

Titre: Approche holistique de diagnostic de stratégies de maintenance
Title: basée sur l'analyse de données

Auteur: Lilas Chabert
Author:

Date: 2025

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Chabert, L. (2025). Approche holistique de diagnostic de stratégies de maintenance basée sur l'analyse de données [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/67734/>
Citation:

Document en libre accès dans PolyPublie Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/67734/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Robert Pellerin, & Bruno Agard
Advisors:

Programme: Maîtrise recherche en génie industriel
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Approche holistique de diagnostic de stratégies de maintenance basée sur
l'analyse de données**

LILAS CHABERT

Département de mathématiques et de génie industriel

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie industriel

Août 2025

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

**Approche holistique de diagnostic de stratégies de maintenance basée sur
l'analyse de données**

présenté par **Lilas CHABERT**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Camélia DADOUCHI, présidente

Robert PELLERIN, membre et directeur de recherche

Bruno AGARD, membre et codirecteur de recherche

Ambre DUPUIS, membre

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à M. Robert PELLERIN et M. Bruno AGARD, respectivement directeur et co-directeur de recherche, pour leur encadrement rigoureux, leur disponibilité et leurs conseils avisés tout au long de ce projet. Leur expertise et leur confiance ont été déterminantes dans l'aboutissement de ce travail.

Je remercie également les équipes de l'entreprise partenaire, qui m'ont accueillie au sein de leur organisation avec bienveillance, et ont grandement contribué au bon déroulement du projet. Je pense notamment aux gestionnaires, aux experts en maintenance et aux analystes qui ont partagé leurs connaissances opérationnelles, leurs données et leur temps avec patience et implication, rendant possible l'application concrète de la méthode développée.

Je tiens aussi à remercier l'organisme MITACS qui, en tant que partenaire de liaison entre le milieu académique et industriel, a contribué au financement de ce projet et m'a permis de réaliser cette recherche dans un cadre professionnel enrichissant, au plus près des enjeux du monde de l'industrie.

Enfin, je remercie sincèrement mes proches, amis et collègues de maîtrise, notamment les membres du Laboratoire en Intelligence des Données, pour leur présence, leur soutien et leurs conseils tout au long de cette aventure. Leur accompagnement m'a été précieux dans les moments de doute comme dans les réussites.

RÉSUMÉ

La performance des stratégies de maintenance joue un rôle déterminant dans la fiabilité, la disponibilité et l'efficacité opérationnelle des équipements. Malgré la multiplication des données disponibles grâce aux systèmes ERP et à la numérisation des processus, ces données restent souvent sous-exploitées pour ajuster les stratégies de maintenance existantes. La majorité des travaux dans la littérature se concentrent sur la définition théorique d'une politique de maintenance optimale, sans proposer de méthodes concrètes pour évaluer et améliorer les pratiques déjà mises en place. Ce mémoire propose de combler cette lacune en développant une méthode de diagnostic holistique, fondée sur l'analyse de données historiques et adaptée à la complexité d'une flotte d'équipements hétérogènes aux comportements divers.

La méthode proposée repose sur une démarche structurée en trois étapes complémentaires : (1) un diagnostic préliminaire visant à comprendre les pratiques de maintenance actuelles et à repérer des tendances et déséquilibres potentiels ; (2) une identification des composants critiques, basée sur plusieurs paramètres représentatifs de leurs besoins en maintenance ; et (3) une évaluation détaillée des plans d'entretien selon trois axes : la pertinence des intervalles d'entretien, la criticité des défaillances associées, et l'efficacité des processus d'exécution. Chaque axe est représenté par un ensemble d'indicateurs calculés à partir des données de maintenance.

Cette méthode a été appliquée à un cas réel en collaboration avec une grande organisation de transport en commun, désireuse de réévaluer ses politiques d'entretien préventif. L'analyse a permis de dresser un diagnostic complet des stratégies de maintenance appliquées à la flotte de métros, et de détecter les plans d'entretien les plus critiques selon différents profils de sous-performance. La méthodologie développée a ainsi permis de cibler les composants les plus problématiques, d'identifier des cas suspects de sur- ou sous-maintenance, et de structurer les résultats dans un tableau de bord interactif conçu comme un outil d'aide à la décision permettant de soutenir les actions d'ajustement des politiques d'entretien.

En permettant une exploitation rigoureuse de données déjà collectées, mais rarement valorisées, cette approche apporte un support concret pour l'aide à la décision et s'inscrit dans une logique d'amélioration continue de la maintenance. Elle est par ailleurs transférable à d'autres organisations industrielles confrontées à des problématiques similaires de gestion de flottes complexes et d'optimisation de la performance de leurs pratiques d'entretien.

ABSTRACT

The performance of maintenance strategies plays a key role in ensuring the reliability, availability, and operational efficiency of equipment. Despite the growing availability of data enabled by ERP systems and the digitalization of processes, such data remains largely underutilized when it comes to evaluating and adjusting existing maintenance strategies. Most studies in the literature focus on the theoretical definition of an optimal maintenance policy, without providing practical methods to assess and improve those already in place. This thesis aims to bridge that gap by developing a holistic diagnostic method based on historical data analysis, tailored to the complexity of a heterogeneous fleet of equipment with diverse operational behaviors.

The proposed approach is structured around three complementary steps: (1) a preliminary diagnostic to characterize current maintenance practices and identify potential trends and imbalances; (2) the identification of critical components based on multiple parameters reflecting their maintenance needs; and (3) a detailed evaluation of maintenance plans along three dimensions: the relevance of maintenance intervals, the criticality of associated failures, and the effectiveness of execution processes. Each dimension is assessed using a set of indicators derived from maintenance data.

The method was applied to a real-world case study in collaboration with a major public transit operator seeking to reassess its preventive maintenance policies. The analysis enabled a comprehensive diagnosis of the maintenance strategies implemented across a metro fleet and identified the most critical plans based on various underperformance profiles. The developed methodology enabled the organization to identify the most problematic components, detect potential cases of over- or under-maintenance, and present the results in an interactive dashboard designed as a decision-support tool to guide the adjustment of maintenance policies.

By enabling the rigorous use of data that is already collected but often underexploited, this approach provides a concrete foundation for decision-making. It supports a continuous improvement process in maintenance. Moreover, it is transferable to other industrial organizations facing similar challenges in managing complex fleets and optimizing the performance of their maintenance practices.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ	IV
ABSTRACT	V
TABLE DES MATIÈRES	VI
LISTE DES TABLEAUX	X
LISTE DES FIGURES	XII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XIII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	4
2.1 Définition des concepts	4
2.1.1 Maintenance	4
2.1.2 Stratégie de maintenance	4
2.1.3 Performance de la maintenance	5
2.1.4 Diagnostic	6
2.2 Protocole de recherche et résultats	6
2.2.1 Protocole de recherche.....	6
2.2.2 Méthodes d'évaluation d'une stratégie de maintenance	10
2.2.2.1 Analyse exploratoire des données de maintenance	11
2.2.2.2 Indicateurs de mesure de la performance	12
2.2.2.3 Méthodes d'évaluation de la stratégie de maintenance à partir des données historiques	13
2.2.3 Méthodes d'optimisation d'une stratégie de maintenance	16
2.3 Revue critique	19

2.4	Conclusion	21
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE		23
3.1	Objectifs de recherche	23
3.2	Méthodologie de recherche	24
3.3	Conclusion	26
CHAPITRE 4 DÉVELOPPEMENT DE LA MÉTHODE DE DIAGNOSTIC.....		28
4.1	Compréhension du cas d'étude	28
4.1.1	Contexte	28
4.1.2	Présentation du partenaire industriel	29
4.1.2.1	Structure de l'organisation	29
4.1.2.2	Processus de maintenance : division des métros	29
4.1.2.3	Processus de maintenance : division des autobus	30
4.1.2.4	Stratégies de maintenance	31
4.2	Compréhension des données	33
4.2.1	Source de données	33
4.2.2	Types de données	33
4.2.3	Données et attributs pertinents	35
4.3	Préparation des données	37
4.3.1	Extraction et transformation des données	37
4.3.1.1	Ordres de maintenance et données de consommations	37
4.3.1.2	Avis de maintenance	39
4.3.1.3	Données liées aux postes techniques	40
4.3.1.4	Données sur la maintenance préventive	41
4.3.2	Classification des ordres de maintenance	42

4.3.2.1	Classification pour la division des métros	42
4.3.2.2	Classification pour la division des bus	44
4.4	Développement de la méthode.....	46
4.4.1	Rappel du contexte et des objectifs du diagnostic	47
4.4.2	Diagnostic préliminaire des stratégies de maintenance	49
4.4.3	Identification des composants critiques.....	50
4.4.4	Évaluation des plans de maintenance préventive	51
4.4.4.1	Méthode d'évaluation de la maintenance préventive.....	52
4.4.4.2	Sélection des indicateurs de maintenance.....	52
4.5	Conclusion.....	55
CHAPITRE 5 APPLICATION DE LA MÉTHODE ET ÉVALUATION		56
5.1	Application au cas d'étude	56
5.1.1	Données utilisées pour l'application de la méthode	56
5.1.2	Stratégies de maintenance préventive dans la division des métros.....	57
5.1.3	Association des données d'avis correctifs aux plans d'entretien	58
5.1.4	Calcul des indicateurs de maintenance	60
5.1.5	Construction du tableau de bord	61
5.2	Présentation des résultats.....	64
5.2.1	Diagnostic préliminaire des stratégies de maintenance	64
5.2.2	Identification des composants critiques.....	75
5.2.3	Évaluation des plans de maintenance préventive	80
5.3	Validation de la méthode.....	88
5.4	Conclusion.....	92
CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		93

RÉFÉRENCES.....	96
-----------------	----

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Liste des articles sélectionnés	8
Tableau 2.2 : Résumé des méthodes d'évaluation de la stratégie de maintenance	15
Tableau 2.3 : Résumé des méthodes d'optimisation de la stratégie de maintenance	18
Tableau 4.1 : Champs de données disponibles sur SAP et sélectionnés pour l'analyse	36
Tableau 4.2 : Structure de la table des ordres de maintenance	38
Tableau 4.3 : Structure de la table des consommations.....	39
Tableau 4.4 : Structure de la table des avis correctifs	40
Tableau 4.5 : Structure de la table des plans d'entretien et besoins matières	41
Tableau 4.6 : Types d'ordres utilisés dans la division des métros.....	42
Tableau 4.7 : Types d'ordres utilisés dans la division des autobus	44
Tableau 4.8 : Paramètres retenus pour l'évaluation et la comparaison des composants.....	50
Tableau 4.9 : Indicateurs de performance sélectionnés pour l'évaluation des plans de MP	54
Tableau 5.1 : Répartition des activités de maintenance préventive dans la division des métros..	65
Tableau 5.2 : Répartition des activités de maintenance corrective dans la division des métros...	65
Tableau 5.3 : Comparatif de la stratégie de maintenance entre les deux types de matériel roulant	66
Tableau 5.4 : Nombre et nature des défaillances par type de matériel roulant	69
Tableau 5.5 : Kilométrage moyen des trains selon leurs besoins de maintenance	72
Tableau 5.6 : Résultats des sous-ensembles les plus critiques pour chaque type de métro.....	78
Tableau 5.7 : Résultats des équipements les plus critiques pour chaque type de métro	79
Tableau 5.8 : Plans les plus critiques selon le score de criticité global.....	82
Tableau 5.9 : Plans les plus critiques au niveau de l'intervalle de maintenance	85
Tableau 5.10 : Plans les plus critiques au niveau de la criticité des défaillances	85

Tableau 5.11 : Plans les plus critiques au niveau de l'efficacité des processus	86
Tableau 5.12 : Plans d'entretien qui semblent associés à de la sur-maintenance.....	87
Tableau 5.13 : Plans d'entretien qui semblent associés à de la sous-maintenance.....	87

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1 : Méthodologie CRISP-DM	26
Figure 4.1 : Structure du partenaire industriel	29
Figure 4.2 : Classification des ordres de maintenance – division des métros.....	44
Figure 4.3 : Classification des ordres de maintenance – division des autobus	46
Figure 4.4 : Méthode d'évaluation proposée	48
Figure 5.1 : Structure des plans d'entretien dans la division des métros	58
Figure 5.2 : Démarche suivie pour l'assignation d'un plan d'entretien à un avis correctif	60
Figure 5.3 : Vue du tableau de bord développé pour l'évaluation des plans d'entretien	63
Figure 5.4 : Ratios MP/MC dans la division des métros	66
Figure 5.5 : Évolution du nombre d'ordres, des consommations et des heures de travail en fonction de la part de kilométrage parcouru par chaque type de matériel roulant	67
Figure 5.6 : Ratio MP/MC par sous-ensemble, durées de travail moyennes et nombre d'ordres total (annotations du haut)	68
Figure 5.7 : Ratios MP/MC dans la division des autobus.....	69
Figure 5.8 : Nombre d'avis correctifs par priorité	70
Figure 5.9 : Nombre d'avis correctifs par année vs Taux de MP par train	71
Figure 5.10 : Nombre d'avis correctifs vs Stratégie de maintenance par sous-ensemble	72
Figure 5.11 : Nombre d'avis correctifs par année selon le kilométrage du train.....	74
Figure 5.12 : Nombre d'avis correctifs par année et par type d'avis selon le kilométrage du train	74
Figure 5.13 : Diagramme de dispersion des sous-ensembles selon leur nombre total d'ordres préventifs et correctifs.....	77
Figure 5.14 : Box-plot des scores de criticité globaux des plans d'entretien évalués	82
Figure 5.15 : Box-plot des scores de criticité des plans d'entretien pour chaque axe.....	84
Figure 5.16 : Démarche suivie pour la validation de la méthode proposée	89

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AMDEC	Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité
CRISP-DM	<i>Cross-Industry Standard Process for Data Mining</i>
CVC	Chauffage, ventilation et climatisation
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
MA-CAD	<i>Maintenance Concept Adjustment and Design</i>
MC	Maintenance corrective
MM	<i>Materials Management</i>
MP	Maintenance préventive
MPI(s)	Indicateur(s) de Performance de la Maintenance
MPM	Mesure de la Performance de la Maintenance
MDBF	<i>Mean Distance Between Failures</i> : Distance moyenne entre les défaillances
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i> : Durée moyenne entre les défaillances
MTTM	<i>Mean Time To Maintain</i> : Durée moyenne de maintenance
MTTR	<i>Mean Time To Repair</i> : Durée moyenne de réparation
NLP	<i>Natural Language Processing</i> : Traitement du langage naturel
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i> : Efficacité globale des équipements
PM	<i>Plant Maintenance</i>
RAMS	<i>Reliability, Availability, Maintainability and Safety</i> : Fiabilité, disponibilité, maintenabilité et sécurité
RCM	<i>Reliability-Centered Maintenance</i> : Maintenance centrée sur la fiabilité
SAP	<i>Systems, Applications and Products for data processing</i>

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

La maintenance s'impose aujourd'hui comme un enjeu stratégique dans la performance des entreprises industrielles, en impactant directement la fiabilité des équipements, l'efficacité des processus, la continuité des opérations et la maîtrise des coûts. Dans un contexte concurrentiel croissant, elle constitue un levier essentiel pour améliorer la rentabilité, prolonger la durée de vie des actifs et garantir la satisfaction des clients. Ces enjeux sont d'autant plus importants dans le secteur des transports en commun, où un taux de service élevé doit être assuré malgré des contraintes opérationnelles fortes, des exigences croissantes en matière de ponctualité et de qualité du service attendues par les usagers, ainsi qu'une concurrence accrue des autres modes de transport (Tubis & Werbińska-Wojciechowska, 2017). Contrairement au cas de l'industrie manufacturière, le choix de la stratégie d'entretien du matériel roulant impacte également le confort et la sécurité des passagers. De plus, si trop d'actifs sont simultanément immobilisés, l'organisation risque de ne pas être capable de desservir l'intégralité des lignes de transport du réseau, conduisant inévitablement à une insatisfaction des adhérents payant pour ces services.

Dans ce cadre, le choix de la stratégie de maintenance optimale s'avère souvent un processus complexe. Une bonne stratégie permet de trouver un équilibre entre la maintenance préventive, qui vise à éviter les pannes, et la maintenance corrective, réalisée après une défaillance. La définition d'intervalles d'entretien optimaux est un enjeu critique : trop courts, ils entraînent une sur-maintenance et des coûts superflus ; trop longs, ils augmentent les risques de pannes et d'arrêts de production coûteux. Ainsi, il est nécessaire de trouver un équilibre entre performance, risques et coûts (Hamasha et al., 2023). Ceci repose sur une bonne connaissance du comportement des équipements, des conditions d'exploitation et une étude approfondie des données de maintenance disponibles. Or, la quantité de données à analyser, la faible fréquence de certains événements ou l'absence d'indicateurs fiables rendent cette tâche particulièrement difficile. Un défi supplémentaire vient s'ajouter pour les organisations avec un large catalogue d'équipements, aux caractéristiques et comportements variés, comme c'est le cas pour une compagnie de transports en commun.

Une fois la stratégie de maintenance définie et mise en œuvre, il s'agit alors de vérifier qu'elle reste adaptée aux besoins réels et aux évolutions du contexte opérationnel. Le maintien d'une stratégie de maintenance efficace exige donc une évaluation régulière de sa performance, afin d'identifier

les écarts entre théorie et réalité et de faire des ajustements en fonction des besoins réels. Sans un suivi rigoureux, l'entreprise court le risque de maintenir des pratiques inefficaces et de perdre en réactivité. Dans cette perspective, le diagnostic de la stratégie de maintenance constitue une étape préalable incontournable : il permet d'établir un état des lieux des performances, d'identifier les points forts et les axes d'amélioration, et de baser toute décision d'optimisation sur des données fiables. Mais les outils pour mener ce diagnostic font souvent défaut, ou ne sont pas adaptés à une approche globale, intégrée et exploitable à l'échelle opérationnelle. Des difficultés peuvent également être rencontrées lors de la collecte et de l'analyse des données, notamment pour les composants avec une faible fréquence de maintenance (Ge et al., 2023).

L'émergence de l'industrie 4.0 et la numérisation croissante offrent aujourd'hui de nouvelles opportunités pour améliorer la prise de décisions en matière de maintenance, grâce à la collecte et l'analyse massive de données. Ces technologies permettent de mieux anticiper les défaillances, d'optimiser les interventions et de passer d'une maintenance réactive à une maintenance proactive, voire prédictive (Pincioli et al., 2023). Cependant, leur mise en œuvre représente un investissement lourd et un défi en termes d'intégration, en particulier dans des contextes où les équipements sont nombreux, hétérogènes, et ne peuvent pas être tous équipés de capteurs intelligents ou de systèmes de surveillance.

L'objectif de ce travail est de **développer une méthode de diagnostic structurée des stratégies de maintenance**, à partir de l'exploitation des données historiques issues d'un système de gestion intégré. Réalisée en collaboration avec un partenaire industriel, cette démarche s'appuie sur un cas réel dans le domaine du transport en commun, avec pour ambition de répondre à des problématiques concrètes. La contribution principale réside dans le développement d'un cadre d'analyse holistique, permettant à la fois d'évaluer la performance des plans mis en place, de prioriser les efforts d'optimisation et de dégager des pistes d'amélioration fondées sur des indicateurs quantitatifs. Cette approche vise à fournir aux gestionnaires de maintenance un outil d'aide à la décision capable de détecter les sous-ensembles critiques et d'identifier les écarts de performance. Adaptée aux spécificités du cas étudié, notamment la diversité des actifs et l'hétérogénéité des pratiques de maintenance, cette méthode se veut également généralisable à d'autres contextes industriels confrontés à des enjeux similaires.

Ce mémoire est structuré en six chapitres. Le chapitre 2 propose une revue de littérature sur les méthodes d'évaluation et d'optimisation des stratégies de maintenance. Le chapitre 3 précise les objectifs de l'étude et la démarche méthodologique adoptée. Le chapitre 4 décrit le développement de la méthode proposée adapté de la méthodologie CRISP-DM, depuis la compréhension du cas d'étude jusqu'à la construction de la méthode de diagnostic. Le chapitre 5 présente l'application de cette méthode au cas d'étude, ainsi que les résultats obtenus et leur utilisation pour valider la méthode proposée. Enfin, le chapitre 6 revient sur les contributions de ce travail, ses limites et propose des pistes d'amélioration pour de futurs travaux.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

L'objectif de ce chapitre est de présenter les articles scientifiques pertinents pour notre étude. Tout d'abord, les principaux concepts qui seront au cœur de ce mémoire sont définis. Ensuite, la stratégie utilisée pour identifier les différents travaux en lien avec le sujet de recherche sera explicitée. Les articles issus de cette revue de littérature seront alors présentés. Enfin, une revue critique des résultats permettra d'identifier les problématiques soulevées par les auteurs et les limitations des précédents travaux.

2.1 Définition des concepts

Cette section a pour but d'introduire les concepts fondamentaux liés au sujet, afin de garantir une compréhension claire de la suite du mémoire et de poser un cadre théorique solide pour l'analyse.

2.1.1 Maintenance

Selon la norme NF EN 13306, la maintenance est définie comme « l'ensemble des actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise » (AFNOR, 2001). Elle englobe donc toutes les activités et procédures, planifiées ou non, qui sont entreprises pour assurer l'accessibilité constante des équipements opérationnels. Elle a pour objectifs principaux la réduction du nombre et de la durée des interruptions, le maintien des équipements en bon état de fonctionnement, la maximisation de la disponibilité et de l'efficacité de l'équipement, la minimisation des coûts opérationnels, et l'assurance de la sécurité des biens et des hommes. C'est un élément essentiel de l'efficacité de la production.

2.1.2 Stratégie de maintenance

Une stratégie de maintenance est définie dans la norme NF EN 13306 comme une « méthode de management utilisée en vue d'atteindre les objectifs de maintenance » (AFNOR, 2001). Il s'agit de l'ensemble des politiques, des pratiques et des plans mis en place pour gérer l'entretien et la réparation des équipements ou des infrastructures d'une organisation. Elle consiste à déterminer les actions de maintenance à entreprendre, la fréquence et les conditions dans lesquelles elles doivent être réalisées, en tenant compte des contraintes opérationnelles, des coûts et des objectifs de performance. Le choix de la stratégie de maintenance est crucial, car il impacte directement

l'efficacité opérationnelle, et ainsi la durabilité de l'organisation sur le marché (Hamasha et al., 2023).

Il existe différents types et stratégies de maintenance. Les principales sont la maintenance préventive, la maintenance corrective et la maintenance prédictive. En fonction du secteur, des ressources disponibles et des objectifs de performance, une combinaison de différentes approches de maintenance peut être adoptée pour obtenir les meilleurs résultats.

Dans la suite de l'étude, nous nous concentrerons principalement sur la maintenance préventive et la maintenance corrective. Différents dérivés et définitions de chaque type de maintenance peuvent être trouvés dans la littérature. La norme NF EN 13306 donne les définitions suivantes :

- Maintenance préventive : « Maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien » ; et
- Maintenance corrective : « Maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise ».

2.1.3 Performance de la maintenance

La performance de la maintenance désigne l'efficacité et l'efficience des activités de maintenance. Elle peut être définie comme la capacité du système de maintenance à assurer une fiabilité et une disponibilité optimales des équipements entretenus, tout en contrôlant les coûts et en minimisant les impacts sur les opérations. Une bonne performance de maintenance implique de trouver un équilibre entre les coûts de maintenance préventive et de maintenance corrective, en maximisant le retour sur investissement des activités d'entretien.

Ce concept est directement relié à celui de mesure de performance de la maintenance (*MPM – Maintenance Performance Measurement*), qui peut être défini comme un processus de justification de la valeur créée par les investissements en maintenance, en répondant aux exigences de l'organisation d'un point de vue stratégique global (Kumar et al., 2013). La MPM permet aux entreprises de réévaluer et d'ajuster leurs politiques de maintenance, de réviser l'allocation des ressources et de comprendre les effets de la maintenance sur d'autres fonctions. La performance de la maintenance est mesurée par une combinaison d'indicateurs spécifiques, qui permettent de suivre l'efficacité des processus selon différents aspects.

2.1.4 Diagnostic

Au sens général, un diagnostic désigne un processus structuré d'analyses permettant de déterminer l'origine, la nature et la gravité d'un problème ou d'une situation donnée, en s'appuyant sur l'observation de faits et l'interprétation de données. Dans le domaine industriel, le diagnostic peut viser à identifier les sources de pertes de performance de l'entreprise, afin de les corriger par des actions concrètes d'amélioration de la productivité et de la rentabilité. Selon le type de dysfonctionnements ou de gaspillages recherchés, différents outils et méthodes peuvent être mobilisés.

Appliqué à la maintenance, le diagnostic correspond ainsi à une évaluation systématique des pratiques et des performances liées à l'entretien des actifs. Comme le soulignent Ge et al. (2024), un diagnostic efficace doit combiner une vue d'ensemble de l'état de santé des performances avec une analyse détaillée des processus, en reliant les objectifs stratégiques aux indicateurs de performance et aux données disponibles. Une telle approche constitue une base solide pour orienter les décisions et prioriser les actions d'amélioration.

2.2 Protocole de recherche et résultats

Dans cette section, la stratégie de recherche utilisée pour identifier les articles pertinents dans la littérature sera explicitée, puis les résultats obtenus seront analysés.

2.2.1 Protocole de recherche

Pour cette revue de littérature, les bases de données Scopus et Google Scholar ont été utilisées. Elles font partie des plus importantes bases de données scientifiques, offrant plus de 94 millions de données de toute sorte (*Données Scopus*, 2024). Elles permettent de donner une vue d'ensemble sur ce qui a déjà été fait dans de nombreuses disciplines en sciences.

Tout d'abord, une première analyse globale de la recherche en maintenance a permis de se renseigner sur les différentes approches utilisées dans l'industrie, puis d'identifier des thèmes plus précis sur lesquels se concentrer afin de trouver les travaux pertinents pour notre étude. Cette revue de littérature s'est donc axée autour de deux objectifs. Le premier est d'identifier les travaux traitant de **l'évaluation d'une stratégie de maintenance**, afin de comprendre les approches utilisées dans l'analyse des performances de la maintenance. Le second objectif est de déterminer les différentes **méthodes d'optimisation d'une stratégie de maintenance mise en place**. Cela permet d'explorer

les outils et techniques qui existent pour améliorer l'efficacité de la politique de maintenance déjà existante dans une organisation, en tenant compte des contraintes opérationnelles et économiques.

Ainsi, une recherche non systématique a été menée autour de ces deux thèmes, afin de garantir une certaine flexibilité dans l'exploration des diverses perspectives théoriques et méthodologiques existantes. Cette approche permet de parcourir une variété de sources, de comparer les différentes méthodologies proposées et de ne pas omettre des travaux pertinents qui n'auraient peut-être pas été inclus dans une recherche systématique plus stricte. Ce choix est justifié par la nature exploratoire de l'étude, qui vise à synthétiser des méthodes appliquées à des problématiques et contextes divers.

Pour les recherches portant sur les méthodes d'évaluation d'une politique de maintenance, des mots-clés comme « *evaluation* » OR « *diagnostic* » OR « *assessment* » OR « *measurement* » ont été utilisés, couplés à « *maintenance performance* » OR « *maintenance efficiency* » OR « *maintenance effectiveness* » OR « *maintenance strategy* ». De plus, notre objectif étant de baser cette évaluation sur l'analyse des données historiques de maintenance, des mots-clés autour de cette idée ont permis de restreindre les résultats : « *data-driven* » OR « *historical data* » OR « *maintenance data* » OR « *work order* ». Cette première recherche a permis de faire ressortir 14 articles pertinents.

Pour le second axe d'intérêt qui porte sur les méthodologies d'optimisation d'une stratégie de maintenance mise en place, des mots-clés comme « *optimization* » OR « *improve* » OR « *adjustement* » ainsi que « *preventive maintenance* » OR « *planned maintenance* » OR « *periodic maintenance* » ont été utilisés. La difficulté ici a été d'identifier les articles traitant spécifiquement de la révision et de l'amélioration d'une politique de maintenance déjà existante. En effet, la majorité des publications dans le domaine de l'optimisation de la maintenance se concentrent sur la détermination de la stratégie de maintenance préventive optimale, sans forcément utiliser les données historiques ni remettre en question les plans déjà établis. Les algorithmes proposés dans ces études visent souvent à optimiser les paramètres de maintenance (dans le cadre de la maintenance préventive, il s'agit en général de l'intervalle entre les activités d'entretien) en fonction des objectifs de l'organisation, qui sont généralement la minimisation des coûts et l'amélioration de la fiabilité des équipements. Ce sujet a été largement étudié dans la littérature, avec des états de l'art exhaustifs comme ceux de Jonge et Scarf (2019) et Pincioli et al. (2023).

Cependant, ces études n'étaient pas directement pertinentes pour notre sujet de recherche, qui se concentre sur la révision de la stratégie déjà mise en place dans l'organisation. Afin de mieux cibler les résultats, des mots-clés comme « *data* » et « *threshold* » OR « *interval* » OR « *frequency* » OR « *period* » ont été intégrés aux requêtes dans les bases de données. Au terme de ce processus, 10 articles supplémentaires ont été retenus.

Ainsi, cette revue de littérature aura permis de dégager 24 études pertinentes pour notre recherche. Le tableau 2.1 présente la liste finale des articles sélectionnés.

