng.* 10, 21–50. <https://doi.org/10.1504/IJISE.2012.044042>
- Hani, Y., Amodeo, L., Yalaoui, F., Chen, H., 2007. Ant colony optimization for solving an industrial layout problem. *Eur. J. Oper. Res.* 183, 633–642. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.10.032>
- Hart, C., 2007. *Doing a literature review: releasing the social science research imagination*, Open University set book. Sage Publications, London ;
- Harzi, M., Krichen, S., 2017. Variable neighborhood descent for solving the vehicle routing problem with time windows. *Electron. Notes Discrete Math.*, 4th International Conference on Variable Neighborhood Search 58, 175–182. <https://doi.org/10.1016/j.endm.2017.03.023>
- Hedjazi, D., Layachi, F., Boubiche, D.E., 2019. A multi-agent system for distributed maintenance scheduling. *Comput. Electr. Eng.* 77, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.04.016>
- Hoffmann, C.M., Joan-Arinyo, R., 2000. Distributed maintenance of multiple product views. *Comput.-Aided Des.* 32, 421–431. [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(00\)00023-3](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(00)00023-3)

- Holmberg, K., Komonen, K., Oedewald, P., Peltonen, M., Reiman, T., Rouhiainen, V., Tervo, J., Heino, P., 2004. Safety and Reliability - Technology Review, VTT Research Report. VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo.
- Hosseini, M.M., Kerr, R.M., Randall, R.B., 2000. An inspection model with minimal and major maintenance for a system with deterioration and Poisson failures. *IEEE Trans. Reliab.* 49, 88–98. <https://doi.org/10.1109/24.855541>
- Hu, J., Wang, Y., Pang, Y., Liu, Y., 2022. Optimal maintenance scheduling under uncertainties using Linear Programming-enhanced Reinforcement Learning. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 109, 104655. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2021.104655>
- Hwang, J.Q., Samat, H.A., 2019. A Review on Joint Optimization of Maintenance with Production Planning and Spare Part Inventory Management. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 530, 12048-. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/530/1/012048>
- Ierace, S., Cavalieri, S., 2013. An Analytic Hierarchy Process Based Model for the Selection of Decision Categories in Maintenance Systems. *Manag. Prod. Eng. Rev.* 4, 37–49. <https://doi.org/10.2478/mper-2013-0014>
- Information GES des prestations de transport [WWW Document], 2020. . Ministère Écologie Énerg. Territ. URL <https://www.ecologie.gouv.fr/information-ges-des-prestations-transport> (accessed 9.22.23).
- ISO 14050:2020 [WWW Document], 2020. URL <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:14050:ed-4:v1:fr> (accessed 9.6.23).
- ISO 14224:2016 [WWW Document], 2016. URL <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14224:ed-3:v1:fr> (accessed 2.23.23).
- Jackson, D.E., 1916. Process for the production and maintenance of general analgesia or anesthesia. US1202391A.
- Jia, C., Zhang, C., 2020. Joint optimization of maintenance planning and workforce routing for a geographically distributed networked infrastructure. *IISE Trans.* <https://doi.org/10.1080/24725854.2019.1647478>
- Kaffel, H., 2001. La maintenance distribuée: concept, évaluation et mise en œuvre. Thèse Philos. Dr. Ph --Univ. Laval 2001.
