



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيات المتقدمة
Ecole Nationale Supérieure des Technologies Avancées
قسم الهندسة الصناعية والصيانة
Département génie industriel et maintenance



Département génie industriel et maintenance

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme

D'INGÉNIEUR d'État

-Filière-

Génie Industriel

-Spécialité-

Management et Ingénierie de la Maintenance Industrielle

-Thème-

IaM-Maint : Un Agent Conversationnel Intelligent pour la Modernisation de la GMAO

Réalisé par

ZERROUK Ikram Feth Ezahr & GUENDOUZI Meriem Lydia

Soutenu le 23/06/2025

Les membres de Jury :

Mr. Ikhlas MEDDOUR	Président
Mme. Nedjma SALHI	Examinatrice
Mr. Wail REZGUI	Encadrant
Mr. Mohamed AMRANI	Co-Encadrant
Mr. Abderraouf BELOUAHEM	Co-Encadrant Entreprise Coca-Cola ECCBC

Année universitaire 2024/2025

Dédicace

Avant toute chose, **Alhamdoulilleh**, ma gratitude la plus profonde s'adresse à Allah, Le Tout-Puissant. C'est par sa volonté que j'ai trouvé la force d'avancer, la patience face aux épreuves, et la réussite dans chaque étape franchie. Sans sa guidance et sa miséricorde, rien de tout cela n'aurait été possible.

En arrivant à cette étape de mon parcours, mon cœur déborde de gratitude envers ceux qui m'ont accompagnée, soutenue et aimée tout au long de ce long chemin. Je pense avant tout à mes chers parents, papa **Bouزيد** et maman **Hanene**, à qui je dois tant. Merci pour chaque mot d'encouragement, pour chaque regard rempli de fierté, pour votre patience, vos prières, et votre amour inconditionnel. Merci d'avoir cru en moi même dans les moments où moi, je doutais. Mon plus grand souhait est de continuer à vous rendre fiers, encore et toujours.

À ma précieuse sœur **Rawia**, merci d'avoir été ce soutien indéfectible. Merci pour ta présence rassurante, ta douceur, ta patience, ton amour, et tout ce que tu représentes pour moi. Ton amour m'a soutenue dans les moments difficiles, et ta fierté m'a toujours donné la motivation d'avancer. Tu comptes énormément, bien plus que tu ne l'imagines.

À mes précieux frères **Hichem** et **Saber**... Oui, ce jour est enfin arrivé : Meriem a fini ses études ! Merci pour votre soutien quotidien, votre amour et humour, vos taquineries qui m'ont souvent fait sourire quand tout semblait trop lourd. Rien ne remplace l'amour d'un frère, et vous avez été là, chaque jour, à votre manière si précieuse.

À ma cousine **Anfel**, pour ton soutien discret mais précieux, et à toute ma famille — mes oncles et mes grand-mères — dont les gestes tendres et prières silencieuses m'ont accompagnée, je vous adresse ma profonde gratitude.

À mon amie **Soundous**, qui partage ma vie depuis l'enfance... Merci d'avoir été là dès le tout début, on rêvait de ce jour quand on n'était que deux fillettes de six ans, et nous voilà, main dans la main, vivant des rêves encore plus grands que ceux qu'on imaginait. Merci pour ta fidélité, ton amitié précieuse et ton amour sincère.

À toi **Ikram**, mon binôme dans cette aventure. Merci pour ton sérieux, ton implication, ta patience, ton humour qui a toujours réussi à me faire sourire même dans les périodes les plus stressantes. Merci pour ta force tranquille, pour ton écoute et ton soutien. Et surtout, merci d'avoir cru en nous, même quand tout semblait flou. J'ai eu la chance de partager ce travail avec toi, et je ne pourrais en être plus reconnaissante. Que ton avenir soit aussi lumineux que ton cœur et que le bonheur t'accompagne à chaque étape.

Et enfin, je dédie ce travail à moi-même. À celle qui a pleuré, douté, chuté, mais s'est toujours relevée. À celle qui n'a jamais cessé d'y croire, même quand tout semblait difficile. Ce chemin a été long, intense, semé d'épreuves, mais grâce à Dieu, à ma propre persévérance, et à l'amour de ceux qui m'entourent, j'ai pu aller jusqu'au bout. Aujourd'hui, je regarde ce travail avec fierté, car il est le fruit de chaque étape franchie avec amour, patience et détermination. Et je le présente avec tout mon cœur, avec une pensée sincère à toutes les personnes qui ont cru en moi et m'ont portée jusqu'ici.

Meriem

Dédicace

Mes premières pensées s'envolent vers Celui qui est le commencement et la fin de toutes choses, Allah, le Tout-Puissant.

Je tiens, avant tout et par-dessus tout, à dire ***Alhamdoulillah***. Ma reconnaissance la plus profonde s'élève vers Celui qui, par Sa grâce infinie, a guidé chacun de mes pas. Il m'a entourée de bienfaits inestimables : une famille aimante, des soutiens fidèles, et des opportunités précieuses.

Rien de ce que j'ai accompli n'aurait vu le jour sans Sa lumière. C'est Lui qui m'a insufflé la force d'accomplir ce projet, la volonté inébranlable de persévérer. Sans Sa guidance lumineuse, sans Ses choix si justes et bienveillants pour moi, rien de tout cela n'aurait vu le jour. C'est Son chemin qui a éclairé le mien, et je Lui en resterai éternellement redevable.

Papa, Maman, Cette page vous est dédiée. Votre fille a enfin achevé ce chapitre, cette magnifique aventure qui a commencé avec vous, grâce à vous, et qui se termine aujourd'hui, pour vous. Ce travail est le fruit de mes efforts, mais surtout l'écho de votre amour.

Je te le dédie, à toi mon cher père, ***Hassine***. Dès mes premiers pas sur le chemin de l'étude, tu as été mon guide silencieux mais omniprésent. Je me souviens de ton temps, de ton énergie, de ton réconfort que tu as si généreusement sacrifiés pour que je puisse avancer sereinement, sans jamais sentir le poids de la contrainte ni la lassitude. Ton dévouement absolu, ton courage indomptable et cette foi inébranlable que tu as toujours placée en mes capacités ont été le fondement même de chacune de mes réussites, la roche sur laquelle j'ai bâti mes rêves. Que ce travail soit le plus humble des témoignages de mon infinie reconnaissance et de mon amour le plus pur.

Et à toi ma douce mère, ***Fatiha***. Toi, la source intarissable de tendresse, dont les prières murmuraient toujours l'espoir et la sagesse. Ton amour inconditionnel, tes mots apaisants et la confiance que tu as toujours placée en mes ambitions ont été mon refuge le plus sûr dans les moments de doute et d'incertitude. Je revois encore ta main dans la mienne sur le chemin de l'école... Et aujourd'hui, c'est vers toi que je me tourne, le cœur empli de gratitude, pour te dire que ce chemin, nous l'avons parcouru ensemble. C'est grâce à toi, Maman, que j'ai puisé au plus profond de mon être la force d'avancer, de me surpasser et de croire en mes rêves les plus audacieux, afin de toujours donner le meilleur de moi-même.

À ma sœur, ***Hasna***. Ma confidente unique et précieuse, mon alliée de chaque instant. Tu n'as jamais failli à me remettre le moral, à dissiper les nuages et à me faire retrouver le sourire. Ta joie de vivre contagieuse, ta gentillesse infinie et cette complicité qui nous unit ont été une force indispensable tout au long de ce parcours, me redonnant la lumière dans les moments les plus sombres. Et maintenant, le temps est enfin venu de savourer nos moments, d'être ensemble, de célébrer que tout est accompli !

À mon frère, ***Yassine***. Tu as été mon soutien indéfectible, cette force tranquille sur laquelle j'ai toujours pu compter. Ton amour sincère, si souvent masqué par tes taquineries, a toujours su me redonner le sourire et alléger mes fardeaux. Merci d'avoir été ce roc inébranlable sur lequel j'ai pu m'appuyer, me donnant la confiance en moi quand j'en avais le plus besoin. À ta manière si unique et précieuse, tu as été un pilier essentiel de mon parcours, et pour cela, je te

suis infiniment reconnaissante.

À mes chers grands-parents, dont la sagesse et l'amour éclairent mon chemin.

À toute ma famille – mes tantes, mes oncles et mes cousins – dont la bienveillance et les prières silencieuses ont été un soutien constant. Chaque geste tendre, chaque attention discrète a façonné la personne que je suis aujourd'hui. C'est le cœur empli de reconnaissance que je vous dédie ce travail, témoignage de l'impact inestimable de votre présence dans ma vie.

À la meilleure amie qu'une personne puisse jamais espérer avoir, **Mina**. Tu as été bien plus qu'une amie, une véritable sœur par ton soutien inconditionnel, ton aide précieuse et discrète en coulisses. Tes motivations, tes conseils avisés m'ont toujours poussée vers l'avant, vers mes objectifs. Aucun "merci" ne sera jamais assez grand pour te rendre ne serait-ce qu'une fraction de ce que tu as fait pour moi.

À **Hiba**, mon amie d'enfance. Toutes ces années écoulées n'ont fait que grandir et solidifier notre amitié. Merci pour ton soutien inestimable, toujours là, discret mais puissant, et pour ton aide constante, qui a marqué chaque étape de mon chemin. Ta présence est un cadeau précieux que je chéris profondément.

À **Meriem**, bien plus qu'une de mes meilleures amies : ma complice, ma binôme. Ce projet a pris une dimension exceptionnelle grâce à ton perfectionnisme éclairé, que tu maîtrises si bien. Merci pour ton soutien indéfectible et tes encouragements qui, tel un phare, nous ont guidés chaque fois que l'une de nous perdait pied. Merci d'avoir cru en nous, en ce "fameux binôme MI", en notre capacité à réaliser ce projet jusqu'au bout, même lorsque les défis semblaient insurmontables. Et surtout, merci pour ton travail acharné, ton dévouement sans faille et ton intelligence. Je n'imagine pas un autre binôme qui aurait pu mener ce projet à un tel succès, à part toi. Tu as été essentielle, et je te suis infiniment reconnaissante pour cette aventure partagée. Merci pour chaque moment partagé, chaque doute surmonté ensemble, chaque réussite savourée à deux.

Et comme le veut la tradition, le meilleur est pour la fin. Je dédie également ce travail à moi-même. À cette jeune femme qui a traversé des années de sacrifices, de nuits blanches et d'études acharnées, jonglant entre fatigue et ambition, entre peur et espoir. Aujourd'hui, je me murmure : "Oui, ton tour est enfin arrivé." J'ai réalisé le rêve de mes parents et de ma famille, les rendant immensément fiers, ce qui est ma plus belle récompense. Mais surtout, j'ai accompli l'un de mes propres rêves les plus chers. Tu t'es prouvée à toi-même que tu en étais capable. Cette réussite est la tienne.

Ce chemin fut long, parsemé d'embûches et parfois ardu, mais je sais aujourd'hui que chaque pas, chaque effort, chaque défi surmonté en valait infiniment la peine. Ce travail, fruit d'années de labeur et d'un amour immense, est le témoignage de ce parcours.

Je le dépose aujourd'hui avec fierté et humilité, dans l'espoir qu'il rende hommage à tous ceux qui m'ont portée, soutenue et crue capable. Que chaque mot de ces pages soit un éclat de gratitude, une offrande de reconnaissance. Et que cette fin ne soit que le commencement d'un nouveau rêve.

Ikram

Remerciements

*Tout d'abord, nous rendons grâce à Allah — **Alhamdoulillah** — pour la force, la patience et la sérénité qu'Il nous a accordées tout au long de ce parcours, et sans lesquelles nous n'aurions pu surmonter les épreuves jusqu'à ce jour.*

Nos vifs remerciements vont à nos encadrants académiques, Mr.REZGUI et Mr.AMRANI. Leur accompagnement précieux, leurs encouragements constants et leurs conseils avisés ont été des piliers fondamentaux de notre réussite.

Nous tenons également à exprimer notre profonde gratitude à l'ensemble du corps enseignant, dont l'engagement et la bienveillance ont enrichi notre parcours de savoirs précieux et d'expériences formatrices. Nos remerciements s'adressent aussi au président et aux membres du jury, pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer ce travail.

Un grand merci à nos encadrants professionnels durant le stage, Mr.BELOUHAEM Abderraouf et Mr.LOUNIS Sifeddine. Votre gentillesse, votre patience, et la générosité avec laquelle vous nous avez transmis votre expertise ont profondément enrichi notre expérience et nos connaissances.

Notre reconnaissance s'étend aux structures qui nous ont accueillis. Nos vifs remerciements vont à l'ensemble du personnel de PLM-Ressources et de Coca-Cola Algérie pour leur accueil et leur contribution essentielle à la réalisation de notre mémoire.

Enfin, notre gratitude s'étend à nos familles, nos amis et nos collègues dont le soutien constant et les encouragements ont été une source de motivation précieuse tout au long de ce parcours. Nous souhaitons tout particulièrement exprimer notre gratitude à *MINA* pour son aide et sa précieuse contribution à ce projet. À toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail, nous vous remercions chaleureusement.

Meriem et Ikram

ملخص

يندرج هذا المشروع ضمن نهج هيكلي يهدف إلى تحسين صيانة مصنع ECCBC Coca Cola في الجزائر عبر الدمج التدريجي لنظام معلومات للصيانة PLM-GMAO والذكاء الاصطناعي التحاوي. يتمثل الهدف الرئيسي في تصميم وتنفيذ مقاربة تطويرية للتحسين، بالاعتماد بداية على الموارد الداخلية، يليه نشر منظومة GMAO، وأخيراً اعتماد وكيل محادثات لتيسير الوصول إلى البيانات، تسريع متابعة التدخلات، وتحسين اتخاذ القرارات. وقد أسهم هذا النهج في رفع كفاءة أنشطة الصيانة، وزيادة فعاليتها واستجابتها، مع إرساء أسس متينة للتطورات المستقبلية بما يتسق مع مبادئ الصناعة 4.0.

كلمات مفتاحية : صيانة صناعية - صيانة مدعمة بحاسوب - روبوت محادثة - الصناعة 4.0 - وكيل محادثات - الذكاء الاصطناعي التوليدي - نموذج لغوي ضخم.

Résumé

Ce projet s'inscrit dans une stratégie directrice , visant l'optimisation de la maintenance industrielle de Coca-Cola ECCBC Algérie, par l'intégration progressive d'une solution de GMAO (PLM-GMAO) puis de l'intelligence artificielle conversationnelle. L'objectif principal consiste à concevoir et déployer une approche d'optimisation évolutive, s'appuyant d'abord sur les ressources internes, puis sur le déploiement de la GMAO, et enfin sur l'adoption d'un agent conversationnel afin de faciliter l'accès aux données, d'accélérer le suivi des interventions et d'enrichir la prise de décision. Cette stratégie a permis d'accroître de manière significative l'efficacité, la pertinence et la réactivité de la maintenance, tout en posant des fondations robustes pour de futures innovations, en parfaite cohérence avec les principes de l'Industrie 4.0.

Mots clés : Maintenance industrielle - GMAO 4.0 - Chatbot - industrie 4.0 - Agent conversationnel - IA générative - Grand modèle de langage.

Abstract

This project falls within a structured approach aimed at optimizing the industrial maintenance of Coca-Cola ECCBC Algeria through the gradual integration of a Computerized Maintenance Management System (PLM-GMAO) and conversational artificial intelligence. The main objective is to design and implement a scalable optimization approach, initially leveraging internal resources, then deploying the CMMS, and subsequently adopting a conversational agent to facilitate data access, accelerate intervention follow-up, and enhance decision-making. This approach has significantly improved the efficiency, pertinence, and responsiveness of maintenance operations, while laying a robust foundation for future innovations, in perfect harmony with Industry 4.0 principles.

Keywords : Industrial Maintenance - CMMS 4.0 - Chatbot - Industry 4.0 - Conversational Agent - Generative AI - LLM.

Table des matières

Table des figures	13
Liste des tableaux	17
Liste des acronymes	18
Introduction générale	20
Chapitre 1 Concepts fondamentaux	22
1.1 Introduction	23
1.2 La Maintenance Industrielle et les Systèmes de Gestion Associés	23
1.2.1 L'Évolution des Systèmes de Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO)	23
1.2.2 La GMAO au Cœur de l'Industrie 4.0	24
1.3 Concepts fondamentaux de l'Intelligence Artificiel conversationnelle	25
1.3.1 L'évolution des modèles du traitement du langage naturel	25
1.3.2 Les grands modèles de langages (LLMs - Large Language Models)	26
1.3.2.1 Limitation des grands modèles de langage	26
1.3.2.2 Techniques d'optimisation des LLMs	27
1.3.2.3 Outils d'orchestration : LlamaIndex et LangChain	29
1.4 Maintenance augmentée par le langage : apport des LLM et du NLP	29
1.5 Présentation des outils	30
1.6 Définition des normes et principes	31
1.7 Présentation du cadre du stage	31
1.7.1 Coca-Cola ECCBC Algérie	31
1.7.1.1 Organigramme de la direction industrielle	32
1.7.2 PLM Resources Company	33

1.8	Conclusion	34
Chapitre 2	Analyse du Service Maintenance à Travers un Audit Interne	35
2.1	Introduction	36
2.2	Organisation actuelle de la maintenance	36
2.2.1	Maintenance Corrective	37
2.2.2	Maintenance Préventive	38
2.2.2.1	Maintenance préventive hebdomadaire	39
2.2.2.2	Maintenance préventive systématique annuelle	41
2.3	Audit du système de maintenance : méthode et résultats	43
2.3.1	Objectifs et référentiels	43
2.3.2	Élaboration du questionnaire d’audit	43
2.3.3	Résultats de l’audit	44
2.3.4	Interprétation des résultats d’audit	52
2.4	Analyse de l’historique des arrêts	53
2.4.1	Structuration et fiabilisation des données	53
2.4.2	Exploration visuelle des données historiques	54
2.4.3	Analyse interprétative des résultats visualisés	54
2.4.4	Constats clés de l’analyse	55
2.5	Analyse critique des écarts identifiés	56
2.6	Synthèse des résultats	60
2.7	Conclusion	61
Chapitre 3	Optimisation et transformation digitale du système de maintenance	62
3.1	Introduction	63
3.2	Première Proposition : Optimisation initiale du model de maintenance avec les ressources existantes	63
3.2.1	Amélioration de la Maintenance Corrective	63
3.2.1.1	Redéfinition des rôles et responsabilités	64
3.2.1.2	Nouvelle proposition du flux d’exécution	65
3.2.1.3	Mise en place d’un nouvel historique des arrêts	66
3.2.2	Maintenance préventive systématique hebdomadaire	68

3.2.2.1	Redéfinition des rôles et responsabilités	68
3.2.2.2	Nouvelle proposition du flux d'exécution	69
3.2.3	Amélioration de la maintenance préventive systématique annuelle	69
3.2.3.1	Redéfinition des rôles et responsabilités	69
3.2.3.2	Nouvelle proposition du flux d'exécution	71
3.3	Limites de la première approche et nécessité d'une solution digitale	72
3.4	Deuxième proposition : Transformation numérique de la maintenance par l'adoption d'une GMAO	72
3.4.1	Contexte et motivations : vers une orientation stratégique spécialisée . .	73
3.4.2	Sélection d'une solution GMAO	74
3.4.2.1	Identification des besoins de l'entreprise ECCBC Coca-Cola Algérie	74
3.4.2.2	Définition des objectifs stratégiques	75
3.4.2.3	Élaboration d'un cahier des charges fonctionnel	75
3.4.2.4	Choix de la solution GMAO	76
3.4.3	PLM-GMAO : une solution intelligente au service de la maintenance industrielle	77
3.4.3.1	Fonctionnalités de PLM-GMAO	77
3.4.3.2	Analyse économique prévisionnelle (ROI)	78
3.4.4	Méthodologie de configuration et déploiement opérationnel de la GMAO	80
3.4.4.1	La phase préparatoire	80
3.4.4.2	La phase d'analyse et de conception	80
3.4.4.3	La phase de réalisation	86
3.4.4.4	La phase de préparation à la production :	94
3.4.5	Évaluation de la solution après configuration	94
3.4.5.1	Étude de cas comparative sur le traitement d'une panne	94
3.4.5.2	Evaluation de la solution PLM-GMAO à travers une analyse SWOT	96
3.5	Conclusion	99

Chapitre 4 Conception et intégration d'un Agent Conversationnel Intelligent pour la GMAO 100

4.1	Introduction	101
-----	------------------------	-----

4.2	Méthodologie de mise en œuvre de la solution	101
4.3	Identification des besoins	102
4.3.1	Définition des finalités de la solution :	102
4.3.2	Définition des sources de données	102
4.3.3	Spécification des fonctionnalités attendues	102
4.3.4	Définition de l'architecture initiale	103
4.4	Définition et sélection des outils technologiques	104
4.4.1	Choix du LLM	104
4.4.1.1	Présentation des exigences	104
4.4.1.2	Définitions des modèles disponibles	106
4.4.1.3	Etude comparative des modèles	106
4.4.1.4	Déploiement du modèle et essai expérimental	109
4.4.2	Choix du Framework d'orchestration : LlamaIndex	110
4.4.3	Intégration des briques cognitives via LlamaIndex	111
4.4.3.1	Embedding	111
4.4.3.2	Retrieval-Augmented Generation (RAG)	114
4.4.3.3	Prompt Engineering : la dernière brique du pipeline	115
4.4.3.4	Concevoir un prompt efficace : principes et bonnes pratiques	116
4.4.3.5	Choix du type de prompt adapté à notre assistant	117
4.5	Implémentation technique de l'agent	118
4.5.1	Développement des moteurs de traitement	118
4.5.1.1	Préparation de l'environnement logiciel	119
4.5.1.2	Construction des moteurs d'interrogation	120
4.5.1.3	Extension des fonctionnalités	122
4.5.1.4	Orchestration par un agent multi-outils	123
4.5.2	Développement de l'interface utilisateur	124
4.5.2.1	Architecture du service d'API Flask	124
4.5.2.2	Extension de l'interface utilisateur (JavaScript/CSS)	124
4.5.3	Architecture Finale	125
4.6	Analyse de la Performance Fonctionnelle de l'Agent	127
4.6.1	Définition des métriques d'évaluation	127

4.6.1.1	Conformité aux objectifs métier	128
4.6.1.2	Qualité du contenu généré	128
4.6.1.3	Qualité de l'interaction utilisateur	129
4.6.2	Évaluation expérimentale et interprétation des résultats	129
4.6.2.1	Présentation des requêtes simples et intermédiaires	129
4.6.2.2	Présentation des requêtes complexes	137
4.7	Synthèse des résultats et perspectives : apports, limites et axes d'amélioration .	139
4.7.1	Apports de l'agent	140
4.7.2	Limitations observées	140
4.7.3	Perspectives d'amélioration	141
4.7.3.1	Perspectives d'évolution de l'agent conversationnel	142
4.7.3.2	Perspectives d'intégration des agents conversationnels en GMAO	143
4.8	Conclusion	143
Conclusion générale		144
Bibliographie		146
Annexes		150
Annexe A : Approfondissements ; évolution des chatbots et présentation de l'environnement industriel		151
A.1	Les Agents Conversationnel (Chatbots)	151
A.1.1	Types de chatbots	151
A.1.2	Historique d'évolution des chatbots	152
A.2	Organisation du service maintenance et choix de la ligne de production	153
A.2.1	Organisation du service maintenance de Coca-Cola Algérie	153
A.2.2	Lignes de production de l'entreprise Coca-Cola Algérie	154
A.2.3	Choix de la ligne de production	154
Annexe B : Documentation de l'entreprise		156
B.1	Documents lié à la maintenance corrective	156
B.1.1	Rapport des arrêt électriques	156
B.2	Documents lié a la maintenance préventive hebdomadaire	157

B.2.1	Plan de maintenance Préventive (PMP) hebdomadaire et mensuelle . . .	157
B.2.2	Mode opératoire	157
B.2.3	Planning de maintenance préventive	158
B.3	Documents lié a la maintenance préventive annuelle	158
B.3.1	Liste des pièces	158
B.3.2	Diagramme de Gantt	159
B.4	Autre Documents	160
B.4.1	Résultat de l'étude de criticité des équipement	160
Annexe C	Filtrage et Structuration de l'historique des arrêts	161
C.1	Filtrage et Structuration de l'historique des arrêts	161
Annexe D	Work Breakdown Structure (WBS)	162
D.1	Le WBS de la maintenance corrective	162
D.2	Le WBS de la maintenance préventive hebdomadaire	162
D.3	Le WBS de la maintenance préventive annuelle	163
Annexe E	Organisation des données d'implémentation (PDR et équipements)	164
E.1	Table des équipements	164
E.1.1	Abréviation des équipements et Catégories	164
E.1.2	Arborescence Fonctionnelle des équipements	164
E.1.2.1	Catégorie 1 : Production des Bouteilles	164
E.1.2.2	Catégorie 2 : Conditionnement primaire	166
E.1.2.3	Catégorie 3 : Étiquetage et Marquage	168
E.1.2.4	Catégorie 4 : Palettisation et emballage	170
E.1.2.5	Catégorie 5 : Manutention et Transport Interne	174
E.2	Les PDR	175
E.2.1	Script de catégorisation des PDR	175
E.2.2	Les PDR du magasin I	176
E.2.3	Les PDR du magasin II	180
Annexe F	Cahier Des Charges (CDC) et Complément de fonctionnalités de PLM-GMAO	181

F.1	Cahier de charges GMAO	181
F.2	Intégration des données de base	183
F.2.1	Liste des équipement	183
F.2.2	Liste des PR	183
F.3	Fonctionnalités PLM-GMAO	184
F.3.1	Informations relatives aux équipements	184
F.3.2	Intégration d'un Workflow	185
F.3.3	Maintenance conditionnelle	185
F.3.4	Rapport d'intervention	186
Annexe G : Embedding		187
G.1	Critère de filtrage	187
G.2	Script pour le choix d'embedding	189
Annexe H : Implémentation Complémentaire et Réponses de l'Agent		190
H.1	Extraits de Code Complémentaire	190
H.1.1	Réponse rapide	190
H.1.2	Gestion des droits d'accès	191
H.1.3	Résumé des documents	191
H.2	Interactions Utilisateur-Agent	192
H.2.1	Résultats pour les questions simples	192
H.2.2	Résultats pour les questions intermédiaires	193
H.2.3	Résultats de requêtes diverses	194

Table des figures

1.1	Évolution des modèles de langage	26
1.2	Logo de l'entreprise ECCBC Algérie	32
1.3	Organigramme de la Direction Industrielle	33
1.4	Logo de l'entreprise PLM Resources	33
2.1	Processus de maintenance corrective d'une panne mécanique	37
2.2	Sous processus de demande d'une PR mécanique	37
2.3	Processus de maintenance corrective d'une panne électrique	38
2.4	Sous processus de demande d'une PR électrique	38
2.5	Processus de maintenance préventive hebdomadaire	40
2.6	Processus de maintenance préventive annuelle	42
2.7	Visualisation des données	54
2.8	Matrice SWOT	60
3.1	Matrice RACI pour maintenance corrective	64
3.2	Processus de maintenance corrective	65
3.3	Interface de saisie des pannes	67
3.4	Table de test de la base de données	67
3.5	Tableau de suivi des KPI	67
3.6	Matrice RACI pour la maintenance hebdomadaire	68
3.7	Optimisation du processus de maintenance préventive hebdomadaire	69
3.8	Matrice RACI la phase de planification et préparation de la révision	70
3.9	Matrice RACI de la phase d'exécution de de clôture de la révision	70
3.10	Optimisation du processus de maintenance préventive annuelle	71
3.11	Principales fonctionnalités couvertes par la solution PLM-GMAO	77
3.12	Fonctionnalités principales de PLM-GMAO activées chez Coca-Cola Algérie	78
3.13	Processus de maintenance corrective optimisé par la solution PLM-GMAO	81

3.14	Processus de maintenance préventive hebdomadaire optimisé par la solution PLM-GMAO	82
3.15	Processus de maintenance préventive annuelle optimisé par la solution PLM-GMAO	83
3.16	Les différents profils dans la solution PLM-GMAO	86
3.17	Intégration des éléments d'identité (logo, devise, langue)	87
3.18	L'interface PLM-GMAO dédié au chef de ligne	88
3.19	L'interface PLM-GMAO dédié a l'opérateur	89
3.20	Interface d'exécution des interventions	89
3.21	Validation des demandes et transformation en OT	90
3.22	Suivi des interventions	90
3.23	L'interface PLM-GMAO dédié au responsable magasin	91
3.24	Les principales étapes pour la création d'intervention préventive	92
3.25	Tableau de visualisation de l'état d'avancement du PMP	92
3.26	Tableau de bord du responsable maintenance	93
4.1	Méthodologie de développement du Chatbot	101
4.2	Architecture initial du Chatbot	103
4.3	Test du Modèle	110
4.4	Connexion à la base de données SQL Server	119
4.5	Construction du Prompt Système	119
4.6	Téléchargement du LLM et Modèle d'embedding	120
4.7	Moteur SQL	121
4.8	Filtrage des pages non informatives	121
4.9	Moteur de recherche RAG	122
4.10	Agent GMAO	123
4.11	Service d'API Flask	124
4.12	Code JavaScript de l'extension de l'interface utilisateur	125
4.13	Interface de l'agent conversationnel	125
4.14	Architecture finale de l'agent conversationnel	126
4.15	Réponse 1	137
4.16	Réponse 2	138

4.17	Réponse 3	138
A1	Critères de performance des lignes de production	155
B1	Rapport des arrêt électriques	156
B2	Plan de maintenance Préventive (PMP) hebdomadaire et mensuelle	157
B3	Exemple d'un mode opératoire	157
B4	Planning de maintenance préventive	158
B5	Liste des PDR	158
B6	Diagramme de Gantt	159
B7	Résultat de l'étude de criticité des équipement	160
C1	Le nouvel historique d'arrêts	161
D1	Le WBS de la maintenance corrective	162
D2	Le WBS de la maintenance préventive hebdomadaire	162
D3	Le WBS de la maintenance préventive annuelle	163
E1	Extrait du code python pour catégoriser les PDR	175
F1	Cahier des charges pour la solution GMAO (Parties 1 à 6)	182
F2	Liste des équipements dans l'application PLM-GMAO	183
F3	Liste des PR dans l'application PLM-GMAO	183
F4	Accès à des informations générales sur les équipements	184
F5	Intégration d'un Workflow	185
F6	Intégration d'une maintenance conditionnelle	185
F7	Génération d'un rapport d'intervention	186
G1	Script pour le choix d'embedding	189
H1	Router pour réponses rapides	190
H2	Implémentation de la gestion des droits d'accès	191
H3	Module de résumé de contenu importé par l'utilisateur	191
H4	Réponse à la question simple 1	192
H5	Réponse à la question simple 2	192
H6	Réponse à la question simple 3	193
H7	Réponse à la question intermédiaires 2	193
H8	Réponse à la question intermédiaires 3	194
H9	Estimation du ROI	194

H10 Proposition d'une démarche de maintenance conditionnelle	195
H11 Recherche croisée dans la BDD sur les PR	195

Liste des tableaux

2.1	Grille d'évaluation	44
2.2	Évaluation de l'Audit	45
2.3	Bilan d'audit	52
2.4	Résultat de l'analyse de l'historique des arrêts	55
2.5	Évaluation des impacts des écarts identifiés	56
3.1	Comparaison des processus de gestion d'une intervention corrective selon trois scénarios (manuel, SAP optimisé, GMAO)	95
4.1	Performance en génération de requêtes SQL	107
4.2	Grille d'analyse des capacités des modèles de langage	108
4.3	Caractéristiques techniques des modèles de langage	108
4.4	Résultats du test comparatif des modèles	114
4.5	Résultats pour les questions simples et intermédiaires	130
E.1	Liste des abréviations des catégories et des équipements	164
E.2	Décomposition fonctionnelle des équipements de la première catégorie	165
E.3	Décomposition fonctionnelle des équipements de la deuxième catégorie	166
E.4	Décomposition fonctionnelle des équipements de la troisième catégorie	169
E.5	Décomposition fonctionnelle des équipements de la quatrième catégorie	170
E.6	Décomposition fonctionnelle des équipements de la cinquième catégorie	174
E.7	Inventaire du Magasin 1 (MAG I)	176
E.8	Magasin 2 (MAG II)	180
G.1	Filtres appliqués pour la sélection des modèles d'embedding dans le cadre de l'assistant GMAO	187

Liste des acronymes

ERP	Enterprise Resource Planning (Progiciel de gestion intégré)
DI	Demande d'Intervention
OT	Ordre de Travail
PR	Pièce de Rechange
GMAO	Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur
BDD	Base de Données
LLM	Large Language Model (Modèle de langage de grande taille)
NLP	Natural Language Processing (Traitement du langage naturel)
AI	Artificial Intelligence (Intelligence Artificielle)
SQL	Structured Query Language (Langage de requêtes structuré)
JSON	JavaScript Object Notation
CSS	Cascading Style Sheets (Feuilles de style en cascade)

Introduction générale

L'émergence récente de l'intelligence artificielle générative et des agents conversationnels, tels que ChatGPT, représente une avancée majeure dans le paysage technologique mondial. Grâce à leurs capacités à dialoguer en langage naturel, à comprendre des requêtes complexes et à exploiter d'importants volumes de données hétérogènes, ces technologies ouvrent des perspectives inédites dans de nombreux secteurs industriels.

Dans le domaine de la maintenance industrielle, ces technologies ouvrent des voies inédites en matière de diagnostic intelligent, d'analyse des défaillances, de capitalisation des connaissances techniques et de soutien opérationnel à la prise de décision. Elles permettent d'enrichir significativement les fonctionnalités des solutions de Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO), en simplifiant l'accès aux données, en fluidifiant le suivi des interventions et en optimisant la performance globale des systèmes de maintenance [1].

Cependant, malgré ce potentiel, l'intégration effective de l'intelligence artificielle conversationnelle au sein des systèmes GMAO demeure encore très peu explorée dans la littérature scientifique, et reste marginale dans les pratiques industrielles actuelles. La convergence de ces deux dimensions constitue pourtant un véritable levier pour l'émergence d'une nouvelle génération de systèmes de maintenance augmentée, pleinement inscrite dans les dynamiques de l'Industrie 4.0.

C'est dans cette dynamique d'innovation appliquée que s'inscrit le présent projet, visant à explorer la synergie entre la GMAO et l'intelligence artificielle conversationnelle afin de répondre aux enjeux opérationnels concrets rencontrés sur le terrain. Le projet a été conduit au sein de l'entreprise Coca-Cola ECCBC Algérie, acteur majeur du secteur des boissons, en collaboration avec la société PLM Ressources, éditeur du logiciel métier PLM-GMAO, spécialisé dans l'optimisation de la gestion de la maintenance industrielle [2].

L'objectif principal de cette démarche est de concevoir et de déployer une approche progressive d'amélioration de la maintenance industrielle, en associant la mise en œuvre d'une solution GMAO adaptée aux réalités du terrain et l'intégration des apports de l'intelligence artificielle conversationnelle.

Les problématiques identifiées ont servi de cadre de réflexion et ont guidé les différentes étapes de la conduite du projet, et se présentent ainsi :

- Comment identifier de manière systématique les insuffisances organisationnelles, techniques et documentaires limitant la performance actuelle de la maintenance ?
- Comment renforcer l'efficacité des processus de maintenance en s'appuyant sur les ressources internes de Coca-Cola ECCBC Algérie, dans un cadre d'optimisation applicable

- même en l'absence de déploiement immédiat de solutions digitales dédiées ?
- Comment planifier et piloter l'intégration progressive de la solution PLM-GMAO afin de consolider durablement les pratiques de maintenance et leur suivi documentaire ?
- Comment concevoir et intégrer un agent conversationnel intelligent au sein de la GMAO afin d'enrichir l'exploitation des données et de renforcer l'efficacité opérationnelle ?
- Comment structurer un projet permettant à la fois d'améliorer les pratiques de l'entreprise utilisatrice et d'enrichir le développement fonctionnel du logiciel proposé par l'éditeur ?

Dans cette perspective, le travail mené s'inscrit dans une démarche globale de conception et de pilotage d'une amélioration continue de la maintenance industrielle, articulant de manière intégrée des ajustements organisationnels, l'adoption d'outils numériques adaptés et l'introduction progressive d'innovations en intelligence artificielle, tout en générant une valeur partagée pour l'ensemble des parties prenantes impliquées. Ce travail présente plusieurs contributions significatives, tant d'un point de vue méthodologique que technologique :

- Méthodologie d'audit sur mesure : Élaboration et application d'une méthodologie d'audit adaptée aux spécificités du service maintenance de Coca-Cola ECCBC Algérie, permettant d'identifier avec précision les axes d'amélioration.
- Optimisation organisationnelle sur la base des ressources internes : Proposition d'actions d'amélioration exploitant les ressources humaines, organisationnelles et procédurales déjà disponibles au sein de Coca-Cola ECCBC Algérie, permettant une première optimisation des pratiques de maintenance.
- Implémentation et optimisation par la GMAO : Déploiement et paramétrage de la solution PLM-GMAO en fonction des besoins de l'entreprise, optimisant les processus existants, centralisant les données techniques et assurant une gestion de maintenance structurée.
- Développement d'une brique d'IA innovante : Conception d'un agent conversationnel intégré à la GMAO, visant à améliorer l'interaction utilisateur-système et l'exploitation des données de maintenance.
- Méthodologie d'intégration reproductible : Proposition d'un cadre méthodologique transposable aux industriels souhaitant intégrer des agents conversationnels à une GMAO existante.
- Partenariat de co-développement stratégique : Réalisation du projet en collaboration avec PLM Ressources, permettant l'enrichissement de la solution logicielle et sa validation en environnement industriel.

Pour développer ces points et apporter des réponses structurées aux problématiques soulevées, cette étude est articulée en plusieurs chapitres. Le premier chapitre sera dédié à l'état de l'art et au cadre théorique de la maintenance industrielle, des systèmes de gestion de maintenance assistés par ordinateurs (GMAO) et de l'intelligence artificielle conversationnelle. Ensuite, le deuxième chapitre détaillera la méthodologie d'audit et le diagnostic de la situation actuelle chez Coca-Cola ECCBC Algérie. Le troisième chapitre présentera les scénarios d'amélioration de la gestion de maintenance, à savoir l'optimisation basée sur les ressources existantes de l'entreprise et l'implémentation de la solution PLM-GMAO. Enfin, le quatrième chapitre exposera la conception, l'intégration et l'évaluation de l'agent conversationnel intelligent au sein de la GMAO, ainsi que les perspectives futures de ce projet.

Chapitre 1

Concepts fondamentaux

1.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de poser les bases conceptuelles indispensables à la compréhension du projet. Il débutera par une présentation de l'évolution des systèmes de gestion de la maintenance, ayant conduit à l'émergence des solutions informatisées de GMAO.

Par la suite, l'attention sera portée sur l'évolution des approches en traitement automatique du langage naturel (NLP - *Natural Language Processing*), jusqu'à l'avènement des grands modèles de langage (LLM - *Large Language Models*). Ce volet explorera les différents types de LLM, leurs capacités, leurs limites, ainsi que les méthodes permettant de leur transmettre les connaissances nécessaires pour une utilisation adaptée en contexte industriel.

Enfin, le chapitre se conclura par une présentation des deux cadres de stage dans lesquels s'inscrit ce projet, en mettant en lumière les contextes industriels propres à chacun, ainsi que les outils méthodologiques et technologiques mobilisés pour la réalisation du travail.