Tableau 2.1 : Liste des articles sélectionnés

	Auteur(s) et date	Titre de l'article	Source	Sujet de la contribution
1	Ge et al. (2024)	An adaptable end-to-end maintenance performance diagnostic framework	International Journal of Quality & Reliability Management	Évaluation d'une stratégie de maintenance
2	Astivia-Chávez et Ortiz-Posadas (2023)	Exploratory Data Analysis for Preventive and Corrective Maintenance for Medical Equipment in a General Hospital from the Health Institute of the State of Mexico	IFMBE Proceedings Puerto Vallarta	Évaluation d'une stratégie de maintenance
3	Weeks et Leite (2022)	Minimizing Facility Corrective Maintenance: Benchmarking Preventative-to-Corrective Maintenance Ratios Using Maintenance Data and Building Age in Dormitories	Journal of Management in Engineering	Évaluation d'une stratégie de maintenance
4	Olack (2021)	Application of Data Analytics to Mine Nuclear Plant Maintenance Data	EPRI (Electric Power Research Institute)	Évaluation d'une stratégie de maintenance
5	Weeks et Leite (2021)	Facility Defect and Cost Reduction by Incorporating Maintainability Knowledge Transfer Using Maintenance Management System Data	Journal of Performance of Constructed Facilities	Évaluation d'une stratégie de maintenance
6	Sigsgaard et al. (2021)	Data-Driven Systematic Evaluation of Preventive Maintenance Performance	Proceedings - Annual Reliability and Maintainability Symposium	Évaluation d'une stratégie de maintenance
7	Besiktepe et al. (2019)	Analysis of the Maintenance Work Order Data in Educational Institutions	Proceedings of International Structural Engineering and Construction	Évaluation d'une stratégie de maintenance

Tableau 2.2 : Liste des articles sélectionnés (suite)

8	Gonnelli et al. (2017)	Evidence-based approach to medical equipment maintenance monitoring	IFMBE Proceedings	Évaluation d'une stratégie de maintenance
9	Morant et al. (2016)	Data-driven model for maintenance decision support: A case study of railway signalling systems	Journal of Rail and Rapid Transit	Évaluation d'une stratégie de maintenance
10	Lai (2015)	Maintenance Performance: Examination of the Computer-Aided Maintenance Data of a Large Commercial Building	Journal of Performance of Constructed Facilities	Évaluation d'une stratégie de maintenance
11	Parida et al. (2015)	Performance measurement and management for maintenance: a literature review	Journal of Quality in Maintenance Engineering	Évaluation d'une stratégie de maintenance
12	Zhou et al. (2014)	Analysing Operating Data to Measure the Maintenance Performance	Quality and Reliability Engineering International	Évaluation d'une stratégie de maintenance
13	Kumar et al. (2013)	Maintenance performance metrics: a state-of-the-art review	Journal of Quality in Maintenance Engineering	Évaluation d'une stratégie de maintenance
14	Maquee et al. (2012)	Clustering and association rules in analyzing the efficiency of maintenance system of an urban bus network	International Journal of System Assurance Engineering and Management	Évaluation d'une stratégie de maintenance
15	Deprez et al. (2023)	Data-driven preventive maintenance for a heterogeneous machine portfolio	Operations Research Letters	Optimisation d'une stratégie de maintenance
16	Ge et al. (2023)	Improving periodic maintenance performance: a grouping and heuristic approach	International Journal of Quality & Reliability Management	Évaluation + Optimisation d'une stratégie de maintenance
17	Knežević et al. (2022)	Optimisation of Reliability and Maintenance Plan of the High-Pressure Fuel Pump System on Marine Engine	Polish Maritime Research	Optimisation d'une stratégie de maintenance
18	Didriksen et al. (2022)	Utilising failure history to improve maintenance planning	Proceedings of NordDesign 2022	Optimisation d'une stratégie de maintenance
19	Herguedas et al. (2022)	A method for obtaining the preventive maintenance interval in the absence of failure time data	Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability	Optimisation d'une stratégie de maintenance

Tableau 2.3 : Liste des articles sélectionnés (suite et fin)

20	Stazić et al. (2020)	Maintenance Interval Adjustment Based on the Experience, Case Study of Marine Air Compressor System	Nase More	Optimisation d'une stratégie de maintenance
21	Coria et al. (2015)	Analytical method for optimization of maintenance policy based on available system failure data	Reliability Engineering and System Safety	Optimisation d'une stratégie de maintenance
22	Segulja et al. (2009)	Maintenance Interval Adjustment of Significant Ship Propulsion Components	PROMET - Traffic&Transportation	Optimisation d'une stratégie de maintenance
23	Block et al. (2008)	Evaluation of Preventive Maintenance Task Intervals Using Field Data from a Complete Life Cycle	IEEE Aerospace Conference	Optimisation d'une stratégie de maintenance
24	Brewin et al. (2001)	Effectively utilizing device maintenance data to optimize a medical device maintenance program	Biomedical Instrumentation and Technology	Optimisation d'une stratégie de maintenance

Dans les sections suivantes, le contenu de ces publications est examiné en détail, en soulignant les objectifs de chaque étude, la méthodologie employée, ainsi que le secteur d'application s'il y a lieu. Cette analyse vise à identifier les pistes les plus prometteuses pour notre étude, mais surtout les lacunes de la recherche actuelle.

2.2.2 Méthodes d'évaluation d'une stratégie de maintenance

Suite à la lecture complète de chaque article lié à l'évaluation des politiques de maintenance mises en place, différents types de contributions ont été identifiées. En effet, certains des travaux sélectionnés se concentrent sur l'analyse exploratoire des données historiques de maintenance issues de divers cas d'étude. Leurs résultats s'apparentent plutôt à une analyse préliminaire de la stratégie de maintenance mise en place plutôt qu'à un cadre d'évaluation formel, mais sont intéressants pour obtenir des informations utiles pour une étude plus poussée par la suite. D'autres articles vont plus loin, en proposant une méthodologie d'évaluation de la performance offrant des mesures concrètes pour l'identification des pistes d'amélioration dans la stratégie de maintenance. Enfin, deux des publications traitent spécifiquement de la sélection et l'utilisation d'indicateurs de performance de maintenance (MPIs) pour évaluer les processus de gestion de l'entretien.

2.2.2.1 Analyse exploratoire des données de maintenance

Dans la littérature, les chercheurs s'accordent à dire que l'utilisation des données historiques de maintenance présente un grand potentiel pour améliorer les processus de planification et gestion de la maintenance, puisque les décisions sont fondées sur l'expérience et les informations disponibles (Didriksen et al., 2022). Plusieurs études se sont consacrées à ce sujet, utilisant les données collectées par des organisations situées dans différents secteurs. Les cas d'application sont divers, allant de la maintenance de bâtiments à celle d'équipements médicaux.

Mais les objectifs de toutes ces études sont similaires. Le principal étant de mener une étude exploratoire des données pour en tirer des informations utiles à l'amélioration de la performance de maintenance. Ils utilisent les ordres de travail issus des systèmes informatisés de gestion de leur cas d'étude, les données s'étalant sur une période de 1 an à 10 ans et considérant à la fois la maintenance préventive (MP) et la maintenance corrective (MC).

À travers leur étude de la maintenance des dortoirs de l'US Army, l'objectif de Weeks et Leite (2021) était de révéler les défauts les plus courants dans ce type d'installations et les coûts associés. Ils ont identifié les disciplines les plus importantes en termes de nombre d'ordres de travail et de coûts, expliquant qu'il est essentiel de se concentrer sur ces systèmes pour la révision des politiques de maintenance. Ils ont également cherché à quantifier la corrélation entre la MP et la MC, démontrant que plus de temps investi en MP réduit les besoins en MC.

Besiktepe et al. (2019) calculent la distribution des ordres de travail pour chaque activité de maintenance (électricité, chauffage, plomberie...) dans chaque bâtiment. Ils l'utilisent ensuite pour étudier le lien entre le type d'activité et le type de bâtiment, ainsi qu'entre le type d'activité et l'âge des bâtiments. D'autres auteurs ont également analysé l'effet de l'âge des équipements sur les besoins de maintenance. C'est le cas de Astivia-Chávez et Ortiz-Posadas (2023) qui font ressortir une forte corrélation entre l'âge des dispositifs médicaux et la fréquence des interventions de maintenance corrective. Weeks et Leite (2022) ont cherché également à déterminer l'impact de l'âge des installations sur les activités de maintenance, et notamment sur le ratio MP/MC. Pour cela, ils ont tracé l'évolution des besoins en maintenance corrective selon l'âge du bâtiment, et comparent le ratio MP/MC de différentes tranches d'âge, en termes de coûts et d'heures de travail. Ils montrent que la plupart des systèmes étudiés sont associés à des coûts d'entretien maximaux entre 21 et 25 ans, ce qui suggère la nécessité de revoir la stratégie de maintenance à ce stade.

Enfin, tout comme Besiktepe et al. (2019), Lai (2015) étudie la distribution des ordres de travail, mais cette fois par zone et par type de maintenance (préventive ou corrective). Ils s'intéressent également au temps de réponse, temps de réparation et temps d'arrêt, suggérant que ces références peuvent être utilisées pour évaluer les performances de maintenance dans des bâtiments similaires.

2.2.2.2 Indicateurs de mesure de la performance

Dans leur état de l'art sur les métriques utilisées en maintenance, Kumar et al. (2013) soulignent l'importance de **la démarche de mesure de performance de la maintenance**. En effet, les organisations sont aujourd'hui sous pression pour améliorer continuellement leur capacité à créer de la valeur pour leurs clients et améliorer l'efficacité de leurs opérations. La MPM (*Maintenance Performance Measurement*) permet de reconsidérer et d'ajuster leurs stratégies de maintenance. Pour cela, une étape essentielle est la formulation d'indicateurs de performance de maintenance (MPIs) adaptés aux objectifs de l'organisation. Les auteurs classent ces indicateurs en plusieurs catégories :

- Les indicateurs financiers, tels que le retour sur investissement (ROI) ou le coût de maintenance par unité de production ;
- Les indicateurs techniques, qui mesurent l'efficacité des équipements et des processus de maintenance. Les plus courants sont notamment le temps moyen entre défaillances (MTBF), le temps moyen de réparation (MTTR), ou l'efficacité globale des équipements (OEE) ; et
- Les indicateurs organisationnels, comme le nombre d'incidents liés à la sécurité ou le taux de satisfaction des employés.

Ils distinguent les indicateurs en deux catégories : les indicateurs "avancés" (*leading indicators*), qui permettent d'avertir d'un problème avant que celui-ci ne survienne ; et les indicateurs "retardés" (*lagging indicators*), ou indicateurs de résultats, qui mesurent le résultat final d'un processus déjà réalisé. Ces derniers reflètent l'impact ou les conséquences des activités passées, et permettent d'évaluer si les objectifs fixés ont été atteints.

Cependant, Kumar et al. (2013) constatent que l'application des cadres de MPM dans un environnement pratique a rencontré un succès limité. Parida et al. (2015) font la même conclusion, en identifiant les différents obstacles qui compliquent l'implantation d'un cadre de MPM. En plus

des coûts et durées de mise en œuvre élevés, il y a par exemple les difficultés à évaluer l'importance relative des mesures, ou l'absence de liaison entre la stratégie globale de l'organisation et les objectifs spécifiques des départements, pouvant conduire à un manque de cohérence.

2.2.2.3 Méthodes d'évaluation de la stratégie de maintenance à partir des données historiques

Gonnelli et al. (2017) utilisent une approche "basée sur les preuves" (*Evidence-Based Maintenance*) pour étudier les données de défaillances d'équipements médicaux et évaluer l'efficacité des activités de maintenance. Cette approche consiste à prendre des décisions basées sur des données factuelles, rigoureusement collectées et analysées, plutôt que sur des hypothèses ou des intuitions. C'est cette idée qui est au cœur des études qui font l'objet de cette section : analyser une politique de maintenance à partir des données collectées, dans l'objectif de l'améliorer en identifiant les pistes d'optimisation.

Pour cela, les indicateurs de performance, que l'on a évoqués dans la section précédente, sont régulièrement utilisés. Gonnelli et al. (2017) en utilisent 10 afin de comparer l'efficacité de la maintenance pour 13 classes d'équipements médicaux. Ils comparent également leurs tendances de défaillances avec celles présentes dans une base de données contenant divers rapports soumis à la FDA (*Food and Drug Administration*), afin d'obtenir une vision plus large du problème et d'effectuer une analyse croisée des performances de la maintenance des équipements médicaux. Ge et al. (2024) ont développé un cadre de diagnostic structuré, qui vise à faciliter la sélection et l'utilisation des MPIs spécifiques au cas étudié. Ils proposent une approche en deux étapes : (1) Vérification de l'état de santé global de la performance, (2) Localisation des problèmes, en se concentrant sur trois aspects (efficacité des processus, efficience des processus, et conformité des processus). Pour l'évaluation du rendement avec la mise en place des MPIs pertinents, ils ont utilisé des questions clés de diagnostic, telles que "*Combien de défaillances apparaissent peu de temps après l'exécution de la maintenance ?*".

Le modèle proposé par Morant et al. (2016) permet de relier plusieurs paramètres pour évaluer la performance de maintenance. En effet, les relations entre les différents paramètres fournissent des informations précieuses sur les points d'amélioration possibles. Par exemple, en identifiant les causes de défaillance les plus fréquentes, il devient possible de cibler les systèmes pour lesquels des mesures préventives spécifiques pourraient réduire les actions de maintenance corrective. Ils

se concentrent particulièrement sur les paramètres RAMS (fiabilité, disponibilité, maintenabilité et sécurité) en analysant les ordres de maintenance corrective. Leur modèle permet ainsi de comparer les procédures de maintenance entre différents actifs, de relier les modes de défaillance aux causes de pannes et d'identifier les points faibles des systèmes.

Pour mettre en forme les résultats de l'évaluation de la performance de maintenance, plusieurs approches sont possibles. L'une des plus courantes est l'utilisation d'un tableau de bord. C'est notamment le choix qu'ont fait Zhou et al. (2014) et Sigsgaard et al. (2021). Les premiers ont cherché à évaluer la performance quotidienne, hebdomadaire, mensuelle et à plus long terme de la MC et de la MP réalisée dans une compagnie d'exploitation d'autobus (Zhou et al., 2014). Pour cela, ils étudient différents paramètres liés à chaque type de maintenance, comme le nombre de réparations effectuées, le temps moyen entre les défaillances (MTBF), ou encore les coûts associés aux activités d'entretien. Ils développent un tableau de bord qui contient à la fois le résumé des données brutes et les résultats obtenus en combinant les analyses faites, pour présenter un aperçu rapide des performances de la maintenance. Sigsgaard et al. (2021) utilisent une méthodologie similaire, en se concentrant sur neuf types d'équipements, choisis en fonction du nombre de pièces et des heures de maintenance associées à ces équipements. Ils utilisent comme indicateur de performance le ratio MC/MP, calculé en comptant le nombre total de travaux correctifs et préventifs effectués.

Finalement, certains auteurs utilisent des techniques caractéristiques de l'industrie 4.0 pour leur analyse. Olack (2021) a choisi un algorithme de segmentation, issu du *data mining*, pour effectuer des regroupements de composants appartenant à différentes centrales nucléaires en fonction de leurs caractéristiques de maintenance. Une fois les groupes formés, il étudie les tendances générales au niveau des heures de travail et des coûts de maintenance, permettant aux gestionnaires d'orienter leurs efforts sur les composants qui nécessitent plus d'attention. Une autre étude utilise la segmentation pour regrouper des bus avec des comportements similaires (Maquee et al., 2012). Ils utilisent ensuite l'algorithme *A-Priori* pour identifier des règles d'association expliquant pourquoi des bus se retrouvent dans des groupes spécifiques, notamment ceux avec de mauvaises performances. L'utilisation de ces techniques d'apprentissage automatique permet ainsi d'extraire des connaissances cachées dans les bases de données, pouvant guider les analystes à adopter de nouvelles stratégies pour améliorer l'efficacité des systèmes de maintenance.

Le tableau 2.2 récapitule toutes les études traitant de l'évaluation des politiques de maintenance.

Tableau 2.4 : Résumé des méthodes d'évaluation de la stratégie de maintenance

Référence	Secteur d'application	Type de contribution	Paramètre(s) d'évaluation
Besiktepe et al. (2019)	Bâtiment (éducatif)	Analyse exploratoire des données	-
Lai (2015)	Bâtiment (commercial)	Analyse exploratoire des données	-
Weeks et Leite (2021)	Bâtiment (dortoirs)	Analyse exploratoire des données	-
Weeks et Leite (2022)	Bâtiment (dortoirs)	Analyse exploratoire des données	-
Astivia-Chávez et Ortiz-Posadas (2023)	Équipements médicaux	Analyse exploratoire des données	-
Gonnelli et al. (2017)	Équipements médicaux	Cadre d'évaluation de la performance	Coûts liés à la maintenance Performance opérationnelle Productivité des processus
Sigsgaard et al. (2021)	Société pétrolière et gazière	Cadre d'évaluation de la performance	Ratio MP/MC
Ge et al. (2024)	Société pétrolière et gazière	Cadre d'évaluation de la performance	Efficacité des processus Efficience des processus Conformité des processus
Maquee et al. (2012)	Réseau d'autobus	Cadre d'évaluation de la performance	Nombre d'activités de maintenance Nombre de défaillances Temps entre les défaillances
Zhou et al. (2014)	Réseau d'autobus	Cadre d'évaluation de la performance	Nombre d'activités de maintenance Coûts liés à la maintenance Nombre de défaillances Temps entre les défaillances
Olack (2021)	Centrales nucléaires	Cadre d'évaluation de la performance	Ratio MP/MC Coûts liés à la maintenance Heures de maintenance
Morant et al. (2016)	Transport ferroviaire	Cadre d'évaluation de la performance	Répartition des défaillances Modes de défaillances Temps total de maintenance Temps de réparation

Tableau 2.5 : Résumé des méthodes d'évaluation de la stratégie de maintenance (suite et fin)

Kumar et al. (2013)	-	Sélection de MPIs (revue de littérature)	-
Parida et al. (2015)	-	Sélection de MPIs (revue de littérature)	-

2.2.3 Méthodes d'optimisation d'une stratégie de maintenance

Le sujet de l'optimisation des intervalles de maintenance préventive a été largement étudié dans la littérature, avec de nombreux algorithmes proposés et prenant en compte différents critères d'optimisation. Cependant, notre objectif ici est de s'intéresser exclusivement aux méthodes reposant sur l'exploitation des données historiques et cherchant à améliorer les politiques de maintenance déjà existantes.

Les études identifiées s'illustrent encore une fois dans des secteurs très divers, comme résumé dans le tableau 2.3. Dans leur article, Brewin et al. (2001) ont cherché à optimiser les plans de maintenance préventive des équipements médicaux de l'UHN (*University Health Network*). Étant donné l'aspect critique de ce type d'équipements, ils ont utilisé une approche par analyse des risques, évalués en fonction de la probabilité et de l'impact d'une défaillance. Ceci leur permet de diviser les dispositifs en deux catégories : une région acceptable et une région intolérable de risque. Si un dispositif se trouve dans la région intolérable, une analyse plus poussée est faite pour modifier les procédures de maintenance, comme ajuster l'intervalle de MP. Block et al. (2008) se sont inspirés de la méthodologie de maintenance centrée sur la fiabilité (*RCM - Reliability Centered Maintenance*), qui vise à minimiser les défaillances critiques tout en optimisant les coûts. Ainsi, leur étude analyse les données de fiabilité des composants, pour vérifier si les intervalles de maintenance définis ont permis de prévenir efficacement les défaillances, et si les ajustements apportés à ces intervalles étaient bénéfiques pour réduire les interventions correctives coûteuses. Ils jugent un intervalle comme pertinent si le nombre de pannes reconnues pendant les activités d'entretien préventif est supérieur à celui des pannes survenues en cours de fonctionnement.

L'optimisation des intervalles de maintenance repose principalement sur l'estimation du temps jusqu'à l'arrivée d'une défaillance. Pour cela, de nombreuses études utilisent une modélisation du comportement de défaillance des équipements. Le modèle le plus courant est la distribution de

Weibull, intégrant deux paramètres principaux (forme et échelle) et permettant de représenter divers comportements de défaillances. En ajustant ce modèle aux données historiques, on peut prévoir la probabilité de panne et définir les moments optimaux pour les interventions de maintenance préventive. Ainsi, plusieurs des travaux sélectionnés utilisent ce modèle. C'est le cas de Coria et al. (2015), qui introduisent un nouveau modèle de maintenance préventive se basant sur la distribution de Weibull, intégrant l'intervalle de maintenance actuel T0 en plus de l'intervalle de maintenance optimal T à déterminer. Leur optimisation consiste à minimiser les coûts moyens par unité de temps associés à la maintenance d'un système. Segulja et al. (2009) se concentrent seulement sur les composants identifiés comme les plus critiques. Grâce à la distribution de Weibull, ils peuvent proposer un nouvel intervalle de maintenance pour ces composants, qui devrait permettre de réduire les risques de défaillances.

Toujours dans l'objectif de recommander un nouvel intervalle de maintenance en fonction des données de fiabilité collectées, Stazić et al. (2020) et Knežević et al. (2022) ont utilisé la méthode MA-CAD (*Maintenance Concept Adjustment and Design*). C'est une technique utilisée pour la détection des anomalies dans les séries temporelles, notamment dans les données de maintenance. Knežević et al. (2022) utilisent cette méthode pour tracer la fiabilité du système, ainsi que la distribution de Weibull, dont les paramètres sont déterminés à partir des données. Cela leur permet d'ajuster l'intervalle initial pour réduire la probabilité de défaillance. Leur méthodologie se rapproche donc beaucoup de celle de Segulja et al. (2009). Stazić et al. (2020) utilisent la méthode MA-CAD pour analyser la performance du plan d'entretien initial, et la comparer aux résultats collectés après modification du plan. Ils font une analyse des modes de défaillance, une analyse des risques et une analyse de la fiabilité. Pour cette dernière, ils utilisent la méthode Γ -exponentielle plutôt que Weibull, afin de s'adapter au cas d'un faible échantillon de données.

Les études de Deprez et al. (2023), Didriksen et al. (2022), Ge et al. (2023) et Herguedas et al. (2022) se détachent des précédentes, car elles s'intéressent à des problèmes communs dans la détermination des intervalles de maintenance pour des cas réels : la disponibilité limitée des données de défaillances, et un grand nombre d'équipements avec des comportements hétérogènes. Pour répondre à cette problématique, Didriksen et al. (2022) proposent un modèle de multi-classification, qui permet de relier l'historique de pannes de composants similaires afin de pouvoir gérer tous les équipements, même en cas de pannes peu fréquentes. En comparant l'historique réel de l'équipement avec ceux de composants associés, les gestionnaires peuvent prendre des décisions

plus éclairées et s'inspirer d'autres plans d'entretien appliqués ailleurs avec succès. Deprez et al. (2023) s'intéressent à un portefeuille de machines aux caractéristiques hétérogènes, en regroupant les données disponibles en fonction des profils des machines pour mieux apprendre le comportement de défaillance et de coûts de chaque profil. Ge et al. (2023) ont une logique semblable, puisqu'ils font des regroupements de composants similaires afin d'augmenter la disponibilité des données. Ensuite, ils font une évaluation basée sur l'intervalle minimal d'entretien périodique et utilisent cinq MPIs, qui permettent d'examiner l'intervalle selon trois aspects : la fréquence planifiée, la conformité d'exécution de la maintenance et l'efficacité du processus au niveau de la détection des défaillances. Selon les résultats de cette évaluation, ils font des suggestions pour améliorer la performance de la maintenance, comme la réduction ou l'augmentation de la fréquence et/ou la révision des processus d'entretien. Ainsi, cette étude est la plus complète de tous les articles sélectionnés, car elle propose à la fois un cadre d'évaluation de la maintenance préventive, et des propositions concrètes pour améliorer la stratégie. Enfin, Herguedas et al. (2022) proposent une méthode permettant de déterminer l'intervalle de maintenance préventive en l'absence de données sur les temps de défaillances : ils connaissent le nombre de défaillances survenues sur une période, mais pas les moments précis de ces pannes. Ils utilisent l'approximation de Benard puis le modèle de Weibull pour estimer la distribution des défaillances, et un modèle semi-markovien pour modéliser le comportement de l'équipement au fil du temps. Ils calculent ensuite l'intervalle optimal qui permet d'équilibrer les coûts et les risques.

Le tableau 2.3 résume les principales caractéristiques de ces études, en soulignant lesquelles utilisent le modèle de Weibull, lesquelles sont adaptées à des cas avec un grand nombre d'équipements différents, et à des cas avec des composants aux données historiques limitées.

Tableau 2.6 : Résumé des méthodes d'optimisation de la stratégie de maintenance

Référence	Cas d'application	Approche principale pour l'optimisation	Modèle de Weibull	Large catalogue d'équipements	Faible disponibilité des données
Brewin et al. (2001)	Équipements médicaux	Analyse de risques			
Block et al. (2008)	Turbines d'aéronefs militaires	Analyse de fiabilité			

Tableau 2.7 : Résumé des méthodes d'optimisation de la stratégie de maintenance (suite et fin)

Coria et al. (2015)	-	Modélisation du comportement de défaillance Minimisation des coûts	X		
Segulja et al. (2009)	Système de propulsion d'un navire	Modélisation du comportement de défaillance Analyse de fiabilité	X		
Stazić et al. (2020)	Système de compresseur d'air	Analyse de risques Analyse de fiabilité			X
Knežević et al. (2022)	Pompes à haute pression pour carburant	Analyse de risques Modélisation du comportement de défaillance Analyse de fiabilité	X		
Didriksen et al. (2022)	Équipements d'une société pétrolière et gazière	Comparaison des historiques de pannes entre différents équipements		X	X
Deprez et al. (2023)	Portefeuille de 240 machines hétérogènes	Modélisation du comportement de défaillance Minimisation des coûts		X	X
Ge et al. (2023)	Équipements d'une société pétrolière et gazière	Regroupements de composants Évaluation des performances des intervalles de maintenance		X	X
Herguedas et al. (2022)	Vanne de dérivation d'un moteur de navire	Modélisation du comportement de défaillance Maximisation des bénéfices générés	X		X

2.3 Revue critique

Cette revue de littérature a permis d'identifier différentes approches pour l'évaluation et la révision d'une stratégie de maintenance existante, mais a également mis en lumière plusieurs limites.

Tout d'abord, on constate que, malgré la diversité des cas d'application présentés dans ces articles, il y a un manque d'études empiriques dans le domaine des transports publics. En effet, seules les contributions de Zhou et al. (2014) et Maquee et al. (2012) s'inscrivent dans ce secteur, mais elles ne proposent pas d'amélioration de la politique de maintenance suite à l'analyse qui est menée. Mener plus d'études sur les tendances de la gestion de la maintenance dans le domaine des transports publics permettrait d'enrichir le corpus de recherches existantes, mais aussi d'identifier

des pratiques et modèles spécifiques à ce secteur afin de soutenir la prise de décision sur les politiques mises en place.

De plus, la plupart des études sur le développement ou l'évaluation de stratégie de maintenance se concentrent sur une seule pièce, un seul type d'équipement, ou juste sur les composants les plus critiques. Tandis que la recherche sur l'évaluation et l'optimisation de la maintenance pour plusieurs classes d'équipements est très limitée, comme le soulignent Ge et al. (2023) et Pinciroli et al. (2023). Cependant, dans la pratique, il est souvent nécessaire d'analyser plusieurs catégories d'équipements simultanément pour avoir une vue d'ensemble de la performance de la stratégie de maintenance de l'entreprise. Les variations dans les conditions de fonctionnement et les comportements de défaillance divers font que ces équipements vont nécessiter des stratégies de maintenance différentes adaptées à leurs caractéristiques, augmentant considérablement la complexité du problème. Seuls trois des articles considèrent l'ensemble des équipements de l'organisation étudiée (Didriksen et al. (2022) ; Deprez et al. (2023) ; Ge et al. (2023)). Ceci souligne la nécessité de développer des modèles capables de gérer de grandes quantités de données associées à une diversité importante de composants.

La majorité des méthodes proposées supposent la disponibilité des données, et reposent sur des observations à haute fréquence de défaillances. Or, dans les systèmes plus complexes, certains équipements peuvent avoir une longue durée de vie avec peu de pannes observées, ne fournissant pas assez d'échantillons pour le calcul de la fiabilité. En effet, le modèle de Weibull, largement utilisé dans la planification et l'optimisation de la maintenance, nécessite un nombre suffisant de données de défaillance pour estimer de manière fiable ses paramètres. Avec des données limitées, ces estimations peuvent devenir imprécises et donner des intervalles de maintenance inadaptés. Pour les composants à faible fréquence de maintenance, la période de collecte de données avant qu'une stratégie puisse être réévaluée peut prendre de nombreuses années, ce qui pose des difficultés pour l'évaluation de la performance à court terme. Afin de pallier le manque de données de défaillances pour l'évaluation des intervalles de maintenance, Ge et al. (2023) expliquent que deux méthodes ont été proposées dans la littérature : l'inclusion de plus d'échantillons de données en regroupant des composants similaires, et l'utilisation d'autres connaissances pour soutenir le processus d'évaluation, comme les réglementations légales et les recommandations des fournisseurs. Cependant, les particularités du contexte opérationnel ou des équipements peuvent limiter l'applicabilité de ces méthodes.

Par ailleurs, un problème régulièrement souligné par les chercheurs est la dépendance des modèles proposés à la qualité des données enregistrées. Plusieurs auteurs remarquent que la qualité des données collectées dans les systèmes de gestion de la maintenance est souvent inadéquate, rendant difficile l'analyse approfondie des stratégies de maintenance. Les descriptions des pannes sont souvent imprécises, et les informations enregistrées manquent de détails critiques (Salonen et al., 2020). Ceci souligne le besoin d'améliorer la qualité des données collectées et de mettre en place des mécanismes robustes pour garantir l'exactitude et la fiabilité des informations, afin d'améliorer la performance des modèles d'analyse et d'optimisation de la maintenance.

A propos des articles traitant de l'évaluation de la maintenance, beaucoup des études identifiées se limitent à une analyse préliminaire sans proposer de cadre formel d'évaluation. Cette approche exploratoire, bien qu'importante, pourrait bénéficier de l'intégration de méthodologies robustes pour une évaluation plus poussée et rigoureuse des politiques de maintenance. Seulement 7 des 14 articles analysés proposent des pistes concrètes pour l'évaluation de la performance.

Le ratio MP/MC est un indicateur clé pour refléter l'efficacité d'une stratégie de maintenance : un bon équilibre entre ces deux types d'entretien permet de minimiser les interruptions imprévues tout en évitant une sur-maintenance coûteuse. Bien sûr, l'équilibre idéal entre maintenance préventive et maintenance corrective dépend de plusieurs facteurs, comme le coût des temps d'arrêt ou la criticité des pièces, et va donc différer d'une organisation à l'autre. Même si ce paramètre est régulièrement mentionné dans la littérature, il existe très peu d'études directes et de recommandations permettant d'évaluer le ratio optimal dans un contexte donné (Hamasha et al., 2023). Plus généralement, beaucoup d'études indiquent quels paramètres regarder pour juger de la performance de la maintenance, et notamment quels MPIs utiliser, mais ne donnent pas de valeurs précises qui pourraient être utiles afin de savoir si la stratégie mise en place est efficace ou non. De plus, au sujet des MPIs, bien que de nombreux indicateurs aient été identifiés, leur application dans des outils pratiques pour la prise de décision reste limitée (Kumar et al., 2013).

2.4 Conclusion

Cette revue de littérature a permis d'aborder différents sujets liés à l'analyse et la révision des politiques de maintenance. Bien que de nombreux chercheurs se soient penchés sur l'exploration, l'évaluation et l'optimisation des stratégies de maintenance, il subsiste encore plusieurs lacunes dans ce domaine, notamment au niveau de l'application des méthodes à des cas réels. En effet, les

études se concentrent généralement sur des équipements spécifiques ou des scénarios simplifiés, où la qualité et la disponibilité des données sont élevées, contrastant ainsi avec la complexité des environnements opérationnels réels, où les actifs sont nombreux et diversifiés et les données souvent manquantes.

De plus, le fait qu'une recherche non systématique ait été nécessaire pour couvrir l'ensemble du sujet et regrouper toutes les méthodes pertinentes souligne le manque de contributions offrant un cadre complet, allant de l'analyse des données à l'évaluation puis l'amélioration de la stratégie de maintenance mise en place. La plupart des études existantes ont tendance à se concentrer sur un seul aspect du problème, laissant un vide quant à une approche intégrée.

Ainsi, cette revue met en lumière la nécessité de développer un cadre de diagnostic exhaustif de la performance de maintenance, capable de s'adapter aux spécificités de l'organisation et aux données disponibles, même lorsque celles-ci concernent des pièces à faible fréquence d'échecs ou d'entretien. Ce cadre devrait permettre non seulement d'évaluer les stratégies de maintenance, mais aussi de fournir des éléments concrets pour améliorer leur efficacité de manière pragmatique.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

Ce chapitre présente les objectifs spécifiques de ce projet de recherche et la méthodologie utilisée pour y arriver.

3.1 Objectifs de recherche

La revue de littérature réalisée au chapitre précédent a fait ressortir un intérêt croissant pour la numérisation de la gestion de la maintenance et l'utilisation des données historiques. Cet intérêt ouvre la voie à une approche globale, intégrant les différents volets du pilotage des actifs et favorisant la mise en œuvre de cadres structurés en matière de maintenance.

Cependant, cette revue a également fait ressortir plusieurs limites. En effet, même si la numérisation est propice à une gestion plus efficace et proactive de la maintenance, l'intégration effective de ces technologies se heurte encore à des obstacles importants. Dans la littérature, les décisions relatives aux politiques d'entretien sont souvent basées sur des modèles mathématiques, mais ceux-ci sont souvent difficilement applicables aux données réelles. De plus, malgré les diverses méthodes de sélection et de priorisation des indicateurs proposées dans la littérature, il n'existe pas de cadres de mesure complets qui considèrent l'ensemble des aspects de la maintenance préventive et offre une perspective unifiée d'aide à la décision.