- Kleber, R., Zanoni, S., Zavanella, L., 2011. On how buyback and remanufacturing strategies affect the profitability of spare parts supply chains. *Int. J. Prod. Econ.* 133, 135–142. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.04.020>
- Klos, S., Patalas-Maliszewska, J., 2013. The Impact of ERP on Maintenance Management. *Manag. Prod. Eng. Rev.* 4, 15–25. <https://doi.org/10.2478/mper-2013-0024>
- Konstantakopoulos, G.D., Gayialis, S.P., Kechagias, E.P., 2020. Vehicle routing problem and related algorithms for logistics distribution: a literature review and classification. *Oper. Res.* <https://doi.org/10.1007/s12351-020-00600-7>
- Kouakep Tchouma, M., Djeunang Mezafack, R.A., Di Mascolo, M., Simeu-Abazi, Z., 2023. Environmental impact of operations carried out in the context of distributed

- maintenance: a literature review, in: 2023 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD). IEEE, Rome, Italy, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1109/ICCAD57653.2023.10152379>
- Lawrence, S.H., Schaefer, M.K., 1984. Optimal maintenance center inventories for fault-tolerant repairable systems. *J. Oper. Manag.* 4, 175–181. [https://doi.org/10.1016/0272-6963\(84\)90031-7](https://doi.org/10.1016/0272-6963(84)90031-7)
- L'économie circulaire [WWW Document], 2023. . Ministères Écologie Énerg. Territ. URL <https://www.ecologie.gouv.fr/leconomie-circulaire> (accessed 9.4.23).
- LEE, J., 1995. Machine performance monitoring and proactive maintenance in computer-integrated manufacturing: review and perspective. *Int. J. Comput. Integr. Manuf.* 8, 370–380. <https://doi.org/10.1080/09511929508944664>
- Lee, J., Ghaffari, M., Elmeligy, S., 2011. Self-maintenance and engineering immune systems: Towards smarter machines and manufacturing systems. *Annu. Rev. Control* 35, 111–122. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2011.03.007>
- Leukel, J., González, J., Riekert, M., 2021. Adoption of machine learning technology for failure prediction in industrial maintenance: A systematic review. *J. Manuf. Syst.* 61, 87–96. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.08.012>
- Li, B., Li, X., Guo, W., Wu, S., 2013. A generalized stochastic petri-net model for performance analysis and allocation optimization of a particular repair system. *Asia-Pac. J. Oper. Res.* 30, 1250042. <https://doi.org/10.1142/S021759591250042X>
- Li, Q., Yang, Y., Jiang, P., 2022. Remote Monitoring and Maintenance for Equipment and Production Lines on Industrial Internet: A Literature Review. *Mach. Basel* 11, 12. <https://doi.org/10.3390/machines11010012>
- Liao, B., Lu, S., Jiang, T., Zhu, X., 2022. A variable neighborhood search and mixed-integer programming models for a distributed maintenance service network scheduling problem. *Int. J. Prod. Res.* ahead-of-print, 1–20. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2138612>
- Lidén, T., Kalinowski, T., Waterer, H., 2018. Resource considerations for integrated planning of railway traffic and maintenance windows. *J. Rail Transp. Plan. Manag.* 8, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2018.02.001>
- Ling, L., Xiao, X., Xiong, J., Zhou, L., Wen, Z., Jin, X., 2014. A 3D model for coupling dynamics analysis of high-speed train/track system. *J. Zhejiang Univ. Sci. A* 15, 964–983. <https://doi.org/10.1631/jzus.A14e0192>
- López-Santana, E., Akhavan-Tabatabaei, R., Dieulle, L., Labadie, N., Medaglia, A.L., 2016. On the combined maintenance and routing optimization problem. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 145, 199–214. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.09.016>
- Manco, P., Rinaldi, M., Caterino, M., Fera, M., Macchiaroli, R., 2022. Maintenance management for geographically distributed assets: a criticality-based approach. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 218, 108148. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108148>

- Mani, V., Sarma, V.V.S., 1984. Queuing Network Models for Aircraft Availability and Spares Management. *IEEE Trans. Reliab.* R-33, 257–262. <https://doi.org/10.1109/TR.1984.5221806>
- Mann, L.B., 1929. Occupational Shifts Since 1920. *J. Am. Stat. Assoc.* 24, 42–47. <https://doi.org/10.1080/01621459.1929.10506269>