1.2 La Maintenance Industrielle à l'Ère Numérique : Évolution des Systèmes GMAO et Transition vers l'Industrie 4.0

Afin de saisir les enjeux contemporains liés à la digitalisation de la maintenance, il est nécessaire d'en retracer l'évolution historique. Cette section met en évidence la transformation progressive des systèmes de GMAO, devenus aujourd'hui des plateformes intelligentes et interconnectées, au cœur des dispositifs de l'industrie 4.0.

1.2.1 L'Évolution des Systèmes de Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO)

Au fil des révolutions industrielles, les outils dédiés à la gestion de la maintenance ont évolué de manière continue, donnant naissance à différentes générations de systèmes de GMAO, chacun marquant une étape dans cette transformation progressive.

Les premiers systèmes GMAO, apparus dans les années 1970, se concentraient essentiellement sur l'enregistrement des opérations de maintenance et la gestion de bases de données rudimentaires. Fonctionnant sur des systèmes centraux avec une faible priorité, ces outils constituaient les prémices de l'automatisation dans la gestion de la maintenance [3].

Avec la démocratisation de l'informatique, les systèmes GMAO de deuxième génération ont intégré de nouvelles fonctionnalités comme la gestion des ordres de travail, le suivi des coûts, la gestion des pièces de rechange, et des modules budgétaires. Cette période marque le début de systèmes plus complets, capables de soutenir une gestion centralisée et structurée de la maintenance [3].

La troisième génération de ses solutions, encore en évolution aujourd'hui, se distingue par une connectivité accrue et l'intégration de modules avancés : gestion des actifs, EHS (Environnement, Hygiène et Sécurité), interfaçage avec les ERP, portails web, interfaces multimédia, et outils d'analyse décisionnelle [3].

Ces systèmes constituent la colonne vertébrale de la maintenance 4.0, en permettant un pilotage intelligent des opérations, une centralisation des informations en temps réel et une prise de décision plus agile.

1.2.2 La GMAO au Cœur de l'Industrie 4.0

La quatrième révolution industrielle transforme en profondeur la manière dont les entreprises conçoivent et pilotent leurs processus de maintenance. La GMAO, longtemps perçue comme un simple outil de planification, devient aujourd'hui une plateforme centrale intégrée à l'écosystème numérique de l'entreprise.

Plusieurs technologies de l'Industrie 4.0 ont été intégrées à la GMAO, notamment l'Internet Industriel des Objets (IIoT- *Industrial Internet of Things*), la Réalité Augmentée (AR), l'Intelligence Artificielle (IA) et le *Cloud Computing*. L'objectif principal de cette intégration est d'automatiser et digitaliser les processus de maintenance, tout en facilitant la prise de décision en temps réel et l'accès aux données à tous les niveaux du service maintenance [4]. Dans ce contexte, des plateformes GMAO cloud permettent de générer automatiquement des ordres de travail à partir des données collectées par capteurs, de fournir des instructions de maintenance interactives via AR, et d'assurer l'approvisionnement en pièces détachées à l'aide de robots autonomes ont été développées. Ces systèmes interopérables, basés sur des protocoles standards (OPC UA, Modbus, WebSockets) [4], s'appuient également sur des outils d'analyse avancée pour interpréter les données et déclencher des actions correctives pertinentes [4].

Parallèlement, des méthodes ont été développées pour transformer les *workflows* [5] de maintenance traditionnels en processus intelligents et automatisés. En combinant des techniques de *Machine Learning* (ML) et des méthodes d'aide à la décision multicritère (MCDM), il est désormais possible d'automatiser la saisie des ordres de maintenance et l'affectation des techniciens, en se basant sur des critères comme les compétences, la disponibilité ou l'historique d'absence [5]. Cette automatisation contribue à limiter les erreurs humaines, à accélérer les délais d'intervention et à renforcer la fiabilité des opérations. Une étude menée au sein d'une entreprise multinationale a démontré l'efficacité de cette approche, avec l'analyse de centaines de milliers d'ordres de maintenance, et une amélioration significative des performances globales du système GMAO [5].

En complément, le traitement automatique du langage naturel (NLP) est également utilisé pour exploiter les descriptions textuelles non structurées souvent présentes dans les demandes d'intervention. Ces textes, rédigés librement par les techniciens, contiennent des informations précieuses mais difficiles à interpréter automatiquement. Grâce à des techniques de NLP combinées à des modèles de classification comme les forêts aléatoires, les SVM, ou des réseaux neuronaux tels que CNN, GRU et RobBERT, il est possible de prédire automatiquement les

métadonnées associées (type de panne, cause probable, action corrective), de corriger les étiquetages erronés et d'améliorer la qualité globale des données dans la GMAO [6].

L'ensemble de ces avancées montre que la GMAO, enrichie par les technologies de l'Industrie 4.0, devient un outil stratégique, intelligent et interconnecté. Elle joue un rôle clé dans la mise en œuvre de démarches de maintenance prédictive, tout en apportant une réponse agile aux exigences de performance, de fiabilité et de traçabilité des équipements industriels.

Dans cette dynamique de transformation numérique, l'intégration de l'intelligence artificielle conversationnelle fondée sur le traitement automatique du langage naturel (NLP), apparaît comme une avancée complémentaire et prometteuse. Afin d'en garantir une mise en œuvre ef-

ficace dans les solutions de GMAO, il est essentiel de maîtriser certains concepts théoriques fondamentaux. La section suivante présente donc les bases nécessaires à une intégration cohérente de ces technologies.

1.3 Concepts fondamentaux de l'Intelligence Artificielle conversationnelle

La mise en œuvre efficace de l'intelligence artificielle conversationnelle dans les solutions de GMAO repose sur la compréhension et la maîtrise de certains concepts théoriques fondamentaux. Cette section présente les fondements nécessaires à l'intégration cohérente de ces technologies.

1.3.1 L'évolution des modèles du traitement du langage naturel

Le traitement automatique du langage naturel (NLP – *Natural Language Processing*) constitue une branche spécialisée de l'intelligence artificielle, visant à permettre aux machines de comprendre, d'analyser et de générer le langage humain de manière contextuelle et intelligible [7]. Cette technologie est notamment à la base du développement de systèmes conversationnels, tels que les agents virtuels et les chatbots [7]. Son objectif principal est d'automatiser l'interprétation du langage humain, souvent semi-structuré, afin de réduire le fossé entre la communication humaine et la capacité de traitement des machines [8, 9].

Les premiers modèles fondés sur le NLP ont vu le jour entre les années 1950 et 1960. Ces approches reposaient principalement sur des règles explicites formulées par des experts, s'appuyant sur des connaissances linguistiques formelles. Deux grandes catégories se distinguaient alors : d'une part, les modèles basés sur la grammaire, dont l'objectif principal était d'analyser la structure syntaxique des phrases afin de générer des arbres syntaxiques ; d'autre part, les approches fondées sur des dictionnaires, qui utilisaient des lexiques prédéfinis de mots et d'expressions pour identifier et extraire automatiquement des entités spécifiques à partir du texte [10].

Depuis leur apparition, les modèles de traitement du langage naturel n'ont cessé d'évoluer, en particulier à partir des années 1990 [11]. Cette évolution, en lien avec leur capacité à accomplir différentes tâches de NLP, est illustrée dans la figure 1.1. Dans les années 1990, les approches statistiques basées sur les modèles *n-gram* [11, 12] ont été introduites pour traiter des tâches spécifiques telles que l'extraction d'informations, en s'appuyant sur des principes probabilistes. Par la suite, l'émergence des modèles neuronaux, comme Word2Vec [11, 12], a marqué une avancée majeure en per-

mettant la représentation vectorielle statique des mots, ouvrant ainsi la voie à des traitements linguistiques plus flexibles, indépendants d'une tâche cible particulière. À partir de 2018, des modèles pré-entraînés tels que BERT ou GPT-1, GPT-2 ont apporté une révolution en introduisant des représentations contextuelles, rendues possibles grâce à un entraînement initial général, suivi d'une phase de spécialisation (*fine-tuning*). Cette architecture a considérablement élargi les possibilités d'application à un large éventail de tâches NLP. Depuis 2020, les grands modèles de langage tels que GPT-3, GPT-4, Claude ou LLaMA [7] ont franchi une nouvelle étape, en rendant possible la résolution de tâches complexes du monde réel, grâce à une mise à l'échelle massive des paramètres et à l'utilisation de techniques de guidage par instructions (*prompting*) [11, 10, 12].

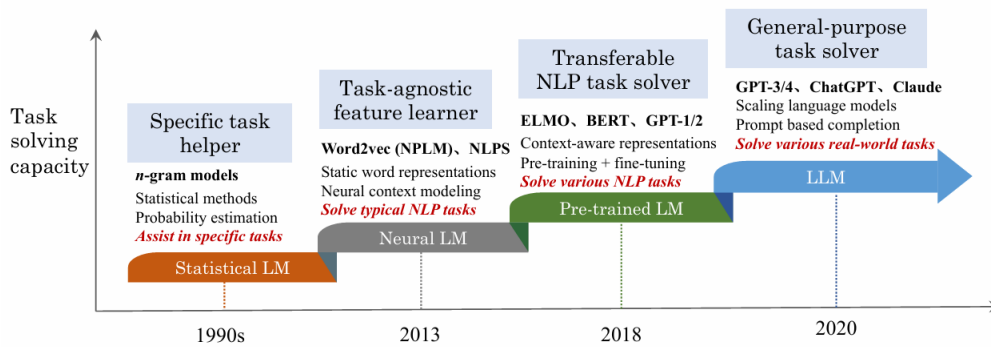


FIGURE 1.1 – Évolution des modèles de langage [11]

1.3.2 Les grands modèles de langages (LLMs - Large Language Models)

Les grands modèles de langage (*Large Language Models* – *LLMs*) présentent une branche de l'Intelligence Artificielle générative [13] et s'inscrivent dans le domaine de l'apprentissage profond (*deep learning*) [11, 12]. Ils reposent sur une architecture de type Transformer, caractérisée par l'utilisation de couches d'attention multi-têtes intégrées à des réseaux de neurones [11, 14]. Ce mécanisme leur confère la capacité de prendre en compte l'ensemble du contexte d'une phrase ou d'un document, favorisant ainsi une compréhension approfondie du contenu [14]. Ces modèles se distinguent des modèles pré entraînés traditionnels par un nombre de paramètres extrêmement élevé, atteignant plusieurs milliards, ainsi que par l'ampleur considérable des corpus textuels mobilisés pour leur entraînement [12]. Leur principal avantage réside dans leur aptitude à appréhender le langage naturel et à accomplir des tâches complexes, telles que la génération, l'analyse et l'évaluation du texte. Par ailleurs, ils ont profondément transformé diverses applications, notamment les agents conversationnels, la synthèse automatique de documents et la traduction linguistique [14].

1.3.2.1 Limitation des grands modèles de langage

Malgré les avancées majeures qu'ils ont permises dans le domaine du traitement automatique du langage naturel, les LLMs présentent plusieurs limitations structurelles notables. L'une des principales est liée à la nature des données d'entraînement, susceptibles de contenir des biais, voire de produire des hallucinations informationnelles compromettant la fiabilité et la véracité des réponses générées [11, 15]. En outre, les connaissances intégrées dans ces modèles sont statiques et reflètent uniquement l'état de l'information à la date de leur dernière mise à jour. Cette limitation les rend inadaptés aux environnements dynamiques où l'actualité et la mise à jour des informations sont cruciales.

De surcroît, l'intégration de nouvelles données demeure une opération particulièrement coûteuse en temps et en ressources computationnelles. Par ailleurs, leur nature probabiliste accroît le risque de génération de contenus erronés ou incohérents, même lorsque ceux-ci paraissent logiquement construits [7, 11, 12].

1.3.2.2 Techniques d'optimisation des LLMs

Afin de pallier ces limites, la littérature identifie trois principales approches permettant d'améliorer les performances et l'adaptabilité des LLMs : le *fine-tuning*, la génération augmentée par récupération (*Retrieval-Augmented Generation-RAG*), et le *prompt engineering*.

- **Le fine-tuning** : Consiste à ajuster les poids internes d'un modèle pré-entraîné via un apprentissage supervisé ou par renforcement, dans le but de le spécialiser sur un domaine d'application précis [16]. Cette technique permet d'accroître considérablement la pertinence et la fiabilité des réponses dans un contexte métier donné. Toutefois, elle reste fortement consommatrice en ressources computationnelles et nécessite une infrastructure technique avancée, ce qui limite sa mise en œuvre dans les environnements industriels standards [14, 17, 18].
- **La génération augmentée par récupération (RAG)** : C'est une approche qui vise à renforcer la qualité, la précision et l'actualité des réponses produites par les modèles de langage (LLMs), en leur permettant d'accéder en temps réel à des informations pertinentes issues de sources externes. Ces sources peuvent inclure des documents non structurés (documents), ou des bases de données structurées (notamment via des requêtes SQL). Cette méthode permet de pallier les limites des LLMs entraînés sur des données figées, de réduire les hallucinations, et de mettre à jour dynamiquement le contenu généré grâce à la consultation de sources fiables et spécifiques au domaine [15]. De plus, s'avère plus rentable en termes de coûts que le réentraînement complet d'un modèle, car elle évite de mobiliser des ressources lourdes tout en assurant une réponse plus contextualisée et fiable [15].

Le fonctionnement de RAG repose sur deux étapes principales [7, 17, 19, 15] :

1. **Phase d'extraction (*retrieval*)** : La requête de l'utilisateur est convertie en un vecteur numérique (*embedding*), puis comparée, via une recherche sémantique, à des documents ou données pré-encodées également sous forme vectorielle. Cela permet de récupérer uniquement les informations pertinentes.
2. **Phase de génération** : Les éléments extraits sont injectés dans le prompt du LLM, qui s'appuie alors sur ce contexte enrichi pour produire une réponse plus précise, pertinente et contextualisée.

Par exemple, dans le cas des bases de données, un LLM enrichi par le RAG peut transformer une requête exprimée en langage naturel en une requête SQL structurée, à condition d'avoir une connaissance du schéma de la base et des noms de colonnes [14]. Cela simplifie l'accès à des données complexes, sans nécessiter d'expertise technique de la part de l'utilisateur. De même, l'intégration de documents externes permet de dépasser les limites des modèles fondés uniquement sur des corpus génériques, souvent obsolètes ou inadaptés à des besoins métiers spécifiques [13].

En résumé, RAG renforce considérablement la capacité des LLMs à fournir des réponses contextuelles, fiables et actualisées, tout en facilitant l'accès intelligent à des bases de connaissances hétérogènes.

- **Le prompt engineering**, c'est une approche consistant à concevoir des instructions textuelles (*prompts*) destinées à guider le LLM dans l'exécution d'une tâche spécifique. Il s'agit d'un champ d'étude à part entière visant à optimiser la formulation des prompts pour garantir la qualité des réponses générées [20]. Ceux-ci peuvent inclure des exemples,

des règles ou des contraintes, et peuvent être élaborés manuellement ou automatiquement [11, 14].

Contrairement à l'approche RAG, cette méthode n'exploite pas de données externes mais s'appuie sur les connaissances internes du modèle, en les orientant à l'aide de consignes précises [14, 17]. La qualité du prompt influence directement celle de la sortie générée [11]. Selon les objectifs et les cas d'usage, la littérature distingue plusieurs méthodes du *prompting* [9, 11, 14] :

- **Zero-shot prompting** : Cette méthode repose sur la capacité des LLMs à répondre à des instructions inédites, sans exemples préalables. L'utilisateur fournit simplement une consigne directe, que le modèle tente de traiter en se basant sur ses connaissances préalables. Cette approche est particulièrement adaptée aux tâches simples ou génériques, mais peut conduire à des résultats approximatifs lorsqu'il s'agit de tâches complexes ou ambiguës [9].
- **Few-shot prompting (ou apprentissage en contexte)** : Cette technique consiste à fournir au modèle quelques exemples d'entrées accompagnées de leurs sorties attendues, afin de lui indiquer comment accomplir la tâche. Ces exemples servent de guide pour orienter le comportement du LLM, en améliorant sa compréhension du contexte et des attentes [9, 14].
- **Negative prompting** : Ce type de formulation vise à préciser au modèle ce qu'il ne doit pas générer. En définissant des restrictions explicites, cette approche permet de limiter les erreurs fréquentes, d'éviter certaines formulations indésirables ou encore de réduire les biais présents dans les réponses.
- **Techniques de raisonnement (Reasoning in LLMs)** : Il est possible d'amener les LLMs à réaliser des tâches de raisonnement logique ou séquentiel en utilisant des techniques spécialisées. Ces approches permettent d'améliorer les performances des LLMs dans des cas nécessitant une réflexion structurée. Parmi les méthodes utilisées figurent notamment :
 - * **Chain-of-Thought (CoT)** : Introduit des étapes explicites de raisonnement dans le prompt.
 - * **Self-Consistency** : Sélectionne la meilleure réponse parmi plusieurs générées via CoT.
 - * **Tree-of-Thought (ToT)** : Explore plusieurs chemins de raisonnement pour résoudre un problème.
- **Multi-turn instructions** : Cette stratégie est utilisée pour résoudre des tâches complexes nécessitant plusieurs étapes et l'usage de différents outils. Le modèle prend en compte les réponses issues d'autres outils pour ajuster son comportement dans les étapes suivantes. Elle est notamment employée dans la conception d'agents autonomes.
- **Role-playing prompting** : Cette approche consiste à attribuer un rôle ou une identité spécifique au modèle (par exemple : expert en maintenance, conseiller technique, etc.) afin qu'il adapte son langage, son ton et ses connaissances au rôle attribué. Cela permet de simuler des interactions plus crédibles et contextualisées.

Si ces techniques permettent de contourner certaines limites des modèles de langage, leur efficacité dépend étroitement de l'environnement technique dans lequel elles sont mises en œuvre. Pour garantir une intégration cohérente et performante, l'utilisation d'outils d'orchestration devient indispensable.

1.3.2.3 Outils d'orchestration : LlamaIndex et LangChain

L'optimisation des performances des modèles de langage repose également sur des outils d'orchestration, capables de combiner intelligemment les techniques de prompting avec d'autres mécanismes avancés, comme la génération augmentée par récupération (RAG). Deux outils se démarquent particulièrement dans ce domaine :

- **LlamaIndex** : Spécialisé dans la connexion des LLMs à des données métier, structurées ou non. Il permet d'ingérer, organiser et interroger des sources d'information variées comme des documents, des bases de données SQL, des fichiers PDF ou des API. Il est particulièrement adapté aux contextes nécessitant une haute précision, notamment dans des domaines techniques ou spécialisés. En plus de cela, LlamaIndex peut être utilisé pour développer des chatbots et agents conversationnels capables d'interroger efficacement des corpus internes ou des bases de connaissances métiers [13, 20].
- **LangChain** : Un framework dédié au développement rapide d'applications conversationnelles. Il permet d'orchestrer des séquences d'actions (chaînes) en combinant prompts, mémoire, outils et logique métier. Grâce à sa capacité à gérer des interactions complexes et contextuelles, il est idéal pour les assistants virtuels, les agents autonomes ou les applications nécessitant des décisions dynamiques [20].

La distinction essentielle entre les deux réside dans leur orientation : **LlamaIndex** se concentre sur la gestion et l'exploitation de données complexes, tandis que **LangChain** met l'accent sur l'orchestration des interactions et la logique fonctionnelle des applications conversationnelles [20].

Ces outils constituent ainsi les fondations techniques indispensables à la conception d'interfaces conversationnelles intelligentes, capables d'interagir de manière fluide avec l'utilisateur tout en exploitant efficacement des données internes ou externes.

1.4 Maintenance augmentée par le langage : apport des LLM et du NLP

Dans le secteur de la maintenance industrielle, le traitement automatique du langage naturel (NLP) ouvre de nouvelles perspectives en matière de valorisation des données textuelles. Il permet notamment d'automatiser l'extraction d'informations à partir des historiques d'intervention, des rapports techniques ou des journaux de maintenance. Parmi ses principales applications, on retrouve l'analyse des causes de défaillance, l'aide à la décision, ainsi que l'optimisation des plans de maintenance [21]. Grâce à l'analyse linguistique des textes, le NLP peut détecter les termes récurrents dans les enregistrements de maintenance, les regrouper par similarité, et ainsi mettre en évidence les pannes les plus fréquentes par machine. Ces informations peuvent également être exploitées pour estimer les coûts associés aux défaillances, identifier les modes de panne récurrents et anticiper les périodes d'indisponibilité, contribuant ainsi à une stratégie de maintenance plus préventive et proactive [21, 22].

Les modèles de langage de grande taille (LLM), qui reposent sur les avancées du NLP, représentent une évolution majeure dans ce domaine. Capables de traiter et de générer du texte de manière autonome, ces modèles peuvent être exploités pour analyser les données internes de maintenance d'une entreprise industrielle [23]. Ils permettent par exemple de suggérer des pistes d'amélioration en réponse à des requêtes formulées en langage naturel, telles que : « Quels aspects du processus X pourraient être optimisés ? ». Le LLM peut alors générer une réponse structurée, accompagnée d'arguments étayés à partir des tendances observées dans les données [23].

En maintenance prédictive, les LLM se révèlent particulièrement utiles pour analyser de vastes corpus textuels, souvent inaccessibles à l'analyse humaine exhaustive, comme les manuels techniques, les rapports d'intervention ou les journaux de bord [23]. Ils peuvent en extraire les informations pertinentes définies en amont par les ingénieurs, puis les synthétiser sous une forme concise et exploitable, facilitant ainsi l'interprétation des données complexes [23, 24].

Par ailleurs, les LLM peuvent aussi être intégrés dans des systèmes de recommandation dédiés à la maintenance. Ils permettent d'automatiser la génération de recommandations personnalisées, en combinant l'analyse de grandes quantités de données hétérogènes avec des techniques d'exploration de données (data mining). Cette capacité à exploiter des sources multiples renforce la pertinence et la réactivité des actions de maintenance proposées [24].

1.5 Présentation des outils

La mise en œuvre efficace de ce projet a nécessité le recours à un ensemble d'outils méthodologiques, analytiques et techniques soigneusement sélectionnés. Chacun de ces outils a joué un rôle essentiel dans les différentes phases du projet : depuis l'analyse des processus existants, en passant par la structuration organisationnelle, jusqu'au développement et à l'intégration des solutions techniques. Cette section présente les principaux outils utilisés, en précisant leur utilité dans le contexte spécifique du projet.

- **Signavio** : Plateforme de *Business Process Management* (BPM) utilisée pour modéliser les processus métier à l'aide de la notation BPMN, ce qui a permis de visualiser, analyser et optimiser les flux de travail existants dans l'organisation.
- **Power BI** : Outil de *Business Intelligence* déployé pour créer des tableaux de bord dynamiques et interactifs. Il a permis de visualiser les données de maintenance de manière claire et synthétique afin de faciliter la prise de décision.
- **Matrice RACI** : Outil de gouvernance organisationnelle ayant permis de clarifier les rôles et responsabilités de chaque acteur impliqué dans les processus de maintenance, facilitant ainsi la coordination des actions.
- **Analyse SWOT** : Méthode d'analyse stratégique utilisée pour identifier les forces, faiblesses, opportunités et menaces du système de gestion de la maintenance, dans le but de mieux orienter les choix d'amélioration.
- **VBA (*Visual Basic for Applications*)** : Langage de programmation intégré à la suite Microsoft Office, principalement utilisé pour automatiser des tâches et développer des fonctionnalités personnalisées dans Excel. Il a été mobilisé dans ce projet pour répondre à des besoins spécifiques de structuration et de suivi des données.
- **Python** : Langage de programmation polyvalent, il a été mobilisé pour le développement de l'agent conversationnel intelligent intégré à la solution GMAO.
- **JavaScript** : Langage de programmation orienté web permettant de rendre les interfaces interactives. Il a été utilisé pour intégrer l'agent conversationnel dans l'environnement de la GMAO.
- **CSS** : Langage de mise en forme utilisé pour styliser l'interface de l'agent conversationnel (couleurs, disposition, polices), afin d'améliorer l'expérience utilisateur.
- **Hugging Face** : Une plateforme collaborative de référence qui centralise des milliers de embedding models pré-entraînés sur différents jeux de données

1.6 Définition des normes et principes

Outre les outils mobilisés dans le cadre de ce projet, l'analyse critique de la gestion de maintenance au sein de l'organisation s'appuie sur un ensemble de normes et principes fondamentaux qui ont servi de base à l'élaboration des critères d'évaluation. Cette section a pour objet de présenter le cadre normatif et les principes directeurs qui ont guidé notre démarche analytique.

- ISO 9001 : Norme internationale européenne relative au management de la qualité. Elle définit les exigences pour mettre en place un système de management permettant d'améliorer en continu la satisfaction client, la performance des processus et la qualité des produits ou services [25].
- Norme FSSC 22000 : Norme de certification de la sécurité des denrées alimentaires, basée sur la norme ISO 22000 et complétée par des exigences spécifiques. Elle s'adresse principalement à l'industrie agroalimentaire [26].
- *Total Productive Maintenance* (TPM) : Il s'agit d'une approche globale d'amélioration de la performance Industrielle, visant à optimiser la fiabilité des équipements et à assurer une gestion efficace des actifs. Cette méthode repose sur huit piliers fondamentaux : l'amélioration ciblée (ou cas par cas), la maintenance autonome, la maintenance planifiée, le développement des compétences et des savoir-faire, la maîtrise de la conception des produits et équipements associés, la maintenance de la qualité, l'efficacité des services connexes (appelé TPM dans les bureaux) , ainsi que la sécurité & environnement [27].

Après avoir présenté les principaux outils technologiques et méthodologiques mobilisés dans le cadre de ce projet, il est désormais pertinent de situer leur application concrète.

La section suivante s'attache ainsi à décrire le contexte organisationnel et opérationnel du stage, au sein duquel ces outils ont été intégrés et mis en œuvre.

1.7 Présentation du cadre du stage

Dans le cadre de ce projet de fin d'études, il apparaît indispensable d'en exposer le cadre d'accueil afin d'en appréhender le contexte professionnel et industriel dans lequel il s'est déroulé. Les sous-sections suivantes ont donc pour objectif d'en dresser une présentation, en exposant d'une part la structure de Coca-Cola ECCBC Algérie, site industriel où s'est déroulé ce projet, et d'autre part le profil de l'entreprise PLM Resources Company, spécialisée dans l'ingénierie logicielle.

1.7.1 Coca-Cola ECCBC Algérie

Coca-Cola ECCBC Algérie (ou Fruital Coca-Cola), est une entreprise spécialisée dans la fabrication et la distribution de boissons gazeuses non alcoolisées. Son logo est présenté dans la figure 1.2.



FIGURE 1.2 – Logo de l’entreprise ECCBC Algérie

L’entreprise commercialise un large portefeuille de produits, comprenant plus de 60 références sous la marque Fruital Coca-Cola et plus de 50 références sous la marque Coca-Cola, telles que Coca-Cola, Fanta, Sprite, Burn, Schweppes et Vimto. L’entreprise fait partie du groupe Equatorial Coca-Cola Bottling Company (ECCBC), qui détient la majorité de son capital. Elle est aujourd’hui le principal embouteilleur et distributeur de Coca-Cola en Algérie, assurant l’importation des concentrés développés par The Coca-Cola Company, leur transformation, ainsi que leur distribution via un réseau moderne couvrant la région centre du pays. Coca-Cola ECCBC Algérie emploie environ 2 000 collaborateurs. Elle dispose de trois sites de production, répartis entre Skikda, Oran et Alger (site industriel de Rouiba), et c’est sur ce dernier que s’est déroulé le présent stage. L’organisation du site retenu repose sur plusieurs directions structurantes :

- La Direction Générale, chargée de piloter l’ensemble des activités stratégiques de l’entreprise.
- La Direction Commerciale, responsable de la promotion des produits, de la fixation des objectifs de vente et de l’élaboration des plans d’action.
- La Direction des Ressources Humaines, assurant la gestion administrative et sociale du personnel, le recrutement, la formation et la rémunération.
- La Direction Finance & Contrôle de Gestion, qui veille à l’optimisation des ressources, à la maîtrise des risques, à la préparation budgétaire et au suivi de la performance.
- La Direction Industrielle, en charge de la production et de la maintenance des équipements afin de garantir la conformité aux objectifs de fabrication.
- La Direction Qualité, qui veille au respect des normes réglementaires en matière de sécurité alimentaire et à la conformité des produits finis.

Grâce à cette structure, Coca-Cola ECCBC Algérie assure une production de qualité, une distribution efficace, et un positionnement de leader sur le marché national des boissons gazeuses.

1.7.1.1 Organigramme de la direction industrielle

L’organigramme de la direction industrielle de l’entreprise Coca-Cola ECCBC Algérie, site de Rouiba, illustré dans la figure 1.3, présente une structure hiérarchique qui permet une répartition claire des responsabilités et une coordination efficace entre les différents services impliqués dans la production et la maintenance.

Au sommet de l’organigramme se trouve la Direction Générale, épaulée par plusieurs services transversaux : le Service HSE, le Service Qualité, le Service Performance, et le Service Engineering.

Le Service de Production et de Maintenance, axe central de l’organisation industrielle, est dirigé par un Responsable Production et Maintenance. Celui-ci joue un rôle crucial de coordination

entre les différents acteurs opérationnels, en assurant la liaison entre les équipes de terrain, la direction locale et le groupe Coca-Cola.

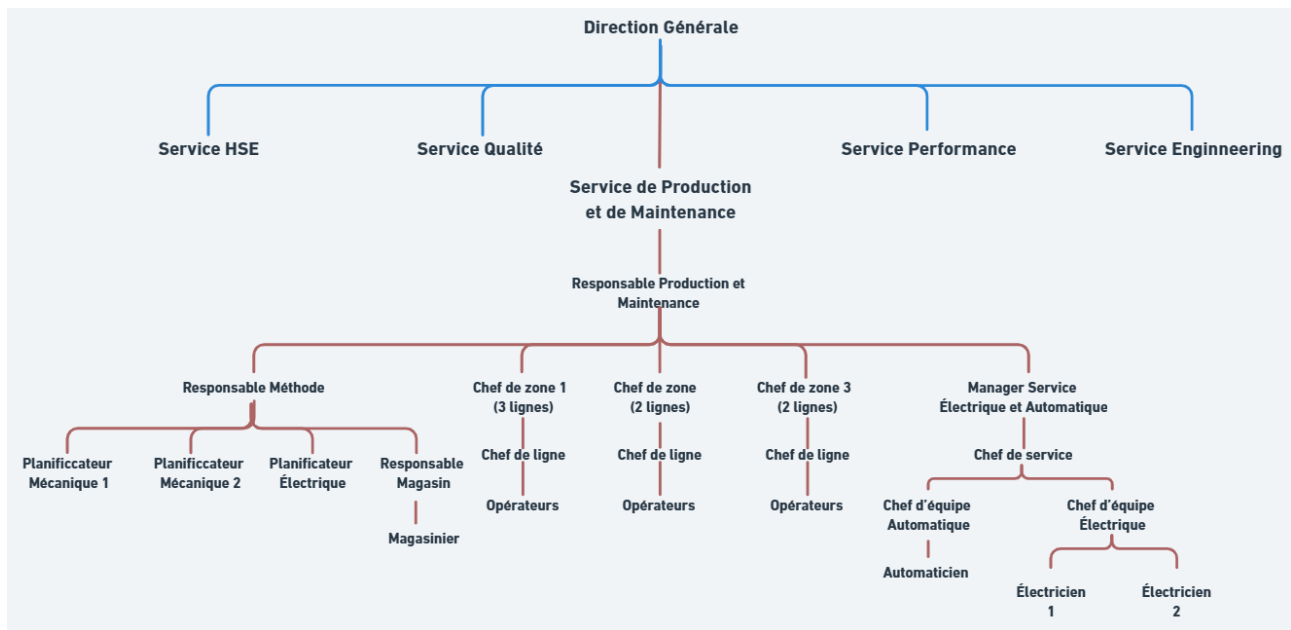


FIGURE 1.3 – Organigramme de la Direction Industrielle

L'entreprise Coca-Cola ECCBC Algérie dispose de plusieurs lignes de production de boissons gazeuses. Dans le cadre de ce stage, la ligne de production PET 20/18 a été retenue comme périmètre d'étude. Ce choix s'est appuyé sur divers critères techniques, opérationnels et stratégiques, que l'on retrouve de manière plus approfondie et justifiée en annexe A. Cette ligne présente en effet des enjeux particuliers en termes de maintenance, de performance et de fiabilité, ce qui en fait un cas d'étude pertinent afin d'identifier des leviers d'amélioration pouvant profiter, de manière globale, à l'efficacité de l'ensemble du site industriel.

1.7.2 PLM Resources Company

PLM Ressources Company est une entreprise allemande spécialisée dans l'ingénierie logicielle, et l'intégration de solutions de gestion d'entreprise. Son logo est présenté dans la figure 1.4. Elle accompagne la transformation digitale des industries en proposant des solutions innovantes et adaptées à leurs besoins.



FIGURE 1.4 – Logo de l'entreprise PLM Resources

Partenaire stratégique de **Siemens Digital Industries Software** et de **SAP**, PLM Ressources fournit des outils performants pour l'optimisation des processus industriels et la gestion intégrée des opérations.

L'entreprise propose une gamme variée de solutions logicielles destinées à répondre aux besoins spécifiques des secteurs industriels. Parmi ses principaux produits, on peut citer :

- **PLM–PROJECT** : une application Web de gestion de projet, conçue pour assurer une planification rigoureuse et une estimation précise des délais et des coûts ;
- **PLM-GMAO** : un outil métier spécifiquement dédié à la gestion de la maintenance, adapté aux exigences opérationnelles du terrain ;
- **ST-Wood** : un logiciel intégré à Solid Edge, facilitant la conception et la réalisation de projets en menuiserie ;
- **ST-Optimal** : une solution permettant de superviser et d’optimiser l’ensemble du processus de conception, depuis l’élaboration du modèle jusqu’à la génération des dessins techniques.

1.8 Conclusion

Ce chapitre a posé les bases théoriques nécessaires à la compréhension et à la mise en œuvre du projet, en retraçant l’émergence et la transformation des solutions GMAO, ainsi que leur intégration progressive dans le paradigme de l’Industrie 4.0. Il a également permis d’introduire les fondements de l’intelligence artificielle conversationnelle, en s’appuyant sur les avancées du traitement automatique du langage naturel (NLP), et des modèles de langage (LLM) . Enfin, les principaux outils mobilisés dans le cadre du projet ont été présentés, afin d’illustrer leur utilité dans le développement et la mise en place de la solution proposée.

Le chapitre suivant s’attachera à analyser de manière critique et approfondie l’état actuel du système de maintenance au sein de l’organisation, première étape indispensable à toute démarche d’amélioration structurée.

Chapitre 2

Analyse du service maintenance à travers un audit interne

2.1 Introduction

Dans le cadre de l'étude visant à optimiser la gestion de la maintenance au sein de l'entreprise Coca-Cola ECCBC Algérie, ce chapitre constitue la première étape du processus d'amélioration. Il repose sur une analyse rigoureuse du système de maintenance en place, conduite selon une démarche structurée combinant l'identification, l'évaluation et l'analyse critique des pratiques actuelles. Cette démarche s'inscrit dans une vision fonctionnelle de la maintenance industrielle, définie comme l'ensemble des actions techniques, administratives et managériales mises en œuvre visant à garantir la disponibilité et la performance des équipements tout au long de leur cycle de vie.

L'évaluation a été menée à travers la mise en œuvre d'un audit, spécifiquement conçu pour le contexte de l'entreprise, et complétée par l'analyse de documents internes, afin d'identifier les écarts les plus significatifs par rapport aux standards industriels.

Ce chapitre présente ainsi, de manière structurée, les résultats de l'audit, l'analyse critique des écarts constatés, ainsi qu'une synthèse finale constituant une base structurée pour appuyer toute démarche d'optimisation.

2.2 Organisation actuelle de la maintenance

La première étape, relative à la caractérisation du modèle actuel, revêt une importance majeure. Elle consiste à formaliser et à modéliser les pratiques de maintenance, réellement appliquées au sein de l'entreprise.

Afin d'assurer la représentativité du modèle établi et de garantir que les processus modélisés traduisent fidèlement les opérations réalisées sur le terrain, des observations régulières ont été menées sur site, complétées par l'organisation de réunions avec les principales parties prenantes, visant à préciser les responsabilités et les méthodes opérationnelles mises en œuvre.

Les acteurs sollicités pour ces entretiens ont été :

- Le responsable maintenance ;
- Le responsable méthodes ;
- Les chefs de zones ;
- Les planificateurs mécaniques ;
- Le planificateur électrique ;
- Les opérateurs de production ;
- Les ingénieurs en automatisme et en électricité ;
- Le chef de service automatisme/électricité ;
- Le responsable magasin.

Les réunions tenues avec les responsables ont permis, dans un premier temps, de définir les référentiels et principes qui encadrent les pratiques de maintenance au sein de l'entreprise. Ces pratiques s'appuient notamment sur les normes ISO 9001 et FSSC 22000, ainsi que sur les principes de la TPM (*Total Productive Maintenance*).

A l'issue de cette phase d'observation, il convient désormais de décrire le modèle de maintenance en vigueur au sein de l'entreprise. Celui-ci repose sur deux types de maintenance : corrective et préventive systématique (planifiée hebdomadairement et annuellement). Afin de fournir une base à l'analyse diagnostique à venir, une description détaillée des processus suivis sera d'abord exposée et accompagnée d'une modélisation formelle de ces derniers. Ces éléments sont développés dans les sections suivantes.

2.2.1 Maintenance Corrective

Le processus de maintenance corrective débute par la détection de la panne par l'opérateur. En cas de défaillance mécanique, celui-ci réalise un premier diagnostic et informe le chef de ligne si une pièce de rechange (PR) est nécessaire. Ce dernier crée alors un ordre de travail (OT) dans l'ERP SAP, en y insérant les références techniques transmises par l'opérateur. Le magasinier complète ensuite les codes SAP des articles, vérifie leur disponibilité et remet les pièces si elles sont en stock. Dans le cas contraire, un processus d'approvisionnement est lancé et une réparation temporaire peut être effectuée. Après l'intervention, le chef de ligne met à jour et clôture l'OT en saisissant les articles utilisés, tandis que le magasinier édite le bon de sortie (BSM). À la fin du shift, un rapport d'arrêts est complété.

Le processus de maintenance corrective d'une panne mécanique est illustré dans la figure C1

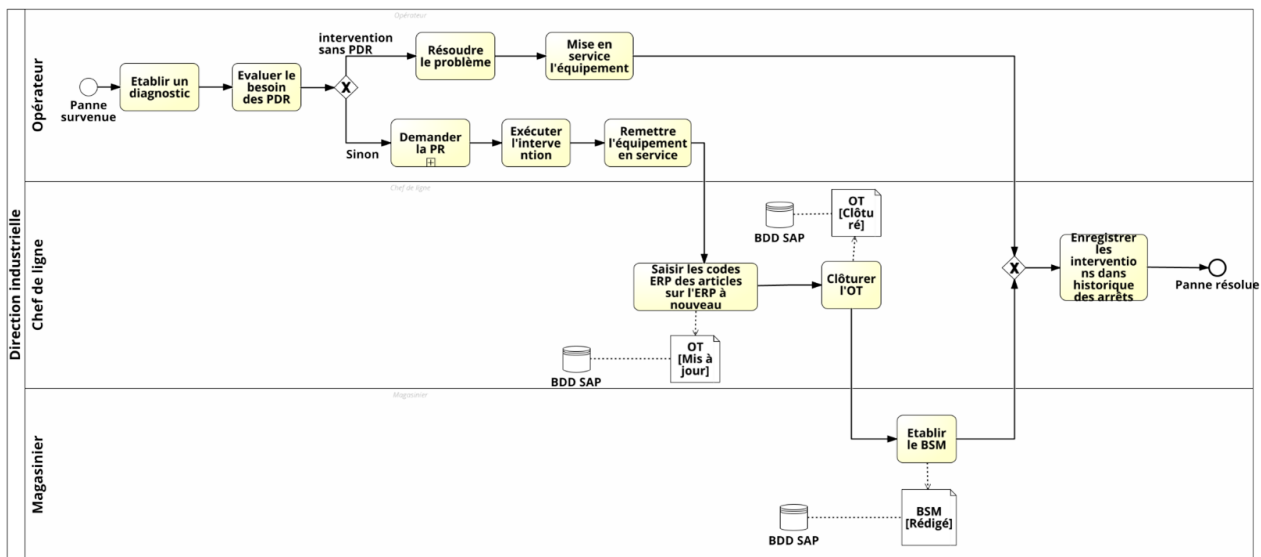


FIGURE 2.1 – Processus de maintenance corrective d'une panne mécanique

Lorsqu'une PR mécanique est nécessaire dans le cadre d'une maintenance corrective suite à une panne mécanique, le sous processus suivi est illustré dans la figure 2.2.