Ainsi, bien que les données relatives à la maintenance soient aujourd'hui de plus en plus disponibles auprès des entreprises grâce à la mise en place de logiciels de gestion intégrés, peu d'analyses approfondies et complètes ont été identifiées pour évaluer les processus de maintenance existants et les réviser afin d'en améliorer l'efficacité.

Dans ce contexte, l'objectif général de ce projet est **de développer une méthode de diagnostic capable d'identifier les opportunités d'amélioration dans les stratégies de maintenance déployées pour supporter des flottes d'équipements complexes.**

À partir de cet objectif général, trois objectifs spécifiques ont été définis :

- Identifier les méthodes existantes et les données pertinentes pour évaluer la performance d'une stratégie de maintenance mise en place ;

- Développer un cadre d'analyse structuré permettant d'évaluer la performance des plans de maintenance et d'identifier les écarts ou pistes d'amélioration, adapté aux spécificités de l'organisation partenaire ; et
- Valider le cadre d'analyse à partir des données historiques de maintenance d'une organisation qui doit supporter une flotte d'équipements vaste et hétérogène.

3.2 Méthodologie de recherche

L'objectif principal de ce projet étant de développer un cadre de diagnostic des stratégies de maintenance adapté aux caractéristiques de l'organisation, à ses contraintes et aux données disponibles, il est essentiel de s'appuyer sur une démarche scientifique rigoureuse qui permette à la fois d'explorer le contexte de l'étude, de concevoir une méthode adéquate et d'en valider l'efficacité.

La méthodologie CRISP-DM (*Cross-Industry Standard Process for Data Mining*) apparaît particulièrement adaptée pour répondre aux objectifs précédemment définis. C'est une méthodologie développée par IBM et publiée dans sa première version en 1999, qui est aujourd'hui la référence pour la résolution de problèmes d'extraction et d'analyse de données (*Présentation générale de CRISP-DM*, 2021). Elle a été retenue comme fil conducteur du développement de la méthode proposée en raison de son approche structurée et flexible, idéale pour conduire des projets liés à l'étude de données complexes comme celles issues des systèmes de gestion de maintenance. Cette approche sert toutefois à développer de nouveaux modèles de valorisation de données et non pour produire une démarche d'intervention ou comme dans notre cas, une méthode de diagnostic. Nous l'avons ainsi adapté pour nous permettre d'atteindre notre objectif spécifique.

L'atout principal de CRISP-DM réside dans sa capacité à s'appuyer sur des données réelles pour la prise de décision. Elle permet d'exploiter pleinement les données historiques en garantissant une approche fondée sur des faits concrets, et d'élaborer une méthode de diagnostic adaptée à la réalité du partenaire. CRISP-DM est aussi une méthodologie itérative et agile, permettant d'ajuster continuellement l'analyse en fonction des données collectées, des résultats et constatations intermédiaires. Ainsi, elle offre un cadre robuste pour l'analyse de données tout en étant suffisamment souple pour s'adapter aux spécificités du cas d'étude et aux besoins de l'organisation partenaire. Elle se décompose en six étapes principales.

La première étape est celle de la **compréhension du cas d'étude**. Elle consiste à analyser la situation actuelle de l'entreprise, à définir les objectifs de l'exploration de données et à identifier les contraintes du projet, en comprenant le fonctionnement et les besoins spécifiques de l'organisation partenaire. Dans notre cas, l'étude porte sur une organisation de transports en commun, responsable de l'exploitation et de la maintenance d'une flotte complexe de métros et d'autobus.

Une fois les objectifs métiers définis, la phase de **compréhension des données** permet d'explorer les données en vérifiant leur qualité, en identifiant les anomalies (données manquantes, erreurs, etc.) et en comprenant les caractéristiques de chaque type de donnée disponible. Cette étape est cruciale pour s'assurer que les données sont fiables et pertinentes pour l'analyse.

Ensuite vient la phase de **préparation des données**, où celles-ci sont nettoyées, transformées et préparées pour l'analyse. Cela inclut la gestion des valeurs manquantes, la normalisation ou la transformation des variables, et la création de nouveaux attributs qui pourront enrichir les analyses.

La quatrième étape correspond à la construction **de la méthode**. Cette étape consiste à appliquer les techniques analytiques appropriées pour développer une méthode répondant aux objectifs du projet. Ce travail s'effectue de manière itérative, avec plusieurs ajustements successifs visant à améliorer la précision et la pertinence des résultats obtenus à partir des données disponibles.

Une fois la méthode développée, il est nécessaire de la tester durant la phase d'**évaluation**, pour déterminer sa qualité et vérifier qu'elle permet d'atteindre les objectifs fixés. Si les résultats ne répondent pas aux attentes, les étapes précédentes peuvent être répétées pour affiner et améliorer la méthode.

Enfin, les résultats de l'analyse sont présentés aux parties prenantes et intégrés si nécessaire dans les processus métiers existants de l'entreprise partenaire. Cette dernière phase de **déploiement** implique souvent la création de rapports et de visualisations permettant de mettre les résultats dans une forme adaptée à leur compréhension et à leur utilisation. Toutefois, cette phase de déploiement ne pourra être entièrement réalisée dans le cadre de ce projet, car elle dépend d'une mise en œuvre opérationnelle par l'entreprise partenaire qui dépasse le périmètre académique de l'étude et ne rentre pas dans sa fenêtre temporelle restreinte.

La figure 3.1 présente les différentes phases qui seront suivies lors du développement de la méthode proposée, correspondant aux étapes de la méthodologie CRISP-DM.

L'étape d'analyse du partenaire industriel est menée dans la partie 4.1. La partie 4.2 est consacrée à la présentation des données disponibles, avant que le processus de collecte et de transformation de celles-ci soit détaillé dans la section 4.3. Dans la partie 4.4, la méthode proposée pour répondre à la problématique de recherche est développée. Les résultats obtenus à l'issue de son application aux données du cas d'étude seront présentés dans la section 5.2, permettant de mener la phase d'évaluation dans la partie 5.3.

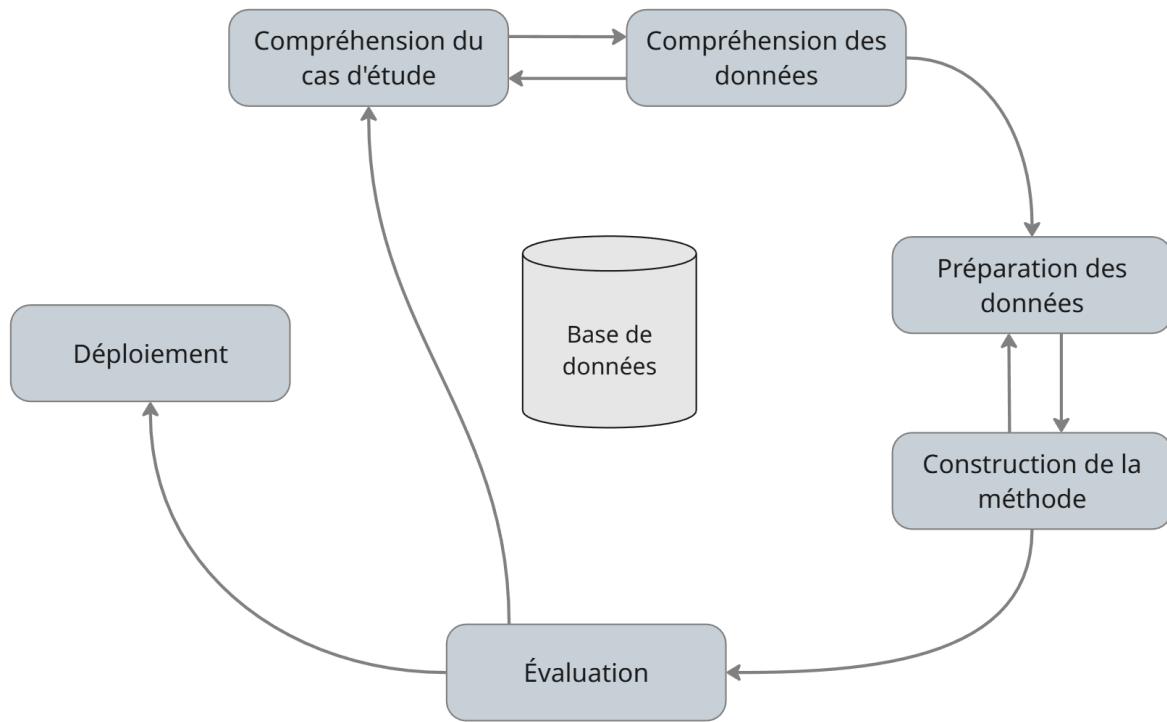


Figure 3.1 : Méthodologie CRISP-DM

3.3 Conclusion

La revue de littérature menée dans le chapitre précédent a mis en lumière les opportunités d'amélioration offertes par la numérisation de la gestion de la maintenance, mais également les limites qui persistent quant à l'exploitation efficace des données pour évaluer et ajuster les stratégies en place. Face à ces constats, l'approche méthodologique suivie pour développer un cadre holistique de diagnostic des stratégies de maintenance a été adaptée de CRISP-DM. Celle-ci offre en effet une structure progressive et itérative permettant de clarifier les attentes de recherche,

d'explorer les données disponibles, et de proposer une méthode répondant aux besoins du partenaire industriel.

Le chapitre suivant présente le développement de la méthode proposée, en suivant les étapes adaptées de la méthodologie CRISP-DM. Il couvre la compréhension du contexte du partenaire industriel, l'analyse et la préparation des données, ainsi que la construction du cadre de diagnostic. Cette organisation vise à fournir une vision claire et structurée des étapes sur lesquelles reposera l'application au cas d'étude présentée dans le chapitre 5.

CHAPITRE 4 DÉVELOPPEMENT DE LA MÉTHODE DE DIAGNOSTIC

Ce chapitre présente l'ensemble des étapes suivies afin de développer la méthode de diagnostic proposée, guidées par la méthodologie CRISP-DM qui sert de cadre scientifique à ce projet. Il expose les choix effectués et le déroulement de la mise en œuvre, en commençant par l'étude du partenaire industriel, puis par l'analyse et la compréhension des données disponibles. Le processus d'extraction et de préparation de ces données est ensuite expliqué, avant de décrire en détails le développement de la méthode.

4.1 Compréhension du cas d'étude

Dans cette partie, le contexte de l'étude est présenté, ainsi que la structure et le fonctionnement du partenaire industriel avec lequel elle a été réalisée.

4.1.1 Contexte

L'ensemble des données enregistrées dans le système de gestion intégré (ERP) d'une entreprise renferme un potentiel important pour atteindre les objectifs d'amélioration de la satisfaction client, optimiser l'efficacité opérationnelle et concevoir des outils d'aide à la décision. Ainsi, l'organisation partenaire avec laquelle cette étude a été réalisée souhaite valoriser ces données afin d'en tirer de la plus-value pour supporter ses processus opérationnels, améliorer la prise de décision, et permettre une utilisation plus efficiente des ressources disponibles.

L'organisation étudiée est l'un des plus importants opérateurs de transport collectif en Amérique du Nord. Elle assure plus de 80 % des déplacements en transport en commun dans son territoire d'intervention. Son réseau comprend quatre lignes de métro totalisant 68 stations sur 71 km de tunnels, ainsi qu'un parc de 2 000 bus desservant une superficie de 500 km².

Elle opère ses activités de gestion au sein d'une chaîne d'approvisionnement multiéchelons, c'est-à-dire au sein d'un système logistique structuré en plusieurs niveaux interconnectés reliant fournisseurs, fabricants, distributeurs et clients. Cela comprend notamment des activités d'attribution d'autobus à des parcours, de gestion de la disponibilité du matériel roulant, des activités de maintenance des actifs et des infrastructures. Pour une entreprise qui gère du matériel roulant, l'ERP permet d'enregistrer des données sur les flux de pièces de rechange, sur les occurrences de pannes ou encore sur les opérations d'entretien de ses véhicules.

4.1.2 Présentation du partenaire industriel

4.1.2.1 Structure de l'organisation

Les activités de l'organisation étudiée sont structurées en trois grandes divisions opérationnelles, chacune subdivisée en plusieurs unités. La première, dédiée à la maintenance du matériel roulant ferroviaire, est responsable de la gestion et de l'entretien de la flotte de métros. La deuxième concerne la maintenance des autobus, et comprend plusieurs unités logistiques et techniques. L'entrepôt central alimente les différents centres de maintenance des autobus, répartis sur le territoire selon leur niveau d'intervention (grosses réparations ou réparations mineures). La troisième division est chargée de l'entretien des infrastructures, incluant plusieurs unités spécialisées dans différents domaines techniques. La figure 4.1 schématise la structure de l'entreprise partenaire.

Dans le cadre de cette étude, l'analyse se concentrera principalement sur les divisions responsables des métros et des autobus.

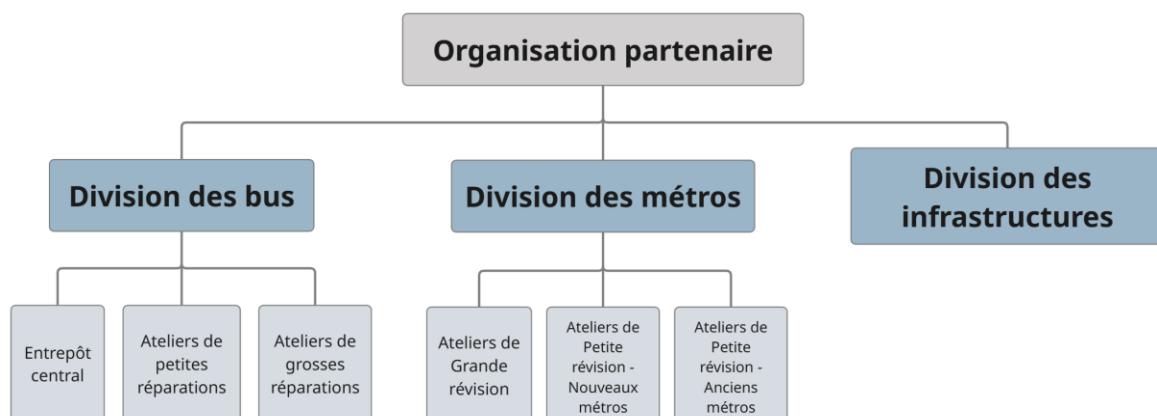


Figure 4.1 : Structure du partenaire industriel

4.1.2.2 Processus de maintenance : division des métros

Le département responsable de la gestion du matériel roulant ferroviaire s'occupe de la maintenance de deux types de rames de métro, qui assurent conjointement le service sur quatre lignes. Les trains les plus anciens encore en service ont commencé à être intégrés dès 1976. Pour ce type de métro, il y a eu au total 141 éléments introduits graduellement, ce qui équivaut à 47 trains (3 éléments par train). Une rénovation de l'ensemble de ces rames a été menée entre 2003 et 2007. Actuellement, 120 éléments sont encore actifs. Plus récemment, une nouvelle génération de

métros a été acquise par l'organisation, dont 54 trains ont d'abord été intégrés progressivement entre février 2016 et janvier 2019, puis 17 derniers trains entre 2020 et 2021. Cela donne au total 71 trains, tous encore actifs actuellement. Lors de la période de garantie, la maintenance de ces métros n'est pas assurée par l'organisation, mais par le constructeur. Ce n'est que depuis l'été 2023 que les garanties des premiers trains de nouvelle génération commencent à expirer. Cependant, les opérations étant effectuées dans les locaux de l'entreprise, les transactions et les consommations de marchandise sont accessibles dans le logiciel ERP. Seuls les ordres de maintenance correspondant à des activités de modification, d'amélioration et de remise à niveau de composants ne seront pas visibles sur SAP.

La division des métros est constituée de deux types d'ateliers : les ateliers de « Petite révision » dédiés aux réparations mineures, et les ateliers de « Grande révision ». Il y a deux ateliers de « Petite révision », chacun prenant en charge une génération spécifique de rames. Leur activité principale consiste à effectuer des interventions de pose et dépose de pièces pour remplacer les composants défectueux. Lorsque des composants nécessitent une analyse approfondie ou des réparations complexes, ils sont transférés vers les ateliers de « Grande révision », afin qu'ils puissent être diagnostiqués de manière plus détaillée et remis en état. De façon générale, un article peut avoir trois types de valorisation : N (neuf), R (réparé) ou X (à réparer). Lorsqu'il est acquis, l'article porte la valorisation N. Une fois consommé pour être posé sur un matériel roulant, il fait son premier cycle de vie. Lorsque son cycle de vie est complété, l'article est retiré du matériel roulant, puis retourné en valorisation X au magasin de « Grande révision ». Il y est alors remis à neuf, et sa valorisation passe de X à R.

Les pièces volumineuses et complexes sont entreposées dans un hangar situé dans l'atelier de révision majeure, tandis que les composants plus petits et fréquemment utilisés peuvent être stockés directement dans les ateliers de révision mineure pour en faciliter l'accès.

4.1.2.3 Processus de maintenance : division des autobus

Comme expliqué précédemment, le département en charge de la maintenance des autobus est découpé en 3 divisions : « l'entrepôt central », les ateliers de « petites réparations », et les ateliers de « grosses réparations ».

Les ateliers de « petites réparations » sont l'équivalent des ateliers de « Petite révision » de la division métro : c'est là que sont faites toutes les opérations de remplacements de composants,

directement sur les véhicules. Cependant, ces activités sont réparties sur 9 centres situés à différents endroits de la zone desservie par le réseau de transport. Lorsque des réparations plus importantes sont nécessaires, les composants sont transférés aux ateliers de « grosses réparations » afin d'y être remis en état.

L'entrepôt central sert à stocker les pièces volumineuses ou rarement utilisées, afin de ne pas encombrer les centres de « petites réparations » qui stockent en priorité les articles les plus fréquemment demandés par souci d'espace et de coûts. L'entrepôt réapprovisionne les magasins placés au niveau des centres de réparation. Une fois que les stocks en pièces de rechange au sein de ces magasins s'épuisent, des demandes de réapprovisionnement sont lancées à l'entrepôt central. L'entrepôt central, quant à lui, s'approvisionne directement auprès des fournisseurs ou via des ordres de fabrications lancés aux usines de l'organisation.

La division des autobus gère une flotte de plus de 2000 bus, dont la composition évolue de manière beaucoup plus fluctuante que la flotte de métros, puisque la durée de vie d'un bus est d'environ 16 ans. Il y a une vingtaine de références de bus, dont les principales catégories sont les autobus à plancher surbaissé (APS) classiques et les autobus APS articulés. Depuis 2012, l'organisation a commencé à se doter de bus hybrides et électriques. Son objectif est de remplacer progressivement l'ensemble des véhicules de la flotte afin d'avoir un parc d'autobus entièrement électriques d'ici quelques années.

4.1.2.4 Stratégies de maintenance

L'organisation partenaire utilise aujourd'hui deux stratégies prédominantes en matière de maintenance : la maintenance préventive et la maintenance corrective.

La maintenance préventive désigne l'ensemble des actions effectuées avant la défaillance et destinées à prévenir la dégradation d'un actif. Il s'agit donc d'une approche proactive, dont les tâches sont basées sur la planification et l'ordonnancement. Elle implique des interventions régulières et planifiées sur les équipements afin de les maintenir en bon état de fonctionnement et d'empêcher les dysfonctionnements. La détermination de ces actions se fait en analysant les risques, et les informations de planification vont généralement être incluses dans un plan d'entretien qui indique quand et comment la maintenance doit être effectuée. On y trouve le cycle d'entretien, c'est-à-dire l'intervalle entre les activités, le détail des opérations à effectuer, les pièces nécessaires pour chaque tâche (gamme opératoire).

La maintenance corrective, quant à elle, est réalisée à la suite d'un bris. Elle englobe toutes les actions effectuées après une panne ou après qu'un défaut ait été reconnu, afin de remettre l'élément défectueux dans un état qui lui permet de remplir sa fonction. Ainsi, elle apparaît plus comme une maintenance de dépannage, une approche réactive. Cependant, elle peut être planifiée (un problème est identifié, mais la réparation peut être différée) ou non planifiée (lorsqu'une panne inattendue se produit et nécessite une intervention immédiate).

Chacune de ces stratégies présente des avantages et des inconvénients. La maintenance préventive permet de réduire le risque de pannes imprévues, de prolonger la durée de vie des équipements et d'améliorer la fiabilité des actifs. Cependant, elle peut engendrer des coûts plus élevés en raison de l'exécution d'interventions parfois prématurées ou inutiles, pouvant engendrer de la sur-maintenance (Hamasha et al., 2023). Elle nécessite donc une planification minutieuse ainsi qu'un suivi rigoureux. En effet, si les seuils de remplacement sont mal définis, il peut y avoir un gaspillage de ressources.

À l'inverse, la maintenance corrective offre une flexibilité opérationnelle, car elle se concentre uniquement sur les interventions nécessaires après une défaillance. Elle peut également réduire les coûts immédiats liés à des interventions inutiles. Néanmoins, elle expose à des risques importants, notamment pour une compagnie de transports publics qui doit éviter les interruptions de service entraînant une insatisfaction des usagers et des risques pour la sécurité. De plus, la dépendance à une maintenance principalement corrective peut engendrer une usure accélérée des équipements et des coûts imprévus élevés.

Ainsi, il est important d'établir un équilibre entre ces deux approches, en mettant en œuvre une stratégie de maintenance optimisée. Dans cette démarche, il est pertinent d'utiliser des outils modernes tels que l'analyse de données, afin d'ajuster les cycles d'entretien en fonction des conditions réelles d'utilisation des équipements et d'améliorer ainsi l'efficacité globale du système de maintenance. C'est dans cette optique que s'inscrit ce projet et que sera ainsi réalisée la suite de l'étude.

4.2 Compréhension des données

Cette section est consacrée à l'analyse des données du partenaire industriel, correspondant à la phase de compréhension des données de la méthodologie CRISP-DM. Cette étape vise à identifier les principales variables dans les données disponibles, à évaluer leur qualité, et à sélectionner les informations nécessaires à la construction de la méthode d'évaluation.

4.2.1 Source de données

Afin de superviser l'ensemble de ses processus opérationnels, l'organisation partenaire utilise le logiciel de gestion intégrée SAP (*Systems, Application and Products for data processing*). Il permet aux entreprises de centraliser et de gérer efficacement leurs opérations dans divers domaines tels que la finance, la gestion des stocks, la logistique, les ressources humaines, et la maintenance. Le progiciel a d'abord été implanté dans la division des métros en 2015, avant d'être également intégré aux processus de la division des autobus en 2019. Ce n'est donc qu'à partir de ces années que les données historiques sont disponibles pour chacun des deux secteurs d'affaires.

Étant donné que l'étude se concentre sur la maintenance, les modules SAP pertinents sont les modules PM (*Plant Maintenance*) et MM (*Materials Management*). C'est ici que sont stockées toutes les données liées à la gestion, la planification et l'exécution des activités de maintenance. Ces données offrent un potentiel considérable pour améliorer les processus de gestion de la maintenance, il convient donc de les collecter et de les analyser de manière rigoureuse afin de soutenir efficacement la prise de décision. Dans la partie suivante sont présentés les différents types de données disponibles dans ces modules et utiles pour la suite de l'étude.

4.2.2 Types de données

Dans le cadre de la gestion de la maintenance et des stocks, les modules PM et MM du progiciel SAP offrent un large éventail de données essentielles pour le suivi et l'optimisation des opérations.

Les ordres de travail, tout d'abord, sont au cœur de la gestion de l'ensemble des interventions techniques. Chaque ordre contient des informations détaillées sur les travaux réalisés, les ressources nécessaires (main-d'œuvre, pièces de rechange, etc.), et le statut de l'intervention (planifié, en cours, terminé). Ces ordres permettent un suivi rigoureux des activités liées à la maintenance et une gestion efficace des opérations, en assurant la planification des interventions. Il existe différents types d'ordres, en fonction de la nature de l'activité réalisée. Cette information

permet par exemple de distinguer les ordres de fabrication, de maintenance préventive, de maintenance corrective, d'inspection, etc. Nous verrons plus en détail ces différents types d'ordres dans le paragraphe 4.3.2.

Tout ordre de travail découle d'un avis de maintenance qui a été approuvé. Les avis de maintenance représentent des rapports signalant des problèmes techniques ou des demandes d'intervention. Ces avis incluent des descriptions des pannes, les équipements concernés et les dates d'émission. Lorsqu'un avis est reçu, une analyse est effectuée afin de lui assigner un statut de priorité, permettant d'ordonnancer les interventions à exécuter. Ainsi, les avis de maintenance permettent une meilleure anticipation et planification des activités.

Ensuite, la transaction MB51 de SAP permet de collecter les données concernant les mouvements de stock. Elle fournit un historique détaillé des flux dans le système, y compris les entrées, sorties, transferts et consommations d'articles. C'est le code mouvement qui permet d'identifier s'il s'agit d'un déplacement de pièce, d'un échange interdivision, d'une réparation ou d'une consommation. Ces données sont cruciales pour suivre l'utilisation des pièces de rechange et identifier les tendances de consommation. Il est important de préciser que seules les consommations d'articles suivis dans le système sont visibles. En effet, il y a des articles dits consommables ou Kanban qui sont disponibles en libre-service dans les magasins, et dont les prélèvements ne seront pas signalés sur SAP. Ce sont des articles non critiques, souvent à faible coût comme des vis, des écrous ou des goupilles.

On trouve également dans les modules PM et MM les données relatives aux plans d'entretien, c'est-à-dire aux programmes de maintenance préventive. Grâce aux transactions SAP, on peut avoir accès aux différents plans mis en place pour chaque équipement, ainsi que leur fréquence d'exécution et les historiques de planification. À chaque plan d'entretien sont associés un ou plusieurs postes d'entretien, correspondant aux tâches spécifiques à réaliser. Sur chacun de ces postes, une gamme est disponible pour décrire les différentes opérations, ainsi que les pièces nécessaires et les quantités requises. Ce niveau de détail permet de structurer et de standardiser les interventions, facilitant ainsi leur exécution et leur suivi.

Un plan d'entretien est spécifique à un poste technique. Les postes techniques représentent les unités physiques ou fonctionnelles d'un système nécessitant une surveillance et une maintenance régulière. La transaction SAP IH06 donne accès à la hiérarchie des équipements, permettant ainsi

de visualiser les relations entre les différents sous-systèmes et composants. C'est le compteur qui va faire le lien entre un plan d'entretien et un poste technique. Ce compteur permet de suivre l'activité, c'est-à-dire le kilométrage réalisé jour par jour par le métro ou le bus. Le plan d'entretien se déclenche au bout d'un certain kilométrage, en fonction de la stratégie d'entretien. À partir des données du compteur et de l'activité prévue pour le train, une date est planifiée pour la réalisation des activités du plan. Cette date est revue chaque jour en fonction du kilométrage réel. En effet, certains jours, le train peut être mis à l'arrêt et ne pas faire le kilométrage prévu.

Enfin, les données sur les articles sont accessibles via la transaction MM03 et stockées dans différentes tables comme les tables MARC et MARA. Elles contiennent des informations générales sur les articles, telles que la description de l'article, sa catégorie, sa criticité, son prix, etc. Elles permettent également d'avoir des informations sur les processus d'approvisionnement et de planification associés à une pièce. À chaque article est associé un code, permettant de savoir de quel type de pièce il s'agit. Ce code ne traduit pas d'un identifiant unique pour chaque pièce physique, il n'est donc pas possible de distinguer une pièce d'une autre s'il s'agit du même type d'article.

4.2.3 Données et attributs pertinents

En raison de la flexibilité de SAP, conçu pour s'adapter à divers contextes d'entreprise et couvrir un large éventail de processus métiers, les tables contiennent une grande variété d'attributs, propres à chaque module et personnalisés selon les pratiques de l'entreprise. Ainsi, les données disponibles peuvent varier d'un environnement à l'autre, et certains champs peuvent être absents, non renseignés ou non pertinents dans le cadre de l'analyse. Il est donc essentiel de passer en revue les variables disponibles afin de sélectionner celles qui sont réellement utiles pour répondre aux objectifs de l'étude. Cette sélection permet d'extraire des données cohérentes et exploitables, tout en évitant la surcharge d'informations inutiles.

La table 4.1 condense tous les attributs disponibles dans les différentes tables de données et identifiés comme utiles pour la suite de l'étude, avec la transaction SAP qui permet d'y avoir accès ainsi que les colonnes où des lignes contiennent des valeurs vides. Certaines valeurs manquantes résultent d'erreurs humaines, comme l'absence de description dans des ordres ou avis, mais ces cas restent marginaux et n'impactent pas l'analyse, car ils ne concernent pas des attributs essentiels. D'autres absences sont normales et reflètent la nature des enregistrements. Par exemple, seuls les

mouvements de stock liés à une opération de maintenance sont associés à un ordre de travail, contrairement aux approvisionnements ou transferts entre entrepôts. Ainsi, pour extraire les consommations de pièces liées aux opérations de maintenance, il convient de retirer les mouvements non reliés à un ordre.

Tableau 4.1 : Champs de données disponibles sur SAP et sélectionnés pour l'analyse

Table	Attribut	Type de donnée	Source	Valeurs manquantes ?	Table	Attribut	Type de donnée	Source	Valeurs manquantes ?
Ordres de maintenance	Numéro d'ordre	Nombre entier			Mouvements de stock	Article	Nombre entier		
	Description de l'ordre	Texte		X		Code mouvement	Nombre entier		
	Type d'ordre	Texte				Division	Nombre entier		
	Type de travail	Texte		X		Date	Date		
	Division	Nombre entier				Quantité	Nombre	SAP - MB51	
	Poste technique	Texte	SAP - IW39	X		Unité de la quantité	Texte		
	Équipement	Nombre entier		X		Ordre	Nombre entier		X
	Sous-ensemble	Texte		X		Plan d'entretien	Texte		
	Avis	Nombre entier				Description du plan	Texte		
	Date de l'ordre	Date				Type de plan	Texte		
Avis de maintenance	Plan d'entretien	Texte		X		Zone de tri	Texte	SAP - IP16	
	Statut système	Texte				Statut système	Texte		
	Travail réel (h)	Nombre décimal	SAP - IW47	X		Équipement	Nombre entier		X
	Travail planifié (h)	Nombre décimal	SAP - IW47	X		Sous-ensemble	Texte		X
	Numéro de l'avis	Nombre entier				Poste technique	Texte		X
	Description de l'avis	Texte		X		Poste d'entretien	Nombre entier	SAP - IP06	
	Type d'avis	Texte				Gamme	Texte		
	Poste technique	Texte		X		Composante	Nombre entier	Table Gammes-Articles	X
	Équipement	Nombre entier		X		Quantité	Nombre	Table Gammes-Articles	X
	Sous-ensemble	Texte		X		Cycle du plan	Nombre	SAP - Table MMPT	
Kilométrages	Date de l'avis	Date	SAP - IW29			Unité du cycle	Texte	SAP - Table MMPT	
	Date de clôture	Date		X		Article	Nombre entier		
	Article	Nombre entier		X		Division	Nombre entier		
	Priorité	Nombre entier		X		Désignation article	Texte		
	Poste technique	Texte				Code ABC	Texte	SAP - MM60	
	Document de mesure	Nombre entier				Prix	Nombre		X
	Date	Date				Gestionnaire MRP	Texte	SAP - Table MARC	
	Valeur mesurée (km)	Nombre entier	SAP - IK17	X					

Ainsi, l'exploitation de tous ces différents types de données reliés à la gestion de la maintenance permet non seulement de suivre l'état des actifs et la consommation des ressources, mais aussi d'optimiser la planification des interventions, la gestion des stocks et la prise de décision stratégique en matière de maintenance.

4.3 Préparation des données

Dans cette partie, nous nous concentrons sur la collecte et la préparation des données, afin de les structurer et de les rendre exploitables pour la suite de l'analyse. Le processus d'extraction des données ainsi que les différentes transformations qui leur ont été appliquées sont détaillés.