- Mariescu-Istodor, R., Cristian, A., Negrea, M., Cao, P., 2021. VRPDiv: A Divide and Conquer Framework for Large Vehicle Routing Problems. *ACM Trans. Spat. Algorithms Syst.* 7, 23:1-23:41. <https://doi.org/10.1145/3474832>
- Mechefske, C.K., Zeng, C., 2006. Opportunistic electrode replacement in a robotic spot welding system. *Int. J. Comput. Integr. Manuf.* 19, 481–489. <https://doi.org/10.1080/09511920500399284>
- Metso, L., Baglee, D., Marttonen-Arola, S., 2018. Maintenance as a combination of intelligent it systems and strategies: a literature review. *Manag. Prod. Eng. Rev.* 9. <https://doi.org/10.24425/119400>
- Miao, B., Deng, Q., Zhang, L., Huo, Z., Liu, X., 2022. Collaborative scheduling of spare parts production and service workers driven by distributed maintenance demand. *J. Manuf. Syst.* 64, 261–274. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.06.012>
- Nguyen, H.S.H., Do Van, P., Vu, H.C., Iung, B., 2019. Dynamic maintenance grouping and routing for geographically dispersed production systems. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 185, 392–404. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.12.031>
- Nunes, P., Santos, J., Rocha, E., 2023. Challenges in predictive maintenance – A review. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* 40, 53–67. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.11.004>
- Ouaret, S., Kenné, J.-P., Gharbi, A., 2018. Stochastic optimal control of random quality deteriorating hybrid manufacturing/remanufacturing systems. *J. Manuf. Syst.* 49, 172–185. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.10.002>
- Pandey, D., Kulkarni, M.S., Vrat, P., 2010. Joint consideration of production scheduling, maintenance and quality policies: a review and conceptual framework. *Int. J. Adv. Oper. Manag.* 2, 1–24. <https://doi.org/10.1504/IJAOM.2010.034583>
- Phogat, S., Gupta, A.K., 2017. Identification of problems in maintenance operations and comparison with manufacturing operations: A review. *J. Qual. Maint. Eng.* 23, 226–238. <https://doi.org/10.1108/JQME-06-2016-0027>
- Renwick, J.T., Babson, P.E., 1985. Vibration Analysis--A Proven Technique as a Predictive Maintenance Tool. *IEEE Trans. Ind. Appl.* IA-21, 324–332. <https://doi.org/10.1109/TIA.1985.349652>
- Ruschel, E., Santos, E.A.P., Loures, E. de F.R., 2017. Industrial maintenance decision-making: A systematic literature review. *J. Manuf. Syst.* 45, 180–194. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.09.003>

- Sanchez, D.T., Boyacı, B., Zografos, K.G., 2020. An optimisation framework for airline fleet maintenance scheduling with tail assignment considerations. *Transp. Res. Part B Methodol.* 133, 142–164. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.12.008>
- Scudder, G.D., Hausman, W.H., 1982. Spares stocking policies for repairable items with dependent repair times. *Nav. Res. Logist. Q.* 29, 303–322. <https://doi.org/10.1002/nav.3800290211>
- Sedghi, M., Kauppila, O., Bergquist, B., Vanhatalo, E., Kulahci, M., 2021. A taxonomy of railway track maintenance planning and scheduling: A review and research trends. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 215, 107827. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107827>
- Shukla, N., Tiwari, M.K., Beydoun, G., 2019. Next generation smart manufacturing and service systems using big data analytics. *Comput. Ind. Eng.* 128, 905–910. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.12.026>
- Simeu-Abazi, Z., Alali Alhouaij, A., 2011. Optimisation of distributed maintenance: Modelling and application to the multi-factory production. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 96, 1564–1575. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.05.011>
- Simeu-Abazi, Z., Gascard, E., 2020. Implementation of a cost optimization algorithm in a context of distributed maintenance, in: 2020 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD). Presented at the 2020 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD), pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICCAD49821.2020.9260507>
- Sites de livraison des Technicentres SNCF [WWW Document], 2023. URL <https://ressources.data.sncf.com/explore/dataset/sites-de-livraison-sncf-ti-geoparts-v2/> (accessed 9.27.23).