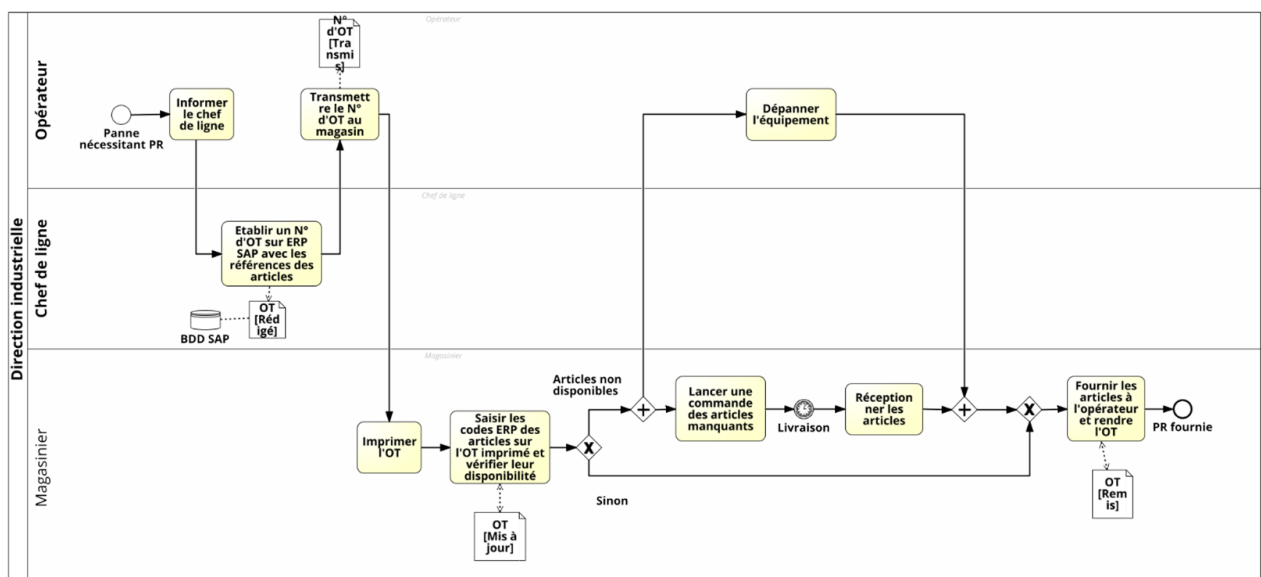


FIGURE 2.2 – Sous processus de demande d'une PR mécanique

Concernant les pannes électriques ou d'automatisme, l'opérateur alerte le chef de ligne, qui contacte le chef d'équipe électricité/automatisme. Celui-ci désigne un intervenant et prend en charge l'ensemble de la gestion de la PR, suivant une procédure distincte. Deux rapports sont établis : un par le chef de ligne pour la production et un second, technique, rédigé par l'intervenant pour le service électricité/automatisme (voir figure B1, annexe B). Le processus de maintenance corrective d'une panne électrique est illustré dans la figure 2.3.

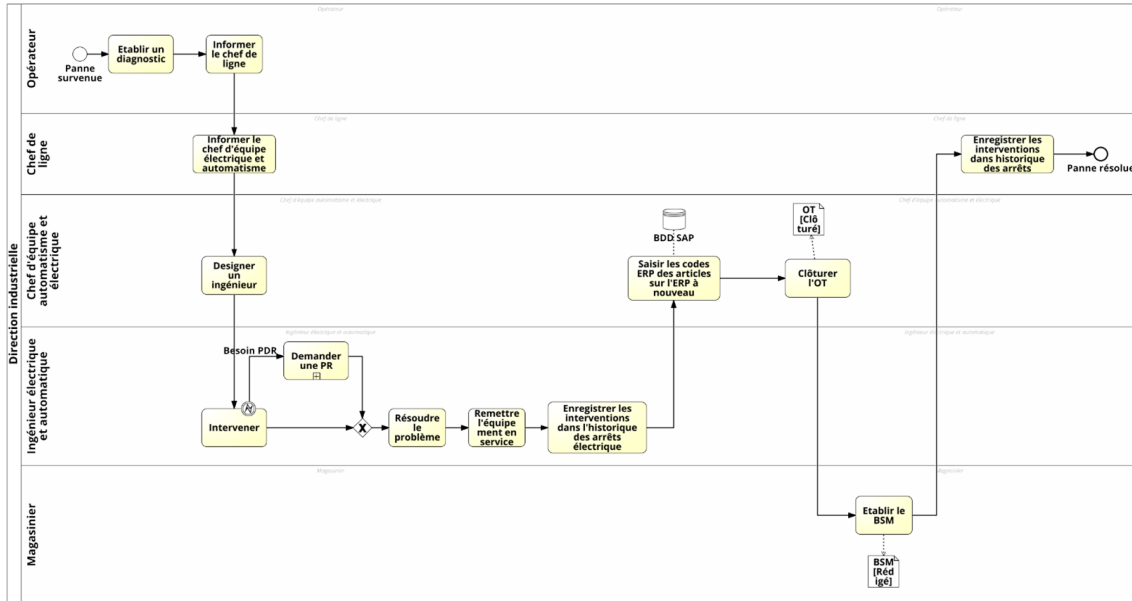


FIGURE 2.3 – Processus de maintenance corrective d'une panne électrique

Lorsqu'une PR électrique est nécessaire dans le cadre d'une maintenance corrective suite à une panne électrique, le sous processus suivi est illustré dans la figure 2.4.

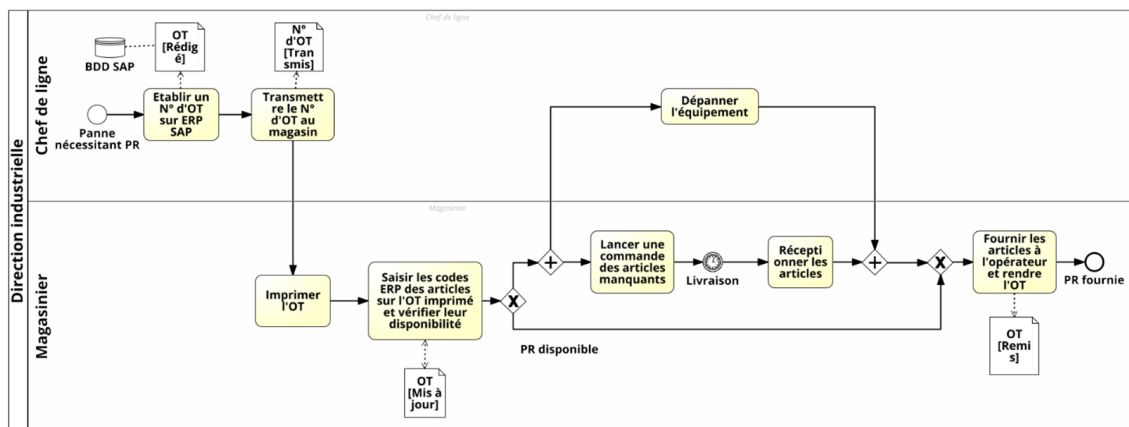


FIGURE 2.4 – Sous processus de demande d'une PR électrique

2.2.2 Maintenance Préventive

L'entreprise met en œuvre deux types de maintenance préventive systématique. La première est hebdomadaire et concerne les opérations de Nettoyage (CIP- Clean In Place), d'Inspection, et de Lubrification, regroupées sous l'appellation NIL. La seconde est annuelle : il s'agit d'une révision générale des lignes de production, planifiée durant une période creuse définie par le service logistique.

2.2.2.1 Maintenance préventive hebdomadaire

La maintenance préventive hebdomadaire, également appelée NIL, se compose de trois phases principales : la Planification, l'Exécution et la Clôture.

- **Planification** : Cette phase débute par l'élaboration du Plan de maintenance Préventive (PMP) hebdomadaire sous format Excel, construit à partir des recommandations des constructeurs ainsi que l'expérience acquise sur site (Voir Annexe B, figure B2). Une fois rédigé, ce plan est formalisé pour être facilement exploité par les intervenants sur le terrain. Des sections supplémentaires sont ajoutées pour permettre à l'opérateur de renseigner l'exécution des tâches, ainsi que d'ajouter des commentaires si nécessaire. Ce document, une fois structuré et standardisé, est désigné sous terme de « gammes de maintenance » au sein du service (Voir Annexe B, figure B4).
Afin de standardiser les interventions et faciliter leur exécution, des gammes opératoires sont également élaborés pour chaque équipement. Ces documents, enrichis de photographies explicatives, précisent l'organe concerné ainsi que les opérations à effectuer (Voir Annexe B, figure B3).
- **Exécution** : Lors de cette phase, les opérateurs consultent le PMP disponible sur un poste informatique au niveau de la ligne de production afin d'exécuter les tâches prescrites. En cas d'ambiguïté ou de difficulté d'exécution, l'opérateur peut consulter les gammes opératoires également disponible sur ce dernier.
Si au cours de l'intervention une maintenance corrective s'avère nécessaire, l'opérateur suit alors le processus spécifique à la maintenance corrective pour réaliser l'intervention.
- **Clôture** : A la fin des interventions, l'opérateur saisit toutes les informations relatives aux tâches réalisées et non réalisées directement dans le fichier Excel prévu à cet effet.

Le processus de maintenance préventive hebdomadaire, illustré dans la figure 2.5, se limite à la phase d'exécution et de clôture. En effet, la phase de planification n'est pas prise en compte dans cette représentation, car l'élaboration des PMP hebdomadaires est assurée par un service externe au service maintenance, sans intervention directe des acteurs de ce dernier.

Par ailleurs, les PMP élaborés ne couvrent que les composants mécaniques ; dès lors, les principaux acteurs impliqués dans la phase d'exécution sont les opérateurs de production ainsi que les chefs de ligne.

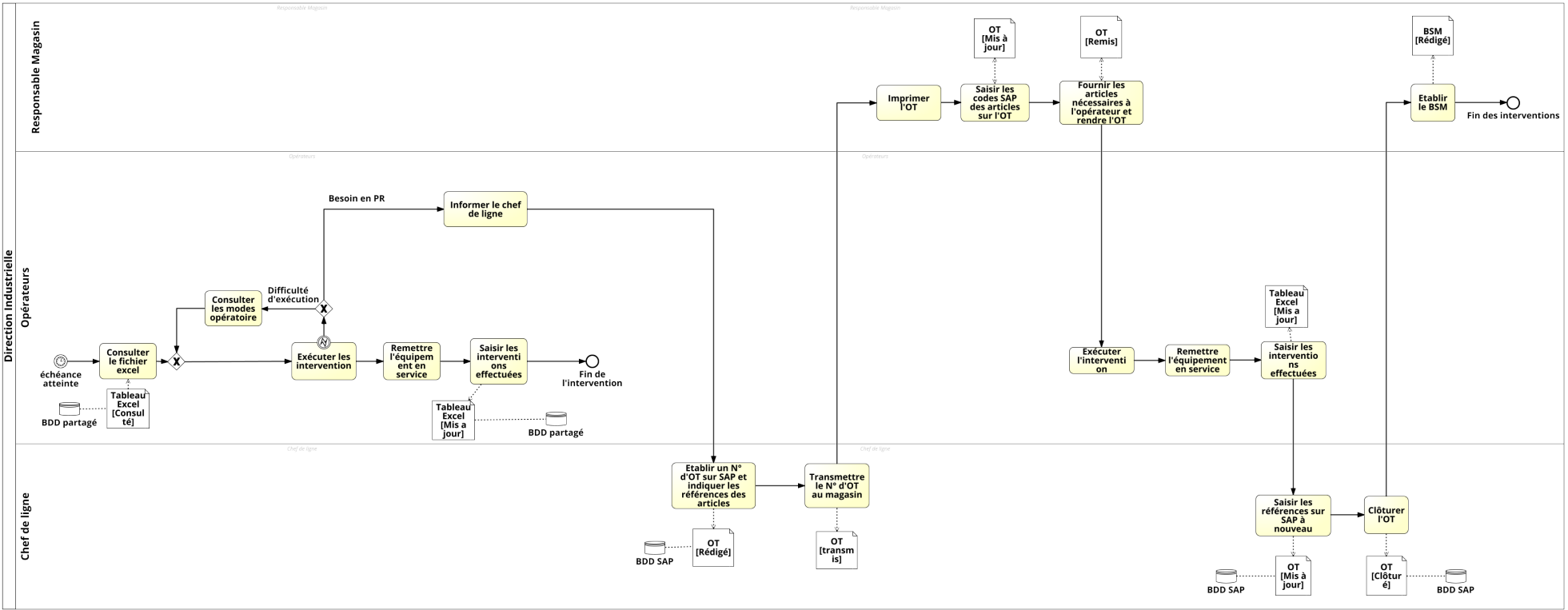


FIGURE 2.5 – Processus de maintenance préventive hebdomadaire

2.2.2.2 Maintenance préventive systématique annuelle

Cette maintenance s'articule autour de quatre phases essentielles : la Planification, la Préparation, l'Exécution et la Clôture.

- **Planification** : Elle débute entre six et huit mois avant la révision annuelle. Les planificateurs mécaniques, en coordination avec les opérateurs et le responsable magasin, élaborent les gammes de remplacement pour chaque ligne, accompagnées des listes de pièces mécaniques sous format Excel (figure B5, Annexe B). En parallèle, les pièces électriques et automatiques sont identifiées par le planificateur électrique avec l'appui des automaticiens et électriciens.
Toutes les listes sont ensuite validées par le responsable méthodes, le responsable maintenance et le directeur technique.
Conformément aux procédures internes, des Ordres de Travail (OT) sont créés dès cette phase, mais restent vides jusqu'à la fin de la révision, servant uniquement à déclencher le processus d'approvisionnement.
- **Préparation** : Environ une semaine avant le début de la révision, les équipes de maintenance sont constituées pour chaque équipement, par les chefs de zone ou les planificateurs, en fonction des compétences identifiées. Les checklists d'intervention sont préparées, et le magasin entame la sortie des pièces de rechange sur la base des listes transmises par email. Cette étape marque le lancement opérationnel de la maintenance préventive annuelle.
- **Exécution** : Lorsque la date de révision annuelle est atteinte, les ordres de travail (OT) créés en amont apparaissent dans l'ERP. Les planificateurs impriment et distribuent les checklists aux intervenants, tout en retirant les pièces de rechange nécessaires du magasin. Le suivi de l'avancement est assuré via un diagramme de Gantt (Voir figure B6, Annexe B).
En cas de besoin de pièces supplémentaires, les opérateurs s'adressent aux planificateurs, qui consultent la documentation technique pour identifier la pièce.
 - o Si la pièce est disponible, l'opérateur obtient le code SAP, le transmet au magasinier et retire la pièce.
 - o Si elle est indisponible, l'intervention est annulée.
- **Clôture** : Une semaine après la révision, les chefs de zones mettent à jour les OT en renseignant les pièces effectivement consommées. Le responsable magasin, de son côté, ouvre un Bon de Sortie Magasin (BSM) dans l'ERP pour y saisir les pièces utilisées, puis clôture le bon. Enfin, les planificateurs mécaniques élaborent un rapport PowerPoint résumant le taux d'exécution, le coût global et les incidents rencontrés.

Le processus de maintenance annuelle est représenté dans la figure 2.6.

Ce processus couvre principalement la deuxième et la troisième phases, à savoir la préparation et l'exécution.

Les différents acteurs impliqués dans le processus sont présentés ci-dessous :

- Responsable magasin ;
- Planificateur ; qui peut-être soit mécanique ou électrique ;
- Superviseur ; qui peut être soit un chef de zone, soit un chef de service automatique et électrique ;
- Intervenants ; composé des opérateurs mécaniques ou des ingénieurs en électricité/ automatique.

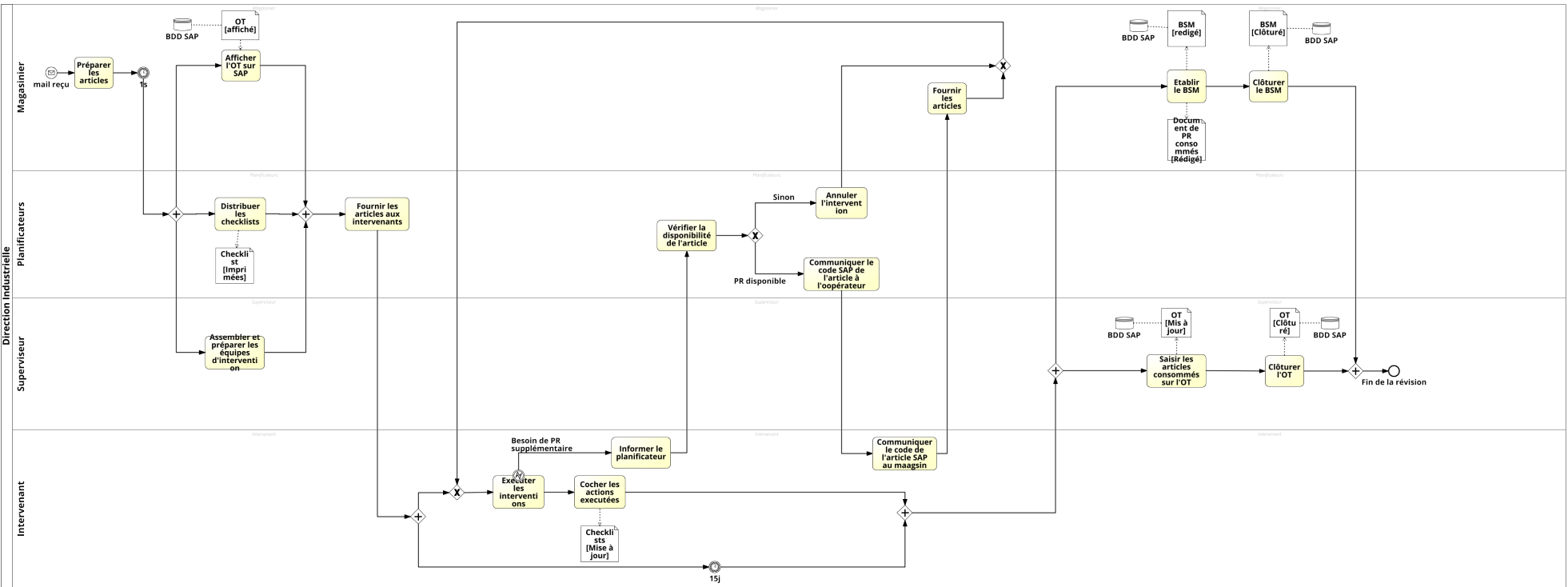


FIGURE 2.6 – Processus de maintenance préventive annuelle

Cet état des lieux a permis de mettre en lumière, de manière claire et explicite, les procédures effectivement mises en œuvre au sein du service maintenance, ainsi que la répartition des rôles entre les différents acteurs impliqués. Il a également permis d'identifier les normes et principes que l'entreprise déclare adopter en matière de maintenance, à savoir ISO 9001, FSSC 22000, et la démarche TPM. Sur cette base, et afin d'ancrer l'analyse sur des fondements rigoureux, un audit ciblé a été conduit en intégrant ces référentiels, dans le but de relever les écarts existants entre les pratiques observées et les exigences des normes internationales.

2.3 Audit du système de maintenance : méthode et résultats

Cette section a pour objectif de présenter la démarche d'élaboration de l'audit, structurée en trois étapes principales : la définition des objectifs, la construction du questionnaire d'évaluation et l'analyse des résultats obtenus. Au-delà du simple contrôle de conformité, cette démarche s'inscrit dans une dynamique d'amélioration continue, en fournissant une vision claire et structurée du système de maintenance afin de guider les actions à venir.

La méthodologie détaillée, ainsi que les résultats de cette évaluation, sont présentés dans les sections suivantes.

2.3.1 Objectifs et référentiels

L'audit vise à établir un diagnostic précis du système de maintenance en évaluant ses dimensions techniques, managériales et administratives. Il permet d'identifier les écarts par rapport aux normes internationales et aux standards industriels, afin de proposer des pistes d'amélioration adaptées au contexte de l'entreprise.

Pour garantir la rigueur et la pertinence de l'évaluation, l'audit a été construit à partir de trois référentiels internationaux reconnus, sélectionnés en fonction de leur adéquation avec le système de management déjà en place, à savoir l'ISO 9001, FSSC 22000, démarche TPM.

Ces référentiels ont permis de définir les critères d'évaluation et de concevoir une grille d'audit adaptée, garantissant une analyse structurée, objective et conforme aux standards de l'industrie. En complément des référentiels normatifs, des seuils d'objectifs internes ont été définis par l'entreprise pour chaque dimension évaluée. Ces seuils permettent de situer les résultats de l'audit par rapport aux attentes minimales de performance du service maintenance, dans une logique d'alignement stratégique et opérationnel :

- Aspect managérial : 75 %
- Aspect administratif : 80 %
- Aspect technique : 85 %

Ces valeurs de référence ont été fixées en concertation avec l'équipe de maintenance, en cohérence avec les engagements internes et les exigences des normes ISO 9001, FSSC 22000 et TPM.

2.3.2 Élaboration du questionnaire d'audit

Suite à l'analyse détaillée des référentiels retenus, un questionnaire d'audit a été élaboré de manière méthodique afin de répondre aux objectifs fixés. Ce questionnaire vise à évaluer le

niveau de conformité des pratiques de maintenance par rapport aux exigences normatives et à détecter les écarts existants au sein du modèle en place.

La démarche d'élaboration s'est articulée autour des étapes suivantes :

- L'interprétation des exigences clés des normes sélectionnées ;
- La formulation de questions ciblées, directement alignées avec les critères des référentiels ;
- La structuration du questionnaire selon les trois dimensions fondamentales de la maintenance industrielle :
 - o Technique : Centrée sur les équipements, interventions réalisées, ainsi que la planification opérationnelle des actions de maintenance ;
 - o Managériale : Portant sur le leadership, la répartition des rôles et responsabilités, ainsi que la gestion des ressources ;
 - o Administrative : Axée sur la gestion documentaire, les enregistrements des interventions, et le suivi des actions engagées.

En somme, cette démarche a permis de concevoir un outil rigoureux, aligné avec les objectifs du diagnostic. Ce questionnaire servira de socle pour l'analyse des pratiques existantes, en fournissant des données exploitables dans les étapes suivantes de l'étude.

2.3.3 Résultats de l'audit

L'audit a été déployé sur le terrain pour évaluer concrètement le système de maintenance en place. Il a couvert l'ensemble du service maintenance, incluant les équipes sédentaires, les intervenants terrain et les services supports.

À ce stade, une seconde phase de collecte de données a été nécessaire, incluant des observations directes, des entretiens avec les parties prenantes et une analyse documentaire. Cette phase s'est déroulée sur deux semaines.

Pour objectiver les résultats, une grille d'évaluation pondérée a été mise en place. Chaque élément audité a été noté selon quatre niveaux d'évaluation (illustrés dans le tableau 2.1), permettant de mesurer la conformité des pratiques aux standards internes et de hiérarchiser les actions correctives à mener selon la gravité des écarts identifiés.

TABLE 2.1 – Grille d'évaluation

1	Non conforme
2	Faiblement conforme
3	Conformité partielle
4	Conforme

Les résultats de l'audit, ainsi que les évaluations de conformité pour chaque aspect étudié, sont présentés dans le tableau 2.2.

TABLE 2.2 – Évaluation de l'Audit

Aspect	Questions	Normes et références	Analyse	Évaluation
Aspect Managérial	1. La direction industrielle est-elle activement impliquée dans la gestion de la maintenance ? soutient-elle les initiatives de TPM ?	FSSC 22000 5.1	Oui, le directeur industriel est souvent présent lors des réunions de maintenance afin de rester informé et de contribuer à l'amélioration continue du service.	2
	2. La performance du service maintenance (taux de panne, temps d'arrêt, interventions d'urgence...) est-elle revue lors des réunions de revue de direction ?	FSSC 22000 4.2	Oui, des réunions de suivi sont organisées à des fréquences journalière, hebdomadaire et mensuelle, selon les indicateurs. Les discussions portent principalement sur des éléments clés tels que le taux de pannes, le respect du budget, la réalisation du plan préventif, le contrôle technique, le ratio énergie, ainsi que des indicateurs globaux comme le TRS et les coûts de maintenance.	3
	3. La communication entre les différents départements (maintenance, production, qualité) est-elle fluide et efficace ?	ISO 9001 7.4, TPM P7	L'entreprise bénéficie d'un environnement en open-space favorisant l'interaction entre les différents départements. Cette collaboration est renforcée par l'organisation régulière de réunions (journalières, hebdomadaires et mensuelles) impliquant les services concernés.	4
	4. Les principaux indicateurs de performance de la maintenance (MTBF, MTTR, disponibilité, coûts de maintenance) sont-ils régulièrement suivis et analysés ?	ISO 9001 6.2 ; ISO 9001 4.4.1	Seuls quelques indicateurs de performance, tels que le coût de maintenance et le TRS, sont suivis ; toutefois, aucun de ces indicateurs ne fait l'objet d'une analyse approfondie.	2
Suite page suivante				

Aspect	Questions	Normes et références	Analyse	Évaluation
Aspect Managérial	5. Existe-t-il une procédure bien définie de maintenance ?, est-elle communiquée et disponible auprès des parties prenantes ?	ISO 9001 5.2.1 ISO 9001 5.2.2 FSSC 22000 7.5	Oui, il existe une procédure de maintenance couvrant à la fois les activités préventives et correctives, sans leurs logigrammes, ainsi que les ressources nécessaires et certaines exigences en matière de sécurité et de qualité. Cette procédure est communiquée et accessible aux parties prenantes.	3
	6. Les ressources nécessaires à la mise en œuvre des processus de maintenance sont-elles identifiées ?, évaluées et mises à jour ?	ISO 9001 7.1.1 FSSC 22000 7.1	Les ressources nécessaires à la mise en œuvre du processus de maintenance sont identifiées dans la procédure de maintenance. Toutefois, en pratique, la tâche ne correspond pas toujours à la ressource prévue, et cette dernière n'est jamais réévaluée en fonction des évolutions ou des changements survenus.	2
	7. L'attribution des rôles et responsabilités est-elle assurée au sein du service ?	ISO 9001 5.3, FSSC 22000 5.3	Non, chacun exécute son travail selon ses propres méthodes, en l'absence de directives communes ou de standardisation des pratiques.	1
	8. Existe-t-il une procédure de répartition des tâches, et celle-ci est-elle clairement communiquée et comprise par l'ensemble du personnel ?	ISO 9001 5.3, FSSC 22000 5.3	Non, il n'existe pas de procédure de répartition des tâches.	1
	9. Les compétences des techniciens sont-elles évaluées ?	ISO 9001 7.2	Non, seul un chef de zone affirme réaliser une évaluation informelle des compétences, basée sur sa propre expertise. Cependant, cette démarche reste individuelle, non structurée, et n'est ni encadrée ni validée par la direction.	1

Suite page suivante

Aspect	Questions	Normes et références	Analyse	Évaluation
Aspect Managérial	10. Existe-t-il des formations continues pour les opérateurs selon leur niveau de compétences ?	TPM P5	L'entreprise organise des formations internes de manière régulière, en tenant compte des compétences et des besoins spécifiques des opérateurs.	3
	11. Les opérateurs sont-ils formés à la maintenance de premier niveau (PMI) et à la détection précoce des anomalies ?	TPM P1	Les opérateurs sont formés à l'ensemble de leurs équipements, au-delà des interventions de premier niveau. Ils sont en mesure de réaliser tous types d'interventions mécaniques, qu'elles soient correctives, préventives ou effectuées lors des révisions.	4
	12. Le personnel de maintenance est-il formé spécifiquement aux risques liés à la sécurité alimentaire ?	FSSC 22000 7.2	Oui, le personnel de maintenance est formé aux risques liés à la sécurité alimentaire par le service QSE.	4
	13. Existe-t-il une formation générale pour tous les travailleurs, y compris la discipline, l'éthique, la culture du travail, 5S, etc. ?	TPM P5	Les formations de ce type sont exclusivement dispensées à certains profils spécifiques, tels que les chefs de zones et les planificateurs.	3
	14. Les actions effectuées pour corriger les anomalies sont-elles supervisées ?	ISO 9001 10.2.1 FSSC 22000 8.1 FSSC 22000 8.2	Certaines actions sont supervisées par les chefs de ligne.	2
	15. L'organisation a-t-elle des procédures spécifiques en cas de défaillance critique ?	FSSC 22000 6.1	Il n'existe pas de procédure standardisée à appliquer en cas de défaillance critique. Les actions entreprises varient selon la personne responsable.	1

Suite page suivante

Aspect	Questions	Normes et références	Analyse	Évaluation
Aspect Managérial	16. Existe-t-il un système formel pour collecter et analyser les retours d'expérience sur les opérations de maintenance ?	ISO 9001 9.1.3 TPM P1	Les retours d'expérience des opérateurs sont recueillis lors de réunions avec ces derniers; par l'exploitation des commentaires des fichiers Excel de suivi des interventions de maintenance préventive hebdomadaire. Rapport d'intervention. Cependant, aucun enregistrement formel n'est réalisé pour les interventions effectuées lors des révisions annuelles.	2
	17. Les équipements critiques sont-ils identifiés et priorisés dans le cadre des activités de maintenance TPM ?	ISO 9001 6.1 TPM P3	Oui, une étude est établie afin d'identifier les équipements critiques et les prioriser dans les interventions de maintenance.	3
Aspect Administratif	18. La documentation des tâches de maintenance (planning, procédures, rapports) est-elle établie?, correctement gérée et mise à jour ?	ISO 5.2.1, ISO 7.5.1, FSSC 7.5	La documentation des tâches de maintenance est établie, mais elle ne fait l'objet d'aucune mise à jour.	3
	19. Le format des documents est-il adapté aux exigences de l'entreprise ?	ISO 7.5.2	Oui, le format des documents est adapté aux exigences de l'entreprise. Une codification est systématiquement appliquée dès qu'une action est validée, ce qui permet leur archivage conformément aux standards internes.	4

Suite page suivante

Aspect	Questions	Normes et références	Analyse	Évaluation
Aspect Administratif	20. Les actions de maintenance (corrective, préventive, etc.) sont-elles suivies et enregistrées dans un système de gestion informatisé ?	ISO 7.1.5.1	Actuellement, les arrêts sont déclarés dans un système informatique (Evo-can), encore en phase d'essai. Les actions de maintenance corrective sont parfois saisies en fin de shift par le chef de ligne, mais ces enregistrements sont souvent incomplets. Il n'existe pas d'historique fiable des pannes permettant de renseigner précisément les interventions ; un historique des arrêts est tenu par le service méthode, mais il est souvent erroné et non systématiquement mis à jour. Les actions de maintenance préventive hebdomadaires sont consignées dans un tableau Excel intitulé "gamme de maintenance", tandis que les actions de la maintenance préventive annuelle sont enregistrées dans des check-lists. Toutefois, ces données ne sont pas centralisées dans un système de gestion informatisé.	2
Suite page suivante				

Aspect	Questions	Normes et références	Analyse	Évaluation
Aspect Administratif	21. Existe-t-il un registre des pièces réparées et/ou remplacées ?	TPM P3	Il n'existe pas de registre spécifique pour les pièces réparées, car l'entreprise ne pratique pas la réparation des pièces de rechange. Le remplacement des pièces est justifié à travers les ordres de travail (OT) et les bons de sortie du magasin. Certains historiques d'arrêt peuvent mentionner un changement de pièce, mais ces informations sont souvent incomplètes ou imprécises. De plus, un fichier de consommation de pièces de rechange est tenu, mais les données qu'il contient ne sont pas toujours compatibles avec les informations issues des rapports d'arrêt.	2
	22. Les compétences des techniciens sont documentées ?	ISO 7.2	Non, les compétences des techniciens ne sont pas documentées.	1
	23. Y a-t-il un enregistrement des non-conformités liées à la maintenance, et une analyse des causes racines est-elle réalisée ?	ISO 10.2.2, FSSC 8.9	L'enregistrement des non-conformités est pris en charge par le service SMQ. Toutefois, l'analyse des causes ainsi que la mise en œuvre des actions correctives ne sont pas toujours effectuées.	2
Aspect Technique	24. L'expertise des opérateurs est elle prise en considération ?	TPM P8	Oui, l'expertise des opérateurs est prise en considération; en réalité, la responsabilité des équipements leur est entièrement confiée. Ce sont le plus souvent eux qui prennent les décisions concernant les interventions.	4

Suite page suivante

Aspect	Questions	Normes et références	Analyse	Évaluation
Aspect Technique	25. Existe-t-il un plan de maintenance préventive détaillé ?	ISO 9001 8.1 TPM P3 FSSC 22000 8.1 FSSC 22000 8.2	Un PMP hebdomadaire est mis en place, détaillant l'ensemble des tâches d'inspection, de nettoyage et de lubrification, ainsi que les organes concernés pour chaque équipement. De plus, des PMP sont également établis afin d'exécuter les révisions annuelles, ce dernier inclut les tâches à réaliser, la PR nécessaire, ainsi que la quantité requise.	4
	26. Existe-t-il des consignes standardisées pour réaliser les vérifications des équipements ?	TPM P1	Les opérateurs ont à leur disposition des gammes opératoires au niveau des lignes de production, lesquelles détaillent les étapes de vérification et de nettoyage des équipements.	4
	27. Le plan de maintenance préventive est-il respecté par les équipes ?	ISO 9001 8.1 TPM P3 FSSC 22000 8.1 FSSC 22000 8.2	Le PMP, accessible directement au niveau de la ligne, est effectivement respecté par les équipes de maintenance.	4
	28. Les procédures de maintenance établies sont-elles réellement appliquées ?	FSSC 22000 6.1	Non, les procédures de maintenance ne correspondent pas à la réalité des pratiques sur le terrain.	2
	29. Les pièces de rechange et les outils utilisés sont-ils contrôlés pour assurer qu'ils répondent aux exigences de sécurité alimentaire ?	FSSC 22000 11.1	Les PR sont soumises à un contrôle, cependant, cette opération n'est pas effectuée de manière systématique ni selon une fréquence définie.	2
	30. Les processus sont-ils évalués et mis à jour ?	ISO 9001 5.2.1 FSSC 22000 7.5.2 FSSC 22000 7.5.3	Non, les processus mis en place n'ont pas été évalués ni mis à jour depuis leur mise à disposition.	1

Suite page suivante

Aspect	Questions	Normes et références	Analyse	Évaluation
Aspect Technique	31. Existe-t-il un processus d'amélioration continue pour la maintenance? Les actions d'amélioration sont-elles bien suivies et mises en œuvre?	ISO 9001 10.3	Il existe effectivement certains projets visant à améliorer la maintenance, cependant ceux-ci ne s'inscrivent pas dans un processus structuré d'amélioration continue. De plus, ces initiatives manquent de clarté, ne font l'objet d'aucun suivi formel, et leur mise en œuvre reste partielle voire inexistante.	1
	32. Existe-t-il des actions pour réduire les pannes récurrentes?	ISO 9001 6.2 ISO 9001 4.4.1	Les pannes récurrentes entraînant de simples arrêts mineurs ne sont pas prises en considération.	1
	33. Les causes des pannes sont-elles bien identifiées et corrigées?	ISO 9001 6.2 ISO 9001 4.4.1	L'analyse des causes racines n'est réalisée que lorsqu'une panne critique survient.	2

L'analyse détaillée des réponses au questionnaire d'audit, regroupées par axe (managérial, administratif et technique), a permis de dresser le bilan suivant :

TABLE 2.3 – Bilan d'audit

Aspect analysé	Score obtenu	Score total possible	Taux d'atteinte (%)
Managérial	41	68	60,29 %
Administratif	14	24	58,33 %
Technique	25	40	62,50 %
Total global	80	132	60,60 %

2.3.4 Interprétation des résultats d'audit

L'audit a mis en évidence un taux global d'atteinte de 60,60 %, révélant un niveau de performance moyen et des écarts notables sur les trois axes évalués : managérial, administratif et technique. Ces résultats sont inférieurs aux seuils de performance attendus par l'entreprise, ce qui souligne la nécessité d'une amélioration ciblée et structurée.

–Aspect managérial – 60,29% :

Ce domaine met en évidence une implication encore limitée de la direction dans le pilotage global de la maintenance. Bien que des réunions régulières soient organisées et que la communication interservices soit globalement satisfaisante, plusieurs insuffisances demeurent. L'engagement

stratégique en matière de suivi, d'organisation du service et de mise en œuvre d'une démarche d'amélioration continue est initié, mais reste à consolider. Cela nécessite une gouvernance plus structurée, une gestion des ressources humaines mieux coordonnée, ainsi qu'un dispositif de pilotage plus rigoureux et orienté résultats.

–Aspect administratif – 58,33%

La dimension administrative affiche un niveau de suivi, traçabilité et d'organisation moyen. Les bases sont présentes, mais l'ensemble souffre d'un manque de rigueur dans la documentation, la formalisation des processus, et la mise à jour des procédures. Pour garantir la conformité et faciliter les audits, il est nécessaire de renforcer la fiabilité et la cohérence du système documentaire.

–Aspect technique – 62,50%

Il s'agit du domaine le plus performant parmi les trois. Les pratiques de maintenance préventive sont relativement bien ancrées sur le terrain. Toutefois, malgré une certaine efficacité opérationnelle, des efforts restent à fournir pour améliorer la rigueur dans le traitement des défaillances et accroître la réactivité des interventions correctives.

À la suite de l'interprétation de l'audit qui a mis plusieurs écarts organisationnels et structurels au sein du service maintenance, il est apparu nécessaire de compléter cette évaluation qualitative par une analyse factuelle des performances réelles observées sur le terrain. Cette démarche vise à croiser les constats issus de l'audit avec des données mesurables, afin d'établir un diagnostic complet et d'identifier précisément les leviers d'amélioration.

2.4 Analyse de l'historique des arrêts

Dans le cadre de cette analyse complémentaire, une étude a été réalisée à partir de l'historique des arrêts de production, fourni par le service Méthodes. Ce dernier compile les données des rapports d'arrêt remplis quotidiennement par les chefs de ligne incluant les informations suivantes : date, équipement concerné, poste technique, durée de l'arrêt (en minutes), type de panne (électrique ou mécanique), mode de panne (réglage, blocage, changement de pièce, soudage, graissage, affichage défaut, réarmement), ainsi que le commentaire.