4.3.1 Extraction et transformation des données

C'est à partir du progiciel SAP que toutes les données nécessaires à notre étude ont pu être collectées.

4.3.1.1 Ordres de maintenance et données de consommations

Tout d'abord, il est nécessaire d'obtenir l'historique de toutes les activités de maintenance réalisées au sein des deux divisions d'affaires étudiées. Pour cela, les transactions utiles sont les transactions MB51 et IW39, donnant accès respectivement aux mouvements de stock et aux ordres de maintenance. Le progiciel permet de transférer les données directement vers des fichiers Excel.

Afin de garantir une analyse exhaustive des tendances de maintenance à long terme et de recueillir un maximum de données, nous avons extrait les données sur la période la plus longue possible, c'est-à-dire du 02/11/2015 au 10/02/2025 (date où se sont faites les dernières extractions) pour la division des métros, et du 20/10/2019 au 10/02/2025 pour celle des autobus. Pour réduire la charge demandée au progiciel, nous avons réalisé une extraction année par année.

Grâce à la transaction IW39, on peut extraire directement un fichier Excel regroupant l'ensemble des ordres de travail qui ont eu lieu sur la période d'étude. Différentes informations sont associées à chaque ordre, comme le type d'ordre, le type de travail, le poste technique, le sous-ensemble, la date, etc. Il est important de préciser que dans le cadre de cette étude, seuls les ordres de maintenance sont étudiés. Ainsi, tous les ordres de fabrication ont été exclus.

Une autre information intéressante à regarder, mais qui n'est pas directement accessible par la transaction IW39, est le total des heures de travail (réelles et planifiées) associées à chaque ordre. C'est grâce à la transaction IW47, qui permet d'afficher les confirmations enregistrées pour les ordres et ainsi de vérifier les heures travaillées, que nous avons pu rajouter ces données à la table. La structure de la matrice finale des ordres de maintenance est décrite dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 : Structure de la table des ordres de maintenance

Ordre	Type d'ordre	Type de travail	Division	Poste technique	Sous-ensemble	Avis	Date planifiée	Date de clôture	Description de l'ordre	Statut système	Travail planifié (h)	Travail réel (h)
1	M1IN	M01				10	02-05-2016	09-05-2016		CONF	1,5	1,5
2	M1GE	M09				20		16-03-2020		CNFP	4,5	6
3	M1PE	M02				30	04-06-2022	02-06-2022		TSUP	0,75	1
4	M1CR	M04				40		24-09-2023		CONF	1,5	1

Une des colonnes de cette table donne le statut système de chaque ordre de maintenance. Il s'agit d'une indication de l'état ou de l'avancement d'un ordre. Il est mis à jour par SAP en fonction des actions effectuées sur l'ordre. Il peut s'agir par exemple de sa création, sa clôture, ou encore son annulation. Un filtrage de la table a été effectué à partir de cette donnée : seuls les ordres portant la mention « confirmé » (CONF) ou « confirmé partiellement » (CNFP) ont été gardés. Cela permet d'éliminer les ordres de maintenance qui ont été annulés, supprimés, et qui ne correspondent pas à de réelles opérations effectuées dans le service de maintenance.

Pour ce qui est des consommations de pièces, la transaction utile est la MB51. En sortie de celle-ci, on obtient l'ensemble des mouvements pour les différents articles. Or, seuls les mouvements correspondant à des consommations réelles sont pertinents pour notre étude. Il a donc fallu filtrer ces données et les mettre en forme pour construire la matrice des consommations pour chaque division sur la période d'étude. Pour cela, nous avons utilisé l'algorithme de compensation développé dans une étude réalisée précédemment, et que nous ne détaillerons pas ici (Deschamps, 2024).

Une fois la matrice des consommations obtenue, on peut y intégrer à partir du numéro d'ordre de maintenance associé à chaque consommation les informations issues de la transaction IW39 : le type d'ordre, le type de travail, le plan d'entretien, la gamme associée, etc. Finalement, on obtient une table résumant l'ensemble des consommations qui ont eu lieu sur la période d'étude, les dates de consommation et les différentes informations associées. La structure de cette table est visible dans le tableau 4.3. Le même filtrage que pour la table des ordres de maintenance, c'est-à-dire à partir du statut système, a été effectué.

Tableau 4.3 : Structure de la table des consommations

Article	Date	Quantité consommée	Division	Ordre	Description de l'ordre	Type d'ordre	Type de travail	Poste technique	Sous-ensemble
1	2017-04-11	1		100		M1CR	M04		
2	2019-05-03	2		200		M2PJ	MJJ		
3	2022-12-02	1		300		M1CR	M01		
4	2023-10-18	6		400		M1PE	M02		

4.3.1.2 Avis de maintenance

Avec l'utilisation de la transaction IW29 et l'extraction des avis de maintenance qui ont été émis sur l'ensemble de la période, il est possible d'ajouter des informations complémentaires aux tables des ordres de maintenance et des consommations. Ces informations concernent principalement l'origine de la demande d'intervention : si elle est issue d'une périodicité, donc de l'exécution d'un plan de maintenance, s'il s'agit d'une défaillance, d'un signalement d'un problème identifié durant une inspection, etc. Ces données seront précieuses pour l'étude des défauts survenus sur les différents équipements. Grâce au numéro d'ordre associé à chaque avis de maintenance, on peut enrichir les tables précédentes avec les colonnes suivantes : le numéro d'avis, le type d'avis, et la description de l'avis.

De plus, en filtrant ces données en fonction du type d'avis, nous avons pu construire une matrice regroupant l'ensemble des avis reportant des défaillances et pannes, c'est-à-dire des avis liés à la maintenance corrective. Cette matrice va nous servir à analyser les tendances de défaillances dans chaque division d'affaires, d'étudier l'impact de ces imprévus et d'identifier les systèmes ou pièces les plus touchés. Pour la division des métros, il y a 3 types d'avis correctifs : les avis MS (Signalement en service), les avis MN (Suite à l'inspection) et les avis MC (Curatif). Pour la division des bus, il y a également 3 types d'avis correctifs : les avis AV (Signalement en service), les avis AS (Suite à l'inspection), et les avis AC (Coupon). Les coupons sont des demandes de vérification faites par des clients externes s'ils constatent un problème ou quelque chose d'inhabituel, comme les chauffeurs de bus. La structure de la matrice des défaillances finale est exposée dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4 : Structure de la table des avis correctifs

Avis	Type d'avis	Description de l'avis	Poste technique	Équipement	Sous-ensemble	Article	Date de l'avis	Date de clôture	Ordre	Priorité
1	MN					Article 1	09-10-2018	10-10-2018	10	2
2	MN					Article 2	22-07-2017	22-07-2017	20	3
3	MC					Article 3	21-10-2021	10-01-2022	30	7
4	MS					Article 3	23-12-2022	26-12-2022	40	4

Un filtrage a également été appliqué sur cette table, en ne gardant que les avis associés à un ordre de maintenance. En effet, certains avis peuvent être clôturés sans donner suite à un ordre de travail, et donc à une action corrective. Le problème reporté par l'avis peut par exemple ne pas être considéré comme pertinent ou assez grave pour être pris en compte.

4.3.1.3 Données liées aux postes techniques

Il est également crucial de collecter les données liées aux postes techniques, et donc aux équipements (autobus et trains) maintenus par l'organisation. Ces informations vont permettre de tracer précisément les interventions effectuées sur chaque actif, d'identifier les équipements les plus défaillants, et d'étudier les stratégies de maintenance en fonction de l'utilisation de chaque véhicule.

La transaction utile pour obtenir les postes techniques d'une division est la transaction IH06. Chaque bus ou métro est associé à une nomenclature, décrivant sa structure hiérarchique. Elle permet de lister l'ensemble des systèmes et sous-systèmes qui composent l'actif, facilitant ainsi la gestion de la maintenance et le suivi des pièces détachées. En effet, lorsque des avis ou des ordres de maintenance sont créés pour un poste technique, la nomenclature permet d'indiquer clairement les sous-ensembles ou composants concernés par l'intervention. Pour les bus, la structure d'un véhicule se découpe en 4 niveaux :

- Poste technique : numéro à 5 chiffres unique à chaque autobus. *Exemple : 39001 ;*
- Système : *Exemple : Freins 39001-04 ;*
- Sous-système : *Exemple : Freins avant 39001-04-01 ; et*
- Composant : *Exemple : Freins avant droit 39001-04-01-06.*

Pour les métros, la nomenclature n'est pas la même pour les deux types de rames, mais se découpe également en 4 niveaux :

- Train : associé à un numéro unique, commençant par 10 pour les métros plus récents et 78 pour les métros plus anciens. *Exemple : 78-070 ;*
- Voiture (remorque ou motrice) : *Exemple : 78-070-640 ;*
- Système : *Exemple : Habillage et équipements mécaniques 78-070-640-066 ; et*
- Sous-système : *Exemple : Fenêtres latérales voyageur 78-070-640-066-FLV.*

La transaction IK17 permet de suivre l'historique des kilométrages des équipements, en donnant l'ensemble des documents de mesure associés au compteur de chaque véhicule. On peut ainsi obtenir pour chaque train et bus l'évolution du kilométrage cumulé. La valeur du compteur kilométrique est mise à jour quotidiennement, même si le véhicule reste immobilisé pendant une ou plusieurs journées.

4.3.1.4 Données sur la maintenance préventive

La transaction IP16 permet d'extraire l'ensemble des plans d'entretien définis pour une division d'affaires, ainsi que le poste technique qui y est associé. Avec la transaction IP06, on peut récupérer pour chaque plan l'ensemble des postes d'entretiens qui y sont associés, avec la gamme de maintenance qui décrit les tâches à réaliser. On obtient donc finalement une table donnant pour chaque plan d'entretien les différentes étapes (postes d'entretien) et les besoins matières.

Tableau 4.5 : Structure de la table des plans d'entretien et besoins matières

Plan d'entretien	Poste d'entretien	Description du poste	Gamme	Poste technique	Sous-ensemble	Article	Quantité requise
Plan n°1	Poste 1		Gamme 1			Article 1	2
Plan n°2	Poste 2		Gamme 2			Article 2	1
Plan n°3	Poste 3		Gamme 3			Article 3	6
Plan n°4	Poste 4		Gamme 1			Article 1	2

Une dernière information à récupérer concernant les plans d'entretien est le cycle de maintenance, c'est-à-dire l'intervalle entre chaque intervention. Celui-ci peut être défini temporellement, c'est-à-dire en jours, semaines ou mois, ou défini selon l'utilisation de l'équipement, c'est-à-dire selon

le kilométrage. C'est le cas pour la majorité des plans d'entretien utilisés dans l'organisation. Ainsi, chaque plan d'entretien va s'exécuter automatiquement au bout d'un certain nombre de kilomètres parcouru par le train ou le bus. Ces données ont pu être extraites en accédant à la table MMPT.

4.3.2 Classification des ordres de maintenance

Afin de mener une analyse rigoureuse des stratégies de maintenance, la première étape a consisté à classifier l'ensemble des ordres de maintenance historiques selon leur nature préventive ou corrective. Cette distinction est essentielle, car différentes stratégies d'entretien sont appliquées, et chaque activité doit être rattachée à la bonne catégorie pour garantir la cohérence des analyses. Pour ce faire, plusieurs champs de la base de données ont été mobilisés, tels que le type d'ordre, le type de travail et le type d'avis. Toutefois, ces éléments ne suffisent pas toujours à eux seuls pour déterminer avec précision la stratégie associée. C'est pourquoi des échanges approfondis ont été menés avec les experts de maintenance afin d'intégrer leur connaissance des pratiques opérationnelles dans le processus de classification et d'aligner celui-ci à la réalité du terrain.

Grâce à cette approche, chaque ordre de maintenance a pu être attribué à la stratégie d'entretien correspondante. La maintenance préventive regroupe ainsi l'ensemble des interventions réalisées en amont d'une défaillance pour en prévenir l'apparition, tandis que la maintenance corrective désigne les actions prises après le signalement d'un défaut. Cette classification constitue un socle fondamental pour les analyses menées par la suite.

4.3.2.1 Classification pour la division des métros

Il existe 8 types d'ordres différents dans la division des métros. Ces types d'ordres ainsi que leur description, telle que renseignée sur SAP, sont résumés dans le tableau suivant.

Tableau 4.6 : Types d'ordres utilisés dans la division des métros

Type d'ordre	Description SAP
M1PE	Ordre de périodicité
M1EP	Ordre entretien préventif
M1CR	Correctif régulier
M1IN	Ordre d'inspection

Tableau 4.6 : Types d'ordres utilisés dans la division des métros (suite et fin)

M1IQ	Ordre d'inspection avec lot de contrôle
M1GE	Travaux généraux
M2MD	Ordre de modification enfant
M2PJ	Atelier PR – Projet

Les ordres de type M1PE désignent des ordres de maintenance préventive générés à intervalles réguliers selon des cycles définis dans les plans d'entretien. Ils visent à anticiper les pannes potentielles et à maintenir les équipements en bon état grâce à des inspections et interventions planifiées. Lorsqu'une pièce est remplacée de manière corrective avant la date prévue, le plan est réinitialisé et l'ordre M1PE associé prend le type de travail M05, au lieu de M02. Ces cas ont été exclus pour éviter les doublons avec les ordres correctifs correspondants (3 380 ordres concernés).

Les ordres M1EP concernent les retraits planifiés de roues, visant à répartir l'usure des pneus pour prolonger leur durée de vie. Bien qu'ils ne soient pas liés à un plan d'entretien, ils relèvent d'une logique préventive planifiée : on sait quand le pneu aura atteint sa durée de vie par rapport aux prévisions temporelles de kilométrage du train.

Le type d'ordre M1CR permet de traiter les dysfonctionnements et pannes signalés par un avis correctif. Ces ordres sont donc déclenchés de manière réactive après notification d'une anomalie, et ont pour but de réparer ou remplacer les pièces défectueuses pour restaurer la fonctionnalité initiale de l'équipement.

Les ordres M1IN et M1IQ sont liés à des inspections périodiques prévues par les plans d'entretien. Leur objectif est de vérifier régulièrement l'état des actifs, d'identifier tout signe de détérioration avant qu'une panne ne survienne, et de prendre des mesures correctives si nécessaire. L'inspecteur dispose en effet de différents points d'inspection à vérifier, pour lesquels il peut signaler une défectuosité en créant un avis MN (Suite à l'inspection). Selon le type de travail, ces ordres sont classés en préventifs (M01) ou correctifs (M03), ce dernier correspondant aux interventions en réserve d'inspection. La réserve d'inspection est le lieu où vont être faites toutes les réparations urgentes ordonnées selon les problèmes détectés durant l'inspection du train.

Enfin, les ordres M1GE, M2MD et M2PJ relèvent de la maintenance corrective. Ils sont déclenchés suite à la détection de défauts ou problèmes récurrents nécessitant des modifications techniques ou structurelles, généralement planifiées à l'aide d'une gamme. Ces activités visent à améliorer la fiabilité des actifs et à corriger des défauts qui ne peuvent pas être résolus par une simple réparation.

La figure 4.2 représente l'algorithme de classification appliquée aux données relatives aux métros. Le nombre total d'ordres de maintenance traités ainsi que le nombre d'ordres classés dans chaque catégorie sont également précisés.

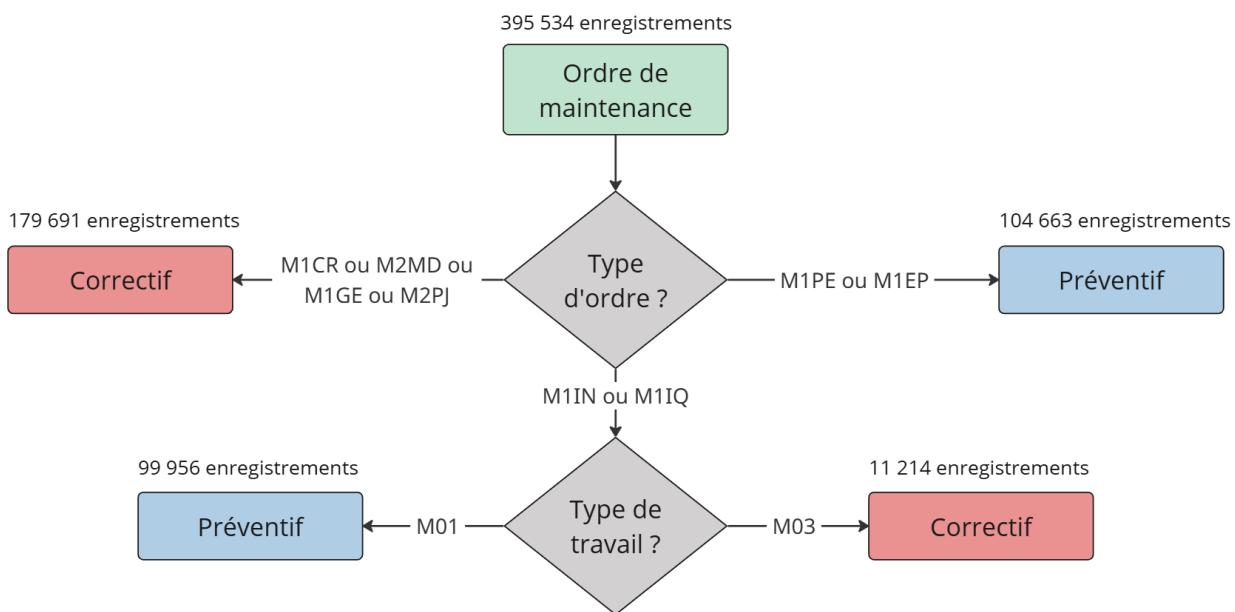


Figure 4.2 : Classification des ordres de maintenance – division des métros

4.3.2.2 Classification pour la division des bus

Dans la division qui s'occupe de la maintenance des autobus, il existe 9 types d'ordres différents, tels que résumés dans le tableau suivant.

Tableau 4.8 : Types d'ordres utilisés dans la division des autobus

Type d'ordre	Description SAP
A0CR	Travaux correctifs
A0CT	Travaux curatifs

Tableau 4.9 : Types d'ordres utilisés dans la division des autobus (suite et fin)

A0P2	Programme pièces requises
A0DE	Travaux divers d'entretien
A0GF	Travaux gestion de la flotte
A0MD	Travaux modification
A0IN	Travaux inspection
A0PL	Ordre de visite
S1RT	SES - Route Entretien Sanitaire

Tout d'abord, les ordres A0GF, A0PL et S1RT correspondent à des activités particulières, telles que la mise en service ou la mise au rancart des bus. N'étant pas directement liées à la maintenance des véhicules, ces catégories ont été exclues de l'analyse.

Les ordres A0P2 sont l'équivalent des ordres M1PE utilisés pour les métros. Ils représentent la maintenance préventive périodique déclenchée par les plans d'entretien, et visant à prévenir les pannes en assurant un entretien régulier et planifié des équipements.

Les ordres A0CR et A0CT couvrent les interventions de maintenance corrective, déclenchées après la détection d'un dysfonctionnement (par un opérateur, lors d'une inspection ou à l'atelier). Certains travaux associés à ces ordres relèvent néanmoins de la maintenance préventive, notamment ceux identifiés par les types de travail ACM (programme préventif), AMF (mesure des freins) et AMP (mesure des pneus).

Ensuite, les ordres A0IN regroupent les activités d'inspection planifiées sur les autobus. Issus de plans d'inspection définissant des points de contrôle précis, ils permettent d'évaluer l'état des véhicules et de détecter de manière anticipée les défaillances potentielles. Si nécessaire, des avis AS sont émis, déclenchant des ordres correctifs de type A0CR ou A0CT.

Les ordres A0MD concernent des modifications techniques visant à améliorer les performances, la sécurité ou la fiabilité des autobus. Ces interventions peuvent être correctives (en réponse à un problème identifié) ou préventives (dans le cadre d'un programme d'amélioration global), la

distinction étant faite selon le type de travail. Elles sont toujours planifiées et réalisées à partir d'une gamme prédéfinie.

Finalement, les ordres A0DE regroupent divers travaux de maintenance corrective, comme la correction de défauts, le remplacement de composants ou encore le nettoyage ciblé de certaines parties du véhicule.

La figure 4.3 représente l'algorithme de classification qui a été appliqué aux données collectées pour la division d'affaire gérant les autobus.

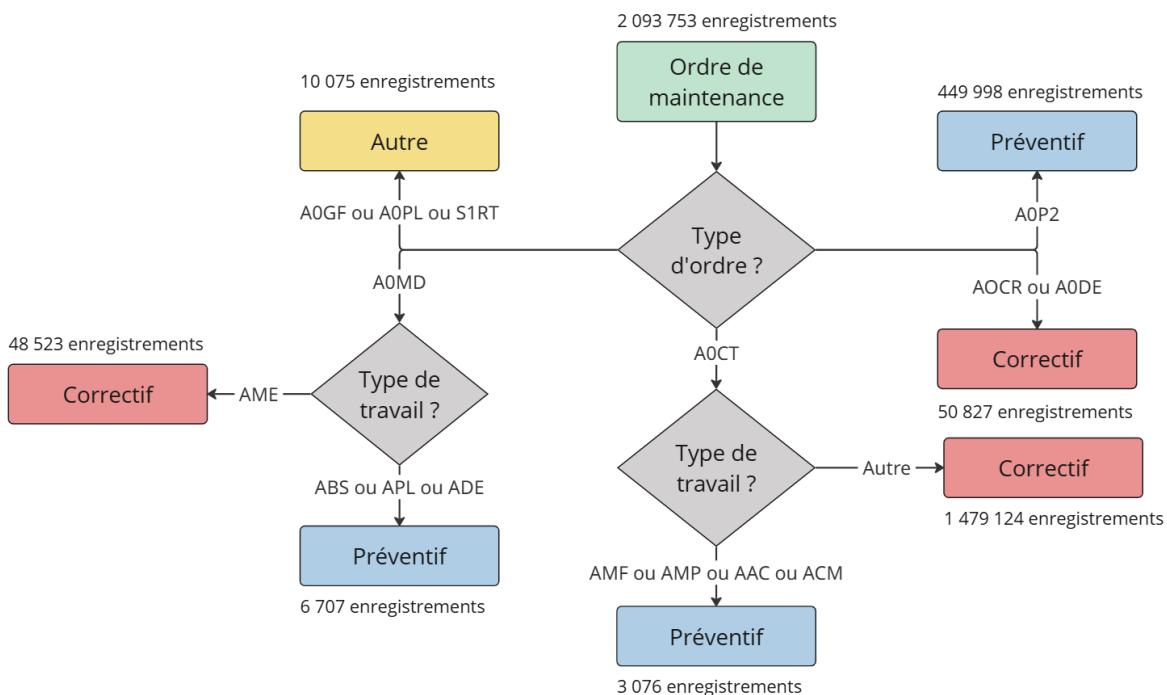


Figure 4.3 : Classification des ordres de maintenance – division des autobus

4.4 Développement de la méthode

À l'issue de la phase de collecte et de préparation des données, l'ensemble des informations essentielles issues du système SAP a été rassemblé, offrant une vue d'ensemble structurée des activités de maintenance et des défaillances enregistrées sur la période étudiée. Ces données ont ensuite été centralisées dans Power BI, afin de faciliter les croisements d'informations, la création de nouvelles tables et le calcul de colonnes adaptées aux besoins spécifiques de la phase de

construction de la méthode. Cette partie présente justement la méthode proposée pour diagnostiquer la performance des stratégies de maintenance mises en place et ainsi répondre aux objectifs du projet.

4.4.1 Rappel du contexte et des objectifs du diagnostic

La maintenance joue un rôle fondamental dans l'efficacité des opérations d'un organisme de transport public, qui doit garantir la fiabilité et la disponibilité d'une flotte variée de bus et de métros afin d'assurer la continuité du service pour des milliers de passagers quotidiens. L'un des principaux défis réside dans la gestion conjointe de la maintenance préventive et corrective, pour des équipements présentant des profils de vieillissement, de défaillance et de criticité différents. La détermination d'intervalles de maintenance appropriés est particulièrement sensible : ils doivent être ni trop longs pour limiter les défaillances imprévues, ni trop courts pour éviter une sur-maintenance. Il est donc indispensable de suivre les performances réelles des stratégies mises en place afin d'ajuster les plans d'entretien en fonction de l'historique observé, et soutenir la prise de décisions éclairées. Dans ce contexte, la méthode proposée vise à exploiter les données historiques de maintenance pour évaluer la pertinence des stratégies en vigueur, détecter les écarts de performance, et identifier les composants à prioriser.

Bien que plusieurs études soulignent l'intérêt d'une approche fondée sur les données (Deprez et al. (2023) ; Weeks et Leite (2022) ; Zhou et al. (2014)), rares sont celles qui s'intéressent à l'évaluation de plans déjà en place. L'approche de Ge et al. (2023) offre des pistes intéressantes, car elle se concentre sur les performances de l'entretien préventif déjà en place, en proposant un cadre d'évaluation centré sur l'intervalle de maintenance périodique. Leur méthode s'adapte à des ensembles d'équipements hétérogènes, ce qui résonne avec les défis rencontrés dans le secteur du transport en commun. Toutefois, elle présente certaines limites par rapport à notre besoin.

Premièrement, leur approche suppose une structure de plans simple, orientée autour de remplacements individuels de composants à intervalles réguliers. Or, les plans d'entretien dans notre contexte sont construits de manière plus complexe : ils regroupent souvent plusieurs opérations sur différents sous-systèmes, dans une logique d'optimisation des périodes d'immobilisation due aux contraintes logistiques et à la nature des équipements. Par conséquent, les intervalles ne sont pas définis seulement en fonction de la durée de vie de chaque composant, ce qui rend insuffisante une méthode d'évaluation uniquement centrée sur le cycle. Il est nécessaire

de prendre en compte d'autres dimensions de la maintenance préventive, notamment à travers une analyse approfondie de l'exécution des tâches planifiées.

Enfin, la quantité de plans d'entretien à étudier dans notre cas nécessite une démarche de priorisation des efforts d'analyse et d'optimisation, qui n'est pas adressée par Ge et al. (2023). Leur approche repose notamment sur une méthode de groupement des composants afin de réduire la complexité d'analyse et les difficultés liées à des données limitées. Si cette logique est pertinente pour établir une vue d'ensemble initiale, elle n'est pas directement transposable dans le cas de notre étude étant donné la nature des équipements et la structure des plans d'entretien. Les contraintes logistiques liées à la maintenance de matériels roulants imposent une logique de planification par sous-ensembles qui rend difficile la composition de groupes de composants à des fins d'analyse.

Ainsi, notre méthode vise à dépasser ces limites en s'adaptant à la structure des plans d'entretien évalués, en analysant leur performance sous plusieurs dimensions, et en fournissant un outil flexible pour le pilotage des stratégies de maintenance d'un parc d'équipements complexe. La figure 4.4 présente l'articulation complète de la méthode et les étapes de son application.

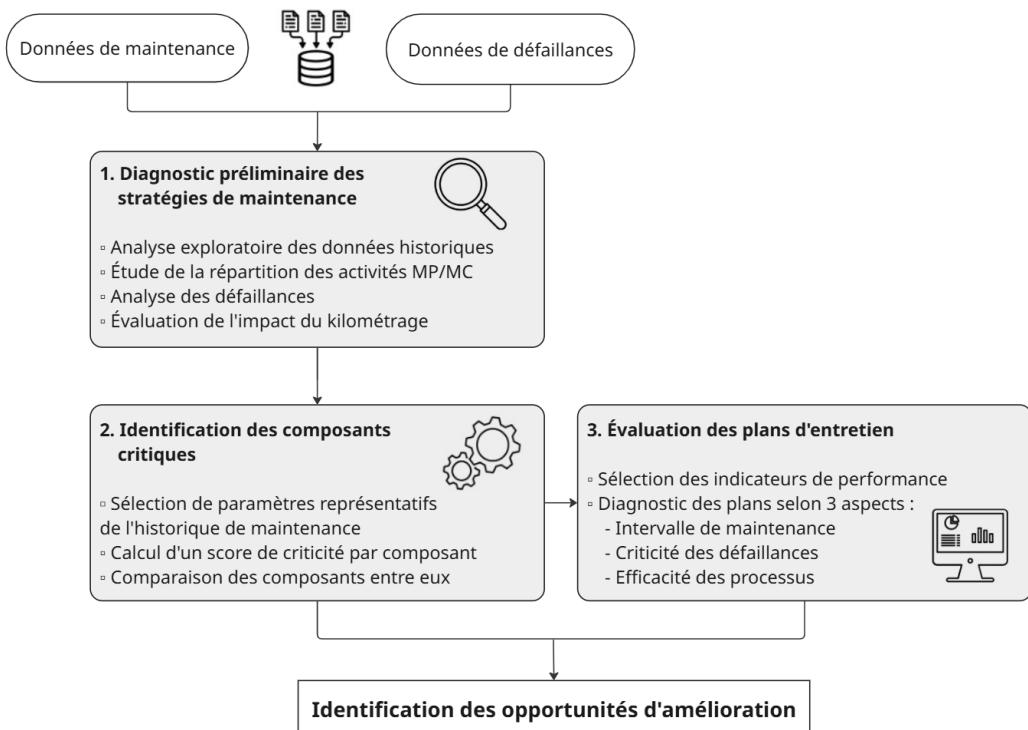


Figure 4.4 : Méthode d'évaluation proposée

4.4.2 Diagnostic préliminaire des stratégies de maintenance

La première étape de notre méthode consiste à réaliser un diagnostic préliminaire des performances de maintenance, qui se traduit par une analyse exploratoire des données historiques de maintenance et de défaillances. Cette analyse vise à comprendre la répartition des activités de maintenance, à évaluer le ratio MP/MC, à étudier les données de défaillances et à mesurer l'impact du kilométrage des véhicules sur la maintenance et la fiabilité des équipements. Cette étape permet d'obtenir un aperçu initial de l'état actuel de la maintenance, des tendances et irrégularités dans les activités d'entretien, et sert de fondation pour l'identification des leviers d'amélioration potentiels.

L'analyse exploratoire des données est reconnue dans la littérature comme étant une étape clé pour améliorer la performance des stratégies de maintenance. D'ailleurs, plusieurs études identifiées dans la revue de littérature se limitent à cette analyse exploratoire pour déterminer les défaillances les plus courantes, les activités récurrentes, ou la corrélation entre âge des systèmes et fréquence des interventions (Astivia-Chávez et Ortiz-Posadas (2023) ; Weeks et Leite (2021) ; Besiktepe et al. (2019)). Ces analyses permettent de repérer des zones de faiblesse ou des anomalies dans les stratégies existantes, en donnant des indications sur la fiabilité des équipements et en suggérant des axes d'amélioration potentiels.

Cependant, bien que cette analyse de données soit une base essentielle pour l'optimisation de la maintenance, elle reste insuffisante pour aller au-delà de l'identification de tendances et des premiers constats. En effet, cette étape se concentre principalement sur des données descriptives qui permettent de repérer des zones nécessitant une attention particulière, mais qui ne permettent pas de répondre directement aux questions complexes que peuvent se poser des gestionnaires de maintenance pour l'optimisation des processus de maintenance.

Ainsi, il est nécessaire de pousser l'analyse pour un diagnostic plus approfondi, qui évalue la performance des stratégies de maintenance de manière rigoureuse et détaillée. Chaque aspect de la maintenance doit être pris en compte et analysé afin d'identifier précisément la source des problèmes et de cerner où des ajustements sont nécessaires. En somme, il ne s'agit plus seulement de repérer des tendances générales, mais de fournir des mesures concrètes et exploitables pour soutenir la prise de décision éclairée. Les prochaines étapes de la méthode se concentrent donc sur une analyse plus détaillée, par sous-système puis par plan de maintenance, afin d'identifier des problèmes spécifiques à certains composants ou plans d'entretien.