- Smith, C.H., Schaefer, M.K., 1985. Optimal inventories for repairable redundant systems with aging components. *J. Oper. Manag.* 5, 339–349. [https://doi.org/10.1016/0272-6963\(85\)90018-X](https://doi.org/10.1016/0272-6963(85)90018-X)
- Snyder, H., 2019. Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *J. Bus. Res.* 104, 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Spanjers, L., van Ommeren, J.C.W., Zijm, W.H.M., 2005. Closed loop two-echelon repairable item systems. *Spectr.* 27, 369–398. <https://doi.org/10.1007/s00291-004-0190-6>
- Spliet, R., Gabor, A.F., Dekker, R., 2014. The vehicle rescheduling problem. *Comput. Oper. Res.* 43, 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.09.009>
- Tang, H., Miller-Hooks, E., Tomastik, R., 2007. Scheduling technicians for planned maintenance of geographically distributed equipment. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* 43, 591–609. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2006.03.004>
- The butterfly diagram: visualising the circular economy [WWW Document], 2023. URL <https://ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram> (accessed 5.31.23).

- Van Horenbeek, A., Buré, J., Cattrysse, D., Pintelon, L., Vansteenwegen, P., 2013. Joint maintenance and inventory optimization systems: A review. *Int. J. Prod. Econ.* 143, 499–508. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.04.001>
- Visentini, M.S., Borenstein, D., Li, J.-Q., Mirchandani, P.B., 2014. Review of real-time vehicle schedule recovery methods in transportation services. *J. Sched.* 17, 541–567. <https://doi.org/10.1007/s10951-013-0339-8>
- 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. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 215, 107872. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107872>
- Wang, K., Djurdjanovic, D., 2018. Joint Optimization of Preventive Maintenance, Spare Parts Inventory and Transportation Options for Systems of Geographically Distributed Assets. *MACHINES*. <https://doi.org/10.3390/machines6040055>
- Wang, L., Chu, J., Mao, W., 2008. An optimum condition-based replacement and spare provisioning policy based on Markov chains. *J. Qual. Maint. Eng.* 14, 387–401. <https://doi.org/10.1108/13552510810909984>
- Wang, Z., Cui, B., Feng, Q., Huang, B., Ren, Y., Sun, B., Yang, D., Zuo, Z., 2019. An agent-based approach for resources' joint planning in a multi-echelon inventory system considering lateral transshipment. *Comput. Ind. Eng.* 138, 106098. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106098>
- World Bank Open Data [WWW Document], 2023. . World Bank Open Data. URL <https://data.worldbank.org> (accessed 9.11.23).
- Wu, Z., Liu, W., Nie, W., 2021. Literature review and prospect of the development and application of FMEA in manufacturing industry. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 112, 1409–1436. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06425-0>
- Yulong, L., Chi, Z., Chuanzhou, J., Xiaodong, L., Yimin, Z., 2019. Joint optimization of workforce scheduling and routing for restoring a disrupted critical infrastructure. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106551>
- Zheng, T., Ardolino, M., Bacchetti, A., Perona, M., 2021. The applications of Industry 4.0 technologies in manufacturing context: a systematic literature review. *Int. J. Prod. Res.* 59, 1922–1954. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1824085>
- Zhu, S., Jaarsveld, W. van, Dekker, R., 2020. Spare parts inventory control based on maintenance planning. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 193, 106600. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106600>
- Zijm, W.H., Avşar, Z.M., 2003. Capacitated two-indenture models for repairable item systems. *Int. J. Prod. Econ., Proceedings of the Eleventh International Symposium on Inventories* 81–82, 573–588. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(02\)00360-2](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(02)00360-2)