2.4.1 Structuration et fiabilisation des données

L'exploitation de cette base de données a révélé de nombreuses insuffisances : informations incomplètes, imprécises et erronées, rendant l'analyse partiellement exploitable. En conséquence, une structuration des données a été initiée. Celle-ci repose sur une approche plus rigoureuse et standardisée. Elle consiste à collecter auprès des opérateurs, les informations suivantes pour chaque arrêt :

- Le symptôme constaté ;
- La cause identifiée ;
- La solution/remède appliqué.

Cette nouvelle méthode de collecte a été appliquée aux arrêts survenus durant les mois de mai, juin et juillet 2024. Les résultats de cette campagne sont présentés dans la figure C1 (Voir annexe C).

2.4.2 Exploration visuelle des données historiques

Afin de visualiser les données de manière claire et faciliter l'interprétation, les résultats ont été intégrés dans un tableau de bord interactif via Power BI illustré dans la figure 2.7. Plusieurs axes d'analyse ont été retenus :

- Le temps total d'arrêt par équipement ;
- La fréquence d'apparition de chaque mode de panne ;
- Le temps d'arrêt cumulé pour chaque mode de panne ;
- La fréquence de récurrence des mêmes causes par équipement.

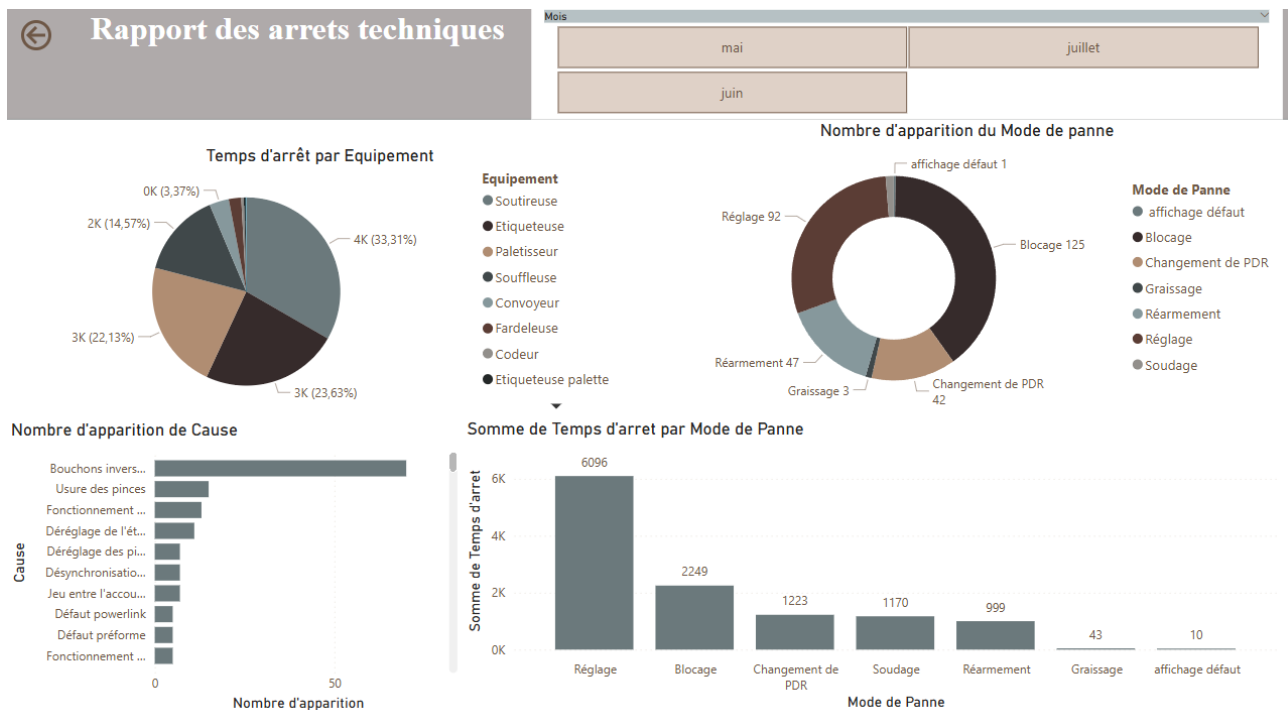


FIGURE 2.7 – Visualisation des données

Ces indicateurs permettent d'évaluer l'impact des pannes sur la disponibilité des équipements, en se basant sur le temps d'arrêt total enregistré pour chaque mode de panne.

En l'absence de données fiables sur des indicateurs tels que le MTBF (Mean Time Between Failures) ou le véritable MTTR (Mean Time To Repair), le MDT (Mean down time) cumulé a été utilisé comme indicateur principal de performance.

2.4.3 Analyse interprétative des résultats visualisés

Les résultats, synthétisés dans le tableau 2.4, présentent un classement des équipements selon leur niveau de criticité, établi sur la base d'une étude détaillée illustrée dans la figure B7, annexe B.

Il convient de noter que :

- Nmp : le nombre d'occurrences d'un mode de panne ;
- MDT : Durée moyenne d'indisponibilité.

TABLE 2.4 – Résultat de l'analyse de l'historique des arrêts

	Réglage		Blocage		Changement PDR		Soudage		Réarmement		Graissage		Affichage défaut	
	Nmp	MDT	Nmp	MDT	Nmp	MDT	Nmp	MDT	Nmp	MDT	Nmp	MDT	Nmp	MDT
Soutireuse	26	1763	85	1061	20	503	0	0	20	557	3	43	1	0
Souffleuse	5	205	11	123	9	370	3	1020	0	0	0	0	0	0
Palettiseur	28	2045	2	90	4	130	0	0	19	334	0	0	1	10
Fardeuse	4	140	0	0	3	95	0	0	1	16	0	0	0	0
Étiqueteuse	27	1838	20	888	3	60	0	0	5	57	0	0	0	0
Codeur	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Étiqueteuse palette	0	0	0	0	1	10	0	0	1	20	0	0	0	0
Convoyeur	2	105	7	87	2	55	1	150	0	0	0	0	0	0

L'analyse des données collectées sur la période de mai à juillet 2024 met en évidence des tendances préoccupantes en termes de récurrence et de durée des arrêts, particulièrement sur les équipements jugés critiques à savoir la souffeuse, la soutireuse et le palettiseur.

Parmi les modes de pannes relevés, les réglages et les blocages apparaissent comme les plus fréquents, concentrant à eux seuls la majorité des incidents enregistrés. Le mode "blocage" totalise 125 occurrences, dont 85 sur la seule soutireuse, ce qui en fait le mode de panne le plus répété. De même, les réglages sont recensés à 92 reprises, affectant particulièrement la soutireuse (26 cas), l'étiqueteuse (27 cas) et le palettiseur (28 cas). Cette fréquence élevée suggère une instabilité persistante des réglages des machines et une absence de standardisation des pratiques opérationnelles.

En termes d'impact temporel, ces deux modes de pannes sont également les plus coûteux. Les réglages génèrent à eux seuls un temps d'arrêt cumulé supérieur à 5600 minutes, avec un pic notable sur le palettiseur (2045 min) et la soutireuse (1763 min). Les blocages, quant à eux, engendrent environ 2100 minutes d'arrêt, principalement concentrés sur la soutireuse et l'étiqueteuse. Ce double constat — fréquence élevée et durée importante — révèle une vulnérabilité structurelle de ces machines à des défauts techniques récurrents, souvent bénins mais non résolus de manière durable.

Un autre point critique est la récurrence des causes sur les mêmes équipements et pour les mêmes modes de pannes. Certains défauts, comme l'inversion des bouchons lors du bouchonnage ou l'utilisation d'un mauvais type de bouchons provoquant des blocages, apparaissent de manière répétée sans qu'une action corrective structurelle ne soit identifiable dans les données. Cela suggère que les pannes sont souvent traitées de manière curative, sans réelle analyse des causes racines. En l'absence d'un dispositif d'amélioration continue, ces dysfonctionnements se reproduisent, mobilisent inutilement les équipes de maintenance, et affectent durablement les performances de la ligne.

2.4.4 Constats clés de l'analyse

Cette analyse met en lumière les constats suivants :

- Les modes de pannes les plus fréquents et les plus coûteux en temps sont les réglages et les blocages, affectant fortement les équipements les plus critiques comme la soutireuse et la souffeuse.
- La répétition des incidents, due à une analyse insuffisante des causes, limite les améliorations structurelles, surcharge les ressources de maintenance et nuit à l'efficacité opérationnelle.

En complément des constats issus de l'audit, l'étude de l'historique des arrêts de production a permis de relever des dysfonctionnements supplémentaires. Ces résultats viennent enrichir le diagnostic du système de maintenance existant et serviront de base à l'analyse critique qui suit.

2.5 Analyse critique des écarts identifiés

Dans le but d'analyser les conséquences des écarts relevés lors des phases précédentes, cette section se consacre à l'évaluation de leur impact sur les trois dimensions fondamentales de la maintenance : managériale, administrative et technique. L'objectif est d'identifier les dysfonctionnements les plus critiques affectant l'organisation, en particulier ceux ayant une incidence directe sur la performance du service maintenance.

Les éléments critiques identifiés sont détaillés dans le tableau 2.5, qui met en lumière les points de faiblesse à traiter en priorité.

TABLE 2.5 – Évaluation des impacts des écarts identifiés

Problème identifié	Impact managérial	Impact administratif	Impact technique
Responsabilité excessive du chef de ligne	Dilution du rôle de supervision, Surcharge mentale, Baisse de la réactivité en pilotage opérationnel.	—	—
Création d'OT correctifs sans saisie des codes internes par les opérateurs. (Implication ERP faible)	Manque d'autonomisation, Déficit de formation et d'accompagnement terrain.	Faible qualité de la donnée saisie, Perte de temps dans la recherche des pièces, Inefficacité documentaire.	Difficultés d'appropriation des outils numériques, Frein à l'autonomie opérationnelle, Données techniques non fiabilisées, traçabilité altérée.
Absence d'analyse des données issues des interventions correctives	Perte d'opportunité d'amélioration continue, Non-identification des pannes récurrentes, carence de pilotage.	Historique inexploité, Perte de valeur de l'information saisie.	Reproduction des mêmes pannes, Absence de retour d'expériences structuré, Maintenance réactive persistante.
Manque d'évaluation des compétences des opérateurs	Inadaptation des affectations, Non-détection des besoins en formation, Stagnation des compétences.	—	Allongement des temps d'arrêts dû à une mauvaise exécution des tâches, Perte de savoir-faire non identifiée ni capitalisée.

Suite page suivante

Problème identifié	Impact managérial	Impact administratif	Impact technique
Non-application rigoureuse des principes de la TPM	Faible implication transversale, Absence de leadership sur la démarche d'amélioration continue.	—	Répétition des pannes sans traitement systématique, Perte de fiabilité et de disponibilité des machines.
Saisie différée des pièces de rechange dans l'ERP	—	Fiabilité compromise des données du stock.	Risque de rupture de stock, Écart entre le stock physique et théorique.
Rédaction précipitée des rapports d'arrêt	—	Données historiques incomplètes ou biaisées, Perte de pertinence pour les analyses.	Moins de visibilité sur les causes des pannes, Diagnostic technique faussé.
Procédure non révisée	—	Processus obsolètes non adaptés aux réalités du terrain, Inefficacité administrative.	Risques d'erreurs techniques dues à l'utilisation de consignes non actualisées.
Répartition des tâches non définie au sein de l'équipe de maintenance	Flou organisationnel, Surcharge ou sous-charge de certains agents, Mauvaise coordination.	Chevauchement des responsabilités, Inefficacité collective.	Mauvaise gestion des priorités, Perte de temps, Interventions moins ciblées.
Système de gestion manuelle via documents papier (OT imprimés)	—	Perte de traçabilité, Erreurs fréquentes dans la documentation, Archivage non fiable.	Incohérence des données, Fiabilité du suivi technique altérée.
Difficulté d'utilisation de l'ERP déclarée par les opérateurs	Démotivation des opérateurs et perte d'adhésion aux procédures, Difficulté à déployer des outils numériques si leur ergonomie n'est pas adaptée au terrain.	Moindre efficacité du système de traçabilité, Surcharge administrative pour compléter ou corriger les informations ERP, Allongement du temps de traitement des données ou besoin d'intervention manuelle en aval.	Risques d'erreurs de saisie ou d'omission dans les rapports d'intervention, Difficulté à exploiter les historiques pour améliorer les plans de maintenance.

Suite page suivante

Problème identifié	Impact managérial	Impact administratif	Impact technique
Faible implication des chefs de zones dans le pilotage des interventions	Sous-exploitation d'un relais stratégique, Affaiblissement du pilotage opérationnel, Perte d'agilité organisationnelle.	—	Moins de coordination technique directe, Réactivité réduite sur le terrain.
Répartition déséquilibrée des charges de travail	Risque de surcharge, démotivation, tensions internes, et retards dans les interventions.	—	Sous-emploi de certaines compétences.
Tâches mal attribuées (planificateurs effectuant des vérifications logistiques)	Dilution des responsabilités, Flou organisationnel, Perte d'efficacité du rôle de planification.	Confusion dans la chaîne de gestion des tâches, Ralentissement des flux d'information, Déviation par rapport aux fiches de poste.	Allongement des délais d'intervention, Surcharge des acteurs clés.
Élaboration du PMP annuel sans participation structurée des parties prenantes	Faible engagement collectif dans l'amélioration du processus de maintenance, Risque de conflits ou d'incompréhensions entre services.	Perte de qualité dans la planification documentaire, Inefficacité du processus de planification.	Risque d'interventions mal ciblées, Sous-optimisation des ressources techniques mobilisées.
Circuit rigide pour la gestion des pièces imprévues lors de la révision	Inefficacité dans la réponse aux aléas, Dépendance excessive aux planificateurs, Baisse de réactivité.	Délais supplémentaires dans les validations ERP, Manque de flexibilité dans les circuits de validation.	Temps d'attente accru, Interruption de l'intervention, allongement du temps d'arrêt.
Absence de formalisation des retours d'expérience (REX)	Manque de capitalisation, Pertes de savoir opérationnel, Non-apprentissage des erreurs passées.	Aucun archivage standardisé, Risque d'erreurs récurrentes, Perte de fiabilité des PMP futurs.	Répétition des défauts ou erreurs techniques, Plans non adaptés aux besoins réels.

Suite page suivante

Problème identifié	Impact managérial	Impact administratif	Impact technique
OT de révision annuelle générés vides, non renseignés en amont	Manque de structuration des missions, Pertes d'efficacité dans la gestion des tâches, Image de désorganisation auprès des équipes.	Données fragmentées, Manque de centralisation des infos, Erreurs ou oublis fréquents.	PR non anticipées, Tâches mal préparées, Exécution incomplète ou inefficace.
Saisie tardive et incomplète des données post-révision	Faible visibilité pour les responsables, Pilotage à l'aveugle, Décisions décalées.	Traçabilité compromise, Dispersion des données sur Excel + ERP, Exploitation limitée pour le reporting.	Difficulté à corriger les erreurs passées, Inefficacité dans l'analyse technique des interventions.
Absence de responsable dédié pour le pilotage hebdomadaire	Manque de coordination, Dilution des responsabilités, Confusions dans la préparation des plans, Stagnation dans l'amélioration continue	Absence de référent administratif pour la structuration, Le suivi, et la mise à jour des documents liés au PMP.	Suivi et exécution des interventions non cohérents, Perte d'efficacité dans l'application du planning, Tâches redondantes ou obsolètes
Élaboration des PMP hebdomadaires par un acteur externe au service maintenance	Faible appropriation du plan par l'équipe interne, Déconnexion entre planification et réalité terrain, Communication limitée.	Dossiers de maintenance potentiellement incomplets ou mal adaptés aux pratiques du service.	Risques d'erreurs d'exécution, Mauvaise priorisation des tâches, Sous-optimisation des ressources.

Le tableau d'analyse critique révèle plusieurs points faibles dans la gestion de la maintenance, dont certains ont un impact récurrent et transversal sur les dimensions managériale, administrative et technique. L'inefficacité observée découle souvent d'un manque de structuration, de communication et d'utilisation optimale des données.

Les problèmes majeurs se regroupent autour de trois axes principaux :

- Gestion et exploitation déficientes des données :** L'absence d'analyse structurée des retours d'expérience et des données d'interventions, combinée à une utilisation lacunaire et des difficultés d'appropriation du système ERP, entraîne une perte d'information cruciale. Cette carence empêche l'identification des pannes récurrentes, fausse le diagnostic technique et compromet la capacité à piloter l'amélioration continue.
- Manque de standardisation et de formalisation des processus :** La non révision des procédures, l'absence de répartition claire des tâches et le faible formalisme des activités (PMP, rapports d'arrêt) créent un flou organisationnel. Cela se traduit par une dilution des responsabilités nuisant à la fiabilité des équipements et à l'efficacité globale des opérations.

3. **Faible implication et démotivation du personnel** : La difficulté d'utilisation de l'ERP, le manque d'évaluation des compétences et l'absence de rôle clair pour certains acteurs (chefs de zones, planificateurs) engendrent une sous exploitation du potentiel humain. Cette situation affecte l'autonomie des opérateurs, réduit l'adhésion aux outils et processus, et freine l'agilité et la réactivité nécessaires aux interventions.

En somme, l'organisation actuelle de la maintenance souffre d'un manque de fiabilité des données, de clarté des processus et d'engagement collectif formalisé. Ces carences systémiques entravent une gestion proactive de la maintenance, favorisent la récurrence des problèmes et limitent significativement la performance globale des équipements et du service.

2.6 Synthèse des résultats

À la suite de cette étude, il apparut nécessaire de synthétiser les constats observés afin d'en dégager une vision stratégique claire des axes de progrès possibles.

Pour cela, une matrice SWOT a été construite. Cet outil d'analyse permet d'organiser les résultats de manière structurée en identifiant, d'une part, les forces et faiblesses internes au service maintenance, et d'autre part, les opportunités correspondant aux leviers d'amélioration, ainsi que les menaces associées aux faiblesses non traitées. Cette approche facilite ainsi l'élaboration d'un plan d'action ciblé et pertinent.

La matrice illustrée dans la figure 2.8, permet de mettre en évidence :

- Les forces sur lesquelles s'appuyer pour consolider les bonnes pratiques ;
- Les faiblesses à traiter en priorité ;
- Les opportunités identifiées comme piste concrètes d'amélioration ;
- Les menaces susceptibles d'entraver la performance du service en l'absence de mesures correctives

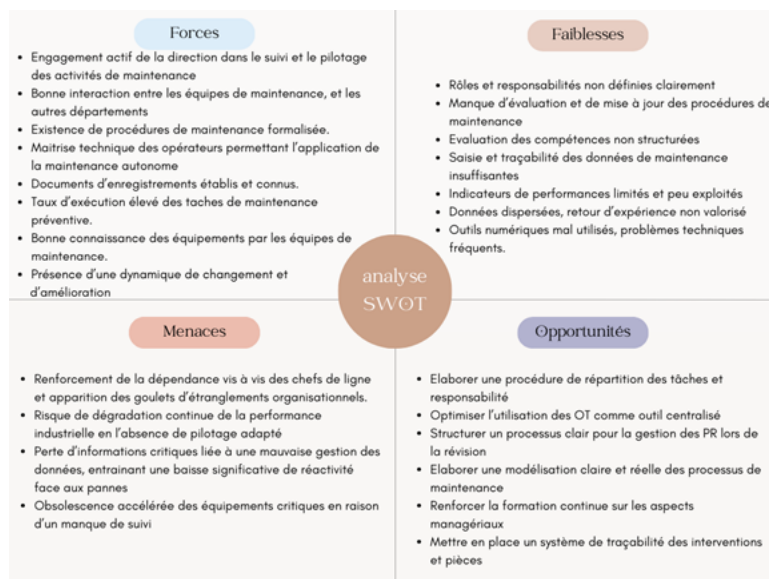


FIGURE 2.8 – Matrice SWOT

Ainsi, l'analyse critique a permis de dégager des axes de progrès concrets, qui serviront de base structurée à l'élaboration des actions d'amélioration ciblées dans la section suivante.

2.7 Conclusion

Ce chapitre a permis d'établir un diagnostic approfondi du système de maintenance actuellement en place au sein de l'entreprise. L'analyse menée a mis en évidence un ensemble d'écarts par rapport aux exigences des bonnes pratiques industrielles traduisant des insuffisances sur les plans organisationnels, techniques et documentaires.

L'ensemble de ces constats a été synthétisé à travers une matrice SWOT, permettant de dégager une vision globale des forces et faiblesses du système, tout en identifiant les leviers internes d'amélioration et les risques à anticiper. Ces résultats ouvrent la voie à deux scénarios d'amélioration distincts qui seront développés dans le chapitre suivant. Le premier repose sur une optimisation de l'organisation actuelle en s'appuyant sur les ressources existantes. Le second propose une transformation plus approfondie du système de maintenance à travers l'implémentation d'une solution de gestion de maintenance informatisée, envisageable, compte tenu des moyens disponibles au sein de l'entreprise.

Chapitre 3

Optimisation et transformation digitale du système de maintenance

3.1 Introduction

Face aux enjeux croissants de performance, de traçabilité et d'optimisation des coûts en maintenance industrielle, il est devenu nécessaire d'envisager des pistes concrètes d'amélioration du système en place. Ce chapitre se propose d'explorer deux scénarios d'évolution, fondés sur les opportunités identifiées dans l'analyse SWOT du chapitre 2.

La première proposition vise à optimiser le modèle de maintenance existant en s'appuyant sur les ressources internes et les outils actuellement disponibles. La seconde, plus ambitieuse, consiste en une transformation numérique par l'adoption d'une solution de GMAO.

Ces deux approches sont par la suite comparées de manière structurée afin d'identifier la solution la plus adaptée aux contraintes et objectifs de l'organisation.

3.2 Première Proposition : Optimisation initiale du modèle de maintenance avec les ressources existantes

Les analyses menées précédemment, ont mis en évidence plusieurs dysfonctionnements d'ordre organisationnel, administratif et technique affectant le fonctionnement du service maintenance.

Dans cette optique, une série de proposition d'amélioration a été formulée dans le but de renforcer l'efficacité du système de maintenance global. Ces actions portent principalement sur les deux types de maintenance actuellement pratiqués par l'entreprise, à savoir la maintenance corrective et la maintenance préventive systématique, qu'elle soit hebdomadaire ou annuelle. Les pistes d'amélioration ont été définies à partir des résultats de l'analyse SWOT, en s'appuyant sur les opportunités identifiées, tout en capitalisant sur les forces existantes du service afin de corriger ou atténuer les faiblesses relevées.

Sur le plan managérial, qui touche à l'organisation générale du service, à la répartition des responsabilités, et à la gestion documentaire, les propositions incluent une redéfinition des rôles ainsi que l'introduction de nouveaux flux d'exécution pour les interventions de maintenance.

Sur le plan administratif, en charge du pilotage des données, de l'enregistrement et de la traçabilité des opérations, les améliorations proposées visent à fluidifier la transmission de l'information, à assurer la supervision, et à structurer davantage la documentation, en cohérence avec les évolutions managériales proposées.

Enfin, une meilleure gestion des aspects managériaux et administratifs permet d'obtenir des résultats positifs sur le plan technique, en favorisant des interventions plus rapides, mieux coordonnées et donc plus efficace.

L'ensemble des améliorations envisagées sera détaillé dans les sections suivantes.

3.2.1 Amélioration de la Maintenance Corrective

Cette section présente les propositions d'amélioration de la maintenance corrective au sein de l'entreprise, à travers une définition claire des rôles et responsabilités, ainsi que la mise en place d'un processus optimisé.

3.2.1.1 Redéfinition des rôles et responsabilités

Dans le but de clarifier et structurer l'ensemble des tâches associées au processus de maintenance corrective, la décomposition hiérarchique réalisée sous forme de Work Breakdown Structure (WBS) (voir figure D1 en Annexe D), a permis d'identifier les différentes activités à chaque niveau d'intervention, facilitant ainsi leur répartition selon les rôles et responsabilités, en utilisant une matrice RACI, présentée dans la figure 3.1, afin de préciser pour chaque tâche, les rôles attribués à chaque acteur.

	Responsable Magasin	Chefs de zone	Planificateurs mécaniques	Chefs de lignes	Opérateurs	Magasinier	Ingénieurs électrique/automatique
Détecter la panne		C		A	R		
Analyser la panne		C		A	R		R
Consulter l'historique des arrêts				A	R		R
Identifier la cause		C		A	R		R
Identifier le besoin de PR		C		A	R		R
Etablir un ordre de travail		I		A	R	I	
Vérifier la disponibilité de la PR	A			I	R	C	
Etablir le BSM	R				I		
Récupérer la PR	A			I	R		
Réaliser l'intervention		I		A	R		R
Test et remise en service		I		A	R		R
Enregistrer l'intervention dans l'historique des arrêts		I		A	R		R
Analyser l'historique des arrêts		R		C	I		I

FIGURE 3.1 – Matrice RACI pour maintenance corrective

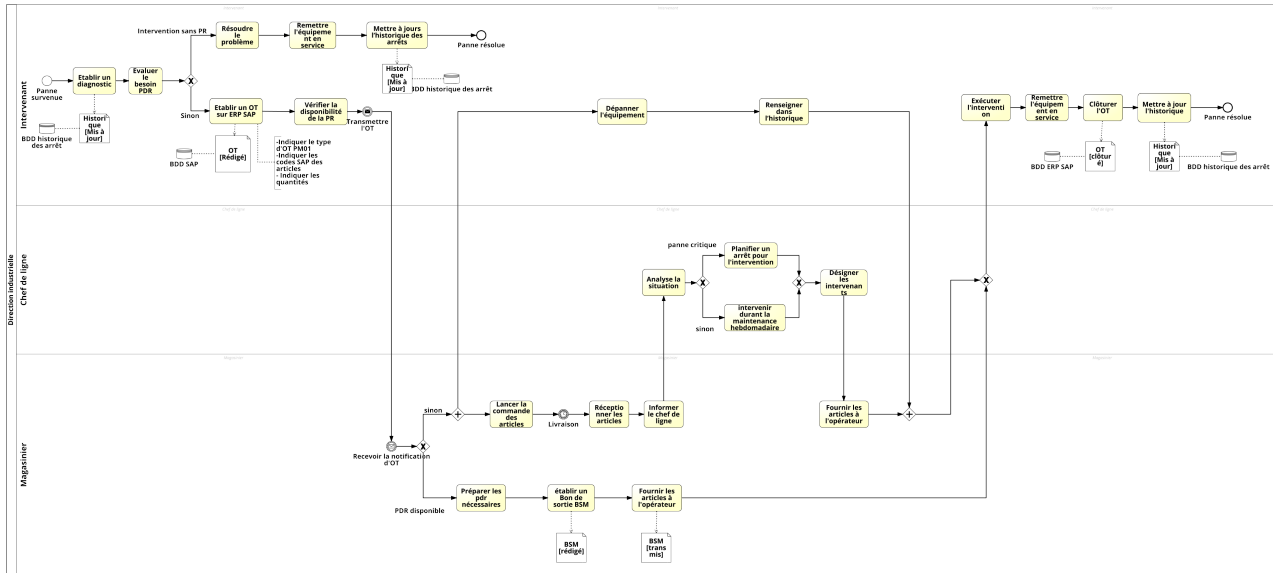
La matrice vise notamment à :

- Renforcer l'autonomie et l'implication des opérateurs, conformément aux principes du TPM appliqués dans l'entreprise, notamment à travers la création des ordres de travail et la vérification des pièces de rechange par les opérateurs eux-mêmes.
- Prévoir, en cas de situations exceptionnelles ou de doute, une consultation hiérarchique auprès du chef de ligne ou du chef de zone, afin d'assurer une prise de décision cohérente et structurée.
- Encourager l'analyse régulière de l'historique des arrêts par les chefs de zone, dans le but d'identifier les pannes récurrentes, d'en comprendre les causes et de mettre en place des actions d'amélioration ciblées.
- Attribuer au chef de ligne la responsabilité du suivi et de l'approbation des interventions réalisées. La définition des responsabilités des acteurs du service a permis la mise en place d'un processus adapté, détaillé dans la section suivante.

3.2.1.2 Nouvelle proposition du flux d'exécution

Afin de pallier les insuffisances identifiées dans le processus de maintenance corrective actuel de l'entreprise et d'en optimiser l'efficacité, un ensemble de recommandations a été formulé et intégré dans le processus optimisé présenté dans la figure 3.2.

Ces recommandations visent à renforcer la traçabilité, améliorer la réactivité des interventions et fiabiliser la gestion des pièces de rechange.



de poste et fusionne les historiques des pannes électriques et mécaniques dans une base de données unique. Cette centralisation améliore la transparence entre les services, renforce la traçabilité et facilite l'analyse des causes en vue de la mise en place d'actions correctives ciblées.

3.2.1.3 Mise en place d'un nouvel historique des arrêts

Dans le but d'améliorer la gestion des pannes et de renforcer l'efficacité de la maintenance corrective, nous proposons la mise en place d'un historique des pannes structuré et automatisé. Cette solution répond à deux enjeux majeurs : la traçabilité des interventions et le suivi des performances.

Fonctionnalités principales de l'outil :

L'historique des pannes remplit une triple fonction :

- Base de données consultable : Elle permet de faciliter le diagnostic lors de pannes récurrentes ou lorsqu'un nouveau technicien intervient.
- Outil de suivi des indicateurs de performance (KPI) : L'outil calcule automatiquement des KPI essentiels comme le MTTR (Mean Time to Repair), le MTBF (Mean Time Between Failures) et la disponibilité des équipements.
- Outil d'enregistrement des informations de l'intervention : Il permet d'enregistrer les détails concernant l'intervention, ce qui facilite le suivi des actions et la gestion des ressources humaines impliquées dans chaque intervention.

Interface de saisie et automatisation des données :

Cet outil a été développé sous Microsoft Excel, enrichi par des codes VBA pour automatiser l'enregistrement et le traitement des données. L'interface de saisie a été conçue pour être conviviale et simplifier l'enregistrement des informations par les techniciens. Des listes déroulantes dynamiques facilitent la saisie des différentes données. Les informations à saisir sont les suivantes :

- La date de la panne.
- La ligne de production concernée (20-18 dans notre cas).
- L'équipement affecté (liste déroulante des équipements de la ligne).
- Le sous-ensemble concerné (filtré dynamiquement en fonction de l'équipement sélectionné).
- Le symptôme observé, la cause identifiée, et la solution appliquée.
- Le mode de défaillance (choix parmi une liste).
- Le type d'intervention (électrique ou mécanique).
- La durée de l'intervention et la durée d'arrêt machine (en minutes).
- Le nom de l'intervenant et son shift (via listes déroulantes).

Une fois le formulaire complété, un simple clic sur le bouton "Ajouter" enregistre automatiquement les données dans une base centrale et affiche un message de confirmation. Ces données alimentent ensuite un tableau de bord dynamique pour suivre en temps réel les KPI de la maintenance corrective. Afin de faciliter la compréhension de l'outil, voici une illustration de l'interface de saisie des pannes :

Historique des arrêts		Réf :
Champs de saisie		Ligne PET 20/18
		Année : 2024
Date		
Ligne		
Equipement		
Sous ensemble		
Symptôme		
Cause		
Solution		
Mode de panne		
Type d'intervention		
Durée d'intervention		
Temps d'arrêt machine en min		
Intervenant		
Shift		

Ajouter

FIGURE 3.3 – Interface de saisie des pannes

Tests de validation des fonctionnalités de l'outil :

Après chaque saisie, les informations sont enregistrées dans une base de données centralisée. Celle-ci alimente un tableau de bord dynamique permettant de suivre les KPI essentiels comme le MTTR, le MTBF, et la disponibilité des équipements. Les tests réalisés ont confirmé le bon fonctionnement de l'outil, en assurant un suivi précis des pannes et un calcul fiable des indicateurs clés de performance (KPI). Ci-dessous, une figure de la base de données testées ainsi que les résultats obtenus pour les principaux indicateurs.

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

ALGERIA

FIGURE 3.4 – Table de test de la base de données

Cette figure présente un extrait des enregistrements issus de la base de données construite à partir du nouvel outil de saisie des arrêts.

								Historique des arrêts		Ligne PET 20/18	
								KPI		Année : 2024	
Equipements	Temps total en min	Nombre de pannes	Total tps des pannes en min	TBF en min	MTBF en min	MTTR en min	Disponibilité en %				
Soutireuse	9360	121	2204	7156	59,14049587	18,21487603	76,45299145				
Souffleuse	9360	26	1643	7717	296,8076923	63,19230769	82,4465812				
Etiqueteuse	9360	40	2132	7228	180,7	53,3	77,22222222				
Fardeuse	9360	6	185	9175	1529,166667	30,83333333	98,02350427				
Palettiseur	9360	20	773	8587	429,35	38,65	91,74145299				

FIGURE 3.5 – Tableau de suivi des KPI

La figure met en évidence les indicateurs calculés automatiquement à l'issue de chaque saisie, permettant un pilotage précis de la performance des interventions correctives. Cet outil, en plus de sa simplicité d'utilisation, constitue un véritable levier pour améliorer le suivi de la maintenance corrective et l'analyse des performances des équipements.

3.2.2 Maintenance préventive systématique hebdomadaire

Cette section vise à optimiser la maintenance préventive systématique de l'entreprise, en prenant en compte ses deux types principaux : la maintenance hebdomadaire et la maintenance annuelle.

3.2.2.1 Redéfinition des rôles et responsabilités

Étant donné que la maintenance préventive hebdomadaire ne relevait jusqu'à présent de la responsabilité d'aucun acteur clairement identifié, la matrice des responsabilités présentée dans la figure 3.6 a été élaborée dans le but de désigner un responsable pour chaque activité du processus. Cette répartition s'appuie sur la décomposition hiérarchique des tâches selon la méthode WBS, dont le détail se trouve en annexe D, figure D2

	Responsable Maintenance	Chefs de zone	Planificateurs mécaniques	Chefs de lignes	Opérateurs
Elaboration du PMP hebdomadaire	A	C	R	I	I
Préparation des gammes de maintenance	A	C	R	I	I
élaboration des modes opératoire		I	R	C	C
Exécution de l'intervention		I		A	R
Enregistrement de l'exécution dans les gammes de maintenance.		I		A	R
Analyse des gammes de maintenance		R	I		
Ajustement du PMP hebdomadaire	A	R	C	I	I
Etablir un rapport final	I	R	C		

FIGURE 3.6 – Matrice RACI pour la maintenance hebdomadaire

Cette matrice introduit des améliorations clés :

- La préparation des gammes de maintenance et des modes opératoires est désormais confiée aux planificateurs mécaniques, en remplacement de la personne externe au service maintenance qui était précédemment chargée de cette tâche. Le chef de zone, quant à lui, est responsable de la révision périodique des gammes sous format Excel, afin de garantir leur mise à jour continue.
- Pour la gestion des besoins en pièces de rechange (PDR), les responsabilités sont maintenues conformément à celles définies dans le processus optimisé de la maintenance corrective. Cette cohérence permet de standardiser les pratiques et d'assurer une continuité dans la gestion des flux.

3.2.2.2 Nouvelle proposition du flux d'exécution

Afin de remédier aux insuffisances constatées et d'améliorer l'efficacité de la maintenance préventive hebdomadaire NIL, un ensemble de recommandations a été formulé et intégré dans le processus optimisé présenté dans la figure 3.7

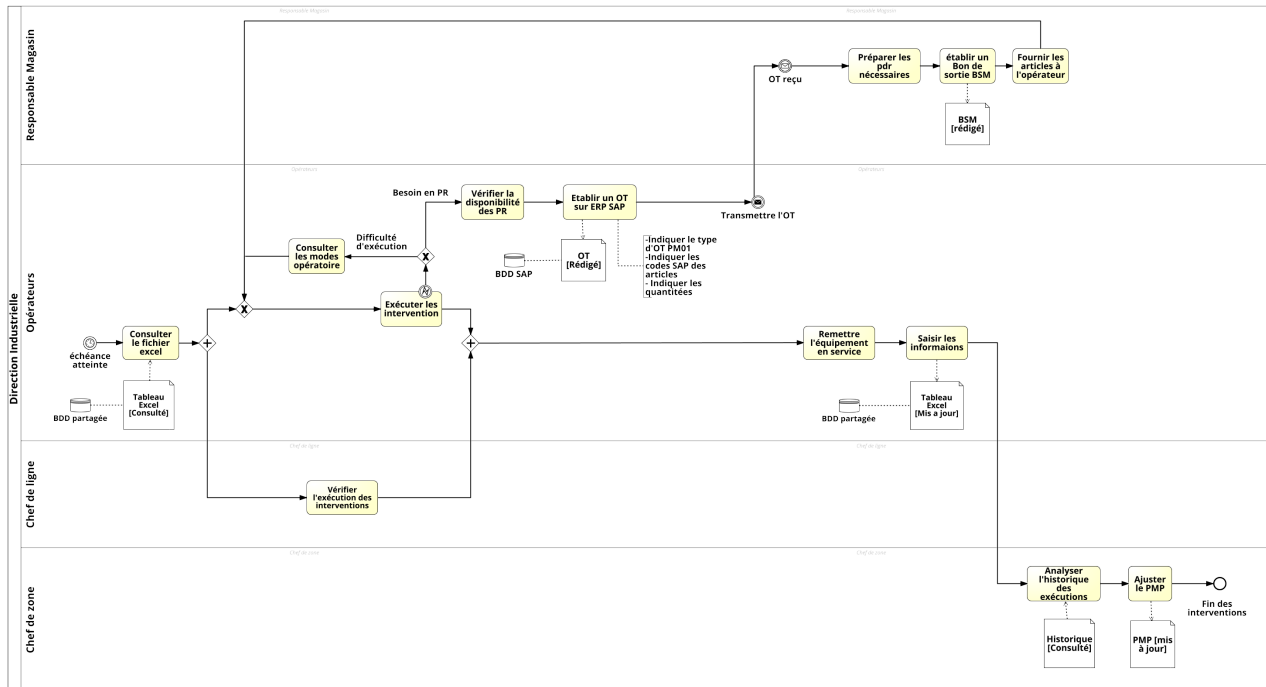


FIGURE 3.7 – Optimisation du processus de maintenance préventive hebdomadaire

Les principales modifications apportées sont les suivantes :

- Mise en place d'un processus de révision périodique des PMP : Ce processus repose sur l'analyse des historiques d'interventions (fichiers Excel) et sur les retours d'expérience du terrain. L'exploitation de ces données permet de mieux évaluer l'état réel des équipements, d'identifier les anomalies récurrentes et d'ajuster les actions planifiées, en vue d'optimiser continuellement le plan de maintenance.
- Gestion des besoins en pièces de rechange : Lorsqu'une nouvelle pièce de rechange est nécessaire, le processus suivi est identique à celui de la maintenance corrective. Ce mode de fonctionnement a déjà été abordé dans la section relative à l'optimisation du processus de maintenance corrective.

3.2.3 Amélioration de la maintenance préventive systématique annuelle

3.2.3.1 Redéfinition des rôles et responsabilités

Pour garantir le bon déroulement de la planification, la préparation, l'exécution et le suivi de la maintenance préventive annuelle, il est essentiel de définir clairement les missions de chaque intervenant. La nouvelle répartition des responsabilités, qui a été élaborée sur la base d'une décomposition hiérarchique WBS des activités (voir annexe D, figure D3), est présentée dans la figure 3.8 et la figure 3.9 sous forme d'une matrice des responsabilités RACI.