4.4.3 Identification des composants critiques

L'objectif de cette étape est d'identifier les composants les plus significatifs en termes de besoins de maintenance. En comparant l'historique de maintenance des différents composants, il est possible de cibler les composants critiques et prioritaires pour l'amélioration de leur politique de maintenance. Pour mesurer la charge de maintenance associée à chaque composant, plusieurs paramètres représentatifs ont été sélectionnés. En s'appuyant sur les apports de la littérature (AFNOR (2019) ; Kumar et al. (2013) ; Parida et al. (2015)) et sur l'analyse préliminaire des données précédente, huit indicateurs ont été retenus, permettant de fournir une vision globale de la part que représente chaque composant dans les besoins de maintenance. Ces paramètres sont résumés dans le tableau 4.8. Ils permettent d'évaluer les systèmes selon cinq aspects clés : la fréquence des interventions, la durée des activités d'entretien, leurs besoins en pièces de rechange, le taux de maintenance corrective non planifiée, et la fréquence des défaillances. L'objectif est ainsi de mettre en évidence les composants nécessitant une attention particulière.

Tableau 4.10 : Paramètres retenus pour l'évaluation et la comparaison des composants

Quantité d'activités de maintenance	Durée des activités de maintenance	Besoins en pièces de rechange	Taux de MC non planifiée	Quantité de défaillances
Nombre d'ordres de maintenance	MTTM (<i>Mean Time To Maintain</i>) (en h)	Taux d'ordres avec consommation	Taux de MC non planifiée (sur les heures de MC totales)	Nombre de défaillances
Nombre d'ordres de maintenance préventive				Nombre de défaillances signalées en service
Nombre d'ordres de maintenance corrective				

Une fois les indicateurs calculés, un score de criticité est attribué à chaque composant afin de comparer les composants entre eux et d'identifier ceux qui ont le plus d'impact sur l'efficacité des processus de maintenance. Ce score vise à hiérarchiser les composants en fonction de leur contribution aux charges de maintenance et à détecter les éléments les plus critiques, pour lesquels des ajustements pourraient générer les gains de performance les plus significatifs. Il est calculé en additionnant les valeurs des indicateurs après normalisation Min-Max. Ceux-ci peuvent être pondérés en fonction de l'importance relative de chaque paramètre pour l'entreprise, afin d'affiner l'identification des composants critiques en fonction de ses enjeux opérationnels.

Cette première évaluation vise à détecter des inefficacités potentielles dans les stratégies de maintenance associées à ces composants. Par exemple, un composant ayant un taux de maintenance corrective particulièrement élevé tout en étant inclus dans un plan d'entretien préventif peut révéler des lacunes dans l'efficacité de ce plan, qui nécessiterait un examen plus approfondi pour l'ajuster et ainsi réduire les interventions correctives. À l'inverse, un composant maintenu uniquement de manière corrective, mais présentant un taux de défaillance élevé, pourrait bénéficier de l'introduction d'interventions préventives pour améliorer sa fiabilité et réduire les coûts de maintenance corrective.

Dans la littérature, plusieurs études ont mis en évidence l'importance de cette phase d'identification des composants prioritaires pour la gestion des systèmes complexes (Zhou et al. (2014) ; Brewin et al. (2001) ; Segulja et al. (2009)). Certains se concentrent même exclusivement sur ces composants pour l'optimisation de leur politique de maintenance, comme Knežević et al. (2022) ou Stazić et al. (2020). Ces études soulignent qu'une hiérarchisation efficace des composants permet de réduire la durée des analyses et d'orienter les efforts vers les équipements les plus sensibles.

L'importance de cette étape est d'autant plus significative dans le contexte du partenaire industriel, où la multiplicité et l'hétérogénéité des composants constituent un défi majeur. L'organisation gère une flotte complexe, composée de différents bus et trains, comprenant des sous-systèmes aux caractéristiques variées et aux besoins spécifiques en maintenance. Cette diversité nécessite une approche différenciée dans l'analyse des composants, en tenant compte de leur usage, de leur fiabilité et de leur maintenabilité. Chaque composant ayant des exigences distinctes, il est essentiel d'adapter l'analyse et la gestion de la maintenance en fonction de ces critères.

Ainsi, cette étape constitue une fondation essentielle pour le diagnostic et l'amélioration des stratégies de maintenance, en ciblant les priorités d'action sur les systèmes qui nécessitent le plus d'attention et en orientant les ajustements des plans d'entretien en conséquence.

4.4.4 Évaluation des plans de maintenance préventive

Après avoir identifié les composants critiques à partir des données historiques, la troisième et dernière étape de la méthode se concentre sur l'évaluation des plans d'entretien. Elle vise à examiner l'efficacité des stratégies de maintenance préventive en place afin d'ajuster les plans pour maximiser la performance globale du système de maintenance.

4.4.4.1 Méthode d'évaluation de la maintenance préventive

La maintenance préventive joue un rôle central dans l'amélioration de la fiabilité, de la disponibilité et de la longévité des équipements. L'évaluation des plans d'entretien, au cœur de la gestion de la maintenance préventive, est donc essentielle pour optimiser les processus de maintenance. Ces plans doivent être régulièrement réévalués afin d'ajuster les paramètres en fonction de la performance réelle observée. Sans une analyse rigoureuse des données historiques, il est difficile de valider la pertinence des cycles de maintenance définis initialement. En effet, souvent établis à partir des recommandations des fournisseurs ou d'estimations de durée de vie, ces intervalles peuvent ne pas refléter les conditions réelles d'exploitation. Bien qu'aucune stratégie préventive ne permette d'éliminer complètement les imprévus en raison du caractère aléatoire et parfois imprévisible de certaines défaillances, une planification appropriée peut contribuer à réduire efficacement le recours à la maintenance corrective.

Dans ce contexte, les indicateurs de performance de la maintenance (MPIs) constituent un outil de suivi indispensable. Ils permettent de mesurer objectivement l'efficacité des activités de maintenance, de détecter les écarts et de guider les efforts d'amélioration. Leur sélection doit être adaptée aux objectifs et au contexte d'analyse. Les indicateurs retenus dans le cadre de ce projet sont détaillés dans la section suivante.

Une fois les mesures de performance pertinentes choisies, il est essentiel de rendre leur interprétation accessible à travers une visualisation claire et structurée. Le choix du type de visualisation doit privilégier la simplicité et la lisibilité, afin de faciliter la compréhension des résultats et d'éviter toute surcharge d'information. C'est pour cela que la solution d'un tableau de bord interactif a été sélectionnée. Celui-ci permet une visualisation structurée des performances des plans, facilite les comparaisons et met en évidence les écarts et les éléments nécessitant une attention particulière (Sigsgaard et al., 2021).

4.4.4.2 Sélection des indicateurs de maintenance

La norme EN 15341 « Indicateurs de performance clés pour la maintenance » (AFNOR, 2019) concerne la définition et l'usage des MPIs. Elle les classe en trois catégories : économique, technique et organisationnelle. Toutefois, chaque organisation doit adapter sa sélection d'indicateurs selon ses objectifs et son contexte. Dans le cas d'une entreprise de transport collectif,

la fiabilité opérationnelle des actifs prime. En effet, la continuité du service, la sécurité et la satisfaction des usagers, ainsi que l'optimisation des ressources, dépendent directement de la capacité à maintenir les équipements en état de fonctionnement fiable et durable. C'est pourquoi les indicateurs retenus ici sont principalement techniques, centrés sur la fiabilité et la maintenabilité plutôt que sur les coûts engendrés. De plus, l'objectif étant de mesurer l'impact effectif des plans d'entretien mis en place – et non de déterminer la stratégie optimale –, les indicateurs sélectionnés sont des indicateurs de résultats, et non des indicateurs "avancés" tels que définis par Kumar et al. (2013).

Le cadre d'évaluation se concentre sur trois dimensions clés de la maintenance préventive :

- (1) La pertinence de l'intervalle de maintenance planifié ;
- (2) La criticité des défaillances associées au plan ; et
- (3) L'efficacité des processus de maintenance définis dans le plan.

Concernant l'intervalle, il s'agit d'observer si les fréquences d'entretien planifiées permettent réellement de limiter et de retarder les défaillances. Le nombre moyen de défaillances par cycle, ainsi que leur position moyenne dans ce cycle, constituent deux indicateurs essentiels à ce diagnostic. Ces indicateurs permettent d'identifier à la fois les cas de sous- ou de sur-maintenance. Une position moyenne très avancée dans le cycle peut suggérer que l'équipement fonctionne bien jusqu'au prochain entretien, tandis qu'une accumulation précoce de défauts peut indiquer un intervalle trop long.

La criticité des défaillances est un autre élément déterminant, afin de ne pas prendre en compte que le volume des défauts, mais également leur nature. En effet, un plan peut être lié à un grand nombre de défaillances mineures sans impact majeur, ou au contraire à un plus faible nombre de défaillances critiques aux conséquences graves. Le taux de défaillances urgentes et le taux de défaillances survenues en service donnent un aperçu du niveau de gravité associé aux dysfonctionnements. Enfin, la maintenabilité des composants est estimée à travers le MTTR (temps moyen de réparation).

L'efficacité des processus de maintenance préventive est généralement évaluée à travers la conformité entre les tâches planifiées et celles réellement exécutées (Ge et al., 2024). Cela permet d'avoir une vision sur la rigueur d'exécution des plans, en incluant l'écart de durée de travail,

l'écart de cycle entre deux exécutions successives, et l'utilisation effective des pièces prévues dans les gammes. En effet, vérifier que les pièces sont utilisées de manière systématique et en quantités adéquates permet de juger du respect des procédures définies. Un indicateur complémentaire, le taux de maintenance corrective associé aux pièces du plan, permet d'évaluer si celui-ci parvient bien à limiter les besoins correctifs. Pour mesurer la capacité de la maintenance préventive à espacer les pannes, le MTBF (*Mean Time Between Failures*), c'est-à-dire la durée moyenne entre deux défaillances consécutives, est également utilisé. Enfin, un indicateur spécifique au contexte de notre partenaire industriel, le nombre moyen d'avis correctifs détectés lors d'une inspection, vient compléter l'analyse en fournissant un aperçu indirect de l'efficacité des procédures préventives.

Tableau 4.11 : Indicateurs de performance sélectionnés pour l'évaluation des plans de MP

Intervalle de maintenance	Criticité des défaillances	Efficacité des processus de maintenance
Nombre moyen de défaillances dans un cycle de maintenance	Taux de défaillances urgentes	Écart entre le planifié et le réel (cycle - durée des opérations - utilisation des pièces)
Position moyenne des défaillances dans le cycle	Taux de défaillances signalées en service	Taux de MC non planifiée des pièces intégrées au plan
	MTTR	MTBF
		Nombre moyen d'avis correctifs signalés durant une inspection

L'ensemble de ces indicateurs permet d'obtenir une vue d'ensemble complète de la performance d'un plan d'entretien, en diagnostiquant trois aspects essentiels de la maintenance préventive. Ils ont été choisis de manière à refléter au mieux les priorités de l'organisation partenaire. Le cadre proposé vise ainsi à guider les révisions potentielles en fonction de l'impact réel des politiques de maintenance sur la fiabilité des composants et à identifier les points faibles. Grâce aux informations apportées, plusieurs modifications stratégiques peuvent être envisagées :

- (1) Modifier l'intervalle de maintenance préventive (l'allonger ou le raccourcir) ;
- (2) Modifier ou renforcer les procédures de maintenance préventive (révision des gammes, des pièces utilisées, des temps alloués) ; et
- (3) Mettre en place des actions spécifiques ciblées sur les composants ou sous-systèmes identifiés comme critiques.

4.5 Conclusion

Ce chapitre a détaillé le développement de la méthode proposée en suivant la logique de la méthodologie CRISP-DM, depuis la compréhension du cas d'étude jusqu'à la construction du cadre d'évaluation.

L'analyse approfondie du contexte, incluant la structure et le fonctionnement du partenaire industriel, a permis d'identifier les enjeux spécifiques liés à la maintenance de ses flottes de bus et de métros. Les phases de compréhension et de préparation des données ont ensuite permis de structurer et d'enrichir l'information disponible afin de la rendre exploitable, tout en adaptant l'approche aux réalités opérationnelles. Sur ces fondations, une méthode de diagnostic a été conçue, articulée en trois étapes complémentaires : un diagnostic préliminaire pour identifier les grandes tendances et déséquilibres, une identification des composants critiques en matière de besoins de maintenance, et une évaluation détaillée de la performance des plans d'entretien préventif.

Conçue en étroite collaboration avec le partenaire industriel, cette méthode répond à ses besoins spécifiques tout en restant adaptable à d'autres contextes, grâce à la flexibilité des indicateurs et à la possibilité de restituer les résultats via un tableau de bord interactif.

CHAPITRE 5 APPLICATION DE LA MÉTHODE ET ÉVALUATION

Après avoir présenté le développement de la méthode de diagnostic des stratégies de maintenance, cette section se concentre sur son application concrète aux données du partenaire industriel afin d'illustrer son fonctionnement. L'objectif est de démontrer l'utilité pratique du cadre proposé, en illustrant comment il permet d'évaluer la performance des plans d'entretien existants et d'identifier les leviers d'amélioration. Cette partie détaille ainsi les résultats obtenus à chaque étape de l'analyse.

5.1 Application au cas d'étude

5.1.1 Données utilisées pour l'application de la méthode

Comme présenté dans la partie 4.1, la gestion de la maintenance chez notre partenaire est répartie entre deux divisions : celle des autobus et celle des métros. Bien que leur structure soit similaire, des différences importantes dans les processus de planification justifient le choix de concentrer l'analyse sur la division des métros.

En effet, la planification est beaucoup plus sommaire pour les autobus : les gammes sont principalement correctives et les plans d'entretien sont moins détaillés et rigoureux. De plus, les nomenclatures associées à ces gammes comportent surtout des pièces non systématiques, avec des quantités souvent non renseignées. Cela traduit une organisation plus souple, mais également moins mature de la maintenance par rapport aux métros. Cette approche plus réactive s'explique par la durée de vie plus courte des bus et leur exposition accrue aux aléas extérieurs, ce qui rend leur maintenance plus difficile à planifier précisément sur le long terme. La maintenance préventive y est marginale, et les ajustements se font au fur et à mesure en fonction des consommations observées et des évolutions de la flotte.

À l'inverse, la division des métros applique une maintenance préventive rigoureusement planifiée, avec des plans structurés liés à des cycles basés sur le kilométrage et associés à des gammes précises. Ce niveau de formalisation rend les données plus exploitables pour une évaluation fiable des stratégies de maintenance. Ainsi, bien que les deux divisions aient été intégrées dans le diagnostic préliminaire, seuls les résultats détaillés de la division des métros seront présentés dans la suite de l'étude, les résultats des bus se limitant à une comparaison du ratio MP/MC dans le but de confirmer les différences de gestion et de maturité entre les deux divisions.

5.1.2 Stratégies de maintenance préventive dans la division des métros

Dans la division responsable de l'exploitation et l'entretien des métros, la maintenance préventive repose sur une planification rigoureuse, organisée autour de plans d'entretien formalisés visant à assurer le suivi régulier de l'état des rames. Ces plans permettent d'anticiper les besoins de maintenance et de limiter les interventions correctives. Les données relatives aux plans (numéros, postes techniques, gammes, nomenclatures, cycles) ont été extraites depuis SAP puis structurées dans des tables de données principales.

Chaque plan est rattaché à un poste technique, qui peut désigner une rame entière, une voiture, ou un sous-système spécifique. Le sous-ensemble concerné est toujours précisé. Il peut s'agir par exemple du système de traction, des portes, des bogies ou encore du système CVC. La maintenance est ainsi pensée de manière granulaire. Certains plans ciblent un seul sous-ensemble tandis que d'autres, comme les plans d'inspection, couvrent plusieurs systèmes pour limiter l'immobilisation des trains. Par ailleurs, certains plans dits "à l'équipement", sont rattachés à des composants précis via leur numéro de série.

Bien que chaque plan soit unique à un poste technique, ceux partageant les mêmes caractéristiques (cycle, gamme, désignation...) ont été regroupés en "types de plans", afin de regrouper les données liées à une même stratégie d'entretien et permettre une analyse consolidée de leur performance. Ce regroupement a été effectué en s'assurant que l'ensemble des plans associés à chaque type de plan étaient strictement identiques, et a nécessité un travail de nettoyage pour corriger certaines incohérences dues à des erreurs de saisie ou à des plans inactifs. Au total, 133 types de plans ont été identifiés : 68 pour les trains les plus récents et 65 pour les plus anciens.

Certains types de plans, appelés "plans à stratégie", adoptent une logique plus flexible que les plans standards : ils se composent de modules successifs, chacun associé à un intervalle de maintenance et à des opérations spécifiques. Cette approche permet d'alterner des tâches légères à intervalles courts et des opérations plus lourdes et plus espacées, s'adaptant à la criticité et à l'usure des composants. Le champ "Stratégie d'entretien" permet d'identifier ces plans et d'en suivre la logique.

Au fil du temps, certains plans peuvent être modifiés ou désactivés, notamment en cas de mise au rebut d'un train. Le champ "Statut système" permet d'identifier les plans inactifs ou obsolètes, correspondant aux valeurs "TSUP" ou "TSUP INAC". Tous les plans, qu'ils soient encore en

vigueur ou non, ont été conservés dans l'analyse afin de suivre l'évolution des stratégies depuis 2015 et de comparer les performances avant/après modification.

La figure 5.1 illustre la structure générale d'un plan d'entretien et les principales informations qui lui sont associées.

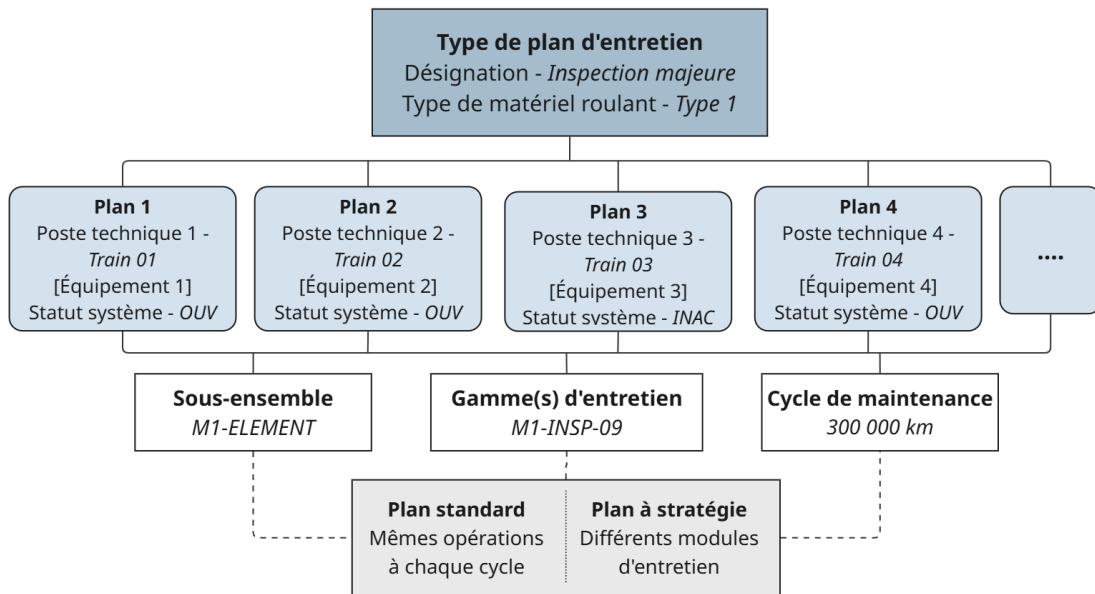


Figure 5.1 : Structure des plans d'entretien dans la division des métros

5.1.3 Association des données d'avis correctifs aux plans d'entretien

La méthode d'évaluation des plans d'entretien repose en grande partie sur leur capacité à prévenir ou limiter efficacement les défaillances. Il est donc essentiel d'intégrer les données de défaillances signalées, afin d'analyser si les équipements couverts par un plan présentent des problèmes récurrents. Dans notre cas d'étude, ces défaillances sont enregistrées dans SAP sous forme d'avis correctifs, créés lorsqu'un problème est constaté sur un composant à la suite d'un incident, d'une panne ou d'une inspection.

Cependant, l'exploitation directe de ces données a posé plusieurs défis. Les saisies sont manuelles, avec une forte variabilité dans les descriptions, l'orthographe ou les mots-clés utilisés. De plus, les champs descriptifs (équipement, article, poste technique...) sont parfois imprécis ou incomplets, rendant difficile toute classification automatique. Aucun lien direct n'existe par défaut entre un avis et le plan d'entretien qui couvre le composant concerné.

Face à cela, un traitement multi-niveau a été mis en place pour rendre les données d'avis correctifs exploitables et établir un lien fiable avec les plans d'entretien. Après une phase de nettoyage (suppression des doublons, filtrage des avis sans ordre ou poste technique), des données complémentaires ont été extraites depuis SAP. En effet, l'examen des avis a révélé que la majorité d'entre eux faisaient référence à des articles fonctionnels, utilisés pour désigner des composants dans SAP, mais incompatibles avec les gammes de maintenance qui référencent uniquement des articles sérialisés. Un travail de correspondance entre ces deux types d'articles a donc été mené à partir des relations hiérarchiques extraites via la transaction SAP IH08, afin de reconstruire des liens exploitables entre équipements fonctionnels et articles sérialisés utilisés dans la planification de la maintenance.

Une fois les avis correctifs traduits en données exploitables, ils ont été associés aux plans d'entretien via le croisement des articles, équipements et postes techniques. Mais face au manque de données descriptives pour certains plans, une méthode complémentaire par traitement automatique du langage (NLP) a été ajoutée. Concrètement, les descriptifs des équipements mentionnés dans les avis ont été comparés aux désignations des plans de maintenance, à l'aide d'un traitement textuel basé sur l'extraction de mots clés communs. Pour cela, un script Python a été développé afin de nettoyer et normaliser les textes (suppression de la ponctuation et des caractères spéciaux, conversion en minuscules, filtrage des mots vides), puis identifier automatiquement des correspondances sémantiques par intersection des mots-clés entre les deux sources de données. Cela a par exemple permis d'associer le plan "Entretien frotteur positif" aux avis reportant des problèmes sur le composant "Frotteur positif V1", même en l'absence de lien direct dans le système.

Cette étape a permis de relier une part significative des avis à leurs plans d'entretien respectifs. Ce travail, bien que fastidieux, était indispensable pour exploiter les données de défaillances et pouvoir calculer les indicateurs de performance nécessaires à l'évaluation des plans d'entretien.

La figure 5.2 illustre la logique suivie pour établir un lien entre chaque avis correctif et le plan d'entretien susceptible de couvrir le composant concerné.

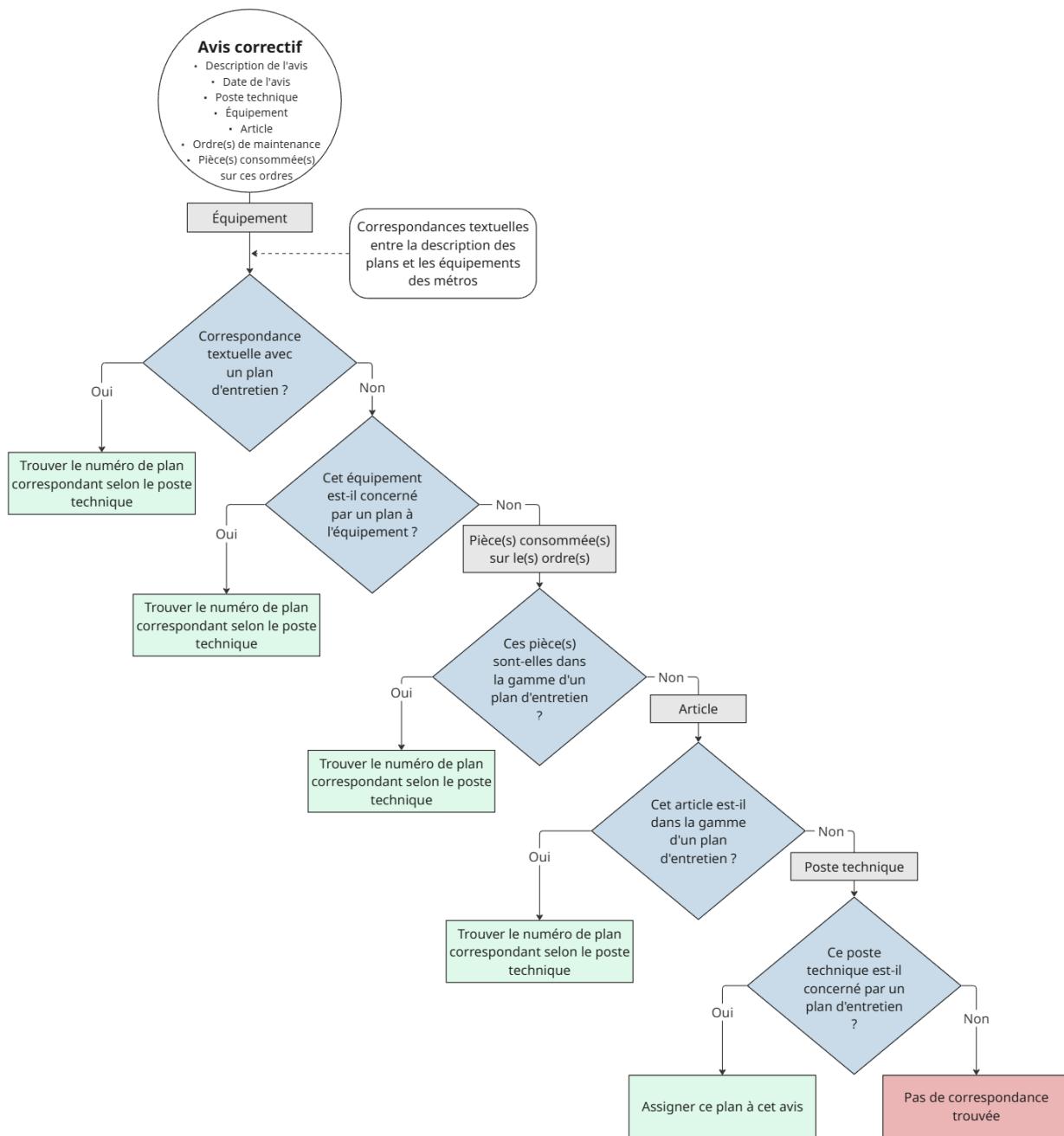


Figure 5.2 : Démarche suivie pour l'assignation d'un plan d'entretien à un avis correctif

5.1.4 Calcul des indicateurs de maintenance

Les indicateurs de performance utilisés dans le cadre d'évaluation (tableau 4.9) ont été calculés à partir des données historiques de l'organisation partenaire, en croisant plusieurs sources : ordres de maintenance, avis correctifs (après traitement et association au bon plan), consommations de

pièces, données de kilométrage et plans d'entretien. Une table complémentaire a été extraite via la transaction SAP IP24 : l'historique des exécutions des plans d'entretien, permettant d'identifier les dates exactes de clôture des ordres préventifs, fondamentales pour évaluer la rigueur d'exécution.

Les calculs ont été réalisés dans Power BI à l'aide de requêtes croisées, filtres conditionnels et formules DAX. La méthode s'est articulée en deux temps : (1) calcul des indicateurs à l'échelle de chaque numéro de plan (par poste technique), puis (2) agrégation des résultats par type de plan, pour avoir une vision consolidée des performances de chaque stratégie d'entretien.

Plusieurs indicateurs ont été obtenus à partir de l'historique d'entretien : le MTTM (durée moyenne réelle des interventions), les écarts relatifs et absolus entre les durées planifiées et réalisées, ainsi que l'écart entre le cycle théorique et les dates réelles d'exécution. Grâce à la table des avis correctifs par plan - obtenue suite au travail de traitement décrit en section précédente -, les indicateurs du nombre moyen de défaillances par cycle, de leur position moyenne dans le cycle, du taux de défaillances urgentes (avis de priorité 1) et du taux de défaillances en service (avis de type MS) ont également été calculés. L'indicateur de MTBF a été adapté dans le cadre de cette étude pour correspondre aux spécificités des équipements étudiés. Plutôt que de mesurer le temps écoulé entre deux défaillances, c'est le MDBF (*Mean Distance Between Failures*) qui a été utilisé, exprimé en kilomètres.

Le MTTR (temps moyen de réparation) a été calculé en liant les avis aux ordres de maintenance corrective associés. À partir de l'historique d'exécution des plans d'inspection, le nombre moyen d'avis correctifs générés par inspection (avis MN) a aussi été déterminé. Enfin, des indicateurs liés aux pièces - comme le taux de maintenance corrective non planifiée pour les composants inscrits dans les gammes - ont été obtenus via des tables calculées dans Power BI.

Ces indicateurs constituent la base du diagnostic de performance des plans d'entretien. Ils permettent d'objectiver les résultats observés et d'identifier les écarts entre la stratégie planifiée et les pratiques réelles. Les résultats de ces calculs seront présentés dans la partie 5.2.1.

5.1.5 Construction du tableau de bord

Afin de rendre les résultats du diagnostic accessibles et exploitables, l'ensemble des indicateurs de performance a été intégré dans un tableau de bord interactif développé sous Power BI. Cet outil constitue l'interface principale à destination des équipes de maintenance, et vise à faciliter le suivi

et l'identification des plans d'entretien présentant des écarts, anomalies ou opportunités d'amélioration.

Les indicateurs ont été sélectionnés en fonction des données disponibles dans SAP et des besoins exprimés par les gestionnaires de maintenance. Certaines métriques ont été ajustées pour refléter la performance réelle des plans, tout en assurant leur lisibilité et leur pertinence opérationnelle. Le tableau de bord a été conçu de façon itérative, en collaboration avec les utilisateurs finaux, afin d'assurer son alignement avec leurs attentes. Plusieurs améliorations ont été intégrées au fil des échanges, comme l'ajout de filtres dynamiques (sélection du type de métro, de la période d'analyse, du type d'avis, des pièces spécifiques), l'affichage détaillé des données sources (description et dates des avis correctifs), et l'intégration de données contextuelles essentielles à la bonne interprétation des résultats (cycle, stratégie d'entretien, nombre d'exécutions, etc.).

D'autres indicateurs ont été ajoutés à la demande des utilisateurs pour enrichir l'analyse, comme :

- Le nombre d'appels manqués, c'est-à-dire les exécutions planifiées non réalisées ;
- Le nombre de fois où un plan est "tombé en curatif", correspondant aux cas où une intervention corrective a été faite avant que le plan d'entretien ne soit exécuté comme prévu ; et
- La priorité médiane des avis correctifs, pour évaluer le niveau de criticité médian des défaillances associées.

L'interface finale permet une lecture détaillée des résultats, et offre un diagnostic global par type de plan. Des exemples de visualisation sont présentés en figure 5.3 (données modifiées). Ce tableau de bord constitue un outil pour suivre l'évolution de la performance de la maintenance préventive et appuyer les décisions de révision des plans.