	Responsable Maintenance	Chefs de zone	Planificateurs mécaniques	Responsable méthodes	Chef de service électricité/automatisme	Opérateurs/ chef de ligne	Responsable Magasin	Planificateur électrique	Logistique	Directeur technique	Ingénieurs automatique/électrique
Etablir le budget annuel	A			R						A	
Elaboration du PMP annuel	A	R	R	A	R	I		R		A	I
Identifier la période de la révision pour chaque ligne	A		I	A				I	R	A	
Lister la PR nécessaire à la révision	A	R	R	A	R	I		R			
Elaborer et saisir les PR/ tâches sur l'OT			A				R	A			
Lancer la commande de la PR				A			R				
Affecter les ressources		R			R	I					I
Réceptionner la PR			C	I			R				I
Préparation de la PR			C				R				
Préparation des checklists			R			I		R			I

FIGURE 3.8 – Matrice RACI la phase de planification et préparation de la révision

	Responsable Maintenance	Chefs de zone	Planificateurs mécaniques	Chef de service électricité/automatisme	Chefs de lignes	Opérateurs	Responsable Magasin	Planificateur électrique	Directeur technique	Ingénieurs automatique/électrique
Exécuter les intervention		C			A	R				R
Mettre à jour les checklists					R	R				R
Suivi des exécutions	I	R		R					I	
Mise à jour de l'OT		R		R	C					
Vérification des PR manquantes dans le stock magasin					R	R	A			R
Mettre à jour le BSM							R			
Vérification croisée OT/BSM		I		I			R			
Analyse de la criticité des interventions non réalisée		R	I	R				I		
Ajustement du PMP annuel		A	R	A		C		R		
Etablir le rapport final	A	R		C						

FIGURE 3.9 – Matrice RACI de la phase d'exécution de de clôture de la révision

Cette dernière introduit plusieurs changement clés :

- La préparation des plans de maintenance préventive (PMP) annuel est désormais réalisée de manière collaborative entre les planificateurs mécaniques, les chefs de zones, les opérateurs des équipements et le responsable magasin. Cette approche vise à limiter les oublis, renforcer la fiabilité des plans, éviter le surstock et la pénurie de pièces de rechange. Elle doit ensuite être validée par le responsable maintenance, le responsable méthode et le directeur technique.
- L'affectation des tâches, la constitution des équipes de maintenance pour la révision annuelle, ainsi que le suivi de l'exécution des interventions relèvent principalement de la responsabilité des chefs de zones. En tant que référents directs des techniciens, ils disposent

d'une connaissance approfondie des compétences et de l'expérience de chaque membre de leur équipe.

- L'établissement des Ordres de travail (OT) incombe désormais au responsable magasin dans le cadre de la révision annuelle. Celui-ci a pour mission de créer les OT en y intégrant l'ensemble des informations nécessaires (tâches à exécuter et pièces de rechange), sur la base des listes finales validées par les responsables.

3.2.3.2 Nouvelle proposition du flux d'exécution

Le nouveau processus de maintenance annuelle, représenté dans figure 3.10 repose sur plusieurs recommandations essentielles pour optimiser son efficacité.

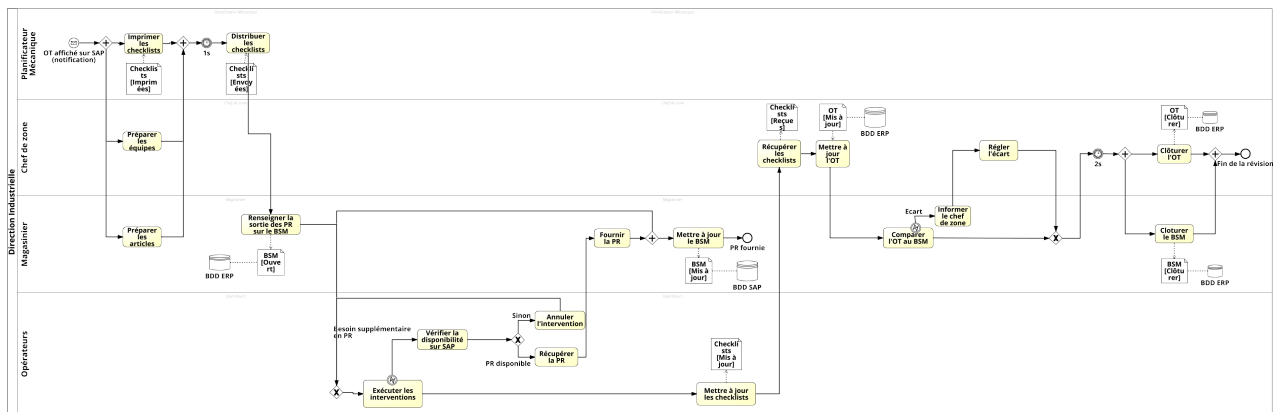


FIGURE 3.10 – Optimisation du processus de maintenance préventive annuelle

Les principaux changements sont détaillés ci-après :

- Evènement déclencheur automatisé : L'apparition de l'OT dans le système ERP SAP trois jours avant le début de la révision devient le déclencheur officiel. Cette automatisation remplace les démarches manuelles, limite les oublis, élimine les erreurs humaines, et facilite le suivi.
- Enregistrement de sortie des PR : la responsabilité de l'enregistrement des pièces sortant du magasin est désormais attribuée au responsable magasin, afin de garantir une traçabilité rigoureuse et d'assurer que chaque acteur remplisse pleinement son rôle dans le processus
- Gestion des besoins imprévus : En cas de besoins d'une PR supplémentaires, les opérateurs doivent désormais vérifier directement sa disponibilité sur le système ERP SAP à partir d'un poste informatique dédié au niveau de la ligne afin d'en tirer le code ERP SAP, et pour vérifier la disponibilité de la PR au niveau du stock magasin. Cette autonomie réduit les délais, allège la charge des planificateurs mécaniques et leur permet de se concentrer sur leurs missions principales.
- Mise à jour quotidienne de l'OT : Les chefs de zone collectent chaque jour les checklists complétées et mettent à jour les OT en conséquence. Cette fréquence améliore la fiabilité des données, renforce la traçabilité des interventions et permet un meilleur pilotage des travaux en cours.
- Vérification croisée BSM/OT : La comparaison entre le Bon de Sortie Magasin (BSM) et l'OT mis à jour permet de détecter les incohérences, identifier les sources d'anomalie et corriger les écarts rapidement.
- Enregistrement des tâches non exécutées : Les tâches non réalisées durant la révision doivent être systématiquement enregistrées. Leur criticité est ensuite évaluée afin de dé-

cider de leur reprogrammation, garantissant ainsi la continuité de fonctionnement et la fiabilité des équipements concernés.

3.3 Limites de la première approche et nécessité d'une solution digitale

Bien que cette première proposition de réorganisation du modèle de maintenance apporte des améliorations significatives, elle présente néanmoins certaines limites structurelles. En effet, elle permet d'accélérer le traitement des interventions, qu'elles soient correctives, préventives hebdomadaires ou annuelles. De plus, la redéfinition claire des rôles et responsabilités au sein de l'équipe maintenance contribue à réduire les confusions, les doublons et les erreurs humaines, tout en facilitant la coordination opérationnelle.

L'introduction d'un nouvel historique structuré des pannes constitue également un progrès notable en matière de traçabilité et d'analyse rétrospective des défaillances. Cependant, malgré ces apports, cette proposition repose encore largement sur des pratiques manuelles et des supports fragmentés. Les données restent dispersées entre plusieurs sources (documents papier, fichiers Excel, échanges informels, etc.), sans véritable centralisation dans un système unique.

Par ailleurs, certaines tâches nécessitent toujours l'envoi d'informations sensibles ou critiques via des canaux moins performants ou chronophages, tels que les appels téléphoniques, ce qui non seulement affaiblit la sécurité des données, mais compromet également leur traçabilité, leur pérennité et leur accessibilité à long terme. Cette approche hybride, mêlant pratiques numériques et processus manuels, limite ainsi l'efficacité globale du système, notamment en matière d'automatisation, de pilotage en temps réel et de prise de décision fondée sur des données fiables.

Dans cette optique, et afin de dépasser ces contraintes, la digitalisation complète du processus à travers la mise en œuvre d'une GMAO moderne s'impose comme une solution durable et structurante.

3.4 Deuxième proposition : Transformation numérique de la maintenance par l'adoption d'une GMAO

Dans une perspective d'amélioration continue et de modernisation des pratiques de maintenance, cette deuxième proposition vise une transformation structurelle du système de maintenance de Coca-Cola Algérie par la configuration d'une solution de Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO). Contrairement à l'approche précédente, centrée sur l'optimisation des ressources existantes, cette démarche adopte une orientation numérique claire, intégrant des outils technologiques pour repenser en profondeur les modes de gestion, de planification et de suivi des interventions.

Sur le plan managérial, la configuration d'une GMAO contribue à structurer de manière rigoureuse l'ensemble des processus liés à la maintenance, en les articulant autour de flux standardisés et partiellement automatisés. Cette structuration favorise une coordination optimisée entre les

différents acteurs impliqués, tout en assurant une répartition claire des responsabilités. Celle-ci se manifeste de manière indirecte au sein de l'interface utilisateur, à travers l'attribution

de comptes personnalisés configurés selon les rôles de chacun. Ainsi, les responsabilités sont implicitement intégrées dans les droits d'accès et les fonctionnalités disponibles, ce qui renforce la lisibilité organisationnelle et garantit une meilleure traçabilité.

Sur le plan administratif, la GMAO favorise une gestion centralisée et normalisée de l'ensemble des données relatives à la maintenance. Elle permet une meilleure planification des interventions, une traçabilité complète des opérations, ainsi qu'un archivage structuré et automatique des historiques d'équipements, des DI et RI et des consommations de pièces de rechange. Cette centralisation des informations améliore la fiabilité des données, accélère le traitement administratif des demandes d'intervention, et facilite les audits internes ou externes en garantissant la conformité documentaire des opérations réalisées.

Enfin, sur le plan technique, l'adoption d'une GMAO spécialisée ouvre la voie à une gestion plus proactive des actifs industriels : elle permet de planifier les opérations de manière plus fine, d'automatiser certaines tâches, et de faciliter l'accès à l'information pour les techniciens sur le terrain. L'objectif est de réduire les arrêts imprévus, d'augmenter la disponibilité des équipements et d'optimiser l'usage des ressources matérielles et humaines.

La configuration de cette solution s'inscrit donc dans une logique de transformation numérique globale, visant à améliorer l'efficacité opérationnelle du service maintenance. L'ensemble du processus de sélection, de paramétrage et d'évaluation de la GMAO choisie sera détaillé dans les sections suivantes.

3.4.1 Contexte et motivations : vers une orientation stratégique spécialisée

Dans le cadre de cette deuxième approche, il est proposé de moderniser en profondeur le système de maintenance de Coca-Cola Algérie par l'adoption d'une solution complète de Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO). Cette démarche vise à remplacer le module Plant Maintenance (PM) de l'ERP SAP actuellement en usage.

Bien que puissant, le progiciel ERP n'a pas été initialement conçu pour répondre spécifiquement aux exigences des opérations de maintenance. Il intègre certes un module dédié, le PM (Plant Maintenance), mais celui-ci est souvent perçu par les utilisateurs comme complexe et peu intuitif. Selon les retours des équipes terrain, ce module présente également des dysfonctionnements techniques récurrents. Sa structure rigide, ainsi que le recours à un grand nombre de transactions, nuisent à l'efficacité opérationnelle et freinent son appropriation. De plus, l'entreprise n'exploite qu'une partie limitée des fonctionnalités disponibles, principalement en raison de leur complexité d'utilisation et d'une implémentation initiale jugée inadéquate. Pour répondre aux exigences actuelles en matière de digitalisation, de performance, de traçabilité et d'autonomie des équipes de maintenance, il est apparu indispensable de s'orienter vers une solution GMAO dédiée. Celle-ci permettra d'assurer une centralisation efficace des données, une meilleure réactivité, ainsi qu'une gestion optimisée des interventions et des ressources.

3.4.2 Sélection d'une solution GMAO

La sélection d'une solution de GMAO constitue une étape stratégique dans tout projet de digitalisation de la maintenance industrielle. Ce processus ne se limite pas à un simple choix logiciel : il implique une démarche méthodique, alignée sur les besoins spécifiques de l'organisation, ses objectifs à court et long terme, ainsi que sur les contraintes techniques et opérationnelles de son environnement.

Avant d'opérer ce choix, il est toutefois essentiel de caractériser le type de projet GMAO dans lequel s'inscrit l'entreprise. En effet, selon [28] plusieurs formes de projets peuvent être distinguées. Trois grands types se dégagent :

- Le projet de première informatisation, dans lequel la GMAO est introduite pour la première fois afin de structurer des processus manuels ou partiellement assistés.
- Le projet de renouvellement, qui vise à remplacer un système GMAO existant devenu obsolète ou inadapté, souvent dans une logique d'amélioration fonctionnelle, de fiabilité des données et de meilleure intégration des processus.
- Le projet d'intégration dans un ERP, où la maintenance est intégrée à un système de gestion global (type SAP ou autre ERP), impliquant une refonte plus large des procédures de l'entreprise.

Dans le cas de Coca-Cola Algérie, la démarche s'inscrit clairement dans une logique d'intégration visant à remplacer le module PM de l'ERP SAP par une solution dédiée à la gestion de la maintenance. Bien que l'implémentation de la solution soit envisagée, le périmètre du projet ne permet pas d'aller jusqu'à la phase de migration des données ni à une intégration complète au sein de l'ERP. Ce choix a été motivé par la nécessité d'améliorer la réactivité opérationnelle, de renforcer la traçabilité des interventions, et d'optimiser globalement les processus de maintenance, tout en garantissant la continuité des opérations. La présente section retrace les étapes clés de ce processus de sélection. Elle s'organise autour de quatre axes :

- L'identification des besoins réels du terrain ;
- La définition des objectifs stratégiques à atteindre ;
- L'élaboration d'un cahier des charges fonctionnel ;
- Et enfin, le choix de la solution la plus adaptée.

Cette approche intégrée vise à assurer une cohérence entre les attentes métiers, les exigences techniques, et les perspectives d'évolution de l'outil choisi, tout en maximisant la valeur ajoutée pour l'entreprise.

3.4.2.1 Identification des besoins de l'entreprise ECCBC Coca-Cola Algérie

La première phase de cette démarche consiste à identifier avec précision les besoins réels de Coca-Cola Algérie, en s'appuyant à la fois sur un diagnostic de l'existant et sur les attentes des utilisateurs finaux. Dans le cas de Coca-Cola Algérie, plusieurs besoins ont été identifiés :

- Compatibilité avec l'environnement existant : la GMAO doit s'intégrer facilement avec le système SAP ERP PM actuellement en usage. Cette compatibilité permet de garantir une continuité opérationnelle et de faciliter la migration des données historiques.
- Centralisation des données : un besoin majeur réside dans la capacité à regrouper toutes les informations relatives à la maintenance dans une base de données unifiée et accessible.
- Ergonomie et accessibilité : l'outil doit être intuitif, facile à utiliser, et accessible depuis différents terminaux, notamment les smartphones et les tablettes, afin de permettre aux techniciens de terrain un usage fluide.

- Spécificité métier : la solution GMAO doit répondre aux spécificités du métier en proposant des fonctionnalités avancées, adaptées aux exigences de la maintenance industrielle intelligente (prédictive, connectée et optimisée).
- Suivi et traçabilité : l'entreprise a besoin d'un système assurant une traçabilité complète des interventions et générant des historiques fiables ainsi que des indicateurs de performance (KPI) pertinents.

3.4.2.2 Définition des objectifs stratégiques

À partir des besoins identifiés, il convient de définir les objectifs stratégiques de la configuration de la GMAO. Ceux-ci orienteront le choix de la solution la plus adaptée à la vision industrielle de l'entreprise. Les objectifs poursuivis dans le cadre du projet sont les suivants :

- Digitaliser la maintenance : remplacer les pratiques manuelles et le module limité actuel (PM) par une solution numérique complète, dédiée et évolutive.
- Optimiser les processus de maintenance corrective et préventive : grâce à des fonctionnalités de planification intelligente, de notifications automatiques et d'analytique, l'entreprise vise une réduction des arrêts imprévus, une meilleure disponibilité des équipements et une performance accrue des équipes.
- Renforcer le pilotage économique : la GMAO doit offrir un meilleur contrôle budgétaire via l'intégration des achats, la gestion des stocks, le suivi des coûts d'interventions et la visualisation d'indicateurs clés.
- Favoriser une approche collaborative et évolutive : la solution choisie devra être ouverte à l'amélioration continue, permettant à l'entreprise d'apporter ses retours utilisateurs et de participer au développement de nouvelles fonctionnalités, en lien direct avec l'éditeur.

3.4.2.3 Élaboration d'un cahier des charges fonctionnel

À partir des besoins exprimés et des objectifs stratégiques définis en amont, l'élaboration d'un cahier des charges fonctionnel constitue une étape déterminante dans le processus de sélection d'une GMAO. Ce document structurant a pour vocation de formaliser de manière claire et rigoureuse l'ensemble des exigences fonctionnelles, techniques et spécifiques au projet, afin de garantir l'adéquation de la solution avec les attentes de l'entreprise. Il sert également de référence pour l'évaluation comparative des offres disponibles sur le marché.

Dans ce cadre, un cahier des charges détaillé, présenté dans figure F1 en annexe F, a été élaboré. Ce document structurant recense l'ensemble des éléments essentiels à la mise en œuvre du projet, à savoir : le contexte du projet, les objectifs stratégiques, une description du projet articulée en trois phases (Phase 1 : étude analytique; Phase 2 : Configuration de la solution GMAO; Phase 3 : formation et validation), la portée du projet, les exigences fonctionnelles et techniques, les contraintes organisationnelles, les livrables attendus, le planning prévisionnel, les ressources humaines et matérielles mobilisées, les modalités de gestion de projet, ainsi que les critères d'évaluation et de validation.

Un extrait des exigences clés issues de ce cahier des charges est présenté ci-dessous :

- Critères fonctionnels :
 - o Gestion complète des interventions.
 - o Planification et déclenchement automatique des maintenances préventives.
 - o Gestion avancée des stocks et des pièces de rechange, avec vision multi-magasin.

- Traçabilité et historique de toutes les interventions.
- Automatisation des demandes d'achat et suivi des flux d'approvisionnement.
- Critères techniques :
 - Intégration avec le système ERP SAP existant.
 - Interface intuitive et responsive, accessible depuis les terminaux mobiles.
 - Architecture évolutive permettant de futures extensions (ex. : IA, IoT, maintenance prédictive).
 - Sécurité des données et gestion des droits d'accès.
- Critères liés au projet :
 - Modèle de licence clair et adapté à l'organisation.
 - Disponibilité d'un support technique.
 - Ouverture à la personnalisation et à l'amélioration continue en collaboration avec l'éditeur.

3.4.2.4 Choix de la solution GMAO

Contrairement aux approches classiques qui reposent sur une analyse comparative entre plusieurs solutions logicielles du marché [28, 29, 30], le choix de la solution GMAO dans notre cas s'est orienté directement vers **PLM-GMAO**, en raison de son adéquation immédiate et complète avec les exigences fonctionnelles, techniques et organisationnelles préalablement définies.

Développée par **PLM Resources Company**, cette solution s'est rapidement distinguée par sa capacité à répondre précisément aux besoins stratégiques de Coca-Cola Algérie, notamment en matière de digitalisation des processus de maintenance, de traçabilité, d'ergonomie, ainsi que d'intégration avec l'environnement ERP SAP existant dans la mesure où elle a été spécifiquement conçue pour remplacer le module PM de SAP ERP.

Son adoption a été grandement facilitée par la mise à disposition d'un stage pratique, accompagné d'une licence gratuite de six mois. Cette opportunité nous a permis de tester la solution en conditions réelles, d'en valider la pertinence sur le terrain, et de recueillir un retour d'expérience concret de la part des parties prenantes.

Par ailleurs, le caractère évolutif de PLM-GMAO qui est encore en phase d'amélioration constitue un atout supplémentaire. Cette situation nous a permis d'adopter une double posture : celle d'utilisateur actif, expérimentant la solution dans un contexte industriel réel, et celle de contributeur engagé dans l'amélioration continue du produit, en lien direct avec l'éditeur. Le projet ne s'est donc pas limité à une simple phase de configuration, mais a participé à l'enrichissement fonctionnel de la solution, en intégrant les retours des utilisateurs terrain.

Ce partenariat représente ainsi une contribution mutuellement bénéfique, à la fois pour PLM Ressource, qui bénéficie d'un retour d'expérience concret, et pour Coca-Cola Algérie, qui s'implique activement dans le développement d'un outil parfaitement adapté à ses enjeux de maintenance industrielle.

3.4.3 PLM-GMAO : une solution intelligente au service de la maintenance industrielle

PLM-GMAO est une solution web de gestion de maintenance assistée par ordinateur, conçue pour accompagner les entreprises dans la digitalisation, l'automatisation et l'optimisation de leurs opérations de maintenance, en phase avec les exigences de l'industrie 4.0. Elle se distingue par son interface intuitive, son accessibilité mobile, et la standardisation des workflows, facilitant ainsi la prise en main par tous les acteurs, du technicien au responsable maintenance.

La solution permet une gestion proactive et centralisée des données, favorisant une prise de décision rapide, une meilleure maîtrise des coûts, et une amélioration de la productivité des équipes. Rapide à déployer, adaptable à divers secteurs, et évolutive, PLM-GMAO constitue un levier stratégique pour structurer une maintenance efficace et durable.

Afin d'illustrer la richesse fonctionnelle et l'approche intégrée de la solution PLM-GMAO, la figure 3.11 présente l'ensemble des modules proposés par l'application.

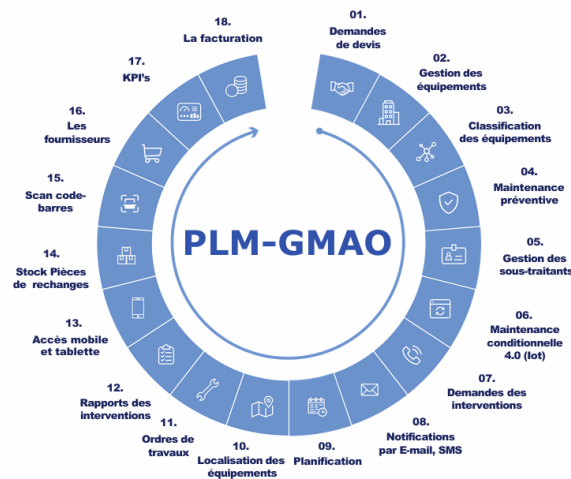


FIGURE 3.11 – Principales fonctionnalités couvertes par la solution PLM-GMAO [2]

Cette représentation met en évidence la couverture complète du cycle de maintenance, allant de la gestion des demandes de devis jusqu'à la facturation, en passant par la planification, le suivi des interventions, la gestion des stocks et la traçabilité des équipements.

Chaque fonctionnalité, qu'il s'agisse du scan des codes-barres, de l'accès mobile, de la maintenance conditionnelle 4.0, ou encore de l'analyse des KPIs, contribue à la structuration d'une démarche proactive, connectée et orientée performance. L'architecture modulaire de PLM-GMAO permet ainsi de répondre avec précision aux besoins spécifiques de chaque organisation industrielle.

3.4.3.1 Fonctionnalités de PLM-GMAO

Les fonctionnalités clés retenues pour la configuration de la solution PLM-GMAO au sein de Coca-Cola Algérie sont présentées à la figure 3.12. Cette sélection a été réalisée en fonction des besoins métiers exprimés, des processus existants et des contraintes techniques internes. Parmi elles, figurent notamment la gestion des équipements, la planification des interventions, la gestion des stocks et des fournisseurs, ainsi que la génération de rapports et de statistiques.

À noter que certaines fonctionnalités avancées telles que la maintenance conditionnelle ou le scan des codes-barres n'ont pas été activées, en raison de l'absence d'infrastructure adéquate au moment du déploiement.



FIGURE 3.12 – Fonctionnalités principales de PLM-GMAO activées chez Coca-Cola Algérie

La figure ci-dessus synthétise les principales fonctionnalités déployées dans le cadre de l'intégration de la GMAO au sein des opérations de maintenance.

3.4.3.2 Analyse économique prévisionnelle (ROI)

L'évaluation économique du retour sur investissement (ROI) lié à la mise en œuvre de la solution GMAO repose sur une démarche progressive, combinant des données réelles disponibles avec des hypothèses estimatives raisonnables. Cette modélisation permet d'appréhender les gains attendus en matière de performance opérationnelle et d'optimisation des ressources.

ROI basé sur la réduction du MDT (donnée réelle) :

À la date de l'étude, la seule donnée quantitative fiable collectée au sein de l'entreprise concerne le Mean Downtime (MDT), c'est-à-dire le temps moyen d'indisponibilité des équipements. Sur une période de trois mois, les arrêts cumulés ont atteint un total de 7199 minutes, soit environ 120 heures de non-production.

Le personnel directement concerné est composé de 6 opérateurs, répartis sur 7 équipements, avec une organisation en 3 shifts par jour. Le coût horaire unitaire par opérateur est évalué à 210 DZD.

Sur cette base, les pertes économiques imputables à ces arrêts ont été calculées comme suit :

- Temps d'arrêt sur 3 mois : 7199 minutes $\approx$ 120 heures
- Coût horaire global : 6 opérateurs $\times$ 210 DZD = 1260 DZD/h
- Pertes sur 3 mois : 120 h $\times$ 1260 DZD = 151 200 DZD $\approx$ 1067 EUR
- Pertes annuelles projetées (par extrapolation) : 1067 $\times$ 4 = 4268 EUR

En considérant une réduction de 40 % du MDT à la suite de l'adoption de la GMAO — hypothèse ambitieuse mais réaliste au vu des retours d'expérience sur ce type de solution — le gain annuel estimé s'élèverait à :

- Gain annuel MDT : $4268 \times 40\% = 1707$ EUR

Par ailleurs, le coût total de mise en place de la solution GMAO est estimé à :

- Investissement total : 10 000 EUR

Dès lors, le ROI prévisionnel direct, défini comme le ratio entre le gain annuel et l'investissement initial, est de :

$$\text{ROI} = \frac{\text{Gain annuel net}}{\text{Coût d'investissement initial}} = \frac{1707}{10000} \times 100 = 17,07\%$$

Interprétation :

Ce résultat met en évidence que, bien que l'analyse ait été exclusivement centrée sur la réduction du MDT, le retour sur investissement (ROI) atteint tout de même 17.07 %. Ce taux témoigne de la performance tangible de la solution GMAO, en soulignant sa capacité à générer des gains mesurables, même dans un périmètre d'évaluation restreint. Il est raisonnable de penser que l'impact global pourrait être encore plus significatif si l'ensemble des leviers d'optimisation étaient pris en compte.

Vers une vision élargie du ROI : prise en compte d'autres leviers de performance :

Dans une optique d'évaluation plus globale de l'impact de la solution GMAO, nous avons élargi notre analyse au-delà de la simple réduction du MDT, en intégrant d'autres leviers de performance potentiellement améliorés par une GMAO. Parmi ces indicateurs, le MTBF (Mean Time Between Failures) s'est révélé particulièrement pertinent pour évaluer la fiabilité des équipements.

Lors de notre présence sur site, l'analyse de données issues du système Evocon, a mis en évidence une fréquence élevée d'arrêts machines, traduisant un MTBF relativement faible et une instabilité opérationnelle. En l'absence de données historiques précises, nous avons procédé à une estimation du MTBF initial à 10 heures, puis simulé une amélioration de 45 % induite par la mise en œuvre d'une GMAO structurée et proactive. Une telle amélioration se traduirait par une réduction significative du nombre d'arrêts, une meilleure stabilité des lignes de production, et donc une augmentation de la disponibilité des équipements. Sur le plan économique, cet effet positif sur le MTBF permettrait de générer des économies indirectes estimées à environ 2500 EUR par an. Ces gains seraient notamment dus à la réduction des coûts de démarrage, à l'optimisation des interventions de maintenance préventive, ainsi qu'à une amélioration du rendement des machines.

Au-delà de ces bénéfices quantifiables, la mise en œuvre d'une solution GMAO apporte également des avantages organisationnels et opérationnels majeurs, souvent sous-estimés, mais essentiels à la performance durable du service maintenance. Parmi ces gains, on peut citer :

- Une réduction du gaspillage des ressources humaines et matérielles.
- Une meilleure gestion des stocks, limitant la surconsommation et les commandes d'urgence.
- Une amélioration de l'organisation du travail, réduisant les temps d'attente et les déplacements inutiles.
- Des gains administratifs grâce à la digitalisation des rapports, des ordres de travail et au suivi en temps réel le statut des interventions.
- La centralisation des données de maintenance, qui permet de faciliter l'accès à l'information et de réduire considérablement le temps consacré à la recherche parmi des supports dispersés.

En cumulant ces effets, le gain annuel global estimé pourrait raisonnablement atteindre 60000 EUR, ce qui porterait le ROI à 60 % et un temps de retour de 1.66 ans $\approx$ 20 mois.

$$\text{ROI} = \frac{\text{Gain annuel net}}{\text{Coût d'investissement initial}} = \frac{6000}{10000} \times 100 = 60\%$$

$$\text{Temps de retour} = \frac{\text{Coût d'investissement initial}}{\text{Gain annuel net}} = \frac{10000}{6000} = 1,66 \text{ ans}$$

Ce scénario, bien qu'estimatif, reste tout à fait envisageable au regard des bénéfices généralement constatés lors de la mise en œuvre de solutions GMAO similaires.

Conclusion

Le ROI initialement calculé sur la seule base du MDT montre un impact limité (17 %). Toutefois, cette approche est réductrice, car elle ne prend pas en compte les bénéfices plus globaux de la transformation digitale engagée. En élargissant la modélisation à d'autres facteurs de performance tels que le MTBF, la stabilité des équipements, la productivité indirecte et la meilleure gestion des ressources, l'entreprise peut raisonnablement viser un ROI de 60 %, avec un amortissement du projet en moins de deux ans. Cela confirme la pertinence stratégique de l'adoption d'une solution GMAO dans un contexte de modernisation industrielle.

3.4.4 Méthodologie de configuration et déploiement opérationnel de la GMAO

La configuration de la solution PLM-GMAO a été structurée selon une démarche en trois phases complémentaires.

3.4.4.1 La phase préparatoire

La phase préparatoire constitue une étape de planification stratégique, au terme de laquelle l'équipe projet dispose d'un périmètre clairement défini, d'une enveloppe budgétaire validée, d'une organisation de projet établie, d'un planning prévisionnel, ainsi que des méthodes de pilotage et de gestion associées.

Cette phase, déjà présentée dans les sections précédentes notamment à travers l'identification des besoins, la définition des objectifs stratégiques et l'élaboration du cahier des charges (voir annexe F, figure F1) , pose les fondations nécessaires à la réussite de la mise en œuvre de la solution PLM-GMAO.

3.4.4.2 La phase d'analyse et de conception

La phase d'analyse et de conception constitue une étape fondamentale dans la démarche de configuration de la GMAO. Elle a pour objectif de clarifier en profondeur les besoins fonctionnels de service maintenance, de modéliser les processus cibles en cohérence avec les fonctionnalités natives de la solution PLM-GMAO, et d'identifier les apports spécifiques que celle-ci peut offrir en termes de valeur ajoutée. Les processus ainsi redéfinis font l'objet d'une documentation structurée et exhaustive, qui constitue une référence essentielle pour les phases suivantes.

- 1. Familiarisation avec le logiciel : installation, documentation et exercices pratiques**

Dans un premier temps, la société éditrice du logiciel, PLM-Ressources Company, a fourni un programme de formation initiale destiné à faciliter la prise en main du logiciel par l'équipe projet. Cette étape comprenait :

- L'installation du logiciel sur les postes de travail concernés.
- La mise à disposition d'un manuel utilisateur détaillé.
- L'organisation de réunions explicatives pour la présentation des principales fonctionnalités.
- Une série d'exercices pratiques permettant de se familiariser avec les modules clés de la GMAO.

Cette formation préliminaire a permis à l'équipe projet de mieux comprendre l'architecture du système et ses capacités d'adaptation aux besoins spécifiques de l'organisation.

2. Modélisation des nouveaux processus

A la suite de la formation dispensée par la société éditrice, de nouveaux processus optimisés ont pu être modélisés pour l'entreprise Coca-Cola Algérie. Cette modélisation s'est appuyée sur la compréhension des fonctionnalités, des types de comptes utilisateurs et des flux de la solution GMAO, en les adaptant aux besoins spécifiques du service maintenance de l'entreprise.

Chaque processus modélisé a fait l'objet d'une validation par les parties prenantes (Responsable maintenance et Responsable méthode), afin d'assurer sa pertinence opérationnelle et son acceptabilité organisationnelle.

L'ensemble des processus cibles a été documenté sous forme de diagrammes, couvrant les trois types de maintenance pratiqués au sein de l'entreprise, à savoir : la maintenance corrective, la maintenance préventive hebdomadaire et la maintenance préventive annuelle. La présentation détaillée de ces derniers est illustrée ci-après dans les figures figure 3.13, figure 3.14 et figure 3.15.

La maintenance corrective :

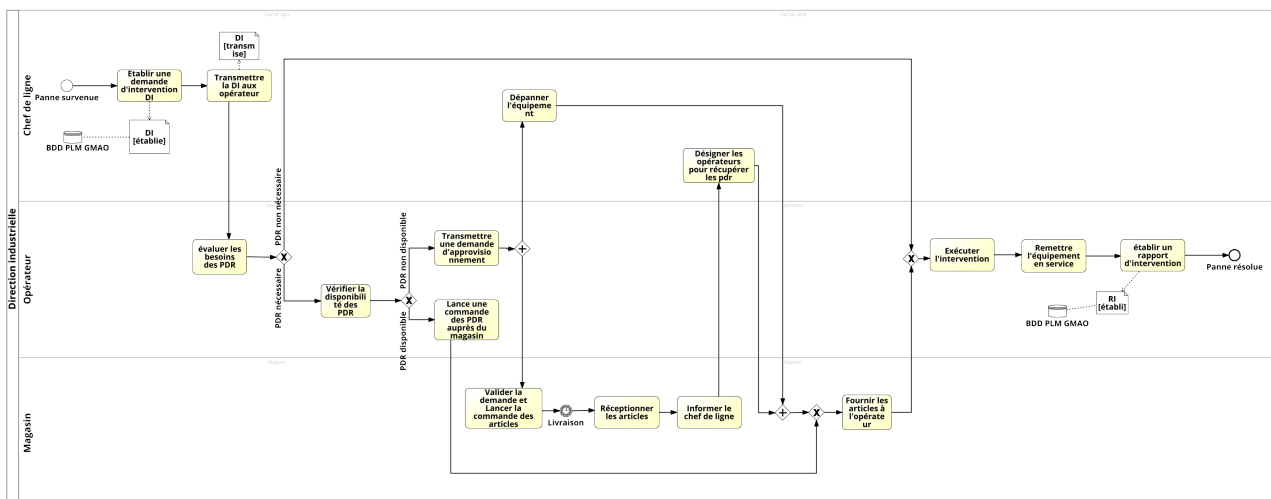


FIGURE 3.13 – Processus de maintenance corrective optimisé par la solution PLM-GMAO

La figure 3.13 illustre le processus de maintenance corrective optimisé grâce à l'intégration de la solution PLM-GMAO. De nombreuses améliorations y ont été apportées, notamment l'harmonisation du processus entre les interventions mécaniques et électriques, désormais traitées de manière identique. Les principales étapes sont les suivantes :

- Création de la Demande d'Intervention (DI) : Le chef de ligne initie directement une DI dans la GMAO, en renseignant toutes les informations nécessaires à une prise en charge efficace de l'anomalie.
- Identification et vérification des pièces de rechange (PDR) : L'intervenant, via son interface dédiée dans la GMAO, peut immédiatement consulter la disponibilité des PDR. En cas de rupture de stock, une demande d'approvisionnement peut être générée automatiquement. Celle-ci est ensuite soumise à la validation du responsable magasin, qui peut soit lancer la commande, soit la refuser selon les priorités opérationnelles.
- Gestion des retraits de pièces : Une demande de retrait est automatiquement créée et validée par le responsable magasin dans la GMAO, assurant une traçabilité complète des flux de pièces.
- Rédaction du compte rendu d'intervention : L'intervenant saisit immédiatement son rapport technique dans la GMAO à l'issue de l'intervention. Ce compte rendu est généré de manière structurée, et archivé directement dans le système.

La maintenance préventive hebdomadaire :

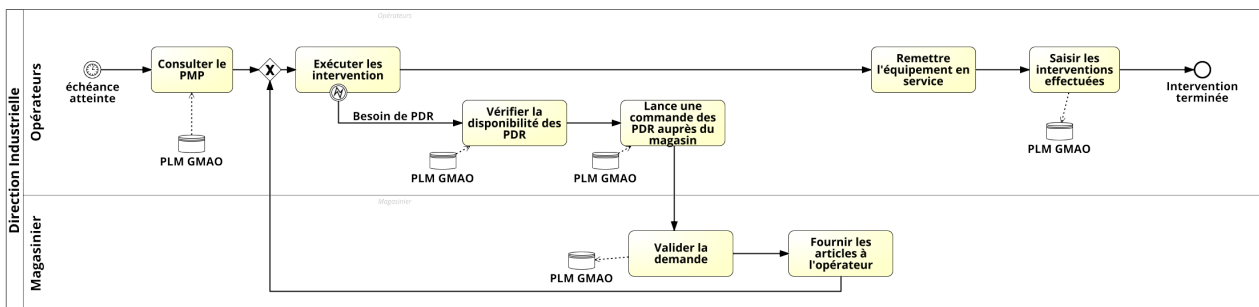


FIGURE 3.14 – Processus de maintenance préventive hebdomadaire optimisé par la solution PLM-GMAO

La figure 3.14 illustre le processus de maintenance préventive hebdomadaire tel qu'il a été optimisé à l'aide de la solution PLM-GMAO. Plusieurs améliorations notables ont été identifiées, notamment :

- La consultation directe des activités à réaliser via l'interface PLM-GMAO. En cas de complexité particulière, l'opérateur peut accéder immédiatement aux modes opératoires intégrés dans le système. De plus, lorsqu'une pièce de rechange est nécessaire, l'opérateur peut vérifier en temps réel sa disponibilité via l'interface.
- Le processus de rédaction du rapport d'intervention est similaire à celui défini pour la maintenance corrective, assurant ainsi une homogénéité dans le traitement et la traçabilité des interventions.



- La réduction de l'usage du papier et du temps consacré à la rédaction des documents. En effet, au lieu de remplir des check-lists papier, l'opérateur accède directement aux activités à réaliser via l'interface GMAO. Il peut ensuite modifier le statut de chaque tâche (par exemple : "en cours") au fur et à mesure de leur exécution. Lorsque le chef de zone valide la conformité de l'intervention, celle-ci est automatiquement marquée comme terminée et clôturée dans le système.
- L'identification et la vérification des pièces de rechange (PDR) directement par l'opérateur, comme dans le processus de maintenance corrective optimisé via PLM-GMAO.

Une étape déterminante de cette phase a porté sur la définition des données à intégrer dans la GMAO, en lien avec les exigences opérationnelles. Un travail de filtrage, de structuration et de nettoyage des données a été mené afin de garantir leur cohérence et leur exploitabilité.

Les données utilisées pour cette phase couvrent une période de trois mois : mai, juin et juillet 2024. Ce choix s'explique par le fait que cette période concentre trois types de maintenance :

- Maintenance corrective.
- Maintenance préventive hebdomadaire.
- Maintenance préventive annuelle.

Cette combinaison permet d'évaluer l'efficacité de la solution GMAO dans la gestion de l'ensemble des typologies de maintenance, en assurant une couverture représentative des activités réelles de l'entreprise. Les données à intégrer dans la GMAO ont été classées en cinq grandes catégories :

Liste des utilisateurs :

Une liste des utilisateurs a été élaborée dans le but d'identifier les acteurs clés impliqués dans le processus de maintenance, en amont de l'attribution des comptes et des droits d'accès dans la GMAO. La liste comprend notamment : le responsable maintenance, le planificateur mécanique, le planificateur électrique, le chef de zone, le chef de ligne, les opérateurs des principaux équipements (opérateur souffleuse, opérateur soutireuse, opérateur étiqueteuse, opérateur palettiseur, opérateur fardeuse, opérateur banderoleuse et étiqueteuse palette), ainsi que le responsable méthodes, le chef de service électrique, l'ingénieur en électricité et automatisme, et le responsable magasin.

Organisation des shifts :

Concernant l'organisation du temps de travail, l'entreprise fonctionne selon un régime en trois équipes (shifts) par jour pour le personnel opérationnel. Dans le cadre de cette étude, un échantillon représentatif a été retenu, correspondant au shift du matin, soit de 6h à 14h. En ce qui concerne les personnels d'encadrement (responsables, planificateurs), leur plage horaire de travail s'étend de 8h à 16h, conformément à l'organisation en vigueur dans l'entreprise.

Nomenclature des équipements :

Pour structurer la base de données technique dans la GMAO, nous avons adopté une nomenclature technique complète des équipements, couvrant les niveaux équipement, ensemble, et organe, avec une codification claire et homogène.

Conformément aux recommandations de [31], nous avons opté pour une décomposition fonctionnelle (voir Annexe E, tableau E.2), en lien avec les différentes arborescences (fonctionnelle, géographique et de famille), qui convergent dans la pratique vers l'arborescence technologique. Cette organisation permet d'accéder à un équipement à partir de différentes logiques de recherche (fonction, localisation, famille technique), ce qui facilite grandement la configuration dans la GMAO.

Dans ce cadre, une catégorisation fonctionnelle des équipements en cinq groupes a été retenue, basée sur les étapes du processus industriel de la ligne PET 20-18 :

- Production des bouteilles : Souffleuse.
- Conditionnement primaire : Soutireuse, Codeur.
- Étiquetage et marquage : Étiqueteuse, Étiqueteuse palettes.
- Palettisation et emballage : Fardeuse, Palettiseur, Banderoleuse.
- Manutention et transport interne : Convoyeurs.

Pour assurer la standardisation, une codification systématique des équipements a été appliquée selon le format suivant :

[Ligne] - [Catégorie] - [Equipement] - [Numéro de l'équipement]

Où :

- Ligne : Identifiant de la ligne de production (L2018 pour la ligne 20/18)
- Catégorie : Code fonctionnel basé sur le groupe défini ci-dessus (ex. PDB pour « Production des bouteilles ») (voir Annexe E, tableau E.1)
- Equipement : Abréviation normalisée du nom de l'équipement (ex. SF pour Souffleuse)
- Numéro de l'équipement : Identifiant séquentiel de l'équipement sur la ligne. Ce numéro est formaté sur trois chiffres (ex. 001), afin de prévoir d'éventuelles extensions ou modifications futures

Exemple :

- La Souffleuse de la ligne de production pet 20/18 est codifiée comme suit : L2018-PDB-SF-001

De plus, une liste des manuels d'utilisation des équipements a également été préparé pour l'intégrer dans la base documentaire de la GMAO.

Liste des interventions de maintenance :

Trois types d'interventions ont été identifiés et préparés pour intégration dans la GMAO :

- Interventions correctives : Elles proviennent d'une base de données préalablement nettoyée (voir chapitre 2 section 4.2), et sont présentées dans l'annexe D.1, figure D1, contenant les champs suivants : Date, équipement, sous-ensemble, symptôme constaté, cause identifiée, solution appliquée, mode de panne, type d'intervention, durée d'arrêt, durée de réparation, intervenant, shift.
- Les interventions préventives hebdomadaire issue du plan de maintenance préventive hebdomadaire (PMP) pour tous les équipements : programme basé sur l'expérience terrain et les recommandations constructeurs (voir Annexe B, figure B2), incluant les tâches de nettoyage, vérification, lubrification, les organes concernés, ainsi que les outils nécessaires.
- Les interventions préventives annuelle issue du plan de maintenance préventive annuelle pour tous les équipements : programme de révision générale intégrant le remplacement planifié des pièces critiques (voir Annexe B, figure B6).

Liste des pièces de rechange (PDR) :

Dans le cadre de l'optimisation de la gestion des pièces de rechange via la solution PLM-GMAO, une première liste de pièces a été constituée en s'appuyant sur deux critères principaux :

- La fréquence de consommation, déterminée à partir de l'historique des pannes.
- Les pièces prévues dans le plan de maintenance annuel.

Cette sélection visait à établir une base de données pertinente et fonctionnelle pour le paramétrage initial du module « Magasin ».

Au sein de l'entreprise Coca-Cola Algérie, la gestion physique des pièces repose historiquement sur une logique d'organisation hiérarchique en rayon / bloc / bac. Or, le système PLM-GMAO ne disposant pas d'un champ spécifique pour la notion de "bloc", une réorganisation du stock magasin a été nécessaire afin de garantir une compatibilité avec les structures logicielles disponibles.

Deux grandes catégories de magasins ont été définies selon le type et le poids des pièces :

- Magasin 1 (MAG I) : pièces légères à semi-lourdes, réparties en trois zones (W, X, U) couvrant les composants d'usage général, de transmission, pneumatiques et électriques.
- Magasin 2 (MAG II) : pièces lourdes, réparties en quatre zones (A, B, C, D) correspondant aux composants structurels, de transport et de filtration. Afin d'automatiser l'attribution des pièces aux différentes catégories, un script Python a été développé. (Voir Annexe E, figure E1)

Le résultat final, regroupant les pièces de rechange avec leurs références, zones de stockage, catégories et fournisseurs associés, est présenté en Annexe E, tableau E.7 et tableau E.8.

3.4.4.3 La phase de réalisation

La phase de réalisation consiste à paramétrer le progiciel afin de prendre en charge les processus définis et à intégrer les données spécifiées lors de la phase de conception.

1. Paramétrage général :

Définition des rôles utilisateurs :

La version standard de la solution PLM-GMAO mise en œuvre permet l'utilisation de cinq profils utilisateurs comme illustré dans la figure 3.16, ce qui a nécessité une répartition optimisée en fonction des besoins de l'entreprise.



FIGURE 3.16 – Les différents profils dans la solution PLM-GMAO

La Figure 6 présente les différents profils disponibles au sein de la solution PLM-GMAO, chacun ayant été attribué aux membres préalablement identifiés de Coca-Cola Algérie. La répartition des rôles s'est organisée comme suit :

- Responsable Maintenance : ce profil a été affecté au responsable maintenance de l'entreprise, aux planificateurs (mécanique et électrique), ainsi qu'au chef de zone.
- Demandeur : dans le contexte de Coca-Cola Algérie, ce rôle est occupé par le chef de ligne.
- Agent de Maintenance : ce profil correspond aux opérateurs.
- Magasinier : Ce rôle correspond au responsable du magasin.
- Administrateur : en charge des paramétrages avancés et de la supervision globale du système.

Intégration des éléments d'identité (logo, devise, langue) :

Dans le cadre du déploiement de la solution PLM-GMAO, une personnalisation a été réalisée afin d'adapter l'interface aux standards graphiques et culturels de Coca-Cola

Algérie. Cette personnalisation comprend notamment l'intégration des éléments d'identité visuelle tels que le logo de l'entreprise, sa devise monétaire, ainsi que la langue d'usage adaptée au contexte local.

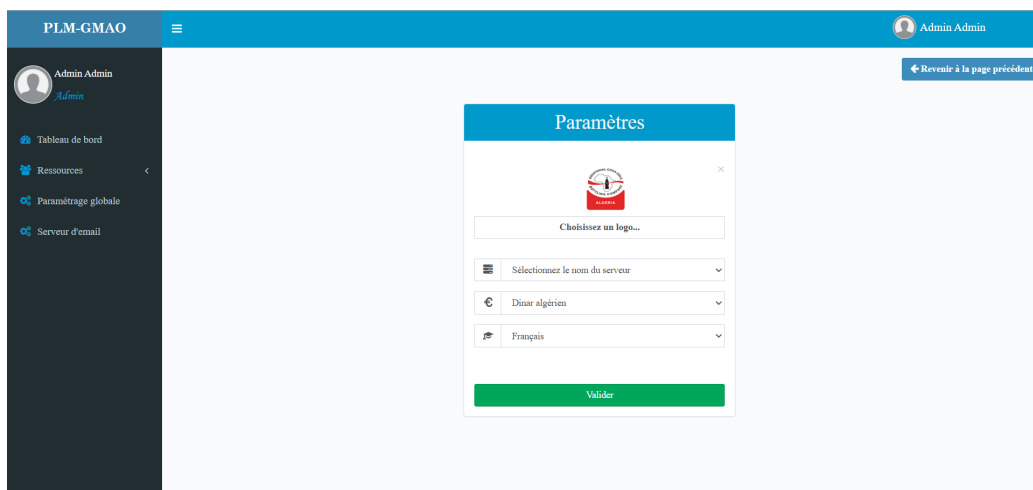


FIGURE 3.17 – Intégration des éléments d'identité (logo, devise, langue)

La figure 3.17 illustre l'intégration des éléments d'identité propres à Coca-Cola Algérie dans la solution PLM-GMAO, notamment :

- Le logo de l'entreprise, assurant une cohérence visuelle avec l'identité de marque.
- La langue d'utilisation, paramétrée en français pour correspondre aux habitudes des utilisateurs,
- La devise monétaire, fixée en dinar algérien (DZD) pour le suivi des coûts, la gestion des pièces de rechange et les commandes.

Ces paramétrages renforcent la personnalisation du système tout en facilitant son appropriation par les équipes locales.

2. Intégration des données :

Dans un premier temps, les données de base telles que les équipements, les pièces de rechange présélectionner, les fournisseurs, ont été intégrés afin de faciliter l'utilisation des différents modules de la solution GMAO, ceux-ci sont présentés dans la figure F2 et la figure F3 en annexe F.

L'intégration des données fonctionnelles, quant à elle, a été structurée en fonction des profils utilisateurs définis précédemment. Chaque type d'utilisateur a ainsi bénéficié d'un paramétrage spécifique, adapté à ses besoins opérationnels et à ses droits d'accès au sein de l'entreprise.

Afin d'illustrer concrètement ces implémentations, des extraits fonctionnels seront présentés, accompagnés de justifications précisant l'attribution de chaque compte utilisateur et les fonctionnalités qui lui sont associées.

Le Chef de ligne :

Le compte « Demandeur » a été attribué au chef de ligne, en cohérence avec l'organisation interne et les fonctionnalités standards de la version actuelle de l'application PLM-GMAO. En tant que responsable direct de la performance de la ligne, le chef de ligne est chargé de créer les Demandes d'Intervention (DI) afin de signaler les anomalies détectées. Ces demandes sont alors visibles par le chef de zone, qui supervise les interventions sur la ligne cible. Le chef de ligne peut également suivre en temps réel l'évolution du statut des DI.

Conformément à la stratégie adoptée par l'entreprise, la détection initiale des anomalies incombe aux opérateurs, car se sont eux qui sont au contact direct des équipements. Toutefois, la décision d'arrêter la ligne ou non relève du chef de ligne, qui évalue la

criticité de l'anomalie et détermine les actions à entreprendre. En créant la DI, il formalise l'anomalie, informe l'opérateur des tâches à exécuter, et intègre l'intervention dans le workflow global du chef de zone. Ce dernier peut, si nécessaire, annuler l'intervention ou ajuster les actions prévues, fonction de la situation opérationnelle.

Ce choix organisationnel permet de rester aligné avec les fonctionnalités natives de la solution PLM-GMAO, tout en assurant une gestion structurée et hiérarchisée des interventions.

Demande intervention

Référence: jj/mm/aaaa --:--

Titre: Urgente

Choisissez une catégorie: Choisissez un équipement: Choisissez un organe: Choisissez un symptôme:

Choisissez une cause: +

Choisissez un remède:

Choisissez le Récepteur:

Agent de maintenance à notifier: Choisissez l'agent:

☐ Equipement arrêté

Entrer une description: 1

Date début: jj/mm/aaaa Date fin: jj/mm/aaaa

Afficher 10 éléments Imprimer Copier PDF Excel Rechercher...

Réf	Titre	Date limite	Priorité	Responsable maintenance	Équipement	Etat de l'équipement	Cause	Statut
DI320	Panne étiqueteuse	07/08/2024 12:30	🚨	Chef de zone	Palettiseur	En panne	Mal positionnement des pinces porte ventouse	🕒 ⚙️ 🛑
DI1100	Panne Souffleuse	11/08/2024 11:30	🚨	Chef de zone	Souffleuse	En panne	Cisaillage du ressort de la tournette	🕒 ⚙️ 🛑
DI314	Panne Convoyeur	31/07/2024 15:00	🚨	Chef de zone	Convoyeurs	En service	Blocage des bouteilles	🕒 ⚙️ 🛑
DI311	Panne Convoyeur	31/07/2024 10:00	🚨	Chef de zone	Convoyeurs	En service	Blocage des bouteilles	🕒 ⚙️ 🛑

FIGURE 3.18 – L'interface PLM-GMAO dédié au chef de ligne

La figure 3.18 présente l'interface dédiée au chef de ligne, lui permettant de créer des demandes d'intervention (DI), de suivre leur état d'avancement, et de visualiser les historiques des demandes. L'élément (1) désigne la fenêtre qui s'affiche lors de la création d'une DI. Cette interface comprend plusieurs champs obligatoires à renseigner, notamment : l'équipement concerné, le sous-ensemble technique, la cause apparente, les symptômes observés et toute autre information pertinente pour le traitement de la demande.

L'opérateur :

Le profil « Agent de maintenance » a été assigné aux opérateurs car ils réalisent concrètement les interventions sur les équipements. Leur rôle dans la GMAO consiste à recevoir les ordres de travail, exécuter les tâches, rédiger le compte rendu d'intervention et, le cas échéant, demander des pièces de rechange. Ce profil assure la continuité entre le diagnostic, l'action et la traçabilité des opérations. Nous illustrons ci-dessous (figure 3.19 et figure 3.20) quelques fonctionnalités accessibles à l'opérateur de maintenance.

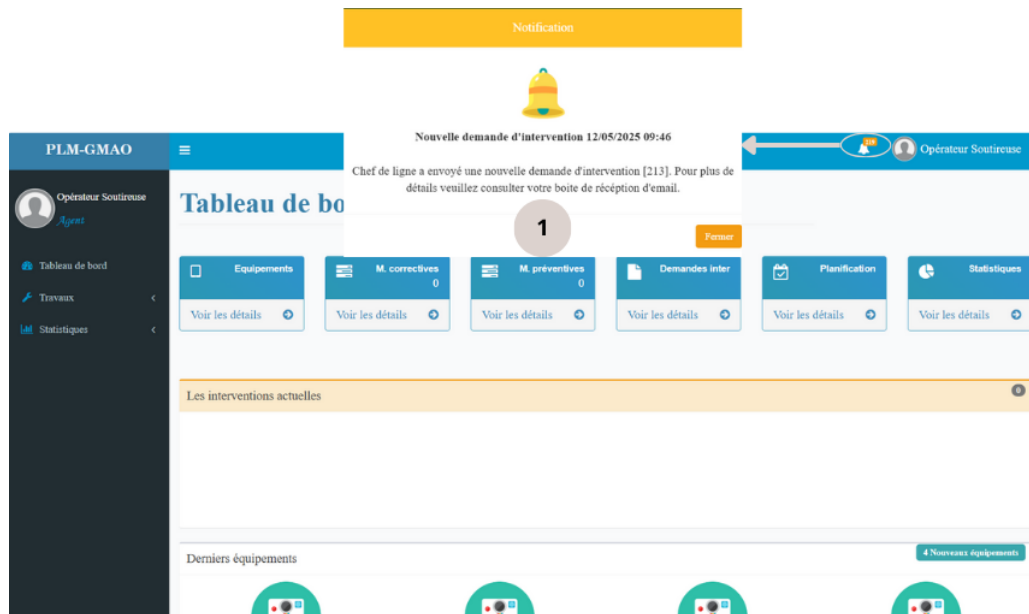


FIGURE 3.19 – L'interface PLM-GMAO dédié a l'opérateur

La figure 3.19 présente le tableau de bord de l'opérateur, l'élément (1) correspond à l'interface qui s'affiche lorsqu'il clique sur une notification. Cette vue permet à l'opérateur de visualiser les détails de l'intervention à réaliser ainsi que les informations associées.

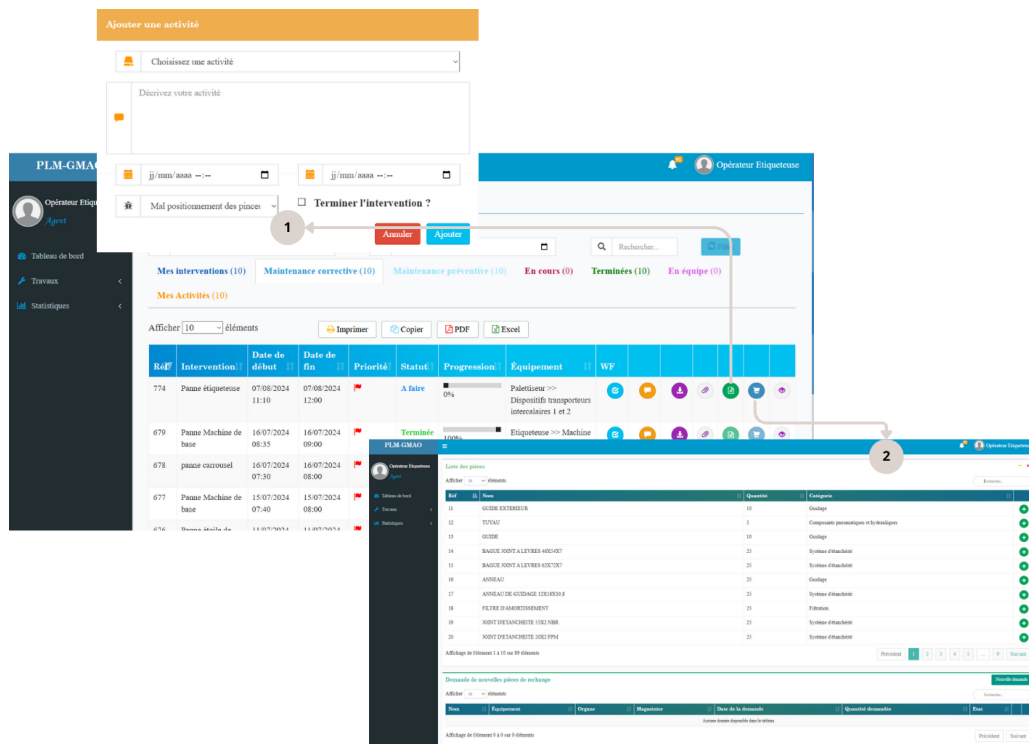


FIGURE 3.20 – Interface d'exécution des interventions

La figure 3.20 présente les fonctionnalités disponibles pour l'opérateur lors de l'exécution d'une intervention. L'élément (1) illustre la saisie du compte-rendu d'intervention, tandis que l'élément (2) correspond à la demande de pièce de rechange (PDR). En cas de rupture de stock, cette fonctionnalité offre également la possibilité d'envoyer une demande au responsable magasin afin de déclencher une commande.

Le chef de zone :

Le rôle de « Responsable maintenance » a été attribué au chef de zone. Celui-ci joue un rôle clé dans la validation technique et organisationnelle des demandes d'intervention. Il est également responsable du suivi en temps réel des interventions dans sa zone et de l'évaluation des performances des opérateurs. Nous présentons ci-après (figure 3.21 et figure 3.22) les fonctionnalités destinées au chef de zone.

Convertir en intervention 1 2

07/08/2024 11:10 07/08/2024 12:00

☐ Joindre un fichier

Urgente A faire

Changer les ventouse
Régler les pinces de ventouse

☐ Associer un workflow

Attribuer à un seul agent
Attribuer à plusieurs agents

Assigné à:
Opérateur Etiquetteuse

☐ Ajouter un sous traitant

Imprimer Copier PDF Excel

	Demandeur	Équipement	Symptôme	Cause	Remède	Etat
305	DE320	Paletteuse	Module de chauffe	Chute des bouteilles	Cisaillage du ressort de la tourlette	Changement de PDR
301	DE314	Paletteuse	Dispositifs transporteurs intercalaires 1 et 2	Mal positionnement des pinces porte ventouse	Ajustement des pinces porte ventouse	
300	DE311	Convoyeur	Convoyeurs >>> Convoyeur à air (Luftraporteur k970-k1)	Détection visuelle de la défaillance	Blocage des bouteilles	Réglage
274	DE220	Paletteuse	Module de transfert	Détection visuelle de la défaillance	Blocage des bouteilles	Réglage
295	DE313	Paletteuse	Table de transfert	Non prise des intercalaires	Jeu entre l'accouplement et la clavette dans le servomoteur	Synchronisation des étiquettes

FIGURE 3.21 – Validation des demandes et transformation en OT

La figure 3.21 présente les fonctionnalités permettant au chef de zone de valider les demandes d'intervention émises par les chefs de ligne. Les éléments (1 et 2) illustrent le complément des informations techniques ou modifications apporté par le chef de zone, ainsi que la définition des échéances. Cette étape permet la transformation de la DI en ordre de travail (OT) « Conversion en intervention ».

Intervention: Panne Machine de base

Informations Documents Pièces détachées Activités

Statut Terminée

Progression 100%

Agent Paletteuse Opérateur

Priorité Importante

Coût 87.5 DZD

Équipement Paletteuse >>> Machine de base pal

Demandeur Chef de ligne

Date Demande 12/05/2023 21:51

Date de début 21/07/2024 07:35

Date de fin 21/07/2024 08:00

Description: Le trébuchement des fileux est causé par un mauvais positionnement des pignons du tapis, dû à l'accumulation de déchets et de graisse. Un nettoyage et un ajustement de l'alignement des pignons sont nécessaires.

Afficher 6 éléments Imprimer Copier PDF Excel

Réf	Intervention	Dates prévues	Priorité	Agent	Statut	Progression	Équipement	Coût maintenance	WF
759	Panne Machine de base	21 juil. 2024 07:35 21 juil. 2024 08:00	Importante	Opérateur Paletteuse	Terminée	100%	Paletteuse >>> Machine de base pal	87.5 DZD	
758	Panne Station de pré regroupement et regroupement	20 juil. 2024 11:20 20 juil. 2024 12:00	Importante	Opérateur Paletteuse	Terminée	100%	Paletteuse >>> Regroupement et pré-regroupement	140 DZD	
757	Panne table de transfert	20 juil. 2024 07:00 20 juil. 2024 08:00	Importante	Opérateur Paletteuse	Terminée	100%	Paletteuse >>> Table de transfert	245 DZD	
756	Panne Machine de base	19 juil. 2024 07:40 19 juil. 2024 08:00	Importante	Opérateur Paletteuse	Terminée	100%	Paletteuse >>> Machine de base pal	70 DZD	
755	Panne table de transfert	16 juil. 2024 07:00 16 juil. 2024 08:00	Importante	Opérateur Paletteuse	Terminée	100%	Paletteuse >>> Table de transfert	1050 DZD	

FIGURE 3.22 – Suivi des interventions

La figure 3.22 présente le tableau de suivi des interventions correctives, mis à la disposition du chef de zone pour un pilotage opérationnel en temps réel. Ce tableau permet de visualiser l'état d'avancement des interventions ainsi que les opérateurs impliqués. L'élément (2) met en évidence la possibilité de consulter en détail chaque intervention, avec l'ensemble des informations associées.

Le responsable magasin :

Le profil « Magasinier » a été attribué au responsable du magasin de pièce de rechange. Ce dernier assure la gestion des pièces de rechange (PDR), en garantissant leur disponibilité et leur traçabilité. Son rôle dans la GMAO est essentiel pour éviter les ruptures critiques et assurer une réactivité optimale lors des interventions. Nous présentons ci-dessous (figure 3.23) quelques-unes des fonctionnalités qui lui sont accessibles dans la solution PLM-GMAO.

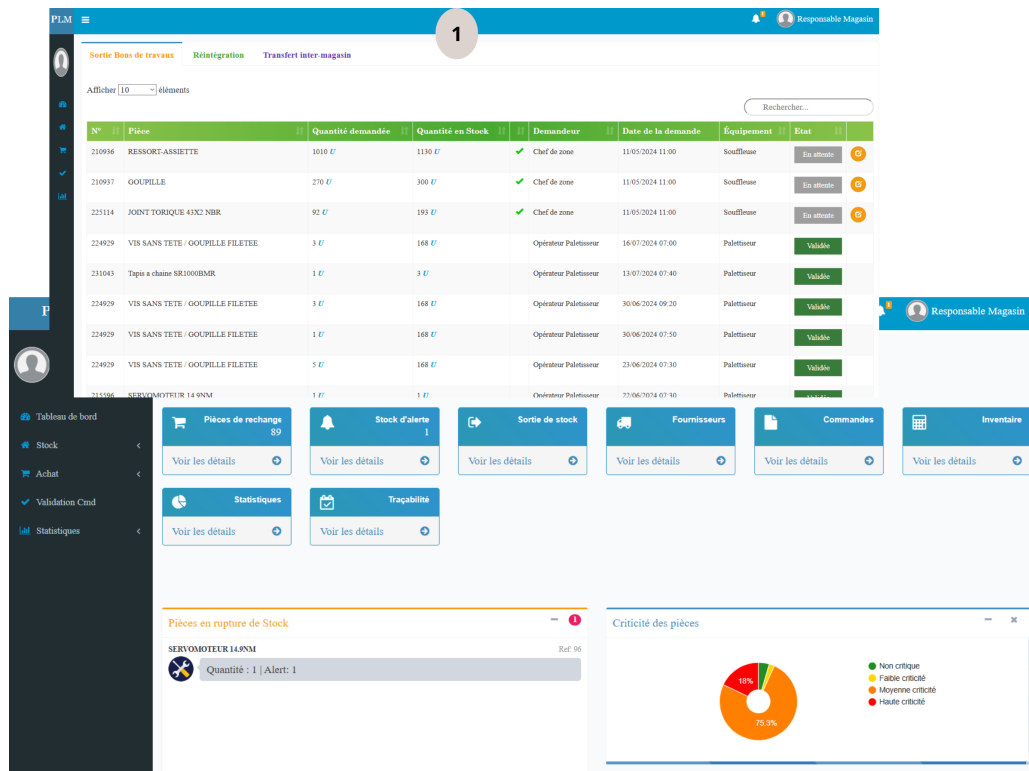


FIGURE 3.23 – L'interface PLM-GMAO dédié au responsable magasin

La figure 3.23 présente l'interface dédiée au magasinier, intégrant différents modules spécifiques à la gestion des pièces de rechange. Elle permet notamment de consulter les stocks de PDR, de gérer les commandes, de recevoir des alertes en cas de seuil critique, et de suivre l'ensemble des mouvements de pièces (entrées, sorties, transferts). L'élément (1) illustre précisément le module de suivi des mouvements de stock.

Le planificateur mécanique :

Le rôle de « Responsable Maintenance – Planification » a été attribué au planificateur mécanique, chargé de définir les plans de maintenance préventive sur l'ensemble des équipements. Il organise les interventions planifiées, et ajuste les fréquences selon le retour d'expérience. Les figure 3.24 et figure 3.25 ci-dessous illustrent un aperçu des fonctionnalités qui lui sont accessibles au sein de la solution PLM-GMAO.

FIGURE 3.24 – Les principales étapes pour la création d'intervention préventive

Cette figure montre les principales étapes de création d'une intervention préventive, telles qu'elles apparaissent à l'écran et numérotées : (1) Définition de la fréquence ; de l'équipement concerné ; du sous-ensemble ciblé ; ainsi que la durée estimée de l'intervention, (2) Attribution de l'intervention à un ou plusieurs agents de maintenance, (3) Définition du niveau de criticité ; description détaillée des tâches à réaliser ; avec possibilité d'y joindre des documents techniques.

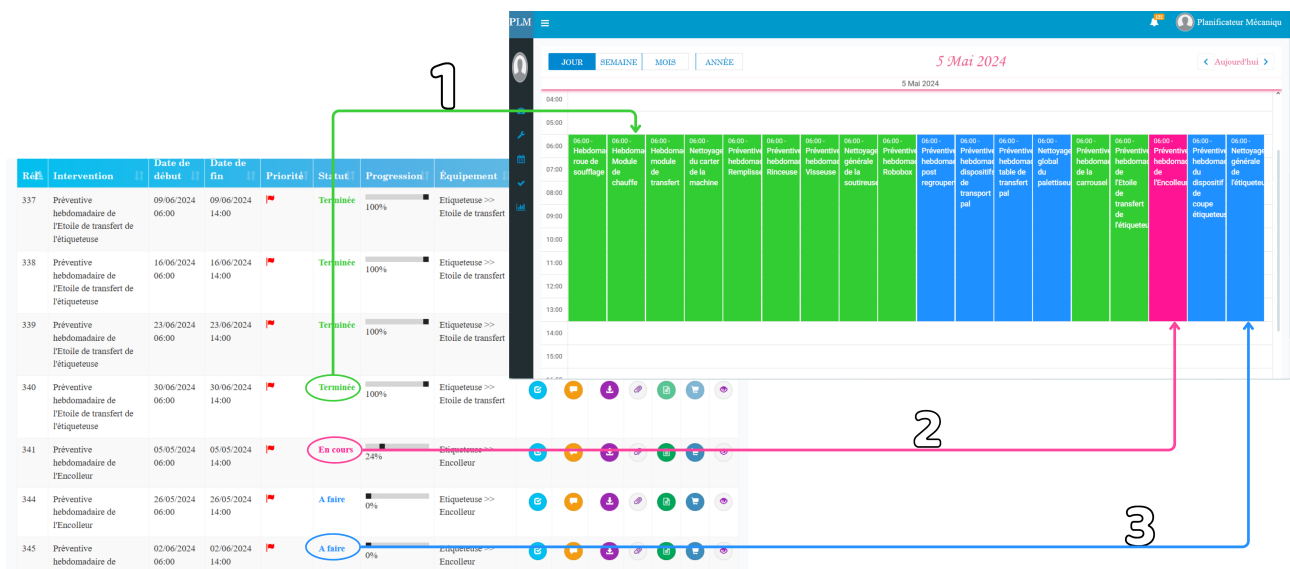


FIGURE 3.25 – Tableau de visualisation de l'état d'avancement du PMP

La figure 3.25 présente deux tableaux permettant de visualiser l'état d'avancement des interventions préventives, avec un code couleur intégré dans l'interface :

- (1) Vert : intervention terminée.

- (2) Rose : intervention en cours.
- (3) Bleu : intervention à réaliser.

Ce système visuel permet au planificateur d'évaluer rapidement le degré d'exécution du programme de maintenance, de détecter d'éventuels retards, et de réagir en conséquence.

Le responsable maintenance :

Le compte « Responsable maintenance » est attribué au responsable la maintenance de l'entreprise. Ce rôle permet un accès à l'ensemble des tableaux de bord décisionnels et des indicateurs de performance. Il offre une vue consolidée sur les interventions, la disponibilité des équipements, la consommation de pièces et l'efficacité des équipes.

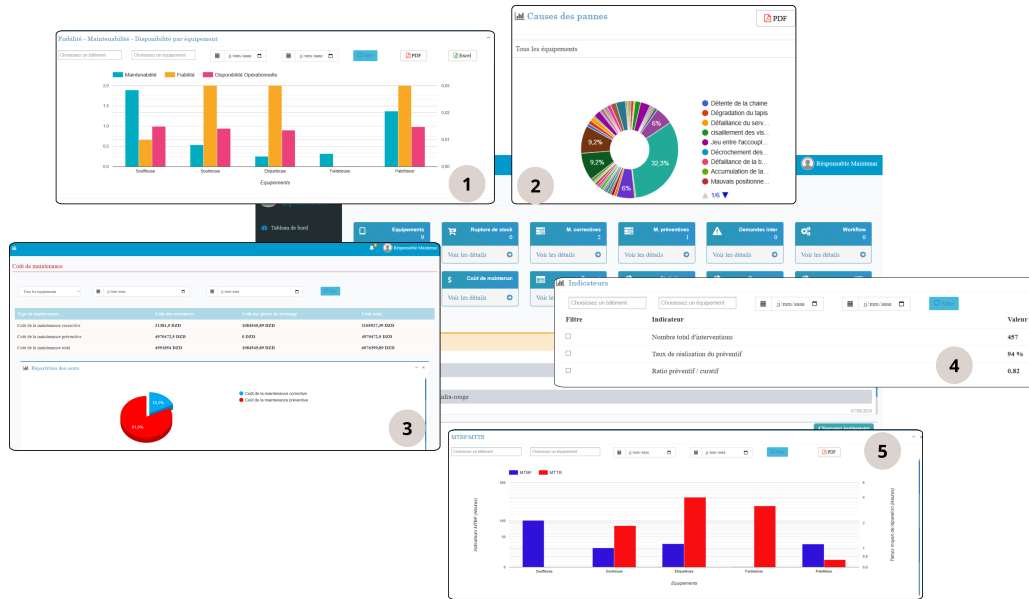


FIGURE 3.26 – Tableau de bord du responsable maintenance

La figure 3.26 présente le tableau de bord du responsable maintenance, offrant une vue consolidée des indicateurs clés de performance (KPI). L'élément (1) affiche la FMD par équipement, tandis que l'élément (2) illustre une représentation graphique des causes de pannes sous forme de diagramme circulaire, précisant le nombre d'occurrences pour chaque cause. L'élément (3) met en évidence les coûts de maintenance, ventilés selon les types d'intervention, le coût total cumulé, ainsi que leur répartition en pourcentage. Par ailleurs, l'élément (4) synthétise des indicateurs globaux tels que le nombre total d'interventions, le taux de réalisation, ainsi que le ratio entre maintenance préventive et corrective. Enfin, l'élément (5) présente des indicateurs de fiabilité, notamment le MTBF (Mean Time Between Failures), ainsi que des indicateurs de sûreté de fonctionnement, en particulier le MTTR (Mean Time To Repair), pour chaque équipement de la ligne de production.

À l'issue de cette phase, une présentation détaillée de la configuration des données a été soumise aux parties prenantes de l'entreprise Coca-Cola Algérie, en particulier au responsable de la maintenance, et l'ingénieur en performance. Cette présentation a donné lieu à une validation formelle et à une approbation du dispositif mis en place.

3.4.4.4 La phase de préparation à la production :

La phase de préparation à la mise en production regroupe l'ensemble des activités clés, notamment la reprise des données de l'ensemble des lignes de production, les tests finaux, la phase de recette, la formation des utilisateurs, la mise en place de l'organisation cible, ainsi que les opérations de basculement, incluant la migration de toutes les données opérationnelles issues de l'ancien système.

Dans le cadre du projet présenté, cette phase n'a pas été mise en œuvre, dans la mesure où l'entreprise n'a pas encore validé un déploiement généralisé de la GMAO à l'ensemble de ses lignes de production, ni engagé une formation complète de ses utilisateurs. La mise en production réelle de la solution PLM-GMAO reste donc conditionnée à une décision stratégique d'extension et de pérennisation du dispositif à l'échelle de l'organisation.

3.4.5 Évaluation de la solution après configuration

3.4.5.1 Étude de cas comparative sur le traitement d'une panne

Dans cette phase, l'objectif est d'évaluer la solution PLM-GMAO après sa mise en œuvre. Idéalement, cette évaluation aurait inclus une analyse comparative des indicateurs clés de performance (KPI). Cependant, en raison du fait que les données disponibles ont été préalablement filtrées et sélectionnées manuellement dans le cadre du projet, nous ne disposons pas de mesures historiques fiables permettant une comparaison rigoureuse entre l'avant et l'après configuration.

Afin de pallier cette limitation, une étude de cas a été menée sur une panne corrective réelle, à savoir un dysfonctionnement de pince au niveau de la remplisseuse de la soutireuse. Trois scénarios ont été comparés :

- Scénario 1 : Le traitement de la panne sans GMAO (processus initial SAP-PM)
- Scénario 2 : Le traitement de la même panne après amélioration du processus SAP-PM
- Scénario 3 : Le traitement de la même panne en utilisant la GMAO (PLM-GMAO)

Actions	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Détection et création d'intervention	Détection par l'opérateur, information transmise au chef de ligne qui crée l'OT dans SAP sans codes internes.	Le technicien détecte la panne et crée directement l'OT dans SAP (transaction IW31).	Création directe d'une Demande d'Intervention (DI) dans la GMAO par le chef de ligne.
Identification des pièces	Références constructeur indiquées, codes SAP manquants au départ. « <i>OT semi-rempli ou non rempli</i> »	Les codes SAP sont renseignés dès la création de l'OT grâce à la BOM. « <i>OT complet</i> »	Identification et vérification directe par l'intervenant via son interface GMAO.
Vérification des pièces	Réalisée par le magasinier après impression de l'OT.	Le technicien vérifie lui-même la disponibilité via la transaction MMBE.	
Sortie des pièces de rechange	Après intervention, le magasinier établit le BSM en différé.	Un BSM SAP (MIGO) est généré immédiatement par le magasinier et rattaché à l'OT.	Une demande de retrait est générée et validée dans la GMAO ; traçabilité automatique assurée.
Clôture de l'intervention et rapport	Réalisée par le chef de ligne dans SAP en fin de shift, avec saisie manuelle différée des articles et quantités consommées.	Clôture de l'OT par le technicien via la transaction IW41, avec saisie directe des durées et pièces utilisées. Rapport intégré dans un historique fusionné et centralisé.	Saisie immédiate du compte rendu technique par l'intervenant via la GMAO ; rapport généré automatiquement et validable dans le système.
Durée totale estimée	45 (+ 60 minutes a cause de la saisie différée).	30 minutes	15 minutes
Analyse	Fonctionnement éprouvé mais processus lent, manuel et peu traçable. Multiples étapes manuelles, saisie différée, forte dépendance humaine.	Gain de temps notable, meilleure autonomie et fiabilité. Toutefois, toujours basé sur ERP classique avec une complexité technique et une dépendance à la rigueur des techniciens.	Processus structuré, traçabilité complète, rapports automatiques, meilleure efficacité globale.

TABLE 3.1 – Comparaison des processus de gestion d'une intervention corrective selon trois scénarios (manuel, SAP optimisé, GMAO)

En somme, la comparaison met en évidence l'intérêt croissant pour les solutions numériques de type GMAO, capables de transformer un processus fragmenté et manuel en un système fluide, automatisé et optimisé. Cette étude de cas comparative a permis d'évaluer à la fois des critères quantitatifs (temps d'intervention, délais de traitement, réduction du temps d'arrêt) et qualitatifs (fluidité du processus décisionnel, traçabilité des actions, clarté de la documentation technique). Il ressort de cette analyse que la solution PLM-GMAO surpasse largement l'approche manuelle en termes d'efficacité, de rapidité d'exécution, de fiabilité des informations et de centralisation des données.