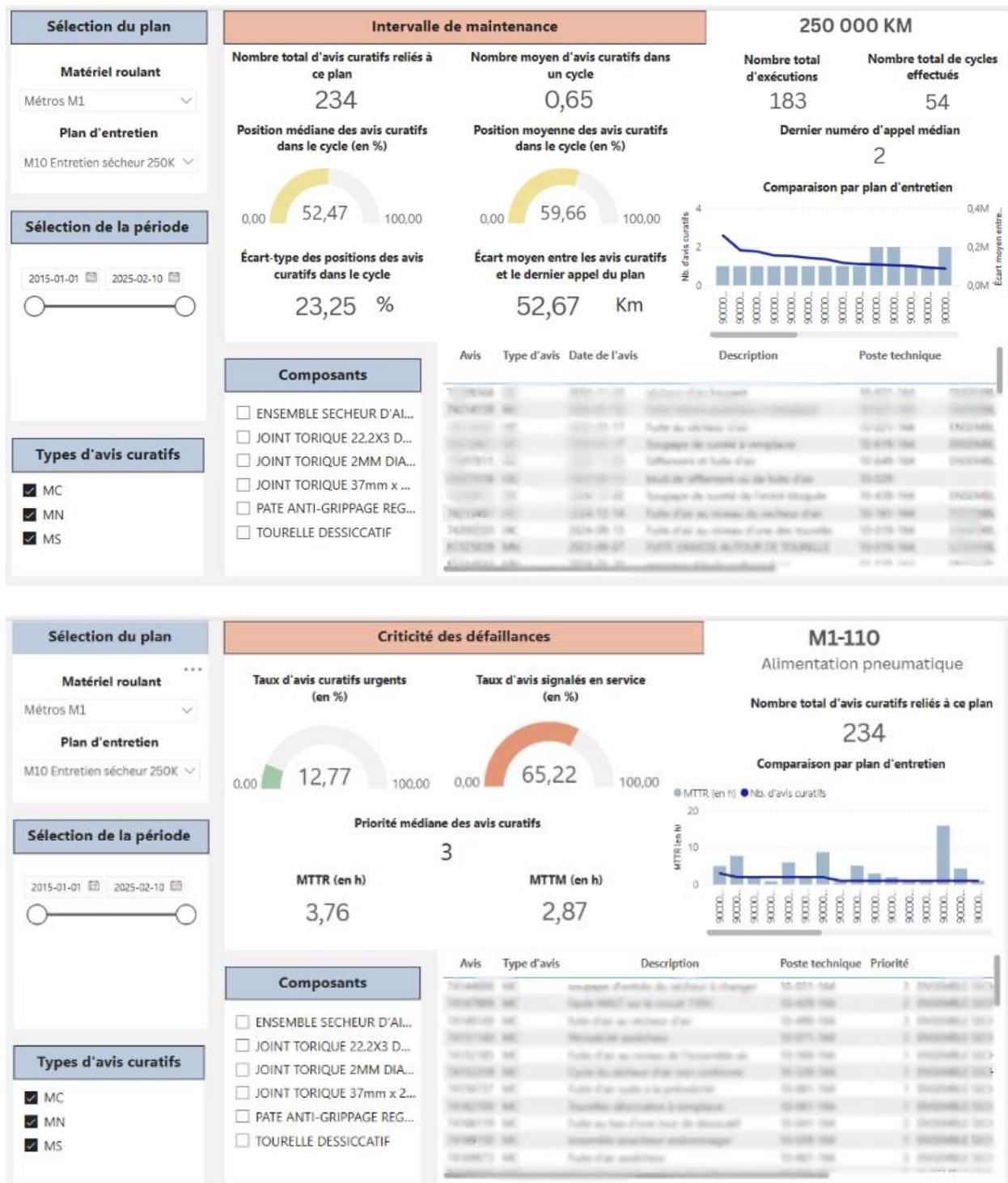


Figure 5.3 : Vue du tableau de bord développé pour l'évaluation des plans d'entretien (1/2)

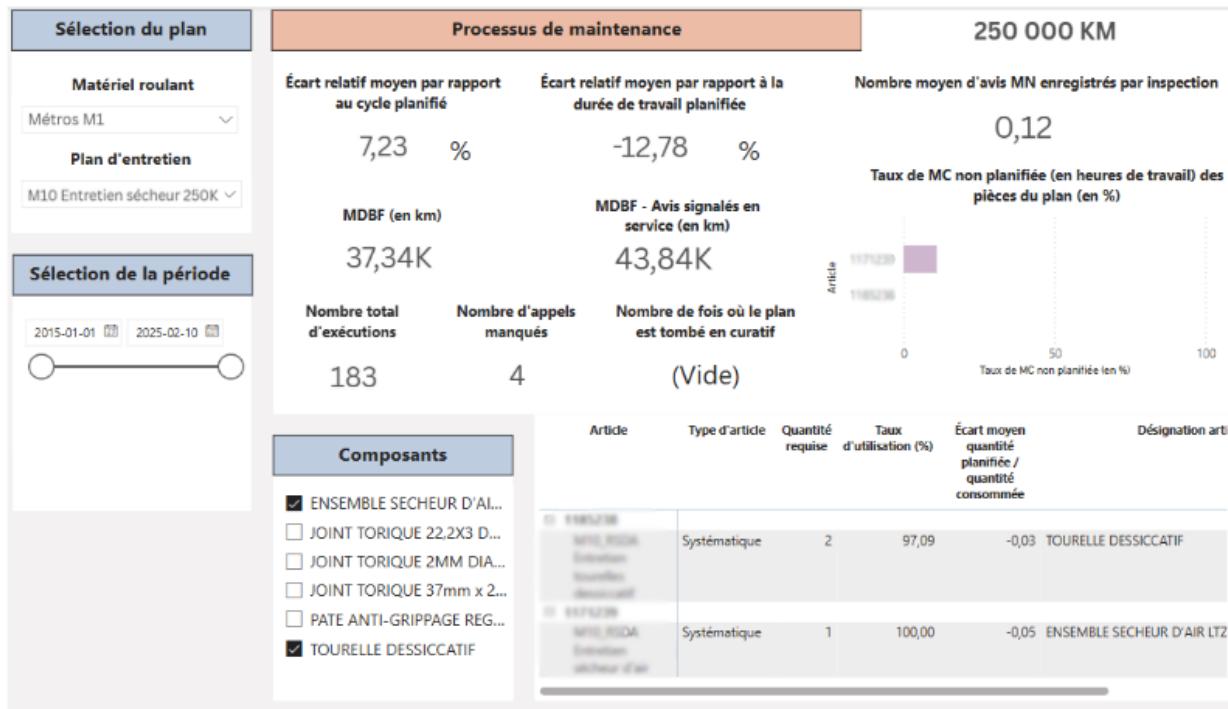


Figure 5.4 : Vue du tableau de bord développé pour l'évaluation des plans d'entretien (2/2)

5.2 Présentation des résultats

Cette section présente les résultats issus de l'application de la méthode aux données historiques du partenaire industriel et de l'exploitation du tableau de bord. Elle vise à illustrer les apports de l'évaluation menée et à valider la pertinence de la méthode proposée.

5.2.1 Diagnostic préliminaire des stratégies de maintenance

L'objectif de cette première analyse est d'explorer les données historiques collectées afin d'effectuer un examen préliminaire de l'état actuel de la maintenance dans l'organisation. Cette phase vise notamment à comprendre la répartition des efforts entre maintenance préventive et maintenance corrective, à identifier les écarts entre les deux flottes de métros de génération différente, et à explorer les principales tendances liées aux défaillances.

- Répartition des activités de maintenance**

Sur la période étudiée, la division métro a enregistré 395 544 ordres de maintenance confirmés, dont 66 629 comportaient au moins une consommation de pièce de rechange tracée dans SAP. Ces

ordres se répartissent entre maintenance préventive et maintenance corrective, mais également entre différents types d'interventions (périodicités, inspections, retraits planifiés...).

Le tableau 5.1 présente cette répartition. On y observe que les ordres de périodicité constituent un peu plus de 50 % des ordres de MP, mais concentrent à eux seuls près de 86 % des consommations de pièces, ce qui en fait un levier central pour le pilotage de la maintenance préventive. À l'inverse, les ordres d'inspection, bien qu'aussi nombreux, génèrent peu de consommations, car il s'agit principalement de vérifications ou de diagnostics. Du côté correctif, les ordres curatifs divers dominent en volume, en pièces consommées et en heures de travail.

Tableau 5.1 : Répartition des activités de maintenance préventive dans la division des métros

	Nombre d'ordres (% du total)	Nombre de consos (% du total)	Heures de travail (% du total)
Ordres de périodicité	50.33 %	86.45 %	64.41 %
Ordres d'inspection	48.85 %	4.48 %	35.08 %
Retraits planifiés de roues	0.82 %	9.07 %	0.51 %

Tableau 5.2 : Répartition des activités de maintenance corrective dans la division des métros

	Nombre d'ordres (% du total)	Nombre de consos (% du total)	Heures de travail (% du total)
Ordres curatifs divers	59.48 %	54.41 %	56.06 %
Ordres correctifs suite à une inspection	25.33 %	18.06 %	19.65 %
Ordres correctifs pour amélioration/modification	15.19 %	27.53 %	24.29 %

En s'appuyant sur la classification des ordres réalisée précédemment, le ratio MP/MC permet de dresser un premier bilan de la stratégie de maintenance. 51.7 % des ordres sont préventifs, mais cette part tombe à 19.8 % lorsqu'on considère uniquement les ordres avec consommation de pièce(s), révélant une prédominance des remplacements en mode correctif. En termes d'heures, les deux types de maintenance se répartissent équitablement le temps de travail (figure 5.4).

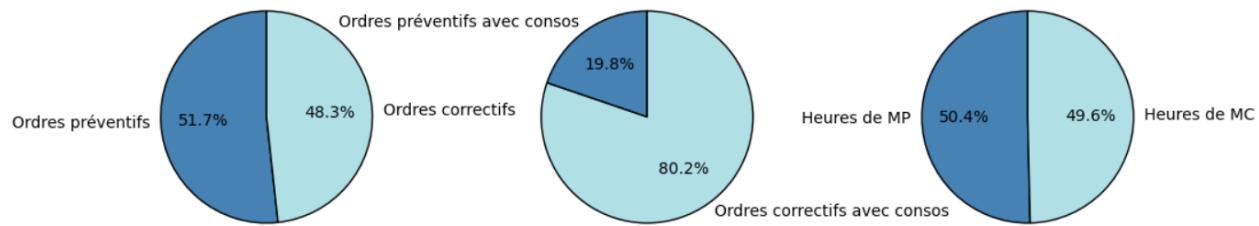


Figure 5.5 : Ratios MP/MC dans la division des métros

La distinction entre chaque type de métro est essentielle pour interpréter ces résultats. Les trains anciens concentrent une part plus importante des activités de maintenance (60.6 % des ordres, 63.1 % des heures de travail), ce qui s'explique à la fois par leur nombre d'éléments plus élevé et leur kilométrage cumulé.

Le tableau 5.3 met en lumière des écarts notables entre les deux types de matériel roulant. Si les métros anciens présentent un ratio MP/MC équilibré, les métros plus récents ont encore une majorité d'ordres correctifs, mais ceux-ci mobilisent moins de temps qu'en MP, contrairement à l'autre type de rame. Ces résultats suggèrent que la maintenance préventive des trains de nouvelle génération, bien que plus récente, implique des tâches plus lourdes ou complexes. De plus, ces métros n'ayant été intégrés que récemment, beaucoup de plans d'entretien ne sont pas encore arrivés à échéance, limitant le nombre total d'ordres de maintenance préventive.

Tableau 5.3 : Comparatif de la stratégie de maintenance entre les deux types de matériel roulant

	Nombre de trains	% des activités de maintenance	Nombre de plans d'entretien	Nombre d'exécutions	MP			MC		
					% du nombre d'ordres	% des heures de travail	Moyenne des heures de travail	% du nombre d'ordres	% des heures de travail	Moyenne des heures de travail
Métros anciens	141 éléments (47 trains)	63.11 %	65	32 827	59.68 %	47.67 %	3.07 h	40.32 %	52.33 %	4.95 h
Métros récents	71 trains	36.89 %	68	30 405	41.05 %	58.82 %	5.03 h	58.95 %	41.18 %	2.38 h

Il est important de contextualiser ces chiffres en tenant compte de la répartition du kilométrage. En 2016, les rames nouvellement intégrées ne représentaient que 6.5 % du kilométrage total parcouru. Aujourd'hui, elles en assurent près de 80 %, comme le montre la figure 5.5. Cette bascule progressive explique la montée des besoins en maintenance sur cette flotte. Pour les métros plus anciens, on observe une légère tendance à la baisse du nombre total d'ordres et de consommations de pièces depuis 2016, mais les besoins en maintenance restent significatifs malgré la baisse de

leur activité, signe que les interventions d'entretien sont souvent plus lourdes à mesure que le matériel vieillit.

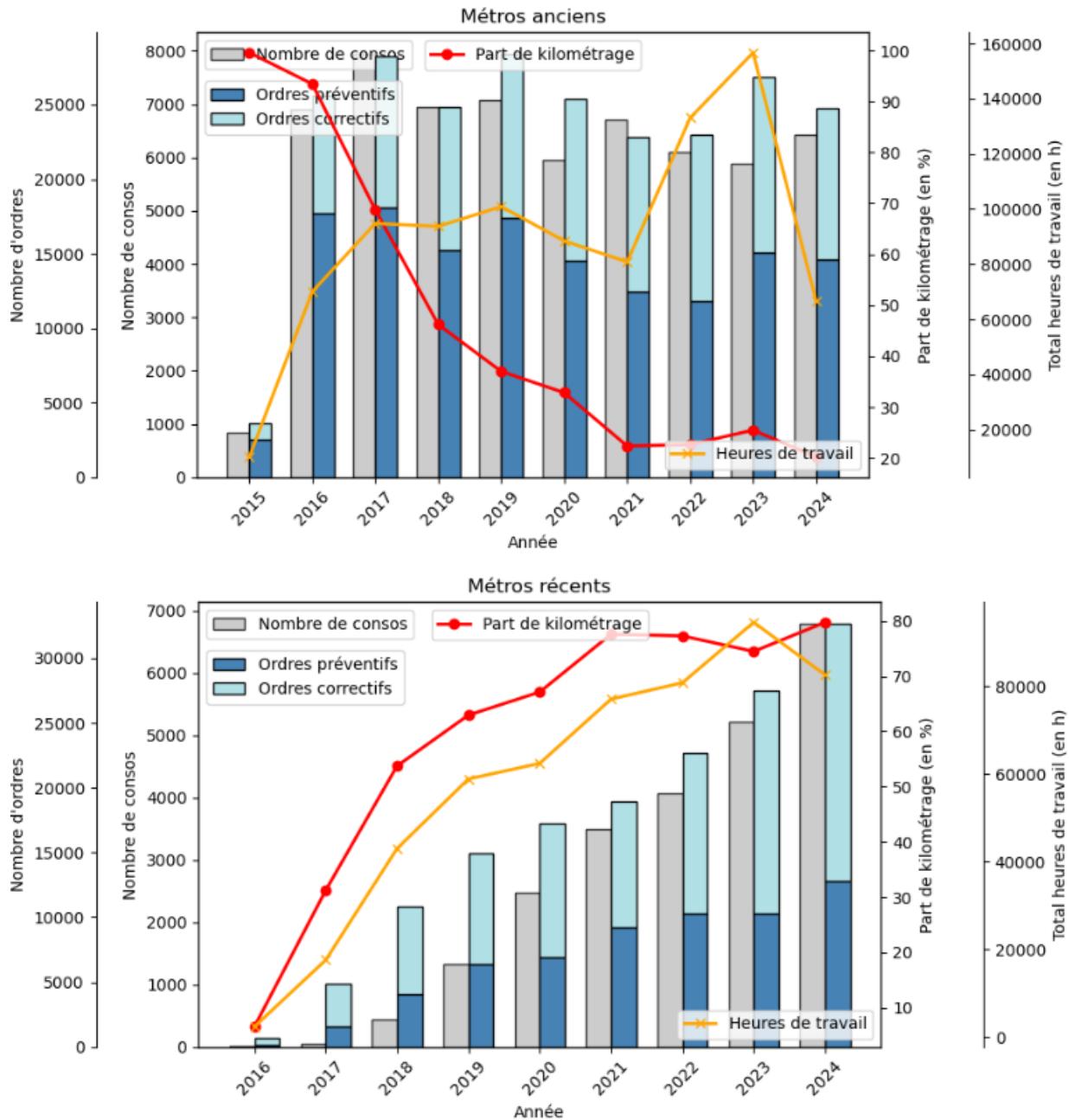


Figure 5.6 : Évolution du nombre d'ordres, des consommations et des heures de travail en fonction de la part de kilométrage parcouru par chaque type de matériel roulant

Une analyse plus fine au niveau des sous-ensembles (figure 5.6) révèle des disparités importantes : certains systèmes, comme le système d'alimentation basse tension pour les trains plus anciens, ne

font l'objet d'aucune MP (entretien purement correctif), tandis que d'autres, comme le système de ventilation/chauffage des trains récents, sont largement couverts par des plans d'entretien. Ces résultats posent la question de l'adéquation entre stratégie de maintenance et criticité des sous-systèmes.

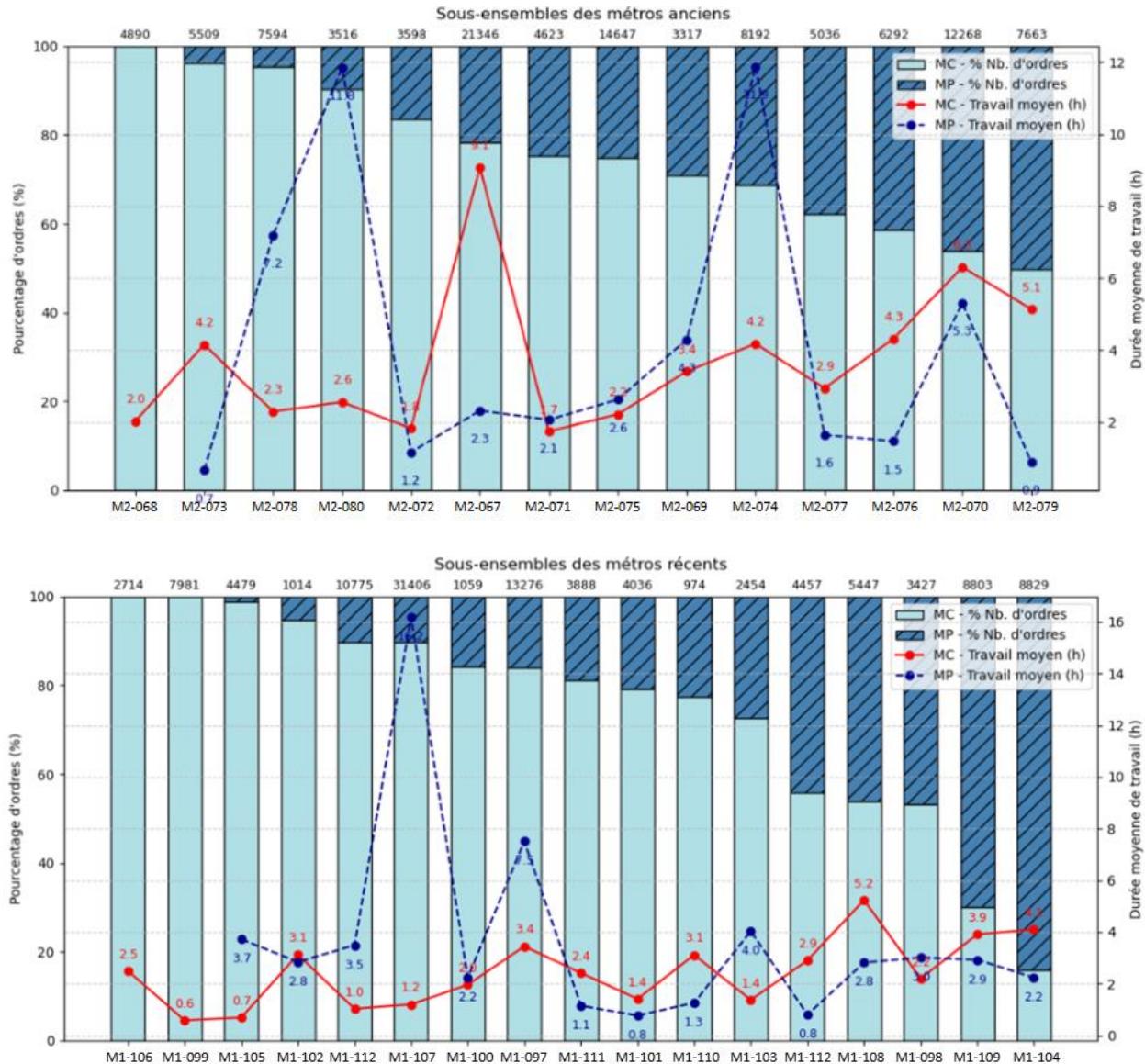


Figure 5.7 : Ratio MP/MC par sous-ensemble, durées de travail moyennes et nombre d'ordres total (annotations du haut)

Par ailleurs, la durée moyenne de travail par ordre permet de nuancer ces observations. Certains sous-ensembles, peu maintenus en MP, mais simples à réparer (comme les éclairages), génèrent

peu de charge. D'autres, comme les systèmes de communication et vidéosurveillance, nécessitent des interventions correctives plus longues, rendant une approche préventive potentiellement plus rentable.

En résumé, cette première analyse a permis d'avoir une première vue d'ensemble sur les pratiques de maintenance au sein de la division responsable des métros. La stratégie de maintenance est relativement équilibrée en volume, sauf sur certains aspects comme les consommations de pièces ou les sous-ensembles laissés en correctif. Pour la division des autobus, la maintenance corrective prend largement le dessus, comme le montre la figure 5.7, ce qui confirme les constats exposés dans la partie 5.1.1.

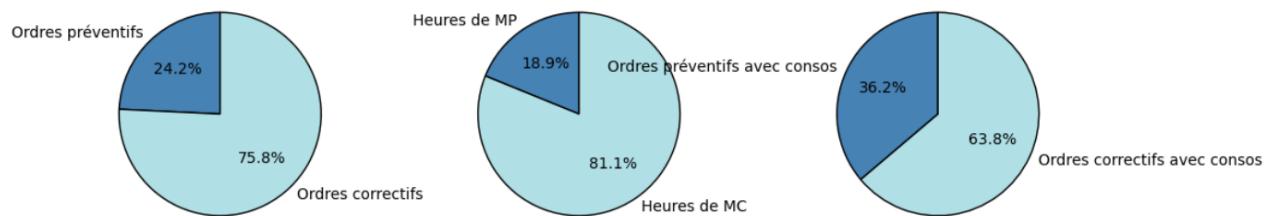


Figure 5.8 : Ratios MP/MC dans la division des autobus

• Étude des données de défaillances

L'analyse des avis correctifs permet d'approfondir le diagnostic en identifiant les composants les plus sensibles et en évaluant l'efficacité des actions de MC. Sur l'ensemble de la période, 355 486 avis correctifs ont été enregistrés. La majorité d'entre eux ont été signalés lors d'inspections planifiées, mais une part significative a été identifiée en service, notamment pour les trains plus anciens (tableau 5.4). Ce constat renforce l'intérêt des inspections comme moyen de détection précoce.

Tableau 5.4 : Nombre et nature des défaillances par type de matériel roulant

	Nombre de défaillances (% du total)	% des défaillances signalées en service (MS)	% des défaillances signalées en inspection (MN)	% des défaillances autres (MC)
Métros anciens	176 533 (49.89 %)	13.04 %	68.59 %	18.37 %
Métros récents	177 292 (50.11 %)	7.41 %	61.51 %	31.08 %

A chaque avis reçu, une analyse est effectuée afin de lui assigner une priorité pour ordonnancer les interventions de maintenance (échelle de 1 à 7). La figure 5.8 montre que les priorités 2 et 3 concentrent près de 80 % des avis, indiquant un niveau d'urgence assez élevé associé à de nombreux événements.

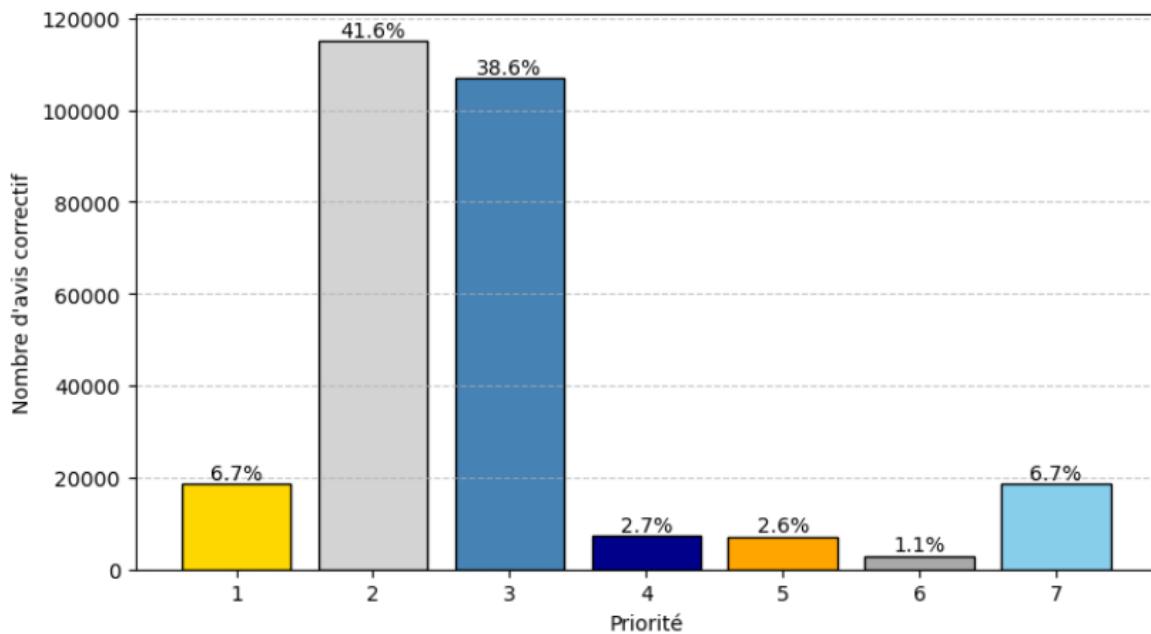


Figure 5.9 : Nombre d'avis correctifs par priorité

L'analyse du lien entre stratégie de maintenance et volume de défaillances révèle que pour les rames récentes, une tendance logique se dessine : plus le taux de MP est élevé, moins il y a d'avis correctifs enregistrés. Pour l'autre type de rames, la corrélation est plus nuancée, notamment sur les avis signalés en inspection, qui semblent croître avec la MP. Cela peut refléter une stratégie de maintenance davantage axée sur la détection que sur la prévention active des pannes.

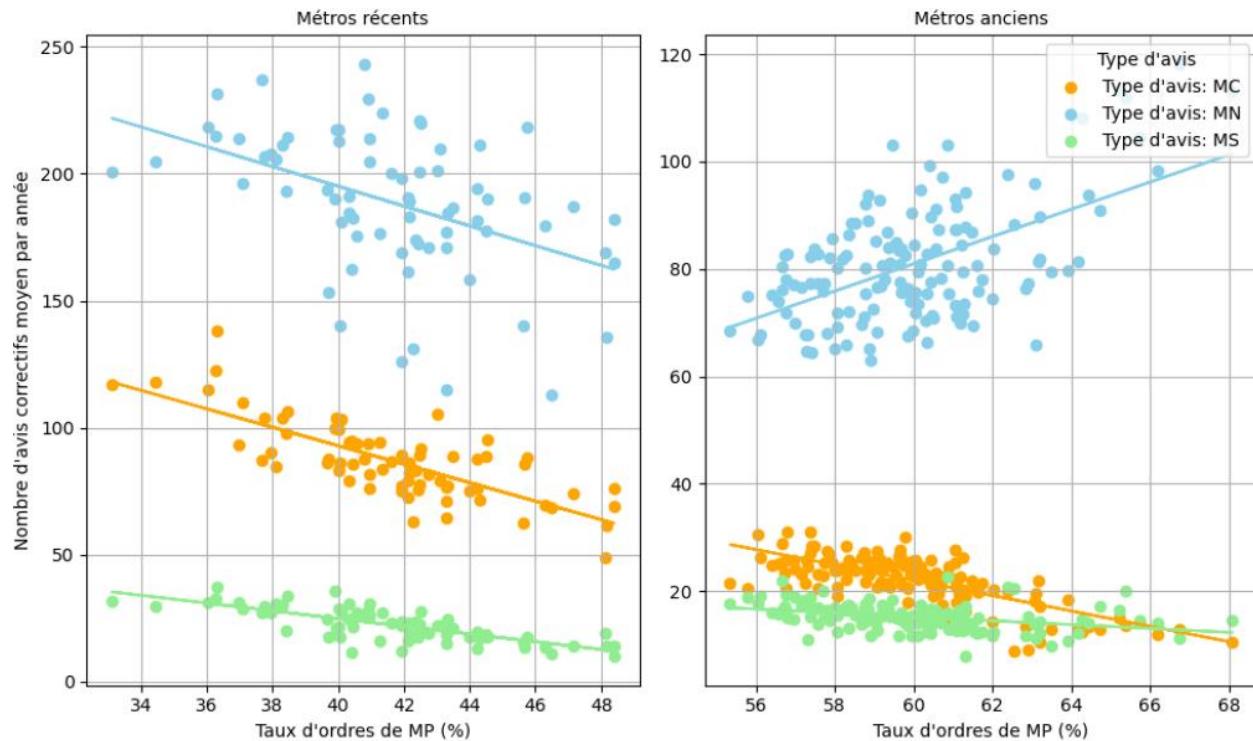


Figure 5.10 : Nombre d'avis correctifs par année vs Taux de MP par train

Cependant, une confrontation à l'échelle des sous-ensembles (figure 5.10) révèle des résultats plus dispersés, sans tendance systématique. Cela montre que d'autres facteurs entrent en jeu dans la fiabilité des composants, et qu'une simple augmentation de la MP ne garantit pas une réduction des défaillances. En effet, des cas particuliers apparaissent : certains sous-ensembles, comme M2-070 ou M2-080, enregistrent un fort volume de défaillances malgré un taux de MP relativement élevé, suggérant une inefficacité des stratégies préventives en place. À l'inverse, des sous-ensembles comme M1-104 ou M1-109 se distinguent positivement, avec un fort taux de MP et un faible nombre d'avis correctifs, traduisant a priori une stratégie préventive efficace. Ces résultats suggèrent que des sous-ensembles prioritaires pourraient être identifiés pour un examen approfondi des plans associés, que ce soit pour ajuster leur contenu, leur fréquence ou envisager leur mise en place lorsqu'ils sont absents.

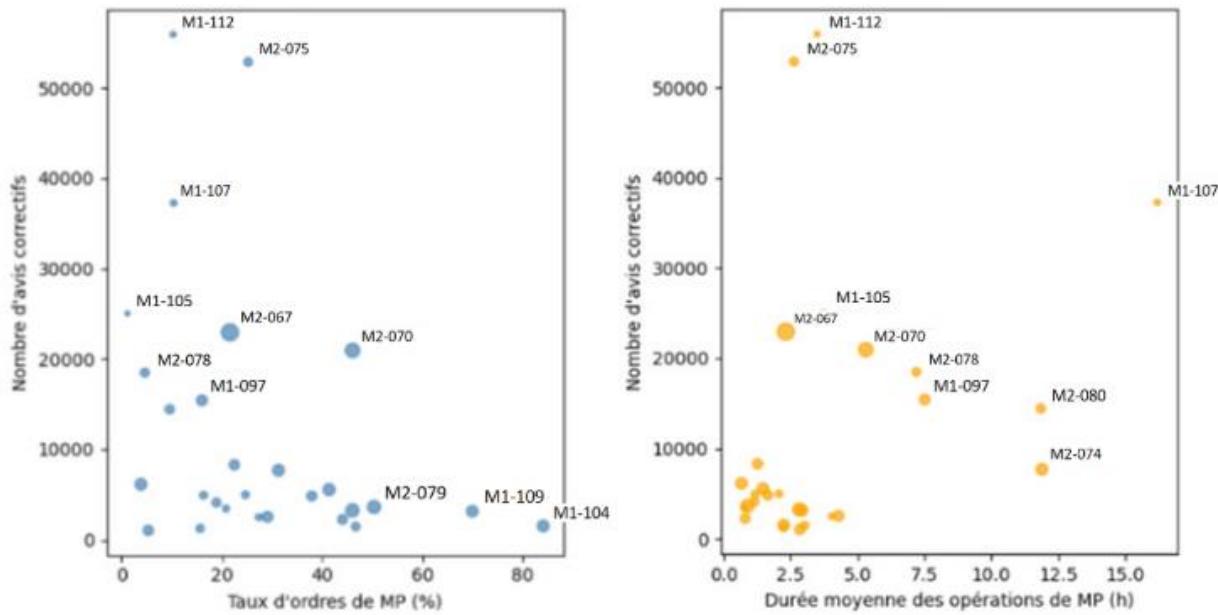


Figure 5.11 : Nombre d'avis correctifs vs Stratégie de maintenance par sous-ensemble - [Taille des points proportionnelle à la durée moyenne des opérations de MC]

- **Impact du kilométrage**

Afin d'évaluer dans quelle mesure l'usure des trains influe sur leurs besoins en maintenance, les trains ont été répartis en quatre catégories selon la part qu'ils représentent dans le volume total d'ordres de maintenance (1 : part la plus faible / 4 : part la plus élevée). Le kilométrage moyen des trains de chaque catégorie a ensuite été calculé, de manière globale, puis en distinguant les ordres de maintenance corrective et de maintenance préventive.