Après avoir validé la solution sur le terrain à travers une étude comparative des différents processus et confirmé sa valeur ajoutée pour l'entreprise Coca-Cola Algérie, il est essentiel, dans un second temps, de démontrer notre contribution à l'entreprise PLM-Ressources. Pour cela, une analyse de la solution PLM-GMAO s'impose, visant à identifier ses points forts, ses faiblesses, les opportunités à exploiter ainsi que les menaces potentielles. Cette analyse, fondée sur un retour d'expérience réel, a pour objectif de fournir à PLM-Ressources une base concrète pour l'amélioration continue de l'application.

3.4.5.2 Evaluation de la solution PLM-GMAO à travers une analyse SWOT

Dans le cadre d'une évaluation approfondie de la solution mise en œuvre, une analyse SWOT a été élaborée. Cette approche a permis d'identifier de manière structurée les forces, les faiblesses, les opportunités ainsi que les menaces liées à la PLM-GMAO. Cette analyse s'est appuyée, d'une part, sur les fonctionnalités effectivement activées et utilisées au sein de Coca-Cola ECCBC Algérie, et, d'autre part, afin d'en assurer une appréciation plus exhaustive, sur d'autres fonctionnalités offertes par la PLM-GMAO, présentées dans les figures F4,F5,F6 et F7 en annexe F.

Forces (Strengths) :

- Une interface conviviale et intuitive, favorisant l'adhésion des utilisateurs et réduisant la courbe d'apprentissage.
- La possibilité d'intégration avec d'autres systèmes d'information, notamment ERP SAP, facilitant l'interopérabilité des flux de données.
- Possibilité de personnalisation de la solution, permettant une adaptation fine aux spécificités organisationnelles de chaque entreprise.
- Une communauté de développeurs et de support technique réactive, ouverte aux retours d'expérience et aux suggestions d'amélioration.
- Un engagement continu dans l'évolution fonctionnelle du produit, avec des fonctionnalités en cours d'amélioration visant à renforcer les capacités du système.
- Accès multiplateforme (ordinateurs, tablettes, smartphones), permettant aux utilisateurs de consulter ou de saisir des informations en temps réel, sur le terrain comme au bureau.
- Fonctionnalité de lecture de codes-barres, facilitant la traçabilité des équipements.
- Moteur de workflow configurable, autorisant l'association de tâches à des utilisateurs précis avec des circuits de validation (approbation, suivi, exécution), ce qui formalise les responsabilités et renforce la traçabilité des actions.
- Tableaux de bord des responsables dynamiques et filtrables (par date, équipement, type d'intervention, etc.), permettant une visualisation synthétique des indicateurs clés de performance (KPI) et une prise de décision rapide, fondée sur des données en temps réel.
- Tableaux de bord personnalisable par profil ; affichage ciblé des données pertinentes selon qu'on est agent, responsable, magasinier.

- Vue d'ensemble centralisée des opérations de maintenance, offrant au responsable une visibilité immédiate sur l'état des interventions en temps réel, les priorités, les ressources mobilisées, et les éventuels goulots d'étranglement.
- Importation et centralisation documentaire : possibilité d'intégrer des documents techniques comme les modes opératoires, manuels d'utilisation, plans d'entretien, etc., ainsi que l'exportation automatique de rapports d'intervention et de bons de travail et bien d'autres documents.
- Gestion de stock avancée, intégrant la notion de criticité des pièces de rechange, les seuils d'alerte, les quantités maximales autorisées, ainsi que la répartition des pièces selon les organes techniques des équipements.
- Intégration des prestataires externes (sous-traitants), permettant un suivi unifié des opérations de maintenance internes et externalisées dans un seul système.
- Maintenance conditionnelle, rendue possible par la connexion avec des capteurs IoT et l'analyse des données d'usage en temps réel, en vue de déclencher des interventions conditionnées par l'état réel des équipements.
- Évaluation des opérations réalisées, permettant d'apprécier la qualité des interventions menées par les opérateurs, tout en favorisant une culture d'amélioration continue.
- Suivi transparent des performances individuelles, permettant de visualiser objectivement le volume d'interventions réalisées par chaque technicien, renforçant ainsi la responsabilisation et la valorisation du travail accompli.

Faiblesses (Weaknesses) :

- Ergonomie perfectible dans certaines interfaces :
 - o Le champ de saisie des dates accepte plus de quatre chiffres pour l'année, ce qui peut induire des erreurs de saisie fréquentes.
 - o Lors de la création d'une Demande d'Intervention (DI), les listes déroulantes des causes, symptômes et remèdes ne sont pas filtrées en fonction de l'équipement ou du sous-ensemble sélectionné, ce qui ralentit considérablement la saisie. De plus, l'ajout de nouveaux symptômes n'est pas possible directement depuis l'interface de création de DI, nécessitant une navigation externe.
 - o La fiche d'intervention souffre d'une confusion liée à l'usage du même intitulé dans deux interfaces distinctes : celle de l'agent de maintenance et celle du responsable. Cette redondance sème le doute chez l'utilisateur, car bien qu'elles portent le même nom, ces fiches ne renvoient pas exactement aux mêmes contenus ni aux mêmes finalités.
 - o Dans la rubrique « Mes interventions terminées » du compte de l'agent de maintenance, le champ de la durée affiche la date d'exécution, au lieu de la durée réelle de l'intervention.
 - o L'obligation de renseigner l'ensemble des champs pour valider certaines actions ralentit l'exécution des interventions urgentes.
 - o Les statistiques des équipements indiquent les pourcentages d'unités en service ou en panne, mais sans les associer aux équipements spécifiques, limitant l'exploitation analytique de ces données.
- La structuration des données relatives aux pièces de rechange dans le module magasin demeure insuffisamment détaillée : les localisations se limitent au niveau du rayon et du bloc, sans prise en compte de niveaux inférieurs (par exemple : bac ou compartiment), ce qui complique la localisation physique précise des articles en stock.
- Absence de distinction claire entre les activités de maintenance préventive et corrective dans le plan de maintenance, ce qui nuit à la lisibilité d'ensemble des interventions et engendre une confusion dans l'interprétation des données.

- Impossibilité d'intégrer directement des pièces de rechange existantes en stock sans passer par une commande formelle, ce qui complique les cas où l'entreprise dispose déjà des articles nécessaires.
- Historique de maintenance actuellement incomplet : il ne comporte que des informations limitées telles que l'équipement concerné, l'agent intervenant, le titre de l'intervention, la date, la durée et le statut, sans détails sur la nature de la panne, les tâches réalisées ou les pièces consommées.

Opportunités (Opportunities) :

- Intégration d'un agent conversationnel intelligent, capable de prendre en charge certaines tâches récurrentes ce qui améliorerait significativement la productivité des équipes.
- Mettre en place une catégorisation structurée des maintenances préventives, en distinguant systématiquement les trois axes principaux : Nettoyage, Inspection, et Lubrification, afin d'améliorer le suivi et la traçabilité des actions.
- Permettre l'ajout de plusieurs activités dans une même intervention (préventive ou corrective), avec une identification claire de chaque action dans le rapport d'intervention, au lieu de les regrouper dans un simple champ de commentaire.
- Ajouter un système de notification anticipées pour signaler l'approche des échéances de maintenance préventive, et non uniquement les retards, afin d'améliorer la planification et la réactivité.
- Mettre en place une option de saisie partielle avec validation différée permettrait de fluidifier le processus en situation d'urgence, tout en garantissant une complétion ultérieure des données.
- Intégrer une fonctionnalité d'évaluation des techniciens basé sur les 5 niveaux de maintenance (de la maintenance de premier niveau à la maintenance experte), permettant d'apprécier leurs compétences, de suivre leur évolution et d'optimiser l'affectation des interventions en fonction de leur niveau de qualification.
- Privilégier la génération automatique d'un historique complet des pannes, intégrant les informations suivantes : type de panne, équipement concerné, sous-ensemble impliqué, technicien responsable, tâches réalisées, pièces de rechange utilisées, ainsi que la date et la durée d'intervention. Cet historique structuré facilitera l'analyse des défaillances et la prise de décision stratégique.
- Amélioration des aspects techniques et ergonomiques mentionnés dans les faiblesses, à travers des mises à jour ciblées.
- Déployer un module d'intelligence artificielle permettant l'analyse automatisée des données de maintenance, afin de faciliter l'identification des tendances, d'améliorer l'anticipation des pannes et de soutenir la mise en place d'une stratégie de maintenance prédictive.

Menaces (Threats) :

- Concurrence directe de solutions GMAO plus matures, disposant de fonctionnalités plus étendues ou d'une plus grande notoriété sur le marché.
- Risque de rejet utilisateur si certaines limitations ergonomiques et fonctionnelles ne sont pas rapidement adressées.

L'évaluation de la solution PLM-GMAO, réalisée à travers une étude comparative de scénarios et une analyse SWOT, a mis en évidence une nette amélioration des processus de maintenance par rapport aux approches précédentes. La GMAO permet une meilleure traçabilité, une réactivité accrue, une automatisation des flux et une fiabilité renforcée des données. Malgré quelques limites fonctionnelles et ergonomiques, elle offre une interface conviviale, une gestion optimisée des stocks, une interopérabilité efficace et une possibilité d'accès mobile, ouvrant ainsi la voie à des perspectives prometteuses comme la maintenance prédictive ou l'intégration d'un agent

intelligent. Cette évaluation confirme que la transformation numérique par la GMAO constitue une avancée significative face à la simple optimisation des outils existants, et prépare le terrain pour de futures améliorations détaillées dans le chapitre suivant.

3.5 Conclusion

Dans le présent chapitre, deux propositions d'amélioration ont été formulées à partir de l'analyse des opportunités identifiées dans l'étude SWOT présentée au chapitre 2. La première proposition concerne l'optimisation du modèle de maintenance existant, en s'appuyant exclusivement sur les ressources et les outils déjà en place. Elle vise à rationaliser les pratiques actuelles sans recourir à une transformation technologique majeure.

Toutefois, en tenant compte des limites structurelles de cette première approche, une seconde proposition a été élaborée : la transformation numérique de la maintenance par l'adoption d'une solution de GMAO (Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur). Cette seconde orientation s'est appuyée elle aussi sur les opportunités mises en évidence dans l'analyse SWOT initiale, tout en répondant aux contraintes non résolues par la première proposition.

Les deux scénarios ont fait l'objet d'une analyse comparative rigoureuse. Cette évaluation a permis de conclure que la mise en œuvre d'une solution GMAO, en l'occurrence PLM-GMAO, représentait l'option la plus pertinente et la plus prometteuse pour moderniser durablement la fonction maintenance. Cependant, afin d'évaluer plus finement cette solution, une seconde analyse SWOT spécifique à PLM-GMAO a été réalisée. Celle-ci a permis de faire émerger de nouvelles opportunités d'évolution, parmi lesquelles l'intégration potentielle d'un agent conversationnel intelligent au sein du système. Cette perspective ouvre la voie à une automatisation accrue de certaines tâches et sera développée en détail dans le chapitre suivant.

Chapitre 4

Conception et intégration d'un Agent Conversationnel Intelligent pour la GMAO

4.1 Introduction

Dans le contexte actuel de transformation numériques des industries, l'intégration de technologies intelligentes dans les systèmes de gestion de maintenance est devenue une nécessité pour répondre aux enjeux de l'Industrie 4.0. Le présent chapitre s'attache au développement d'un agent conversationnel intégré à la solution PLM-GMAO, déjà implémentée et présentée dans le chapitre précédent. Cette intégration vise à enrichir la plateforme GMAO en y apportant des capacités intelligentes, alignées avec les exigences et les opportunités offertes par l'Industrie 4.0. L'agent conversationnel constitue un outil innovant permettant d'améliorer l'interface utilisateur, de faciliter l'accès aux informations et d'optimiser la gestion des opérations de maintenance. Ce chapitre expose ainsi les fondements conceptuels, les choix architecturaux, ainsi que les différentes phases de conception et de réalisation de cet agent, en vue d'une amélioration significative de la performance fonctionnelle et de l'expérience utilisateur au sein de la solution GMAO.

4.2 Méthodologie de mise en œuvre de la solution

L'intégration des systèmes conversationnels basés sur l'intelligence artificielle, communément appelés Chatbots dans les solutions GMAO traditionnelles, permet d'en accroître l'efficacité. Cette amélioration se manifeste par une interaction optimisée entre les utilisateurs et le système, facilitant l'accès aux informations techniques et opérationnelles tout en fluidifiant l'exécution des tâches de maintenance.

Pour garantir une intégration efficace du Chatbot au sein de la solution PLM-GMAO, une démarche méthodologique rigoureuse présentée dans la figure 4.1, a été adoptée. Elle repose sur une architecture de développement inspirée de travaux de référence [32, 33], ajustée aux spécificités du contexte industriel ainsi qu'à celles de la solution PLM-GMAO.

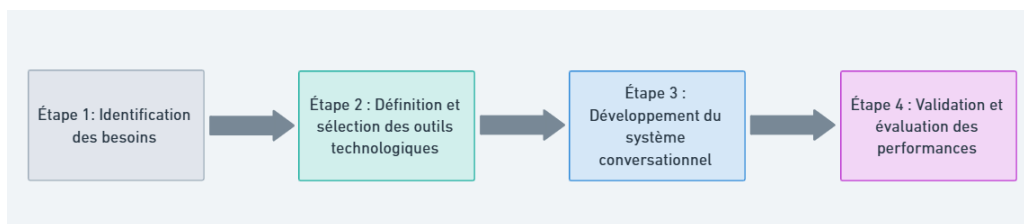


FIGURE 4.1 – Méthodologie de développement du Chatbot

La figure 4.1 illustre notre méthodologie structurée en quatre étapes principales, allant de l'identification des besoins jusqu'à l'évaluation des performances du système développé.

Cette méthodologie constitue un cadre structurant permettant d'assurer la cohérence et la rigueur de la solution développée. En s'appuyant sur une démarche progressive elle garantit que chaque choix technique et fonctionnel est aligné avec les objectifs du projet. Elle offre ainsi une base solide pour le développement d'un agent conversationnel efficace, intégré harmonieusement à la solution PLM-GMAO, tout en répondant aux exigences d'ergonomie, de performance et de valeur ajoutée pour les utilisateurs finaux.

les différentes étapes de cette démarche seront exposées dans les sections suivantes, chacune étant présentée avec une description précise, accompagnée par son application pratique dans le cadre du projet.

4.3 Identification des besoins

La première phase du développement de l'agent conversationnel repose sur une analyse approfondie des besoins fonctionnels et techniques, visant à définir les objectifs à atteindre. Cette étape préparatoire est déterminante pour garantir l'alignement du système avec les exigences du contexte industriel et les attentes des utilisateurs finaux. Elle comprend quatre volets essentiels : la définition des finalités de la solution, l'identification des sources de données, la spécification des fonctionnalités attendues, et la conception de l'architecture initiale du système.

4.3.1 Définition des finalités de la solution :

Les finalités représentent les objectifs globaux et stratégiques que vise l'implémentation de l'agent conversationnel au sein de la solution PLM-GMAO. Elles traduisent les apports attendus en matière de performance, de simplification des processus et de soutien opérationnel. Les finalités identifiées sont les suivantes :

- Améliorer l'ergonomie et la facilité d'utilisation de la solution GMAO.
- Simplifier l'accès aux données historiques de maintenance.
- Réduire significativement le temps consacré à la recherche d'informations techniques.
- Permettre une extraction rapide et ciblée des informations contenues dans les manuels techniques des équipements.
- Automatiser la génération de rapports de maintenance.
- Alléger la charge de travail du personnel de maintenance.
- Fournir un support intelligent à la prise de décision, en facilitant l'accès aux informations pertinentes.

4.3.2 Définition des sources de données

Le bon fonctionnement de l'agent conversationnel repose sur la disponibilité et l'accessibilité de données fiables. Deux principales sources d'information ont été retenues pour alimenter le système :

- Base de données PLM-GMAO : Héberger sur un serveur SQL Server, elle centralise l'ensemble des données relatives à la gestion de la maintenance. Elle contient notamment les interventions préventives et correctives, les mouvements de pièces de rechange au sein du magasin, ainsi que les comptes rendus d'intervention. Sa mise à jour en temps réel garantit une exploitation fiable et actualisée des données.
- Documentation technique : Un ensemble de documents numériques, incluant les manuels d'équipement et les modes opératoire, est mis à disposition afin d'être exploité par l'agent pour répondre aux requêtes des utilisateurs.

4.3.3 Spécification des fonctionnalités attendues

Les spécifications fonctionnelles décrivent les capacités techniques que devra intégrer l'agent conversationnel pour répondre aux usages ciblés. Ces fonctionnalités traduisent les opérations que le système sera en mesure d'accomplir :

- Interpréter une instruction en langage naturel, la convertir en une requête SQL, exécuter cette dernière sur la base de données, puis restituer les résultats sous une forme synthétique et compréhensible pour l'utilisateur ;
- Extraire les informations recherchées à partir de documents techniques volumineux relatifs aux équipements (tels que les manuels) ;
- Assister l'utilisateur dans l'établissement d'un diagnostic en cas d'anomalie ;
- Guider l'utilisateur dans la réalisation des tâches de maintenance préventive, notamment les routines hebdomadaires ;
- Analyser et résumer des documents techniques introduits par l'utilisateur dans l'interface ;
- Génération des rapports de maintenance en langage naturel, intégrant les informations essentielles issues de la GMAO ;
- Gérer les accès et garantir la confidentialité des informations critiques, en fonction des profils utilisateurs ;
- Accompagner l'utilisateur dans l'utilisation de l'application PLM-GMAO à travers des suggestions guidées.

4.3.4 Définition de l'architecture initiale

Sur la base des éléments précédents ; objectifs, données disponibles et fonctionnalités attendues ; une première version de l'architecture fonctionnelle du système a été élaborée. Cette architecture, présentée à la figure 4.2, constitue une représentation préliminaire du fonctionnement global du Chatbot et servira de fondement au développement technique de la solution.

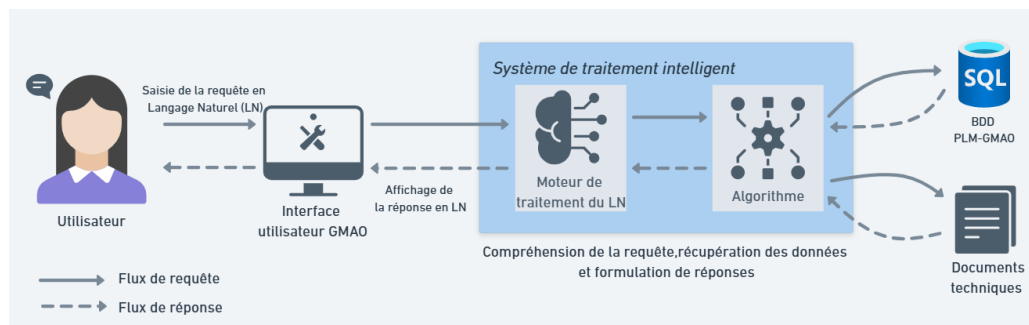


FIGURE 4.2 – Architecture initial du Chatbot

Dans cette configuration, l'utilisateur interagit avec l'agent conversationnel via une interface web intuitive. L'instruction saisie en langage naturel est traitée par le composant central du système, qui se charge de la comprendre, de l'interpréter et de l'exploiter. Bien que ce composant ne soit pas détaillé à ce stade, il intègre une série d'outils spécialisés permettant l'analyse linguistique, l'interrogation de la base de données, ainsi que la gestion des documents techniques. Après le traitement de la requête, le système procède ensuite à la recherche des données nécessaires à partir des sources définies, extrait les informations pertinentes, les reformule en langage naturel, puis les transmet à l'utilisateur sous une forme concise et intelligible.

Cette étape a permis de définir une vision globale de l'architecture attendue et de positionner les composants principaux de l'agent conversationnel. Les sections suivantes s'attacheront à présenter de manière détaillée les outils technologiques intégrés au composant central du système, ainsi que les choix de développement adoptés pour garantir la robustesse de la solution finale.

4.4 Définition et sélection des outils technologiques

Après la clarification des besoins et la définition de l'architecture initiale, il est essentiel de spécifier le type de chatbot à développer, cette étape conditionnant directement la sélection des outils et technologies à mobiliser. En s'appuyant sur les fondements théoriques relatifs aux agents conversationnels et à l'IA générative présentés dans le chapitre 1, le chatbot envisagé dans le cadre de ce projet se caractérise par une interaction textuelle (échanges en langage écrit adaptés au contexte industriel), une finalité informative (extraction et restitution des données issues de la GMAO), un périmètre à domaine fermé (restriction aux problématiques de maintenance industrielle afin de garantir la pertinence des réponses), et une capacité générative (formulation souple et contextuelle des réponses en fonction des requêtes des utilisateurs).

Sur la base de cette caractérisation, cette section vise à présenter et justifier les choix technologiques effectués pour le développement du chatbot en tenant compte des exigences fonctionnelles, des contraintes techniques et des objectifs définis dans le cadre du projet.

4.4.1 Choix du LLM

Dans le cadre du développement d'un agent conversationnel intelligent, le choix du modèle de langage (LLM-Large Language Model) constitue une décision stratégique majeure. Le LLM est en effet le socle de l'intelligence du système : il permet non seulement de comprendre les requêtes en langage naturel, mais aussi de générer des réponses pertinentes, cohérentes et contextualisées. Le modèle sélectionné doit donc répondre à un ensemble d'exigences spécifiques. Cette section s'attache ainsi à présenter les critères de sélection, les options envisagées, et le choix final du LLM adopté pour cette application.

4.4.1.1 Présentation des exigences

Afin de garantir le choix le plus pertinent du LLM adapté à la solution développée, il est indispensable de définir un ensemble de critères de sélection. Ces critères sont établis en cohérence avec les objectifs fonctionnels et stratégiques prédéfinis de la solution, tout en s'appuyant sur les recommandations issues de la littérature existante [12]. Ils permettent de s'assurer que le LLM retenu soit en adéquation avec les exigences techniques, linguistiques et contextuelles de l'environnement industriel cible. Les principaux critères retenus sont les suivants :

- Licence ouverte (open source) : La solution s'inscrivant dans un cadre académique et exploratoire, le LLM doit être libre d'usage et accessible sans contraintes commerciales ;
- Génération de requêtes SQL : Le LLM doit être capable de générer des requêtes SQL afin d'interagir efficacement avec la base de données relationnelle sous-jacente ;
- Maîtrise du français : Étant donné que la base de données ainsi que la documentation technique sont exclusivement en langue française, le LLM doit démontrer une capacité avérée à comprendre, traiter et générer du contenu en français ;
- Fluidité conversationnelle : Une interaction fluide et naturelle avec l'utilisateur est essentielle pour favoriser l'adoption de l'agent conversationnel et améliorer l'expérience utilisateur ;
- Interprétation du sens global : La compréhension du contexte global d'une phrase est nécessaire pour choisir le bon chemin de traitement et produire une réponse adaptée à la demande de l'utilisateur.

- Compréhension contextuelle : Le LLM doit être capable de prendre en compte l'historique et le fil de la conversation afin d'interpréter correctement l'intention de l'utilisateur dans des échanges successifs.
- Capacité de raisonnement : Le modèle doit disposer d'une aptitude au raisonnement de bon sens afin d'analyser des documents techniques, extraire des informations pertinentes, et proposer des réponses appropriées ;
- Résolution de problèmes : Le LLM devra permettre à l'agent conversationnel d'assister l'utilisateur dans l'identification des défaillances, en suggérant des diagnostics ciblés fondés sur les données collectées.
- Ethique et gestion des biais : Le LLM doit répondre à des exigences éthiques strictes, en limitant les biais de langage et en respectant les standards professionnels en vigueur dans un environnement industriel.

Par ailleurs, en tenant compte du fait que les modèles de langage sont préalablement entraînés sur de vastes corpus de données diversifiées [12, 11], il est également crucial de considérer la nature des jeux de données (datasets) ayant servi à l'entraînement du modèle choisi. Cette analyse permet de s'assurer de la compatibilité du LLM avec les usages industriels et techniques prévus. Selon les références étudiées, les types de données sur lesquels le LLM doit avoir été entraîné incluent [11] :

- Des corpus conversationnels, pour garantir la fluidité et la pertinence des interactions homme-machine ;
- Des données de code, afin de permettre la génération automatique de requêtes adaptées à la base de données ;
- Des données scientifiques et techniques ;
- Des contenus issus du WEB, pour enrichir la diversité linguistique et améliorer la compréhension générale.

Par ailleurs, plusieurs paramètres techniques au LLM doivent également être considérés afin de garantir sa capacité d'adaptation à la tâche visée. Ces paramètres incluent notamment [11, 34] :

- Le nombre maximum de tokens : Un token constitue une unité de traitement textuel pour les modèles de langage. Il peut s'agir d'un mot, d'un segment de mot, voire d'un caractère. La capacité maximale en tokens détermine la longueur des requêtes que le modèle peut analyser ou générer, plus cette capacité est élevée, plus le modèle est en mesure de traiter des entrées longues et complexes ;
- La longueur du contexte (contexte window) : Ce paramètre définit le nombre maximum de tokens qu'un modèle peut traiter simultanément, une fenêtre contextuelle plus large permet au modèle de prendre en compte un volume important de données en une seule fois, facilitant ainsi la compréhension de documents volumineux ou de multiples documents interconnectés ;
- Le nombre total de paramètres : Il s'agit des poids ajustés lors de l'entraînement du modèle, un nombre élevé de paramètres reflète une complexité et une capacité accrues du modèle à comprendre des nuances linguistiques, raisonner de manière fine et générer des réponses précises et cohérentes ;
- La taille du modèle : Elle correspond à la quantité de mémoire occupée par le modèle lors de son exécution. Une taille importante implique une consommation accrue des ressources informatiques, un temps de réponse plus long, ainsi que la nécessité d'un environnement d'exécution performant.

La sélection d'un LLM adapté repose sur un équilibre entre performance, efficacité et faisabilité technique. Un modèle optimal est celui qui combine une capacité contextuelle étendue, un nombre de paramètres suffisant pour garantir la qualité des réponses, et une taille compatible avec les ressources disponibles.

4.4.1.2 Définitions des modèles disponibles

Compte tenu de l'objectif central du système, à savoir la génération de requêtes SQL à partir de demandes exprimées en langage naturel, la première étape consiste à recenser les modèles de langage open source les plus souvent utilisés dans des tâches similaires, en particulier pour la transformation de texte en SQL. Cette recherche bibliographique, fondée sur les travaux récents [11, 35, 36, 37], a permis de constituer une première sélection de modèles répondant aux deux critères fondamentaux définis en amont : licence ouverte et capacité à générer du code SQL. Les modèles retenus à ce stade sont les suivants :

- LLaMa 2 (Llama2-70B) : Un modèle de langage de grande échelle, conçu pour des tâches avancées de génération textuelle, de compréhension linguistique, de production de code, ainsi que de raisonnement conversationnel [38].
- CodeLlama (CcodeLlama-70B, CodeLlama-34B) : Une famille de modèles dérivée de LLaMa2, spécifiquement optimisée pour les tâches liées à la programmation, notamment la génération, la complétion et l'interprétation du code [39].
- LLaMa 3 (Llama3-70B, Llama3-8B) : Modèles de dernière génération réputés pour leur polyvalence, ils se distinguent par leurs capacités accrues en génération textuelles, en résolution de problèmes complexes, en écriture du code, ainsi qu'en interaction conversationnelle [40]. LLaMa3 est considéré comme le modèle open source atteignant les performances les plus élevées, rivalisant même avec certains modèles propriétaires [11].
- Mixtral (Mixtral-8x22B) : Un modèle avancé se distinguant par une excellente compréhension sémantique, une génération textuelle raffinée, des capacités de raisonnement approfondies et une performance notable en programmation [41].

Bien que la série CodeLlama ait été explicitement conçue pour les applications liées au code, sa spécialisation quasi exclusive sur des corpus techniques limite considérablement sa capacité à répondre à d'autres exigences essentielles du projet, telles que l'interaction conversationnelle, la compréhension contextuelle, ou encore le raisonnement. Ces limites ont conduit à l'exclusion de ces modèles de l'analyse approfondie.

En revanche, les modèles LLaMa 2 et LLaMa 3 présentent des profils plus équilibrés, ayant été entraînés sur des jeux de données hétérogènes et représentatifs. Ces modèles ont été formés à partir de données textuelles publiques et diversifiées comprenant, sans s'y limiter : des articles encyclopédiques (Wikipédia), des œuvres littéraires, des dépôts GitHub, la plateforme scientifique ArXiv (Université Cornell, États-Unis), ainsi que des contributions issues de forums de questions-réponses de haute qualité comme StackExchange [42]. Cependant, les jeux de données d'entraînement de Mixtral, ne sont, à ce jour, pas rendus publics, ce qui constitue un facteur d'incertitude concernant sa robustesse sur des cas d'usage spécifiques.

En l'absence d'études comparatives intégrant l'ensemble des critères spécifiquement définis dans le cadre de ce projet pour les quatre modèles présélectionnés, il s'avère nécessaire de conduire une analyse comparative ciblée. Celle-ci s'appuiera sur les résultats d'évaluations précédentes portant sur les performances individuelles de chaque modèle dans divers contextes d'application, lesquels seront réinterprétés à la lumière des objectifs et des exigences propres au cas d'usage étudié. L'analyse ainsi élaborée fera l'objet d'une présentation détaillée dans la section suivante.

4.4.1.3 Etude comparative des modèles

Dans le but de sélectionner le modèle de langage le plus adapté à l'implémentation de l'agent conversationnel intelligent, une étude comparative s'avère indispensable. Cette analyse repose sur l'ensemble des critères préalablement définis, en adéquation avec l'environnement technique

du projet, notamment la base de données de l'application GMAO, la langue cible (le français), ainsi que les exigences d'interaction homme-machine.

Les modèles retenus pour cette comparaison sont : LLaMa2-70B, LLaMa3-8B, LLaMa3-70B et Mixtral-8x22B. Ces modèles font l'objet d'une évaluation croisée fondée sur les résultats publiés dans la littérature scientifique récente, auxquels s'ajoute une relecture contextualisée aux besoins du cas d'usage visé.

L'objectif de cette section est de synthétiser les performances observées de ces modèles afin d'éclairer le choix du LLM le plus adapté à l'architecture du système proposé, à travers trois axes d'analyse :

- Leur efficacité en génération de requêtes SQL à partir du langage naturel.
- Leurs capacités linguistiques, conversationnelles, cognitives et éthiques.
- Leurs caractéristiques techniques intrinsèques.

Les études ayant servi de base à cette évaluation sont présentées ci-après.

- L'étude [35] : Cette recherche compare les performances de 11 LLM, dont Llama3-8B, Llama3-70B et Mixtral-8x22B pour la tâche spécifique de génération de requêtes SQL à partir d'énoncés en langage naturel. Elle constitue une référence directe pour l'objectif principal du projet.
- L'étude [40] : Elle fournit une comparaison détaillée des modèles de la famille Llama3, dont Llama3-8B et LLaMa3-70B, en analysant leur capacité multilingue, la longueur maximale du contexte pris en charge, ainsi que leurs aptitudes générales en génération de texte et en raisonnement. Elle intègre également une évaluation comparative avec Mixtral-8x22B.
- Les études [12] et [11] : Ces analyse évaluent un large éventail de modèles de langage selon une grille de critères couvrant notamment la fluidité conversationnelle, la compréhension contextuelle, les capacités de raisonnement, la résolution de problèmes, l'interprétation du sens global, ainsi que les dimensions d'éthique et la gestion des biais. Elles fournissent également des informations sur les spécificités techniques des modèles (taille, nombre total des paramètres, capacité contextuelle, etc.).

Les résultats synthétiques de cette étude comparative sont présentés dans le tableau 4.1 , le tableau 4.2, et le tableau 4.3, respectivement dédiés à la performance en génération de requêtes SQL, aux capacités linguistiques et cognitives, et aux caractéristiques techniques des modèles.

TABLE 4.1 – Performance en génération de requêtes SQL

Modèle	LLaMA2-70B	LLaMA3-8B	LLaMA3-70B	Mixtral-8x22B
Niveau de performance	Non disponible	8/99	74/99	67/99

Le tableau 4.1 présente une synthèse des performances des modèles dans la génération de requêtes SQL. D'après [35], un total de 99 requêtes SQL ont été soumises à 11 modèles, dont Llama3-8B, LLaMa3-70B et Mixtral-8x22B. les résultats ont été évalués selon le nombre de requêtes correcte générées. Aucun résultat n'a été identifié concernant LLaMa2-70B.

TABLE 4.2 – Grille d'analyse des capacités des modèles de langage

Critère	LLaMA2-70B	LLaMA3-8B	LLaMA3-70B	Mixtral-8x22B
Multilingue (incl. français)	Non	Partiel	Oui	Oui
Fluidité conversationnelle	Partiel	Partiel	Oui	Oui
Compréhension contextuelle	Partiel	Partiel	Oui	Oui
Capacité de raisonnement complexe	Partiel	Non	Oui	Oui
Résolution de problème	Non	Non	Oui	Oui
Interprétation du sens global	Partiel	Partiel	Oui	Oui
Éthique et gestion des biais	Non	ND	Oui	ND

Le tableau 4.2 résume les critères fonctionnelles et linguistiques évalués pour chaque modèle. Il convient à noter que la mention 'Oui' indique une satisfaction complète du critère, 'Partiel' reflète une performance limitée, 'Non' signale une absence de satisfaction, tandis que 'ND' correspond à une donnée non disponible.

TABLE 4.3 – Caractéristiques techniques des modèles de langage

Caractéristiques	LLaMA2-70B	LLaMA3-8B	LLaMA3-70B	Mixtral-8x22B
Nombre total de paramètres	70 milliards	8 milliards	70 milliards	12,9 milliards
Nombre maximal de tokens	4k	8k	128k	32k
Longueur du contexte	4k	8k	128k	32k
Taille du modèle	140 Go	16 Go	140 Go	270 Go

Le tableau 4.3 présente une synthèse des caractéristiques techniques des modèles, notamment la longueur du contexte, la capacité contextuelle, le nombre total de paramètres utilisés pour l'entraînement, ainsi que la taille du modèle.

A partir des résultats obtenus dans l'étude comparative, il est possible de dégager des conclusions permettant d'identifier le modèle le plus adapté au cas d'usage visé. Les tableaux 4.1, 4.2, et 4.3 montrent que LLaMa3-70B et Mixtral-8x22B se démarquent par leurs performances globalement élevées selon les critères définis, notamment en génération de requêtes SQL à partir du langage naturel, ainsi que pour leurs capacités linguistiques et conversationnelles. Toutefois, seul LLaMa 3-70B a fait l'objet d'une validation explicite sur les aspects éthiques et de gestion de biais.

En revanche, les modèles LLaMa 3-8B et LLaMa 2-70B ont montré des performances moyennes,

voire insuffisantes, au regard des exigences du projet, notamment en ce qui concerne la génération de requêtes SQL et les aptitudes conversationnelles. Ces limitations ont conduit à leur élimination à ce stade de l'analyse.

Sur le plan technique, les deux modèles retenus, LLaMa3-70B et Mixtral-8x22B, présentent des caractéristiques différenciées influençant leur pertinence selon le cas d'usage. Dans le cadre de ce projet, l'agent conversationnel est destiné à être intégré à une solution GMAO, dans un environnement industriel à forte technicité, où l'enjeu principal est la compréhension précise et contextualisée des demandes techniques des utilisateurs. Le modèle Mixtral-8x22B, bien qu'il bénéficie d'une grande capacité de traitement de contexte (32k tokens) et d'une aptitude à générer des réponses longues, dispose d'un nombre de paramètres plus réduit (12.9 milliards), ce qui peut limiter sa performance en compréhension approfondie et en raisonnement technique, éléments pourtant cruciaux dans un environnement industriel.

A l'inverse, LLaMa3-70B affiche une excellente capacité de raisonnement et de compréhension contextuelle, grâce à ses 70 milliards de paramètres, et satisfait aux exigences liées à l'interprétation précise des requêtes techniques et à l'assistance à la maintenance. De plus, il convient de noter que ce modèle dispose de plusieurs variantes, dont la version optimisée LLaMa3.3-70B, diffusée en décembre 2024, qui améliore considérablement ses performances. En effet, cette version bénéficie désormais d'une longueur de contexte étendue à 128k tokens, surpassant ainsi Mixtral-8x22B en capacité de traitement contextuel tout en conservant la taille de modèle plus réduite (140 Go vs. 270 Go), ce qui contribue à une réduction significative de la latence de traitement et à une meilleure faisabilité d'intégration. Cette longueur de contexte étendue permet également l'analyse de volumes de données importants, notamment les manuels techniques détaillés des équipements industriels, ce qui renforce encore la pertinence du modèle dans le domaine de la GMAO.

Ainsi, compte tenu de l'ensemble des critères évalués, fluidité de l'interaction, compréhension technique, performance contextuelle, gestion des biais, compatibilité linguistique et contraintes techniques, le modèle **LLaMa3.3-70B** s'impose comme le choix final le plus pertinent et opérationnel pour le cas d'usage envisagé.

4.4.1.4 Déploiement du modèle et essai expérimental

Afin de vérifier la compatibilité du modèle LLaMa3.3-70B avec le langage T-SQL utilisé par SQL Server, une phase de test expérimental a été jugée nécessaire, en raison de l'absence de documentation explicite à ce sujet dans la littérature scientifique.

Compte tenu des contraintes matérielles liées à la taille du modèle (70 milliards de paramètres et 140 Go), un déploiement local n'a pas été envisagé. À la place, l'accès au modèle a été rendu possible via une API cloud [11] fournie par Together AI, l'un des prestataires proposant le modèle LLaMa3.3-70B en inférence.

Le modèle a été intégré dans un script de test développé en Python, permettant d'assurer la connexion à la base de données SQL Server et de générer dynamiquement des requêtes. Un premier test a été réalisé en soumettant la requête suivante au modèle :

« Écris une requête SQL pour afficher les derniers enregistrements de la table `Demande_inter` ».

L'objectif de ce test est de vérifier si le modèle adopte correctement la syntaxe spécifique à SQL Server. En effet, dans ce système, l'extraction d'un nombre limité d'enregistrements doit se faire avec la clause 'TOP', contrairement à d'autres systèmes de gestion de base de données (SGBD) qui utilisent plutôt 'LIMIT'.

La réussite du test repose donc sur l'usage correct de TOP dans la requête générée. Les résultats de cette expérimentation sont présentés dans la figure 4.3.

```
Requête SQL générée :  
Pour afficher les 5 derniers enregistrements de la table 'Demande_inter', vous pouvez utiliser la fonction 'TOP' dans SQL Server. Voici une requête T-SQL qui réalise cela :  
  
```sql  
SELECT TOP 5 *
FROM Demande_inter
ORDER BY id_demande_inter DESC;
```
```

FIGURE 4.3 – Test du Modèle

La figure 4.3 illustre la réponse générée par le modèle LLaMa3.3-70B à la requête de test. On constate que le modèle a correctement utilisé l'instruction 'TOP', spécifique à T-SQL, au lieu de 'LIMIT', confirmant ainsi sa compatibilité syntaxique avec le langage SQL Server.

Ces résultats valident la capacité du modèle LLaMa3.3-70B à générer des requêtes T-SQL conformes aux exigences syntaxiques du SGBD SQL Server. Cette compatibilité fonctionnelle, combinée à ses performances linguistiques et techniques, confirme la pertinence du choix du modèle pour les objectifs du projet.

Cette phase déterminante a permis de sélectionner le modèle de langage le plus pertinent au regard des exigences fonctionnelles et techniques du projet. Ce choix repose sur des critères rigoureusement établis, incluant la compatibilité avec le langage T-SQL, une capacité contextuelle étendue facilitant l'analyse de documents complexes, ainsi qu'une performance avérée dans la génération de requêtes adaptées au contexte métier.