Tableau 5.5 : Kilométrage moyen des trains selon leurs besoins de maintenance

Métros récents	1	2	3	4
Ordres de maintenance	539 881 km	599 788 km	599 788 km	590 741 km
Ordres de maintenance corrective	464 198 km	609 708 km	549 824 km	630 796 km
Ordres de maintenance préventive	348 770 km	570 962 km	606 039 km	642 769 km
Métros anciens	1	2	3	4
Ordres de maintenance	3 901 646 km	3 988 837 km	3 954 945 km	3 932 036 km
Ordres de maintenance corrective	3 944 439 km	3 935 027 km	3 936 609 km	3 963 083 km

Tableau 5.6 : Kilométrage moyen des trains selon leurs besoins de maintenance (suite et fin)

Ordres de maintenance préventive	3 977 466 km	3 959 694 km	3 919 016 km	3 931 430 km
----------------------------------	--------------	--------------	--------------	--------------

Les résultats montrent que globalement, pour les trains de nouvelle génération, plus la part d'ordres de maintenance est élevée, plus le kilométrage moyen des trains est élevé, que ce soit en préventif ou en correctif. Cela indique une relation directe entre le niveau d'usure (kilométrage) et l'intensité des interventions de maintenance, confirmant que les besoins augmentent avec le vieillissement des actifs. Pour les trains plus anciens, les kilométrages sont globalement élevés et relativement constants entre les groupes. Mais pour les ordres de maintenance corrective, les trains de la catégorie 4 ont également un kilométrage plus élevé, confirmant la tendance observée pour le premier type de matériel roulant.

La figure 5.11 confirme cette tendance. Pour les métros récents, une forte corrélation positive est observée entre le kilométrage cumulé et le nombre moyen d'avis correctifs annuels. En revanche, pour les autres métros, la tendance est plus plate, voire légèrement décroissante, traduisant une certaine stabilisation des défaillances au bout d'un certain kilométrage, possiblement liée à des actions de remise à neuf ou à une fiabilisation progressive des sous-systèmes.

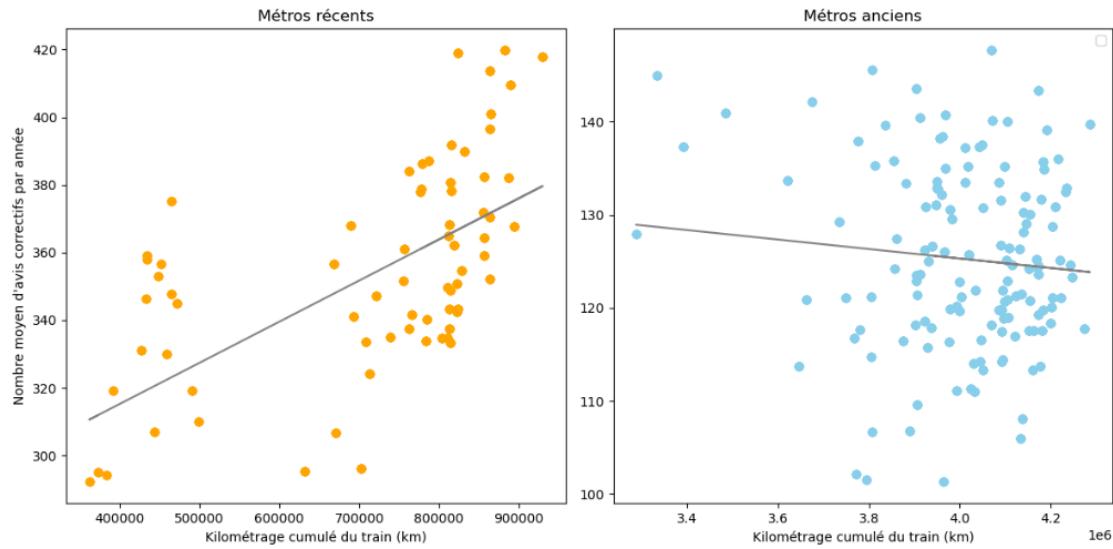


Figure 5.12 : Nombre d'avis correctifs par année selon le kilométrage du train

Enfin, la figure 5.12 détaille ces résultats par type d'avis. On constate que, pour les métros récents, les défaiillances signalées en inspection (MN) augmentent sensiblement avec le kilométrage, tout comme celles signalées en service (MS). Cela confirme que la dégradation progressive des équipements se traduit à la fois par des constats faits lors des inspections et par des pannes en service. Pour les rames anciennes, les avis d'inspection diminuent légèrement avec le kilométrage, tandis que les autres types restent stables.

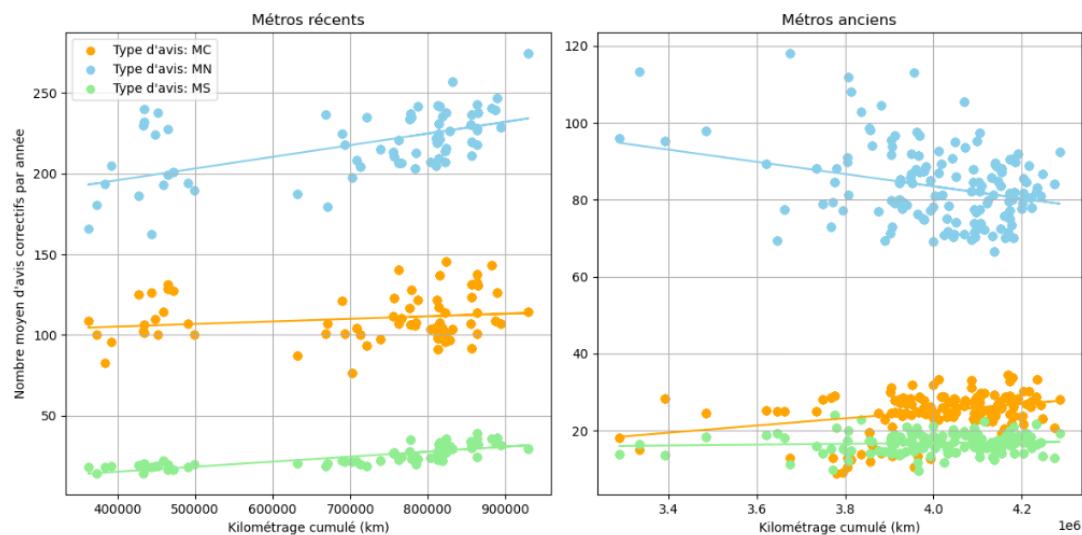


Figure 5.13 : Nombre d'avis correctifs par année et par type d'avis selon le kilométrage du train

- Conclusion

Ce diagnostic préliminaire a permis d'examiner les grandes tendances de la maintenance dans la division métro, en s'appuyant sur les données historiques issues du système ERP. Trois constats majeurs en ressortent : la prédominance globale de la maintenance préventive en volume, mais non en consommation de pièces ; des disparités importantes entre les deux types de matériel roulant en lien avec leur âge, leur niveau d'usure et leur part de service ; et enfin, une variabilité significative du lien entre stratégie de maintenance appliquée et fiabilité des équipements.

L'analyse a également mis en valeur une importante disparité des stratégies de maintenance des différents sous-ensembles, dont certains ne sont encore entretenus qu'en correctif. Les données de défaillances montrent également que l'augmentation du taux de maintenance préventive n'induit pas systématiquement une réduction des défauts. Enfin, l'influence du kilométrage sur les besoins de maintenance a été confirmée pour les trains récents, mais reste plus complexe à interpréter pour les rames anciennes déjà fortement sollicitées.

Ainsi, ces constats globaux, bien qu'essentiels pour comprendre les dynamiques d'ensemble, ne suffisent pas à évaluer la performance réelle des plans d'entretien mis en œuvre. Il devient alors nécessaire de descendre à un niveau d'analyse plus granulaire, celui des sous-ensembles et des plans d'entretien associés, afin d'identifier les points forts et les leviers d'amélioration de la stratégie actuelle. La suite de la méthode vise précisément à évaluer cette performance individuelle, en confrontant les stratégies planifiées aux résultats observés sur le terrain.

5.2.2 Identification des composants critiques

Cette étape vise à identifier les composants (sous-ensembles et équipements) qui concentrent une part particulièrement élevée des efforts de maintenance et qui, de ce fait, ont un impact significatif sur la performance globale des stratégies d'entretien mises en place. En s'appuyant sur l'historique de maintenance des métros, l'objectif est de déterminer quels sous-systèmes génèrent le plus de charges en termes d'interventions, de consommation de pièces ou de fréquence de défaillances, afin d'orienter les ajustements potentiels des plans d'entretien.

Tous les sous-ensembles qui constituent les deux types de métros ont été pris en compte. Pour les premiers trains, 14 sous-ensembles distincts sont recensés ; pour les trains plus récents, ils sont au nombre de 16. Ces sous-ensembles sont identiques sur chaque voiture du train, bien que les

nomenclatures et les stratégies d'entretien associées puissent varier selon le type de voiture (motrice ou remorque).

Le champ *Poste technique* présent dans les données extraites permet d'associer chaque ordre de travail ou avis de maintenance à un sous-système précis. Cela offre une base complète pour reconstituer l'historique de maintenance de chaque sous-ensemble et calculer les indicateurs représentatifs de leur comportement.

Pour chaque sous-ensemble, chacun des paramètres présentés dans le tableau 4.8 a été calculé :

- Le nombre total d'ordres de maintenance, de MP et de MC ;
- La durée moyenne des interventions ;
- Le taux d'ordres avec consommation(s) ;
- Le taux de maintenance corrective non planifiée parmi les heures de MC totales ; et
- Le nombre d'avis correctifs associés.

Ces indicateurs ont été calculés de façon agrégée sur l'ensemble des trains. Pour les métriques comme la durée de travail, une moyenne a été prise sur l'ensemble des ordres rattachés au sous-ensemble.

Une première analyse a consisté à représenter les résultats sous forme de diagrammes de dispersion afin d'identifier visuellement les *outliers*. Pour ce travail, le seuil du 75e centile a été choisi pour considérer un composant comme outlier s'il se situait au-delà sur au moins un indicateur. Ce seuil, choisi de manière paramétrique, n'est pas figé et peut être ajusté en fonction du nombre de composants que l'on souhaite mettre en évidence. Par exemple, la figure 5.13 illustre la dispersion des sous-ensembles selon leur nombre total d'ordres préventifs et correctifs. Cinq sous-ensembles s'en distinguent nettement, traduisant leur contribution importante à la charge de maintenance.

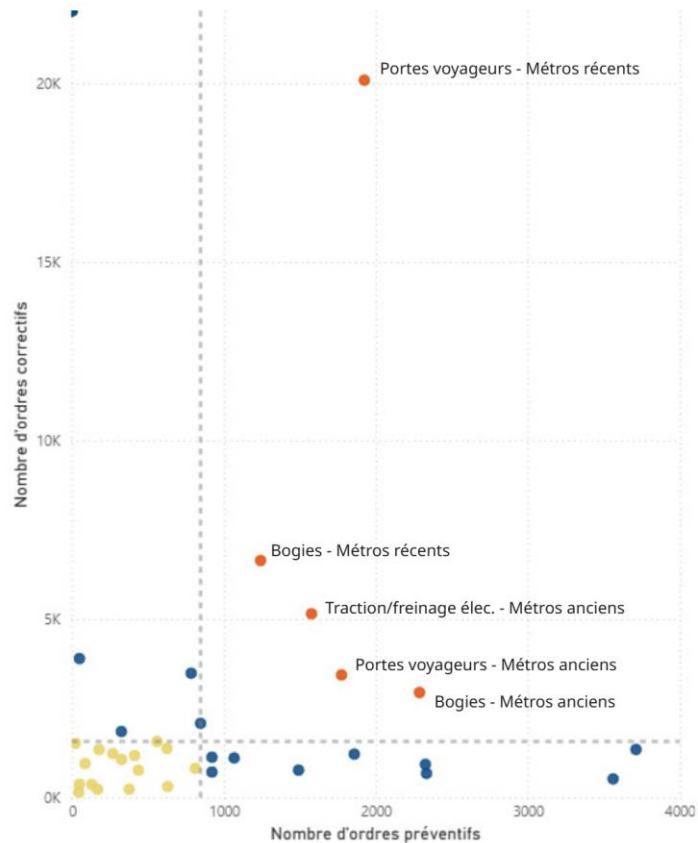


Figure 5.14 : Diagramme de dispersion des sous-ensembles selon leur nombre total d'ordres préventifs et correctifs

Pour obtenir une vision synthétique, un score global de criticité a été calculé pour chaque sous-ensemble. Les indicateurs ont d'abord été normalisés par une méthode Min-Max, afin de les ramener sur une échelle commune (0 à 1). Le score final a été obtenu par simple sommation des indicateurs normalisés, sans pondération afin de considérer chaque dimension de la criticité de manière équivalente. Ce score permet de classer les sous-ensembles selon leur contribution globale à la charge de maintenance, tous critères confondus. Les résultats montrent des scores variant de 0.69 à 4.64, avec une moyenne de 2.06. Les sous-ensembles ayant les scores les plus élevés sont considérés comme les plus critiques.

Tableau 5.7 : Résultats des sous-ensembles les plus critiques pour chaque type de métro

Métros récents	Score de criticité	Nombre d'ordres (depuis 2022)	Nombre d'avis correctifs (depuis 2022)	Moyenne de travail (en h)	Taux de MC non planifiée (en %)	Nombre de plans d'entretien
Portes-voyageurs	4.64	22 012	25 197	2.76 h	100 %	4
Bogies	3.03	7 879	6 506	4.03 h	88 %	8
Alimentation haute tension	2.48	4 265	23 767	1.28 h	96 %	4
Métros anciens	Score de criticité	Nombre d'ordres (depuis 2022)	Nombre d'avis correctifs (depuis 2022)	Moyenne de travail (en h)	Taux de MC non planifiée (en %)	Nombre de plans d'entretien
Traction-freinage élec	4.13	6 722	4 853	7.64 h	97 %	9
Portes-voyageurs	3.32	2 924	2 452	6.58 h	79 %	4
Habillement et équipements mécaniques	3.25	5 206	10 711	2.32 h	90 %	8

On constate que les portes-voyageurs ressortent comme un sous-ensemble particulièrement critique dans les deux flottes. Elles cumulent un grand nombre d'interventions et d'avis correctifs, malgré les plans préventifs qui leur sont appliqués. Ce constat suggère que les stratégies actuellement en place semblent insuffisantes pour maîtriser pleinement les défaillances sur ces composants. Ceci peut s'expliquer par la fonction même des portes-voyageurs, qui sont parmi les éléments les plus sollicités d'un train. Exposées à une utilisation intensive et à des interactions directes avec les passagers, elles sont particulièrement vulnérables aux incidents répétés, comme des blocages volontaires, des chocs, ou des dysfonctionnements mécaniques liés à l'usure. Cette exposition continue à des facteurs extérieurs, souvent aléatoires et difficilement prévisibles, rend leur fiabilité plus complexe à maîtriser malgré les interventions planifiées.

Le même raisonnement a été appliqué à l'échelle des équipements (niveau inférieur aux sous-ensembles). Certains équipements sont couverts par des plans "à l'équipement", tandis que d'autres ne le sont pas explicitement, bien qu'ils puissent être inclus dans les gammes d'entretien de leur sous-ensemble supérieur. Cette analyse permet de mettre en évidence des équipements critiques

non couverts spécifiquement par des plans dédiés, et d'identifier des opportunités d'amélioration pour renforcer la prévention ciblée à un niveau plus granulaire.

Tableau 5.8 : Résultats des équipements les plus critiques pour chaque type de métro

Métros récents	Score de criticité	Nombre d'ordres (depuis 2022)	Nombre d'avis correctifs (depuis 2022)	Moyenne de travail (en h)	Taux de MC non planifiée (en %)	Nombre de plans à l'équipement
Luminaires fluorescents	3.71	5 502	5 825	0.45 h	100 %	0
Seuil de porte	3.30	7 170	7 719	1.06 h	100 %	0
Frotteur positif	3.13	3 713	35 521	0.88 h	100 %	0
Métros anciens	Score de criticité	Nombre d'ordres (depuis 2022)	Nombre d'avis correctifs (depuis 2022)	Moyenne de travail (en h)	Taux de MC non planifiée (en %)	Nombre de plans à l'équipement
Siège opérateur	2.95	986	1 055	2.21 h	91 %	0
Moteur de traction	2.47	3 741	8 316	2.40 h	98 %	1
Opérateur de porte	2.38	560	565	1.96 h	95 %	0

Cette étape d'identification des composants critiques constitue une base essentielle pour prioriser les efforts de révision des stratégies de maintenance. D'une part, elle fournit une vision synthétique des zones de concentration des besoins de maintenance, en mesurant les charges associées à chaque composant à partir des données historiques. D'autre part, elle oriente les analyses à venir, en permettant de sélectionner les sous-ensembles les plus critiques pour un examen approfondi de l'efficacité et du potentiel d'optimisation de leurs plans d'entretien.

Ainsi, cette évaluation assure la transition entre une approche basée sur les symptômes (les composants les plus sollicités ou défaillants) et une approche ciblée sur les causes potentielles de sous-performance (les plans d'entretien associés à ces composants). La phase suivante se concentre justement sur l'analyse de la performance de ces plans.

5.2.3 Évaluation des plans de maintenance préventive

Cette section présente les résultats obtenus à l'issue de l'évaluation mise en œuvre sur l'ensemble des plans de maintenance préventive appliqués aux métros de l'organisation, à partir de la méthode développée précédemment. L'objectif de cette étape est d'analyser, pour chaque type de plan d'entretien, les performances observées à travers les différents indicateurs définis, afin d'identifier les stratégies efficaces, les éventuelles anomalies, et les opportunités d'amélioration. Les résultats permettent d'avoir une vue d'ensemble sur la performance des plans selon les trois dimensions clés de l'évaluation : l'intervalle de maintenance, la criticité des défaillances associées, et l'efficacité des processus.

Afin de faciliter l'interprétation des résultats et de comparer efficacement l'ensemble des 133 types de plans d'entretien identifiés, un score de criticité a été calculé pour chaque type de plan, en suivant la même logique que celle appliquée pour l'identification des composants critiques. L'objectif de cette étape n'est pas d'établir un classement absolu, mais de mettre en valeur les plans les plus susceptibles de présenter des contre-performances, et de valider ces constats en les soumettant à l'expertise terrain des équipes de maintenance.

Le score de criticité a été obtenu à partir des indicateurs calculés dans les trois axes du cadre d'évaluation, après normalisation des valeurs via une méthode Min-Max. Le sens attendu de chaque indicateur a été pris en compte lors de la normalisation : certains indicateurs sont à minimiser pour garantir une bonne performance (ex. : taux de défaillances urgentes, écart entre planifié et réalisé), tandis que d'autres sont à maximiser (ex. : MTBF, position moyenne des défaillances dans le cycle). Les calculs ont donc été adaptés en conséquence pour assurer la cohérence du score global. Aucun poids n'a été appliqué aux indicateurs afin de les considérer de manière équivalente dans ce premier niveau d'analyse.

En complément du score global, trois sous-scores ont été calculés pour chacun des axes d'évaluation, afin de permettre une analyse plus ciblée et d'identifier les dimensions spécifiques sur lesquelles chaque plan présente des difficultés. Par ailleurs, l'analyse par axe est particulièrement utile dans les cas où certaines données sont partiellement indisponibles. En effet, pour certains plans, notamment ceux présentant peu de détails au niveau des équipements concernés ou avec un nombre d'enregistrements insuffisant, il n'a pas été possible de relier des avis correctifs et donc de calculer les indicateurs de fiabilité. Dans cette situation, même si

l'évaluation globale est limitée, la méthode permet malgré tout de formuler un diagnostic partiel, en s'appuyant uniquement sur les dimensions pour lesquelles les données sont exploitables. Cela garantit une certaine robustesse de l'analyse, tout en soulignant les limites liées à la qualité des données disponibles.

- **Analyse globale**

Le score de criticité global utilisé pour comparer l'ensemble des plans d'entretien agrège les résultats obtenus sur les trois axes d'analyse définis dans la méthode (pertinence de l'intervalle de maintenance, criticité des défaillances associées, et efficacité des processus). L'objectif de cette agrégation est de prioriser les plans les plus problématiques pour guider les échanges avec les experts de maintenance. Elle permet d'identifier ceux qui se détachent du reste par une performance inférieure sur une ou plusieurs dimensions, ou par des valeurs extrêmes sur un indicateur en particulier.

Le score global obtenu varie entre 0.143 et 0.710, avec une moyenne de 0.293 et un écart type de 0.088. Le seuil du 85e centile a été retenu pour identifier les plans considérés comme « critiques » : tout plan dont le score dépasse ce seuil est classé comme prioritaire pour une analyse approfondie. De plus, pour chacun des axes d'évaluation, l'état de performance du plan étudié est noté comme "critique" si son score calculé à partir des indicateurs de cet axe est supérieur au 75e centile, "à surveiller" s'il est supérieur au 50e centile, et "performant" sinon. De la même manière, ces seuils ont été choisis de manière paramétrique et peuvent être ajustés en fonction du degré de sélectivité souhaité.

Une visualisation synthétique (figure 5.14) présente la distribution des scores de criticité pour l'ensemble des plans étudiés. Les plans au-delà du seuil du 85e centile sont au nombre de 13. Les 5 premiers sont résumés dans le tableau 5.8, avec leur état de performance sur chacun des axes et certaines données numériques associées.

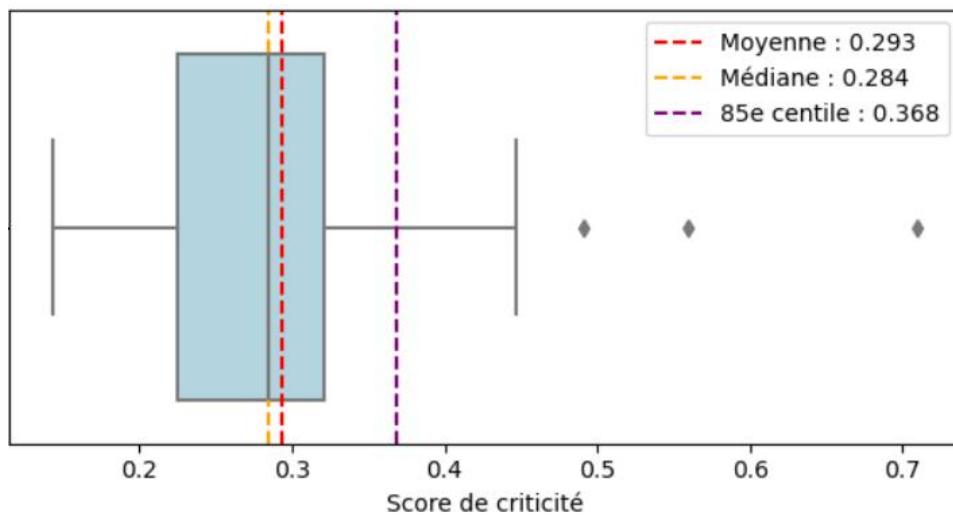


Figure 5.15 : Box-plot des scores de criticité globaux des plans d'entretien évalués

Il est important de souligner que le score de criticité global présenté ici ne constitue pas une mesure absolue de performance. En effet, comme il repose sur la somme normalisée des indicateurs de chaque axe, un indicateur particulièrement défavorable, comme un nombre de défaillances très élevé, peut influencer le score total et ainsi masquer les résultats plus équilibrés sur les autres dimensions. Ce score est donc avant tout un outil de priorisation et d'alerte : il permet de faire ressortir les plans d'entretien potentiellement problématiques, afin de concentrer l'analyse sur les cas les plus critiques. Ainsi, pour interpréter correctement les résultats, il est nécessaire d'examiner le nombre d'axes pour lesquels un plan présente une contre-performance, et de faire une analyse détaillée des indicateurs sous-jacents.

Tableau 5.9 : Plans les plus critiques selon le score de criticité global

Plan d'entretien	Score global	Axe 1 : Intervalle de maintenance	Axe 2 : Criticité des défaillances	Axe 3 : Efficacité des processus	Cycle	Nombre moyen d'avis correctifs/an	Ecart moyen défaillances-exécution du plan	Taux d'avis signalés en service	MTTR	MDBF
Entretien frotteur positif	0.710	Critique	Performant	Critique	240 000 km	5 961.70	62 000 km	0.02 %	14.75 h	19 062 km
Périodicité Tiroir TRB	0.491	Critique	Critique	Critique	600 000 km	12.85	126 537 km	55.6 %	18.28 h	96 543 km
Révision bogies et voitures	0.447	Critique	Performant	Critique	2 400 000 km	1 527.14	64 603 km	6.4 %	2.94 h	11 820 km
Entretien CVAC	0.443	Critique	Critique	Critique	1 200 000 km	48.86	62 614 km	55.4 %	4.83 h	86 208 km
Périodicité 100	0.432	Performant	Critique	A surveiller	100 000 km	1.62	51 365 km	66.7 %	33.12 h	318 081 km

Parmi les cinq plans présentés, on observe des profils de performance variés, traduisant la diversité des causes possibles de sous-performance. Par exemple, le plan "Entretien frotteur positif" se détache, car il présente un nombre très élevé d'avis correctifs, et un MDBF faible par rapport à la valeur du cycle planifié. Cela suggère une fréquence d'entretien insuffisante ou mal adaptée au comportement réel du composant, qui ne suffit pas à réduire le nombre d'interventions correctives. Le plan "Périodicité 100", quant à lui, présente une forte criticité des défaillances, avec un MTTR élevé et des taux importants de défaillances signalées en service et urgentes, malgré un intervalle de maintenance court (100 000 km). Cela suggère que les composants concernés sont difficiles à fiabiliser et que leur défaillance a un impact significatif, interrogeant sur l'efficacité du plan à prévenir les problèmes critiques et justifiant un réexamen du contenu des opérations définies.

Les plans "Périodicité Tiroir TRB" et "Entretien CVAC" montrent une sous-performance généralisée, avec des résultats défavorables sur l'ensemble des axes : un taux élevé d'avis signalés en service, un MTTR important, ou encore un nombre ou une fréquence de défaillances élevés. Ces plans pourraient donc faire l'objet d'une analyse plus poussée complète, tant sur le contenu que sur la fréquence des opérations.

Il convient toutefois de nuancer les résultats de cette analyse globale : pour certains plans, des données sont manquantes ou incomplètes, notamment lorsqu'il n'a pas été possible de relier suffisamment d'avis correctifs pour évaluer la performance sur les axes liés aux défaillances. C'est pourquoi l'analyse est également déclinée par axe d'évaluation, afin de tenir compte des limites de disponibilité des données.

- **Détail par axe d'évaluation**

Au-delà du score global, une analyse détaillée a été menée pour chacun des trois axes d'évaluation, afin de faire ressortir des plans problématiques même lorsqu'ils n'ont pu être pleinement évalués sur les trois dimensions. Elle apporte également une vision plus granulaire, facilite l'interprétation des résultats et aide à identifier les leviers d'amélioration les plus pertinents pour chaque plan d'entretien.

La figure 5.15 illustre la distribution des scores de criticité calculés pour chaque axe d'évaluation. On y observe des profils de distribution distincts. Les scores de l'axe 1 (intervalle de maintenance) sont globalement plus élevés, reflétant une tendance plus marquée à des écarts liés à la fréquence ou à la répartition des défaillances dans le cycle. L'axe 3 (efficacité des processus) présente une

variabilité importante, suggérant des disparités fortes dans la rigueur d'application des plans d'entretien.

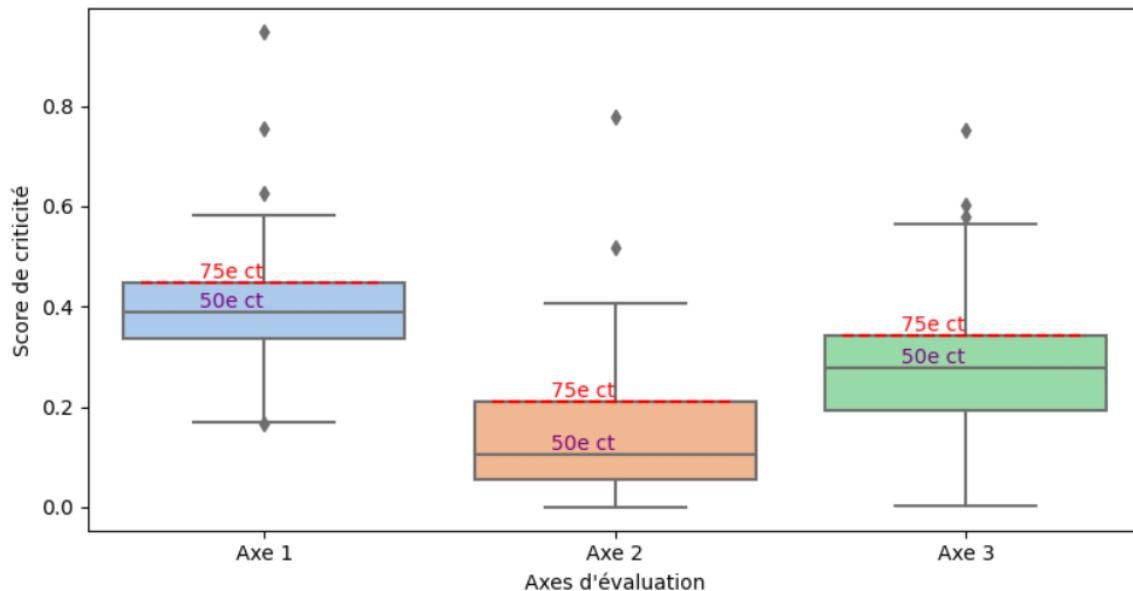


Figure 5.16 : Box-plot des scores de criticité des plans d'entretien pour chaque axe

Les tableaux suivants présentent, pour chaque axe, trois des plans avec les scores de criticité les plus élevés (au-dessus du 75e centile), en fournissant les valeurs des indicateurs associés pour appuyer l'interprétation. Les cinq plans qui ont déjà été identifiés comme les plus critiques selon le score global dans la partie précédente n'ont pas été représentés ici.

Les plans qui ressortent comme critiques selon l'intervalle de maintenance, bien que présentant des fréquences d'intervention plutôt rapprochées, sont associés à un volume important d'avis correctifs par cycle (tableau 5.9). Les défaillances sont également positionnées assez tôt dans le cycle malgré les actions préventives exécutées. Cela peut témoigner d'un intervalle inadapté ou d'une stratégie préventive insuffisante au regard de la dégradation réelle des composants.

Tableau 5.10 : Plans les plus critiques au niveau de l'intervalle de maintenance

Plan d'entretien	Score de criticité Axe 1	Cycle	Nombre d'avis correctifs total	Nombre moyen d'avis correctifs par an	Nombre moyen d'avis correctifs dans un cycle	Position relative moyenne des avis dans le cycle
Entretien portes voyageurs 120k	0.754	120 000 km	18 028	3 158	55.3	55.6 %
Entretien portes voyageurs 60k	0.583	60 000 km	18 046	3 160	30.5	62.1 %
Entretien pont moteur	0.531	240 000 km	5 202	776	27.5	53.7 %

Sur l'axe 2 qui évalue la gravité des défaillances (tableau 5.10), les plans les plus critiques sont ceux dont les défaillances sont fréquemment signalées en service ou classées comme urgentes (priorité 1), ainsi que ceux avec des durées d'interventions correctives particulièrement élevées. Ces résultats suggèrent un enjeu important en termes de fiabilité et d'impact sur le fonctionnement des équipements, ce qui justifie une révision prioritaire de ces plans.

Tableau 5.11 : Plans les plus critiques au niveau de la criticité des défaillances

Plan d'entretien	Score de criticité Axe 2	Taux de défaillances urgentes	Taux de défaillances signalées en service	MTTR
Périodicité Tiroir TRA	0.366	28.3 %	62.8 %	9.4 h
Périodicité MVT	0.342	0 %	66.7 %	17.5 h
Périodicité bloc G1	0.325	23.1 %	60.3 %	7.2 h

Pour ce qui est de l'efficacité des processus de maintenance (tableau 5.11), plusieurs plans présentent des écarts marqués entre le planifié et le réel, que ce soit sur la durée des interventions ou sur les cycles exécutés, traduisant une faible conformité au plan initial. De même, les pièces inscrites dans les gammes opératoires préventives de certains plans présentent parfois un taux de maintenance corrective non planifiée élevé, ce qui questionne l'efficacité des tâches effectuées pour réduire les remplacements de pièces de manière corrective et imprévue. Enfin, un MDBF faible traduit un problème dans la capacité du plan à espacer les défaillances, ce qui reflète l'inefficacité potentielle des procédures préventives appliquées à l'équipement concerné.

Tableau 5.12 : Plans les plus critiques au niveau de l'efficacité des processus

Plan d'entretien	Score de criticité Axe 3	MDBF	Écart relatif moyen durée de travail	Écart relatif moyen cycle planifié	Taux de MC des pièces	Nombre moyen d'avis par inspection
Verif. manostats valve et UCL	0.604	-	68.4 %	98.0 %	-	-
Vérification SAB	0.517	27 260 km	368.37 %	25.89 %	-	0.46
Entretien coffres batteries	0.435	72 450 km	50.37 %	6.78 %	100 %	0.24

Cette analyse détaillée par axe permet donc de mettre en évidence des profils de sous-performance spécifiques, qu'il s'agira d'examiner plus en détail en collaboration avec les gestionnaires de maintenance. Une attention particulière pourra ainsi être portée à la révision des intervalles pour les plans critiques sur l'axe 1, à l'évaluation des risques opérationnels pour ceux de l'axe 2, et à l'amélioration des procédures et de la rigueur d'exécution pour l'axe 3.

- **Cas de sur- ou sous-maintenance suspectés**

L'objectif premier de l'organisation partenaire étant de revoir ses plans d'entretien mis en place en détectant les cas potentiels de sur-maintenance et de sous-maintenance, une attention particulière a été portée aux plans qui pourraient être associés à une de ces situations.

Les cas de sur-maintenance se caractérisent par un faible nombre de défaillances détectées durant un cycle de maintenance, et une position moyenne de ces défaillances proche de la fin du cycle. Parmi les plans évalués, plusieurs présentent ces caractéristiques. Le nombre moyen d'avis correctifs signalés entre deux exécutions consécutives du plan est inférieur à 1, et leur position moyenne dans le cycle est supérieure à 60 %. De plus, ces plans présentent un MDBF relativement élevé par rapport au cycle défini, et une criticité faible des avis correctifs associés. Ces résultats suggèrent que l'intervalle de maintenance semble trop conservateur, entraînant des interventions récurrentes peu justifiées au regard de l'historique de défaillances observé. Ainsi, ces plans sont peut-être exécutés plus souvent que nécessaire, mobilisant des ressources sans bénéfice clair en matière de fiabilité.

Tableau 5.13 : Plans d'entretien qui semblent associés à de la sur-maintenance

Plan d'entretien	Score de criticité Axe 1	Score de criticité Axe 2	Cycle	Nombre moyen d'avis correctifs dans un cycle	Position moyenne des avis dans le cycle	Taux d'avis urgents (en %)	MDBF
Inspection tachymètre	0.168	0.050	40 000 km	0.05	86.84 %	4.35 %	76 102 km
Changement sabot	0.249	0.087	200 000 km	0.15	83.21 %	5.71 %	68 787 km
Vérif fusible frotteur	0.251	0.107	120 000 km	0.25	67.30 %	23 %	233 902 km
Périodicité filtres BSC	0.252	0.050	6 mois	0.03	62.20 %	5.33 %	234 394 km

Il est toutefois important de souligner que l'absence ou la faible densité de défaillances ne signifie pas nécessairement que le plan est inutile, mais peut traduire surtout d'une efficacité de la maintenance préventive. Ces cas doivent donc être discutés avec les experts de maintenance, en intégrant d'autres considérations comme l'impact et le coût des défaillances potentielles, les enjeux de sécurité ou encore les contraintes logistiques liées à la réparation des composants.

À l'inverse, certains plans semblent exposer les équipements à un risque de sous-maintenance, c'est-à-dire que l'intervalle actuel pourrait être trop espacé au regard du nombre et de la criticité des défaillances observées. Ces plans présentent un nombre élevé de défaillances détectées durant un cycle. Les défaillances surviennent tôt par rapport à la prochaine exécution du plan prévu, et présentent un MDBF faible, révélant une fréquence importante de défauts signalés. Dans ces cas, un raccourcissement de l'intervalle de maintenance ou un renforcement du contenu des opérations pourrait être envisagé.

Tableau 5.14 : Plans d'entretien qui semblent associés à de la sous-maintenance

Plan d'entretien	Score de criticité Axe 1	Score de criticité Axe 2	Cycle	Nombre moyen d'avis correctifs dans un cycle	Position moyenne des avis dans le cycle	Taux d'avis urgents (en %)	MDBF
Entretien pont moteur	0.531	0.095	240 000 km	27.50	53.70 %	19.85 %	21 674 km

Tableau 5.15 : Plans d'entretien qui semblent associés à de la sous-maintenance (suite et fin)

Entretien opérateur de porte	0.429	0.006	240 000 km	17.51	63.99 %	0.45 %	42 293 km
Périodicité moteur alt.	0.408	0.008	300 000 km	10.09	55.07 %	11.22 %	30 372 km
Inspection soufflet	0.405	0.167	240 000 km	11.92	56.52 %	0 %	66 863 km

Ces observations permettent d'identifier des plans qui méritent un réexamen ciblé, et offrent une base pour orienter les ajustements futurs. Elles illustrent également la capacité de la méthode à détecter les inefficacités potentielles dans les stratégies en place, même lorsqu'un plan n'apparaît pas comme globalement critique selon l'ensemble des axes d'évaluation.

Cependant, les plans identifiés comme suspects doivent faire l'objet d'une analyse détaillée en collaboration avec les experts de maintenance afin de confirmer les constats, d'en comprendre les causes potentielles, et de définir des actions adaptées en tenant compte de l'ensemble du contexte opérationnel et des indicateurs. Par ailleurs, certains plans peuvent paraître efficaces simplement parce qu'ils ne sont pas encore arrivés à échéance pour certains équipements récents, ou parce que les données disponibles ne couvrent qu'un nombre limité de cycles. Il est donc essentiel de mettre à jour les données régulièrement afin d'enrichir les analyses et d'affiner les résultats au fil du temps. Finalement, ces constats soulignent l'intérêt d'un outil de diagnostic non pas comme solution automatique, mais comme support à la prise de décision.

5.3 Validation de la méthode

Cette dernière phase vise à évaluer la pertinence et la robustesse de la méthode proposée, ainsi que la qualité des résultats obtenus. Étant donné la portée du projet et le cadre temporel restreint, il n'est pas possible de mesurer l'impact direct de la méthode sur le terrain. Ainsi, l'objectif est de s'assurer que l'outil construit constitue bien un support fiable et exploitable facilitant la prise de décision et la priorisation des efforts d'amélioration de la maintenance. Pour cela, plusieurs dimensions complémentaires sont vérifiées afin d'analyser la portée de l'approche proposée : la pertinence analytique de l'outil, la valeur ajoutée de la méthode par rapport à l'existant et son

efficacité opérationnelle à soutenir la prise de décision. La figure 5.16 présente les principales étapes de la démarche de validation.

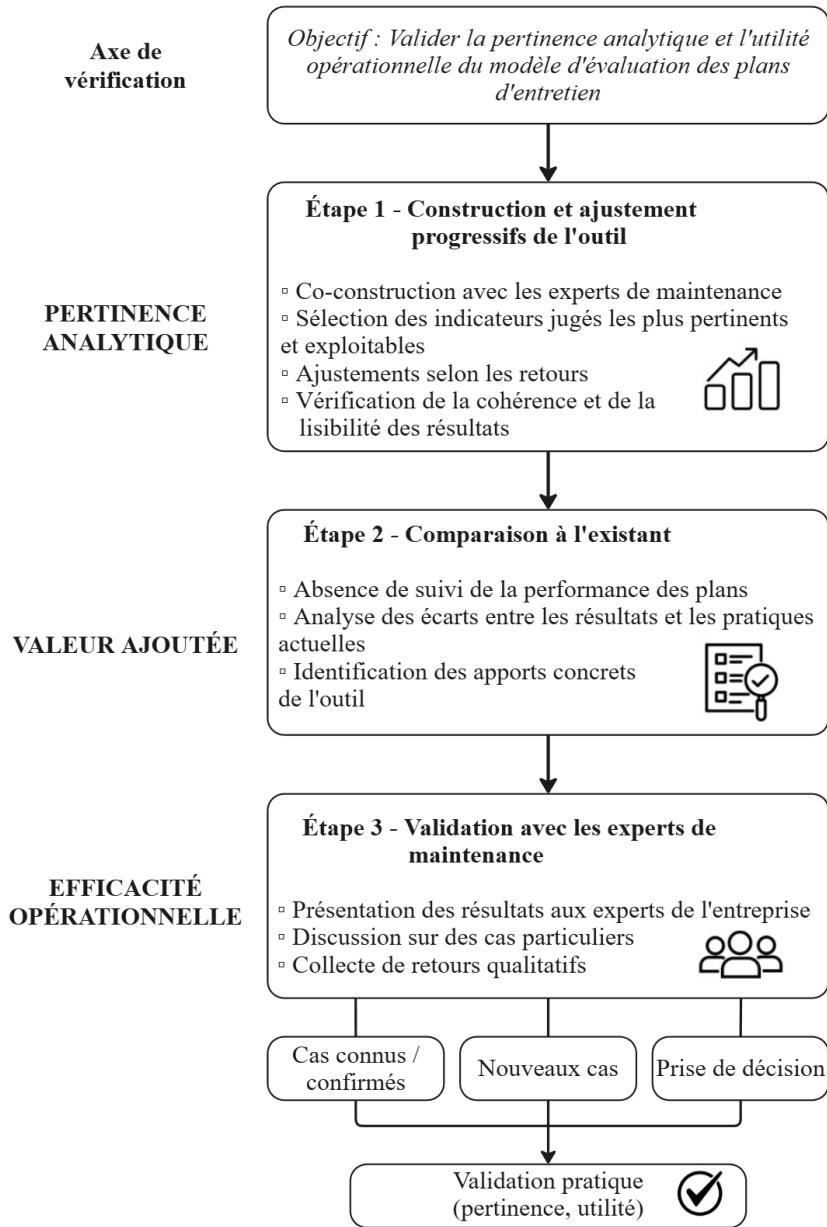


Figure 5.17 : Démarche suivie pour la validation de la méthode proposée

La pertinence analytique de l'outil repose sur les indicateurs de performance utilisés et leur capacité à refléter de manière intelligible la réalité opérationnelle. Ces indicateurs ont été sélectionnés et construits en accord avec les recommandations de la littérature, mais surtout en collaboration avec

les experts de maintenance de l'entreprise partenaire. Cette démarche a permis d'assurer la lisibilité et l'alignement des résultats avec les besoins du terrain. De plus, une démarche itérative a été suivie pour la construction du tableau de bord, avec plusieurs ajustements qui ont été apportés en fonction des retours des utilisateurs finaux. Cette collaboration continue a permis d'obtenir un ensemble d'informations et de résultats à la fois complet, cohérent et compréhensible pour faciliter leur appropriation.

Pour ce qui est de la valeur ajoutée apportée par la méthode, l'outil développé vient répondre à un besoin clairement identifié au sein de l'organisation partenaire : celui de pouvoir suivre et évaluer objectivement les plans de maintenance préventive, afin d'en améliorer l'efficacité. Jusqu'à présent, aucun suivi structuré de la performance et de l'impact réel des plans d'entretien sur les équipements n'était mis en place. Les données issues de l'exécution de la maintenance, notamment préventive, bien qu'enregistrées dans le système ERP, restaient sous-exploitées. Dans ce contexte, plusieurs personnes de l'entreprise – et notamment du département ingénierie – se sont montrées fortement intéressées par la mise en place d'un tel outil durant les différentes réunions et présentations qui ont pu être faites tout au long du projet. Leur besoin était notamment de détecter les cas de sur-maintenance ou de sous-maintenance. Ce besoin avait déjà fait l'objet de discussions internes, mais aucun outil n'avait encore été mis en œuvre pour y répondre, en raison de la complexité des données à traiter et du manque de ressources disponibles pour mettre en place cette démarche.

La méthode proposée apporte ainsi une valeur ajoutée concrète :

- Elle exploite pleinement les données historiques de maintenance déjà disponibles dans le système d'information ;
- Elle permet de visualiser, pour chaque plan, les indicateurs clés liés à sa performance de manière standardisée ;
- Elle permet une hiérarchisation des plans à revoir en priorité, selon des critères objectifs ; et
- Elle offre une base de diagnostic et de discussion commune entre les différents départements concernés (planification, ingénierie, exploitation...), en facilitant une lecture partagée des résultats.

Au-delà de la pertinence analytique et de la valeur ajoutée, il est essentiel de s'assurer de la validité de l'outil en vérifiant la cohérence des résultats générés, leur adéquation avec les connaissances métiers et leur pertinence pour orienter les actions d'amélioration. Pour cela, une rencontre avec des experts faisant partie du département ingénierie a été organisée afin d'examiner plus en détail les cas de plans d'entretien classés comme critiques par la méthode sur la base des différents indicateurs relatifs au volume et à la position des avis correctifs. Ces cas sont particulièrement intéressants à détecter pour l'entreprise, car ils correspondent à des cas suspectés de sur- ou sous-maintenance et constituent ainsi des opportunités potentielles d'optimisation et d'économies. L'objectif était d'identifier si ces plans signalés comme problématiques correspondent aux perceptions ou constats déjà établis par les experts, ou s'ils mettent en lumière des situations encore non identifiées.

Parmi les cas discutés, certains résultats sont venus confirmer les observations des experts. Par exemple, les plans liés à l'entretien des frotteurs positifs ou aux portes-voyageurs étaient associés à un score de criticité élevé, ce qui a été jugé cohérent compte tenu du nombre élevé d'avis correctifs remontés dans leur département sur ces composants. À l'inverse, d'autres plans ont suscité plus d'interrogation comme le plan « Périodicité 971 », fortement lié à la consommation régulière d'un bloc KFP de manière corrective. Ce résultat, plus inattendu pour les experts, a permis de faire émerger un nouveau point d'attention.

Cependant, en l'absence de base de comparaison préexistante, les résultats n'ont pas pu être confrontés à un référentiel établi. En effet, il n'y avait pas de liste de plans suspects ou validés par les experts, puisque de telles analyses n'avaient encore jamais été initiées. Les échanges ont donc porté principalement sur la cohérence perçue des résultats et sur leur potentiel d'exploitation pour alimenter les réflexions internes.

Ce qui ressort de manière générale de cette rencontre est que l'outil développé constitue une base d'analyse précieuse et complète au niveau des données prises en compte, qui structure l'interprétation de ces données et permet aux experts d'identifier, discuter et prioriser des plans à ajuster. Néanmoins, la complexité des données et la diversité des cas analysés montrent que des ajustements restent possibles pour améliorer la précision du diagnostic, notamment en affinant certains liens entre plans et avis, et en rajoutant des filtres pour mieux discriminer les données

prises en compte. L'outil développé est donc un support évolutif à intégrer dans une démarche d'amélioration continue, et non un système de décision figé.

Finalement, les retours des experts ont permis de valider le potentiel opérationnel de l'outil développé. La reconnaissance de son utilité s'est également traduite par une volonté de pérenniser la démarche au sein de l'organisation. En effet, à la suite du projet, l'entreprise partenaire a exprimé le souhait que l'outil soit adapté au gabarit interne afin d'être intégré à la plateforme partagée regroupant l'ensemble de leurs outils analytiques développés sur Power BI. L'objectif est de permettre une utilisation par l'ensemble des acteurs concernés avec une mise à jour régulière des données, pour assurer un suivi continu de la performance des stratégies de maintenance préventive.

5.4 Conclusion

Ce chapitre a présenté l'application de la méthode développée au cas d'étude, ainsi que les résultats obtenus.

Compte tenu du nombre de plans analysés (133 types de plans d'entretien), une démarche de comparaison a été mise en œuvre pour repérer ceux se distinguant par des contre-performances sur un ou plusieurs axes d'évaluation. Contrairement à l'approche de Ge et al. (2023), il n'a pas été jugé pertinent de fixer des seuils absolus de performance, en raison de la forte diversité des plans, des logiques d'exécution et des composants concernés. L'approche par score de criticité a permis de mettre en évidence les écarts relatifs et de prioriser les plans à analyser plus en détail. L'analyse croisée des trois dimensions de validation a permis d'évaluer la fiabilité de la méthode, son alignement avec les besoins du terrain et sa capacité à soutenir une démarche d'amélioration continue des stratégies de maintenance.

Les résultats obtenus offrent ainsi une vision complète des stratégies actuellement déployées et constituent un support objectif pour orienter les décisions. L'outil d'aide à la décision développé sous forme de tableau de bord permet une interprétation visuelle et hiérarchisée des résultats, facilitant l'identification des leviers d'optimisation et le dialogue avec les experts métiers. Ce travail fournit donc une base solide pour ajuster ou réorienter les stratégies de maintenance préventive, tout en assurant une mise à jour régulière des analyses grâce aux nouvelles données collectées.

CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ce dernier chapitre rappelle le cadre général de l'étude, expose les contributions de la méthode proposée, discute des limites rencontrées, puis ouvre sur des perspectives d'amélioration.

Cette étude a été menée en collaboration avec une organisation de transports en commun, dans l'objectif d'identifier les opportunités d'amélioration des stratégies de maintenance mises en œuvre pour soutenir l'exploitation d'une flotte complexe de matériels roulants. S'appuyant sur une exploitation approfondie des données issues du système ERP, ce travail propose une méthode de diagnostic de la performance des plans de maintenance préventive, structurée en trois étapes principales : (1) un diagnostic préliminaire des pratiques de maintenance, (2) l'identification des composants critiques, et (3) l'évaluation détaillée des plans d'entretien.

La méthode s'appuie sur une série d'indicateurs opérationnels, qui permettent d'évaluer la capacité des plans à prévenir les défaillances, à réduire le recours à la maintenance corrective, et à garantir la bonne exécution des tâches planifiées. Ils permettent également d'évaluer la cohérence entre les stratégies mises en place et la criticité des défaillances associées aux composants concernés. Ces indicateurs ont été rassemblés au sein d'un tableau de bord interactif, conçu pour aider les décisionnaires à suivre la performance de leurs plans d'entretien et à cibler les révisions prioritaires.

La mise en œuvre du diagnostic s'est appuyée sur des données historiques relatives à la division des métros et couvrant une période de près de 10 ans. Un travail important a été réalisé pour structurer, nettoyer, enrichir et croiser les différentes sources d'information. Des méthodes de traitement automatique ont été utilisées pour pallier l'absence de certains liens dans les données, notamment entre les avis correctifs et les plans d'entretien, ou entre les équipements fonctionnels et les articles sérialisés. Le tout a été intégré dans Power BI afin de fournir un outil de visualisation clair, évolutif et utilisable par les équipes opérationnelles. Son développement itératif avec les gestionnaires de maintenance a permis de garantir son alignement avec les besoins opérationnels réels.

Le principal apport de la méthode proposée réside dans sa capacité à fournir un cadre d'analyse holistique et répliable, fondé sur les données disponibles et orienté vers l'aide à la décision. Elle permet de réduire la complexité inhérente à la gestion d'un large catalogue d'équipements et de plans d'entretien, en synthétisant des volumes importants d'informations en indicateurs clés, et en mettant en lumière les points de vigilance et les opportunités d'optimisation. Elle se distingue

également par sa flexibilité : l'approche peut être transposée à d'autres types d'équipements ou secteurs, en adaptant les indicateurs aux caractéristiques de l'entreprise et aux données disponibles.

Compte tenu du cadre temporel restreint du projet, combiné à la complexité importante des données manipulées et des procédures de maintenance analysées, tous les ajustements nécessaires n'ont pas pu être pleinement finalisés et nous n'avons pas pu aller jusqu'au déploiement, phase finale de la méthodologie CRISP-DM. Toutefois, l'entreprise partenaire s'est montrée vivement intéressée par la démarche. D'ailleurs, le tableau de bord a été adapté au gabarit interne de l'organisation à l'issue du projet, afin de faciliter son intégration dans la plateforme analytique centralisée de l'entreprise. L'outil pourra ainsi continuer d'évoluer afin d'en améliorer la précision, et être déployé de manière effective dans un futur proche.

Toutefois, plusieurs limites ont pu être identifiées au cours du projet. La plus importante concerne la qualité et l'exploitabilité des données, sur lesquels les résultats de la méthode reposent. Certains champs présentaient un manque de détail ou une hétérogénéité importante, rendant difficile l'interprétation ou le croisement automatisé des informations. Certaines données qui auraient pu enrichir l'analyse, comme les coûts des interventions ou les causes précises des défaillances, n'étaient pas disponibles. Cela souligne l'importance d'une gouvernance de la donnée renforcée pour fiabiliser les analyses futures, avec des règles de saisie plus uniformes et une meilleure traçabilité des liens entre plans et nomenclature des équipements.

Par ailleurs, la méthode ne vise pas à déterminer la stratégie optimale, mais à évaluer la performance actuelle des plans déjà en place. Elle ne permet pas d'identifier les causes racines des défaillances ni de prescrire directement des actions. Ainsi, elle ne remplace pas les approches classiques d'ingénierie de la maintenance comme la RCM ou l'AMDEC, mais se place plutôt comme un outil complémentaire de diagnostic, agissant en premier filtre pour prioriser les efforts d'amélioration sur les cas les plus critiques et guider des analyses approfondies à venir.

Au regard de ces constats, plusieurs recommandations peuvent être formulées pour consolider et pérenniser la démarche. Dans un premier temps, il serait pertinent d'envisager une mise en œuvre progressive de la méthode dans les processus opérationnels de l'entreprise partenaire. La collecte des données et la mise à jour des indicateurs pourraient être automatisées pour rendre le tableau de bord dynamique et assurer un suivi en temps réel, afin de transformer cet outil d'analyse en un système de pilotage continu. Par ailleurs, il apparaît nécessaire de renforcer la gouvernance de la

donnée au sein des équipes de maintenance, en intégrant davantage les exigences analytiques en amont des processus de saisie. Enfin, bien que cette étude ait été menée sur la flotte de métros, la méthode développée a vocation à être étendue à d'autres entités de l'organisation, en particulier à la division autobus, si les conditions de maturité de la planification et de qualité des données le permettent. Elle pourrait également inspirer des démarches similaires dans d'autres secteurs industriels confrontés à des problématiques de maintenance sur des flottes d'actifs complexes.

En somme, bien que non exhaustive, cette étude constitue une base solide pour un pilotage plus efficient, éclairé et rationnel des politiques d'entretien. Dans un contexte où les contraintes opérationnelles et économiques se renforcent, un tel outil constitue un levier stratégique essentiel pour soutenir les décisions dans le domaine de la maintenance industrielle.

RÉFÉRENCES

- AFNOR. (2001). NF EN 13306 - Terminologie de la maintenance. In *Normes nationales et documents normatifs nationaux*.
- AFNOR. (2019). Maintenance - Indicateurs de performance clés pour la maintenance. In (Vol. NF EN 15341, pp. 53). Normes nationales et documents normatifs nationaux.
- Astivia-Chávez, & Ortiz-Posadas. (2023). Exploratory Data Analysis for Preventive and Corrective Maintenance for Medical Equipment in a General Hospital from the Health Institute of the State of Mexico. In *XLV Mexican Conference on Biomedical Engineering* (805-815). IFMBE proceedings. https://doi.org/10.1007/978-3-031-18256-3_84
- Besiktepe, Ozbek, & Atader. (2019). Analysis of the Maintenance Work Order Data in Educational Institutions. *Proceedings of International Structural Engineering and Construction*, 6. <https://doi.org/10.14455/ISEC.res.2019.18>
- Block, Soderholm, & Tyrberg. (2008). Evaluation of Preventive Maintenance Task Intervals Using Field Data from a Complete Life Cycle. 2008 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA. <https://doi.org/10.1109/AERO.2008.4526635>
- Brewin, Leung, & Easty. (2001). Effectively utilizing device maintenance data to optimize a medical device maintenance program. *Biomedical instrumentation & technology / Association for the Advancement of Medical Instrumentation*, 35, 383-390.
- Coria, Maximov, Rivas-Dávalos, Melchor, & Guardado. (2015). Analytical method for optimization of maintenance policy based on available system failure data. *Reliability Engineering & System Safety*, 135, 55-63. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.11.003>
- Deprez, Antonio, Arts, & Boute. (2023). Data-driven preventive maintenance for a heterogeneous machine portfolio. *Operations Research Letters*, 51(2), 163-170. <https://doi.org/10.1016/j.orl.2023.01.006>
- Deschamps, C. (2024). *Méthode de valorisation de données pour la gestion des pièces de rechange selon leur historique de consommation* Polytechnique Montréal].
- Didriksen, Hansen, Sigsgaard, Mortensen, Agergaard, & Ge. (2022). Utilising failure history to improve maintenance planning. Proceedings of NordDesign 2022, Copenhagen, Denmark. <https://doi.org/10.35199/NORDDESIGN2022.42>
- Données Scopus. (2024). Elsevier. Retrieved 06/09/2024 from <https://www.elsevier.com/fr-fr/products/scopus/data#0-%C3%A0-propos-des-donn%C3%A9es-scopus>
- Ge, Sigsgaard, Agergaard, Mortensen, Khalid, & Hansen. (2023). Improving periodic maintenance performance: a grouping and heuristic approach. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 40(3), 845-862. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-09-2021-0322>
- Ge, Sigsgaard, Andersen, Mortensen, Agergaard, & Hansen. (2024). An adaptable end-to-end maintenance performance diagnostic framework. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 41(2), 732-753. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-02-2022-0071>
- Gonnelli, Satta, Frosini, & Iadanza. (2017). Evidence-based approach to medical equipment maintenance monitoring. In v. IFMBE proceedings, European Medical and Biological

- Engineering Conference Nordic-Baltic, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5122-7_65
- Hamasha, Bani-Irshid, Almashaqbeh, Shwaheen, Qadri, Shbool, Muathen, Ababneh, Harfoush, Albedoor, & Bashir. (2023). Strategical selection of maintenance type under different conditions. *Scientific Reports*, 13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42751-5>
- Herguedas, S., Mena-Nieto, & Rodrigo-Muñoz. (2022). A method for obtaining the preventive maintenance interval in the absence of failure time data. *Eksplotacja i Niezawodnosc - Maintenance and Reliability*, 24, 564-573. <https://doi.org/10.17531/ein.2022.3.17>
- Jonge, & Scarf. (2019). A review on maintenance optimization. *European Journal of Operational Research*, 285. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.09.047>
- Knežević, Stazić, Orović, & Pavin. (2022). Optimisation of Reliability and Maintenance Plan of the High-Pressure Fuel Pump System on Marine Engine. *Polish Maritime Research*, 29, 97-104. <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0047>
- Kumar, Galar, Parida, Stenström, & Berges. (2013). Maintenance performance metrics: a state-of-the-art review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 19(3), 233-277. <https://doi.org/10.1108/JQME-05-2013-0029>
- Lai. (2015). Maintenance Performance: Examination of the Computer-Aided Maintenance Data of a Large Commercial Building. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 29(4), 04014118. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000619](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000619)
- Maquee, Shojaie, & Mosaddar. (2012). Clustering and association rules in analyzing the efficiency of maintenance system of an urban bus network. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 3(3), 175-183. <https://doi.org/10.1007/s13198-012-0121-x>
- Morant, Larsson-Kraik, & Kumar. (2016). Data-driven model for maintenance decision support: A case study of railway signalling systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit*. <https://doi.org/10.1177/0954409714533680>
- Olack, D. (2021). *Application of Data Analytics to Mine Nuclear Plant Maintenance Data*.
- Parida, Kumar, Galar, & Stenström. (2015). Performance measurement and management for maintenance: a literature review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 21(1), 2-33. <https://doi.org/10.1108/JQME-10-2013-0067>
- Pincioli, Baraldi, & Zio. (2023). Maintenance optimization in industry 4.0. *Reliability Engineering & System Safety*, 234, 109204. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109204>
- Présentation générale de CRISP-DM*. (2021). IBM Corporation. Retrieved 14-11-2024 from <https://www.ibm.com/docs/fr/spss-modeler/saas?topic=dm-crisp-help-overview>
- Salonen, Bengtsson, & Fridholm. (2020). The Possibilities of Improving Maintenance Through CMMS Data Analysis. In *SPS2020* (13, 249 - 260). <https://doi.org/10.3233/ATDE200163>
- Segulja, Bukša, & Tomas. (2009). Maintenance Interval Adjustment of Significant Ship Propulsion Components. *PROMET - Traffic & Transportation*, 21. <https://doi.org/10.7307/ptt.v21i3.223>

- Sigsgaard, Agergaard, Mortensen, & Soleymani. (2021, 24-27 May 2021). Data-Driven Systematic Evaluation of Preventive Maintenance Performance. 2021 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), Orlando, FL, USA. <https://doi.org/10.1109/RAMS48097.2021.9605706>
- Stazić, Knežević, Orović, & Mihanović. (2020). Maintenance Interval Adjustment Based on the Experience, Case Study of Marine Air Compressor System. *Nase More*, 67. <https://doi.org/10.17818/NM/2020/2.7>
- Tubis, & Werbińska-Wojciechowska. (2017). Balanced Scorecard use in Passenger Transport Companies Performing at Polish Market. *Procedia Engineering*, 187, 538-547. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.412>
- Weeks, & Leite. (2021). Facility Defect and Cost Reduction by Incorporating Maintainability Knowledge Transfer Using Maintenance Management System Data. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 35, 04021004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001569](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001569)
- Weeks, & Leite. (2022). Minimizing Facility Corrective Maintenance: Benchmarking Preventative-to-Corrective Maintenance Ratios Using Maintenance Data and Building Age in Dormitories. *Journal of Management in Engineering*, 38(1), 04021086. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000996](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000996)
- Zhou, Kou, & Ergu. (2014). Analysing Operating Data to Measure the Maintenance Performance. *Quality and Reliability Engineering International*, 31. <https://doi.org/10.1002/qre.1584>