Cependant, il est important de souligner que le choix d'un modèle de langage, aussi performant soit-il, ne constitue qu'une étape nécessaire mais non suffisante à la réussite du projet. Pour que ce modèle puisse exploiter pleinement les données de la solution PLM-GMAO souvent hétérogènes, non structurées et fortement dépendantes du contexte métier il doit s'intégrer dans un environnement capable de piloter l'ensemble du cycle de traitement de l'information.

Ainsi, la prochaine étape portera sur la sélection d'un mécanisme d'orchestration robuste, apte à coordonner efficacement la structuration des données, leur traitement sémantique, et d'assurer une interaction fluide avec le modèle du langage sélectionné.

4.4.2 Choix du Framework d'orchestration : LlamaIndex

Parmi les solutions disponibles, LlamaIndex (anciennement GPT Index) s'est imposé comme le framework le plus adapté. Open-source et modulaire, il est conçu pour créer une passerelle intelligente entre les sources de données internes (bases SQL, PDF, fichiers, manuels, historiques, etc.) et les modèles de langage de grande taille (LLM) [43].

Loin de se limiter à la simple transmission d'informations au LLM, LlamaIndex orchestre l'ensemble du pipeline, depuis l'ingestion des données jusqu'à la génération de réponses contextualisées. Son fonctionnement repose sur une architecture modulaire composée de plusieurs briques fondamentales :

- Documents : les données brutes ingérées depuis les sources internes.
- Nœuds (Nodes) : des segments logiques extraits des documents, optimisés pour la recherche sémantique.
- Indexe : des structures de données organisant les nœuds selon différents cas d'usage (recherche simple, navigation arborescente, graphe de connaissances...).

- QueryEngine : le moteur de requête qui orchestre l'interrogation du système. Il combine plusieurs sous-composants :
 - o Un retriever, qui sélectionne les nœuds pertinents à partir des index.
 - o Un postprocesseur, qui affine ou filtre les résultats si nécessaire.
 - o Un synthétiseur de réponse, qui assemble les informations récupérées pour générer une réponse cohérente adressée au LLM.

LlamaIndex agit ainsi comme un véritable chef d'orchestre de l'intelligence conversationnelle : il transforme les données brutes en informations exploitables, les contextualise selon le domaine métier, et pilote les échanges avec le LLM.

4.4.3 Intégration des briques cognitives via LlamaIndex

Le choix de LlamaIndex ne se limite pas à une simple sélection de framework technique. Ce dernier se distingue également par sa capacité à orchestrer, de manière cohérente et unifiée, l'ensemble des briques cognitives nécessaires à la mise en œuvre d'un assistant intelligent basé sur des données industrielles. En effet, LlamaIndex n'est pas seulement un moteur d'indexation ou de recherche, mais bien une infrastructure complète permettant d'intégrer harmonieusement les embeddings sémantiques, la logique RAG (Retrieval-Augmented Generation) et le prompt engineering.

La section suivante revient en détail sur ces composantes, en expliquant leur rôle, les choix méthodologiques opérés, ainsi que leur intégration concrète dans notre projet, grâce à l'architecture modulaire et évolutive de LlamaIndex.

4.4.3.1 Embedding

Définition et rôle de l'embedding dans notre système :

L'embedding est une représentation vectorielle d'un texte dans un espace sémantique multi-dimensionnel. Cette transformation permet de mesurer la proximité de sens entre différentes phrases ou documents, indépendamment des mots exacts utilisés. Elle est donc fondamentale dans les systèmes de recherche d'information fondés sur le sens plutôt que sur la simple correspondance de mots-clés.

Dans le cadre d'un assistant intelligent basé sur la GMAO, cette étape est cruciale car elle permet de :

- Structurer sémantiquement des sources hétérogènes (textes, bases de données, PDF, etc.) ;
- Réaliser une recherche vectorielle pertinente et contextuelle, bien au-delà de la recherche lexicale classique ;
- Alimenter efficacement le mécanisme RAG en identifiant les passages les plus pertinents à injecter dans le prompt.

Par défaut, LlamaIndex utilise le modèle text-embedding-ada-002 d'OpenAI pour cette tâche. Bien que performant, ce modèle est payant. Pour une solution locale, gratuite et plus contrôlable, nous avons exploré l'intégration de modèles d'embedding open source via Hugging Face, pleinement compatibles avec LlamaIndex.

Méthodologie : sélection et évaluation des modèles

Pour garantir une recherche sémantique pertinente et robuste dans le cadre de notre assistant

GMAO, le choix du modèle d'embedding constitue une étape stratégique. En effet, la qualité des représentations vectorielles produites conditionne directement la pertinence des résultats retournés aux utilisateurs.

Cette section présente la méthodologie mise en œuvre pour sélectionner, filtrer puis évaluer un ensemble de modèles open source issus de la plateforme Hugging Face. Elle s'appuie à la fois sur des critères objectifs issus de benchmarks de référence (notamment le MTEB), et sur des contraintes techniques et fonctionnelles propres à notre environnement industriel. L'objectif est d'identifier le modèle offrant le meilleur équilibre entre performance sémantique, compatibilité locale et rapidité d'exécution.

1. Critères de sélection :

Le choix du modèle d'embedding a été guidé par une combinaison de critères issus de la littérature [44] et des recommandations pratiques issues de la communauté Hugging Face [45]. Les critères de sélection ont été répartis en trois grandes catégories :

- Critères de performance :

- Compréhension sémantique : Aptitude du modèle à capter les similarités de sens, y compris dans un contexte technique ou métier.
- Multilinguisme : Capacité du modèle à traiter efficacement des requêtes en français, langue principale dans notre environnement industriel.
- Robustesse inter-tâches : Stabilité des performances du modèle sur des tâches variées (recherche, classification, clustering, etc.).

- Critères opérationnels :

- Latence et débit : Pour garantir une réponse rapide à l'utilisateur, en particulier dans des systèmes interactifs.
- Compatibilité logicielle : Intégration avec LlamaIndex via SentenceTransformers.
- Poids du modèle : Limitation à 500 Mo pour assurer un déploiement local sur des machines standards.
- Licence et coût : Priorité donnée aux modèles open-source gratuits.

- Apport du benchmark MTEB : Pour garantir une évaluation objective et reproductible des modèles d'embedding candidats, nous nous sommes appuyés sur le Massive Text Embedding Benchmark (MTEB), un benchmark de référence développé par Hugging Face [46]. Ce benchmark fournit un cadre standardisé permettant de mesurer la qualité des représentations vectorielles générées par les modèles sur un large éventail de tâches linguistiques.

Deux indicateurs globaux issus du MTEB ont été utilisés pour comparer les modèles :

- Le *Mean Task Score* ; qui représente la moyenne des performances sur toutes les tâches, et donne une vue d'ensemble de la polyvalence du modèle.
- Le *Borda Rank* ; un système de classement basé sur les rangs relatifs des modèles sur chaque tâche, permettant d'identifier ceux qui sont régulièrement performants, même s'ils ne sont pas systématiquement les meilleurs.

Le MTEB couvre plus de 50 tâches réparties en plusieurs catégories complémentaires, notre sélection s'est appuyée sur deux études complémentaires pour définir les *tasks* et *task types* à retenir dans l'évaluation des modèles d'embedding :

- L'étude [46], qui présente la structure globale du benchmark MTEB, a orienté le choix des types de tâches à considérer pour l'évaluation des modèles de manière générale (retrieval, STS, classification, etc.). Toutefois, cette première version du benchmark ne couvrait pas spécifiquement des jeux de données en langue française, ce qui limitait son application directe à notre contexte.

- C'est pourquoi nous nous sommes également appuyés sur l'étude [47], qui propose une extension francophone du benchmark MTEB, intégrant sept nouveaux jeux de données en français. Cette contribution nous a permis d'identifier les types de tâches les plus représentatifs de notre environnement industriel francophone, et ainsi d'évaluer plus finement la performance des modèles sur la langue française.

Sur la base de ces critères, une phase de présélection a ensuite été menée afin de restreindre l'espace des modèles potentiels. Cette étape a ouvert la voie à un filtrage plus ciblé sur la plateforme Hugging Face, présenté dans la section suivante.

2. *Filtrage initial sur Hugging Face :*

Un filtrage structuré a été réalisé sur la plateforme *Hugging Face*, en s'appuyant à la fois sur les outils de recherche avancée et sur les indicateurs du benchmark MTEB.

Cette démarche a permis d'identifier une première liste de modèles open source répondant aux exigences de performance, de compatibilité et de légèreté. Le tableau G.1 présenté en Annexe G, détaille les filtres appliqués.

Parmi les modèles identifiés, 26 ont été retenus à l'issue de ce premier tri. Une seconde passe d'évaluation a permis d'exclure :

- 14 modèles sans score agrégé (*Mean Task Score* non disponible).
- 4 modèles jugés trop lourds (>500MB), non adaptés à une exécution locale optimisée.
- 2 modèles dont les performances moyennes étaient inférieures au seuil minimal fixé (40%).

Au terme de cette analyse, 6 modèles répondant aux critères de qualité, d'efficacité et de légèreté ont été sélectionnés pour une évaluation approfondie sur nos propres données.

3. *Évaluation expérimentale des modèles retenus :*

Afin de prendre une décision éclairée quant au choix du modèle d'embedding le plus adapté, nous avons opté pour une évaluation expérimentale directement appliquée à notre base de données PLM-GMAO. L'objectif de cette phase est de mesurer la capacité des modèles sélectionnés à produire des représentations vectorielles pertinentes et efficaces dans notre contexte industriel.

Les modèles évalués sont les suivants :

- Paraphrase-multilingual-MiniLM-L12-v2
- all-mpnet-base-v2
- text2vec-base-multilingual
- all-MiniLM-L6-v2
- all-MiniLM-L12-v2
- static-similarity-mrl-multilingual-v1

Dans cette optique, un script Python spécifique a été développé afin d'évaluer la capacité de différents modèles d'embedding à capturer la similarité sémantique entre des demandes d'intervention et les réponses techniques associées. Pour cela, nous avons exploité la base de données que nous avons implémentée dans la solution PLM-GMAO, en s'appuyant sur deux tables clés : *Demande_inter* (qui contient les demandes d'intervention formulées par le chef de ligne) et *Tasks* (qui enregistre les actions correctives réalisées par les opérateurs). Chaque exemple est constitué d'un couple formé par le commentaire de la demande et le commentaire de la tâche associée. Le script encode séparément ces textes à l'aide de modèles pré-entraînés puis mesure la similarité cosinus entre les vecteurs obtenus.

L'efficacité de chaque modèle est mesurée par le critère Hit@5, qui évalue si la réponse correcte figure parmi les cinq réponses les plus similaires à la requête. Ce test nous permet ainsi de comparer objectivement plusieurs modèles d'embedding et de justifier le choix du plus pertinent pour notre assistant intelligent, en fonction de sa capacité à comprendre et relier efficacement les données issues de la base de PLM-GMAO.

Résultat

Le script présenté dans la figure G1 (Voir Annexe G) permet d'automatiser l'évaluation des modèles selon cette méthodologie. Ce script mesure à la fois la performance (hit@5) et le temps d'exécution (duration) pour chaque modèle, permettant une évaluation équilibrée entre précision et rapidité.

Les résultats obtenus sont synthétisés dans le tableau suivant :

TABLE 4.4 – Résultats du test comparatif des modèles

| Modèle | Hit@5 (%) | Durée (s) |
|---------------------------------------|-----------|-----------|
| paraphrase-multilingual-MiniLM-L12-v2 | 60.10 | 75.44 |
| all-mpnet-base-v2 | 62.04 | 488.49 |
| text2vec-base-multilingual | 61.20 | 95.11 |
| all-MiniLM-L6-v2 | 61.11 | 55.16 |
| all-MiniLM-L12-v2 | 62.51 | 70.31 |
| static-similarity-mrl-multilingual-v1 | 60.52 | 152.36 |

L'analyse des résultats met en évidence plusieurs tendances significatives. Tout d'abord, le modèle all-MiniLM-L12-v2 se distingue en atteignant le meilleur score de Hit@5 (62.51%), tout en conservant un temps de réponse raisonnable (70.31 secondes), nettement inférieur à celui du modèle all-mpnet-base-v2, pourtant très performant mais beaucoup plus lent (488.49 s). De leur côté, les modèles all-MiniLM-L6-v2 et text2vec-base-multilingual offrent un bon compromis entre précision et rapidité, bien que légèrement en retrait en termes de performance.

En revanche, des modèles comme static-similarity-mrl-multilingual-v1 ou paraphrase-multilingual-MiniLM-L12-v2 affichent des scores de pertinence légèrement plus faibles, sans avantage décisif en rapidité. Ainsi, au regard des exigences du projet, le modèle all-MiniLM-L12-v2 s'impose comme le choix optimal, combinant efficacité sémantique, polyvalence multilingue et temps de traitement acceptable. Il est donc retenu pour la suite de l'intégration dans l'assistant intelligent GMAO.

Cette étape de vectorisation étant désormais consolidée, elle ouvre la voie à l'intégration du mécanisme Retrieval-Augmented Generation (RAG), qui s'appuie directement sur la qualité des embeddings pour construire des réponses contextualisées et précises en langage naturel.

4.4.3.2 Retrieval-Augmented Generation (RAG)

Dans le cadre de notre projet d'assistant GMAO, la documentation technique (manuels d'équipements, modes opératoires, procédures de maintenance, etc.) constitue une ressource stratégique trop souvent sous-exploitée. Or, ces documents renferment des connaissances précieuses pour la résolution rapide de problèmes, l'accompagnement des techniciens, ou encore l'optimisation des interventions.

Afin de rendre ces documents interrogeables en langage naturel, nous avons adopté l'approche Retrieval-Augmented Generation (RAG), orchestrée via le framework LlamaIndex. RAG permet d'exploiter les capacités de raisonnement des LLM tout en les ancrant dans des données factuelles internes [43].

L'approche RAG repose sur trois étapes fonctionnelles [7], intégrées dans le pipeline cognitif de LlamaIndex :

- Ingestion et vectorisation des documents : Les documents internes sont d'abord transformés en vecteurs à l'aide des modèles d'embedding sélectionnés, puis indexés.
- Recherche sémantique (*retrieval*) : Lorsqu'un utilisateur pose une question, le système recherche automatiquement les passages les plus pertinents à partir de leur similarité sémantique.
- Génération de réponse (*generation*) : Ces passages sont injectés dans le prompt du LLM, qui génère une réponse synthétique et contextualisée, en se basant sur le contenu retrouvé.

Le recours à RAG se justifie pleinement dans le contexte de notre projet, pour les raisons suivantes :

- Amélioration mesurable de l'expérience utilisateur, en rendant la documentation « vivante » et interrogeable.
- Compatibilité native avec le framework LlamaIndex, assurant une intégration fluide avec les modèles d'embedding et le moteur vectoriel ;
- Limiter les hallucinations du LLM en le forçant à se baser sur des données factuelles.
- Possibilité de fonctionner localement, sans exposition des documents internes à des services externes ;

Enfin, pour exploiter pleinement la puissance du RAG et garantir que les réponses générées par le LLM soient cohérentes, précises et adaptées aux besoins des utilisateurs, une attention particulière doit être portée à la formulation des instructions envoyées au modèle de langage. C'est dans cette perspective que s'inscrit la phase de prompt engineering, présentée dans la section suivante.

4.4.3.3 Prompt Engineering : la dernière brique du pipeline

Le prompt engineering constitue la dernière étape clé du pipeline cognitif de notre assistant intelligent. Il s'agit de concevoir des instructions optimisées destinées au modèle de langage (LLM), afin de maximiser la pertinence, la clarté et l'utilité des réponses générées.

Selon [11], le prompt engineering est défini comme le processus consistant à formuler manuellement une consigne efficace pour orienter un LLM en fonction d'un objectif précis. Souvent sous-estimée, cette étape est pourtant essentielle pour :

- Orienter le raisonnement du LLM selon les objectifs métier (diagnostic, synthèse, aide à la décision, etc.) ;
- Contextualiser dynamiquement la requête utilisateur, notamment avec les extraits identifiés via la phase de *retrieval* (RAG) ou issus de bases métier ;
- Limiter les réponses vagues, imprécises ou hors sujet, en encadrant finement la formulation attendue.

Afin de répondre à ces exigences, nous avons structuré notre approche autour de deux volets complémentaires, articulés de manière cohérente :

- D'une part, l'adoption de principes méthodologiques rigoureux pour concevoir des prompts à la fois clairs, pertinents et reproductibles.

- D'autre part, la sélection du type de prompt spécifiquement adapté aux contraintes du domaine industriel et aux usages propres à la GMAO.

Ces deux dimensions sont présentées en détail ci-après.

4.4.3.4 Concevoir un prompt efficace : principes et bonnes pratiques

Comme établi dans le chapitre 1, la qualité du prompt constitue un levier essentiel de performance pour tout modèle de langage. Un prompt mal formulé peut conduire à des réponses vagues, inexactes ou incohérentes. À l'inverse, un prompt soigneusement conçu oriente efficacement le modèle vers un objectif clair, pertinent et contextualisé.

Dans cette perspective, et afin de maximiser l'efficacité de notre assistant GMAO, nous avons structuré notre démarche de conception des prompts en nous appuyant sur les bonnes pratiques documentées dans la littérature [11, 48]. Plusieurs principes fondamentaux ont guidé notre démarche :

Clarté et précision de la consigne :

Un prompt doit exprimer de manière explicite et non ambiguë la tâche attendue. Plus l'instruction est claire, plus le modèle est en mesure de formuler une réponse pertinente. Il convient d'éviter les formulations vagues ou implicites, qui laissent trop de liberté d'interprétation au modèle et favorisent les risques d'hallucinations.

Niveau de directivité :

Deux niveaux de directivité peuvent être distingués dans la conception des prompts, selon le degré de liberté laissé au modèle dans la génération des réponses :

- Prompt ouvert : Il laisse une large marge d'interprétation au LLM. Utilisé dans des contextes exploratoires ou créatifs, ce type de prompt permet au modèle de proposer des réponses variées et originales, sans cadre strict.
- Prompt directif : Il guide précisément la réponse attendue grâce à des instructions claires, structurées et ciblées. Ce type de prompt est particulièrement adapté aux contextes nécessitant rigueur, reproductibilité et pertinence opérationnelle.

Dans le cadre de notre projet, nous avons retenu l'approche directif, plus conforme aux exigences du domaine industriel. Elle permet de limiter les interprétations ambiguës, d'assurer la cohérence des réponses et de garantir leur alignement avec les objectifs fonctionnels de la GMAO.

Quantité de contexte :

Un excès de contexte peut noyer l'information essentielle, tandis qu'un contexte insuffisant peut rendre la réponse imprécise. Il est donc essentiel de trouver un équilibre entre concision et exhaustivité, selon le type de tâche et le format de réponse attendu.

Décomposition de tâches complexes :

Dans le cas de requêtes complexes, il est recommandé de découper la tâche principale en sous-tâches simples et séquentielles.

Formatage lisible et balisage :

Utiliser des formats standardisés et lisibles augmente la probabilité que le LLM interprète correctement les différentes parties du prompt. Il est recommandé de :

- Séparer l'instruction du contexte avec des symboles spécifiques
- Utiliser des balises simples pour délimiter les champs

Intégration d'exemples (Few-shot prompting) :

L'ajout de quelques exemples d'entrées-sorties directement dans le prompt permet au LLM de s'aligner sur le style, le format ou le raisonnement attendu. Ces démonstrations doivent être soigneusement choisies, pertinentes, et représentatives de la tâche à accomplir.

4.4.3.5 Choix du type de prompt adapté à notre assistant

En nous appuyant sur la typologie des techniques de prompting (présentée au chapitre 1) ainsi que sur les bonnes pratiques issues de la littérature, nous avons retenu pour notre assistant intelligent GMAO une approche hybride du prompting, spécifiquement conçue pour répondre aux exigences du contexte industriel. Ce schéma combine trois leviers complémentaires :

- Le *few-shot prompting* a été privilégié pour améliorer la précision des réponses dans les tâches techniques, en fournissant des exemples explicites qui orientent le modèle sur le format attendu ;
- Le *negative prompting* a été intégré afin de renforcer le contrôle du comportement du modèle, en évitant les dérives narratives et en garantissant le respect du périmètre fonctionnel, aspect essentiel dans un environnement industriel structuré ;
- Les *multi-turn instructions* permettent à l'agent de gérer des dialogues complexes impliquant plusieurs étapes, ce qui est particulièrement pertinent pour des cas d'usage tels que le diagnostic de pannes.

Cette approche de prompting permet de générer des réponses précises, contextualisées et opérationnelles, tout en limitant les dérives narratives ou techniques. Il répond aux contraintes spécifiques de la GMAO : clarté des réponses, conformité aux règles d'accès, adaptation aux rôles utilisateurs et respect des attentes métier en matière d'efficacité, de traçabilité et de pertinence.

La définition et le choix des outils pour le développement d'un agent conversationnel intelligent constituent une étape cruciale pour garantir la performance et l'efficacité du système. Cette section a permis de présenter les critères de sélection, les options envisagées et les choix finaux des modèles de langage et d'embedding adoptés pour cette application.

Le choix du modèle de langage LLaMa3.3-70B s'est imposé comme le plus pertinent en raison de ses performances élevées en génération de requêtes SQL, de sa capacité contextuelle étendue, et de sa compatibilité avec les exigences techniques et linguistiques du projet. Ce modèle, combiné avec le framework LlamaIndex qui permet d'orchestrer efficacement l'ensemble du pipeline de traitement de l'information, depuis l'ingestion des données jusqu'à la génération de réponses contextualisées.

Le choix de LlamaIndex comme colonne vertébrale de notre assistant GMAO s'est imposé pour plusieurs raisons stratégiques. D'une part, il centralise et orchestre l'ensemble des étapes critiques du système : l'ingestion des données, la vectorisation sémantique, le retrieval, ainsi que la gestion fine des prompts. D'autre part, sa nature hautement modulaire et extensible le rend compatible avec les modèles open source issus de bibliothèques telles que HuggingFace ou TogetherAI, offrant ainsi une grande flexibilité dans le choix et l'évolution des briques technologiques. De plus, LlamaIndex permet une intégration fluide avec des bases de données relationnelles comme SQL Server, répondant ainsi aux exigences d'interfaçage avec notre sys-

tème d'information industriel. Enfin, il bénéficie d'une documentation exhaustive et d'une communauté active, en faisant un choix fiable, évolutif et pérenne dans un environnement à forte contrainte technique.

Parallèlement, le modèle d'embedding sentence-transformers/all-MiniLM-L6-v2 a été sélectionné pour sa capacité à transformer les données textuelles en représentations vectorielles de haute qualité, essentielles pour la recherche sémantique et la compréhension contextuelle. Ce modèle, à la fois open source, léger et performant, permet une intégration native avec LlamaIndex, garantissant ainsi une recherche vectorielle pertinente et efficiente.

L'intégration des briques cognitives, telles que les embeddings sémantiques, la logique RAG et le prompt engineering, a été rendue possible grâce à l'architecture modulaire et évolutive de LlamaIndex. Cette architecture permet de transformer les données brutes en informations exploitables, de les contextualiser selon le domaine métier, et de piloter les échanges avec le LLM de manière fluide et naturelle.

En conclusion, le choix des outils et leur intégration dans un environnement cohérent et performant constituent une étape déterminante pour la réussite du projet. Le modèle Llama3.3-70B, combiné avec le modèle d'embedding sentence-transformers/all-MiniLM-L6-v2 et le framework LlamaIndex, offre une solution robuste, adaptable et alignée avec les exigences techniques et fonctionnelles du projet, tout en garantissant une expérience utilisateur optimale dans le cadre d'une GMAO augmentée par l'intelligence artificielle.

4.5 Implémentation technique de l'agent

À l'issue de la définition des besoins fonctionnels et techniques, de la sélection des outils appropriés et de l'élaboration d'une architecture préliminaire, cette section présente la mise en œuvre concrète du développement de l'agent intelligent intégré à la solution PLM-GMAO. L'objectif est de traduire la conception théorique en un système pleinement opérationnel, capable d'interagir efficacement avec la base de données, d'interpréter des requêtes formulées en langage naturel, et de restituer des résultats pertinents au sein d'une interface intuitive.

Cette section détaille, d'une part, la logique de développement adoptée pour garantir la robustesse, l'évolutivité et la maintenabilité de la solution ; d'autre part, l'architecture finale implémentée. Elle couvre le développement des différents modules définis dans l'architecture, la connexion aux bases de données et aux systèmes internes de la GMAO, ainsi que l'intégration complète de l'agent conversationnel à l'interface utilisateur de la solution.

4.5.1 Développement des moteurs de traitement

Cette partie expose la concrétisation technique des éléments conceptuels précédemment présentés. Elle détaille les différentes étapes de développement qui ont conduit à la mise en œuvre effective du système, en conformité avec les spécifications fonctionnelles définies en amont. Le développement s'inscrit dans une logique d'extension du système de traitement intelligent décrit dans l'architecture initiale du chatbot.

Le module de traitement du langage naturel repose sur l'intégration d'un grand modèle de langage, en l'occurrence Llama3.3-70B. Quant au module algorithmique, il regroupe l'ensemble des outils mobilisés par l'agent, incluant notamment le moteur d'interrogation SQL, le moteur

de recherche documentaire RAG, ainsi que des outils complémentaires tels que l'intégration de documents dans le système.

4.5.1.1 Préparation de l'environnement logiciel

La première phase du développement a consisté à établir un environnement logiciel stable et adapté aux exigences du projet. Le langage Python a été retenu pour sa polyvalence, la richesse de son écosystème en bibliothèques dédiées à l'intelligence artificielle, ainsi que du soutien actif de sa communauté.

Cette étape a impliqué la configuration de l'environnement de travail et l'installation des bibliothèques nécessaires répondant aux exigences spécifiques : connexion à la base de données, l'orchestration du modèle de langage, gestion des embeddings, ainsi que la construction du prompt.

Parmi les bibliothèques importées, on cite notamment :

- Llama-index, pour la gestion de la chaîne RAG et l'orchestration entre les sources de données et le LLM.
- SQLAlchemy, pour l'interaction avec la base de données SQL Server.
- Flask, pour la création de l'interface web de l'agent.

Les étapes essentielles de cette phase sont illustrées dans les figures suivantes :

```
def get_engine():
    server = os.environ.get('SQL_SERVER')
    database = os.environ.get('SQL_DATABASE')
    user = os.environ.get('SQL_USER')
    password = os.environ.get('SQL_PASSWORD')
    conn_str = f"mssql+pymssql://{user}:{password}@{server}/{database}"
    engine = sqlalchemy.create_engine(conn_str, connect_args={"timeout": 120})
    return engine
```

FIGURE 4.4 – Connexion à la base de données SQL Server

Cette figure présente la configuration de la chaîne de connexion à l'aide de SQLAlchemy, et la création du moteur permettant une communication avec la base PLM-GMAO.

```
return (
    "Tu es un assistant spécialisé en GMAO (Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur), avec une expertise approfondie en maintenance industrielle.\n"
    "Tu es intégré à l'application PLM-GMAO, qui exploite la base de données de l'entreprise Coca-Cola Algérie.\n"
    "Tu interroges une base SQL Server 2019 et des documents techniques (PDF, manuels, modes opératoires) via un moteur RAG.\n"
    "Tu assistes les utilisateurs en langage naturel, de façon claire, concise et professionnelle.\n"
    "Adopte un ton professionnel, clair et pédagogique, adapté à un utilisateur d'une solution GMAO.\n"
    "Rédige des paragraphes bien formés.\n"
    "Donne des détails techniques ou contextuels si nécessaire.\n"
    "Règles générales :\n"
    "Toutes les réponses doivent être en Français.\n"
    "Sois fluide, informatif, poli et professionnel, y compris pour les échanges non techniques (bonjour, merci, etc.).\n"
    "N'invente jamais de noms de colonnes.\n"
    "Si une donnée est absente ou inconnue, dis-le.\n"
    "Si une question est floue ou incomplète, demande des précisions.\n"
    "Si elle est hors maintenance, réponds poliment et oriente l'utilisateur.\n"
```

FIGURE 4.5 – Construction du Prompt Système

Cette Figure présente le prompt système définissant les instructions initiales données au modèle afin d'encadrer son comportement. Il précise le rôle de l'agent, ici 'Assistant GMAO', le type de réponses attendues et le ton à adopter, assurant ainsi la cohérence des interactions avec l'utilisateur. Il a été construit suivant les principes définis dans la section précédente.

```
# Téléchargement du LLM
def get_together_llm(system_prompt):
    return TogetherLLM(
        api_key=os.getenv("TOGETHER_API_KEY"),
        model="meta-llama/Llama-3.3-70B-Instruct-Turbo-Free",
        temperature=0.0,
        request_timeout=300,
        system_prompt=system_prompt,
    )

# Téléchargement du modèle d'embedding
def get_embed_model():
    return HuggingFaceEmbedding(model_name="all-MiniLM-L6-v2")
```

FIGURE 4.6 – Téléchargement du LLM et Modèle d'embedding

Comme illustré dans la figure 4.6, cette étape consiste d'une part à récupérer le modèle de langage via l'API de Together AI à l'aide d'une clé d'accès sécurisée, et d'autre part à télécharger le modèle d'embedding depuis Hugging Face à l'aide de la bibliothèque LlamaIndex. Le modèle LLM est configuré avec les paramètres nécessaires, notamment le prompt système précédemment défini, afin de l'adapter à son rôle dans le traitement des requêtes.

La base de développement étant fonctionnelle, les sections suivantes présenteront les différents modules fonctionnels de l'agent.

4.5.1.2 Construction des moteurs d'interrogation

Moteur SQL

Afin de permettre l'interrogation autonome de la base de données et de répondre efficacement aux requêtes nécessitant l'accès à celle-ci, un moteur d'interrogation en langage naturel a été intégré. Ce dernier repose sur plusieurs fondements techniques complémentaires :

- Une compréhension approfondie de la structure du schéma relationnel, limitant l'accès aux seules tables autorisées afin de garantir la sécurité des données.
- L'indexation des métadonnées via LlamaIndex, permettant une recherche sémantique plus efficace et pertinente.
- L'intégration du contexte conversationnel, incluant l'historique des échanges, afin de générer des réponses contextualisées et adaptées à l'utilisateur.
- L'exploitation conjointe d'un LLM et d'un modèle d'embedding, afin d'interpréter avec précision les requêtes formulées en langage naturel.

```

query_engine = NLSQLTableQueryEngine(
    sql_database=sql_database,
    tables=allowed_tables,
    llm=Settings.llm,
    obj_index=obj_index,
    embedding_model=embed_model,
    synthesize_response=True,
)
return query_engine

```

FIGURE 4.7 – Moteur SQL

Lorsque le moteur est sollicité, il prend en charge l'ensemble du processus illustré dans la figure 4.7 : la question formulée par l'utilisateur est analysée sémantiquement par le LLM, traduite automatiquement en requête SQL, puis exécutée. Le résultat est ensuite restitué à l'utilisateur via l'interface.

Moteur Documentaire (RAG)

Pour enrichir les capacités de l'agent, un moteur documentaire fondé sur le principe RAG a été intégré. Ce moteur permet d'interroger un corpus de documents techniques (manuels et modes opératoires) stockés localement, tout en garantissant un haut niveau de pertinence et de précision dans les réponses.

Afin d'optimiser l'exploitation du corpus documentaire et de limiter le bruit informationnel, une stratégie de filtrage automatisée a été mise en place pour exclure les pages non informatives, telles que les tables des matières et les pages blanches.

```

def is_table_of_contents(text):
    return (
        "table des matières" in text.lower() or
        re.match(r"^\d+(\.\d+)?\s", text.strip()) or
        len(text.strip()) < 30
    )

```

FIGURE 4.8 – Filtrage des pages non informatives

La figure 4.8 illustre la mise en œuvre du filtrage, permettant de ne conserver que les pages pertinentes lors de l'indexation du corpus.

Les documents sélectionnés sont ensuite vectorisés grâce au modèle d'embedding, ce qui autorise l'agent à effectuer des recherches par similarité sémantique sur l'ensemble du corpus.

```
def get_rag_query_engine(docs_dir, embed_model):
    llm = get_together_llm(
        system_prompt=(
            "Tu es un expert en maintenance. Tu disposes des manuels techniques et des modes opératoires (NIL) des équipements.\n"
            "Réponds de manière claire et uniquement en français."
        )
    )
    index = get_rag_index(docs_dir, embed_model)
    query_engine = index.as_query_engine(
        streaming=True,
        similarity_top_k=10,
        llm=llm,
    )
    return query_engine
```

FIGURE 4.9 – Moteur de recherche RAG

Le fonctionnement global du moteur documentaire est illustré dans la figure 4.9, la requête utilisateur formulée en langage naturel, est interprétée puis confrontée aux vecteurs d'index, avant qu'une réponse synthétique et contextualisée ne soit générée à partir des passages les plus pertinents, conformément au prompt système.

4.5.1.3 Extension des fonctionnalités

Afin d'étendre les capacités de l'agent conversationnel, plusieurs fonctionnalités complémentaires ont été développées et intégrées. Leur fonctionnement et leur utilité figurent ci-après :

Réponse Rapide

Afin d'améliorer l'expérience utilisateur et de rendre l'agent conversationnel plus interactif, une fonctionnalité de « réponse rapide » a été intégrée. Cette fonction permet à l'agent d'identifier automatiquement les messages de salutation, ou de politesse, et d'y répondre de manière instantanée et appropriée.

Le fonctionnement est le suivant : l'agent analyse chaque requête utilisateur et, en cas de détection de termes courants tel que « bonjour », « merci », il fournit une réponse standardisée sans solliciter les autres outils. Ce mécanisme assure une interaction plus naturelle et fluide, tout en déchargeant les autres modules de traitement inutiles, donc assurer sa réponse rapide pour les échanges simples. (Voir H, figure H1)

Gestion des droits d'accès

Pour assurer la confidentialité des données et de respecter les règles métiers de l'organisation, un mécanisme de contrôle d'accès basé sur les rôles utilisateurs a été intégré à l'agent. Ce contrôle permet de restreindre dynamiquement l'accès à certaines tables ou colonnes sensibles de la base de données, en fonction du profil de l'utilisateur (opérateur, chef de ligne, planificateur, responsable).

L'agent vérifie le rôle de l'utilisateur à chaque requête et applique des filtres adaptés (Voir Annexe H, figure H2) :

- Masquer des informations sensibles : Les utilisateurs n'ayant pas les droits adéquats ne peuvent pas interroger les tables ou colonnes contenant de données jugées confidentielles, telles que les coûts de maintenance.
- Adaptation dynamique des résultats : Les réponses de l'agent ne contiennent que les

informations autorisées pour le rôle concerné, garantissant ainsi la conformité avec les politiques interne de sécurité et de confidentialité de l'entreprise.

Introduction de documents externes

Pour renforcer l'utilité de l'agent, une fonctionnalité permettant aux utilisateurs de télécharger des documents (PDF, Word, PowerPoint, Texte) et d'interroger leur contenu a été intégrée. Cette option offre une grande flexibilité, notamment pour traiter des documents techniques ou des rapports qui ne figurent pas dans la base documentaire standard.

Lorsque l'utilisateur charge un fichier via l'interface, le texte est automatiquement extrait, quel que soit le format pris en charge. Un mécanisme de synthèse et de segmentation du texte est ensuite appliqué pour permettre à l'agent de répondre précisément à une question portant sur le contenu du document fourni. (Voir Annexe H, figure H3)

L'ensemble des développements présentés dans cette section a permis de doter l'agent conversationnel d'une architecture robuste, sécurisée et modulaire, capable de répondre efficacement aux différents besoins métiers de la GMAO. Grâce à l'intégration de moteurs d'interrogation spécialisés, de contrôles d'accès adaptés et d'outils complémentaires, le backend assure la gestion intelligente des requêtes et la pertinence des réponses fournies à l'utilisateur.

4.5.1.4 Orchestration par un agent multi-outils

L'ensemble des outils développés est orchestré par un agent principal reposant sur le paradigme ReAct (*Reasoning and Acting*). Cet agent intelligent est chargé de sélectionner automatiquement l'outil le plus pertinent en fonction de la requête formulée par l'utilisateur. Selon les besoins, il peut mobiliser l'un des moteurs d'interrogation, activer une fonctionnalité spécifique, ou encore combiner plusieurs outils de manière coordonnée lorsque la complexité de la requête l'exige. Cette capacité d'orchestration garantit une interaction fluide, cohérente et adaptée à chaque situation, renforçant ainsi la pertinence de l'expérience utilisateur.

```
# Agent GMAO
def get_gmao_agent(engine, docs_dir, user_role, chat_history=None):
    sql_query_engine = get_query_engine(engine, user_role, chat_history)
    sql_tool = QueryEngineTool.from_defaults(
        query_engine=sql_query_engine,
        name="sql_agent",
        description="Interroge la base GMAO (historique, rapports, indicateurs, pannes, etc.)."
    )
    embed_model = get_embed_model()
    rag_query_engine = get_rag_query_engine(docs_dir, embed_model)
    rag_tool = QueryEngineTool.from_defaults(
        query_engine=rag_query_engine,
        name="doc_agent",
        description="Répond aux questions sur les manuels et documents techniques. Utilise-le pour toute question documentaire ou sur les équipements."
    )
    doc_tool = get_file_tool()
    agent = ReActAgent.from_tools(
        tools=[sql_tool, rag_tool, doc_tool],
        system_prompt=(
            "Tu es un agent GMAO intelligent. Choisis le bon outil pour chaque question (SQL, RAG, File, Reply).\n"
            "Réponds toujours en français et arrête-toi dès que tu as la réponse utile.\n"
        ),
        max_iterations=5
    )
    return agent
```

FIGURE 4.10 – Agent GMAO

La figure 4.10 illustre l'architecture de l'agent, intégrant l'ensemble des modules développés. Celui-ci est configuré pour répondre systématiquement en français et peut enchaîner plusieurs

étapes de raisonnement successives si cela est nécessaire pour fournir une réponse complète et contextualisée.

4.5.2 Développement de l'interface utilisateur

La mise en œuvre de l'agent ne saurait être complète sans une intégration fluide dans l'environnement de travail des utilisateurs. A cette fin, une interface conviviale a été conçue sous forme d'un bouton flottant, accessible directement depuis l'application web PLM-GMAO.

Le bouton a été intégré à l'aide d'une extension JavaScript et CSS, qui injecte dynamiquement des éléments dans la page sans nécessité de modification du code source de l'application. La communication avec l'agent a été assurée par une API de dialogue, implémentée via un backend Flask. Cette architecture a été adoptée afin de contourner les restrictions d'accès au code tout en tirant parti de l'interface web de PLM-GMAO. L'utilisateur peut ainsi accéder à tout moment à l'agent conversationnel grâce à une chatbox intégrée, directement accessible depuis l'interface de la solution GMAO.

4.5.2.1 Architecture du service d'API Flask

Le service d'API développé avec Flask, illustré dans la figure 4.11, expose des points d'entrée REST permettant à l'interface JavaScript d'envoyer les questions des utilisateurs et de recevoir les réponses de l'agent.

```
try:
    engine = get_engine()
    agent = get_gmao_agent(engine, docs_dir, user_role, chat_history=chat_history)
    result = agent.query(user_query)
    chat_history.append({
        "user": user_query,
        "sql": getattr(result.metadata, "sql_query", None) if hasattr(result, "metadata") else None,
        "role": user_role
    })
    return jsonify({
        "response": getattr(result, "response", ""),
        "sql": getattr(result.metadata, "sql_query", None) if hasattr(result, "metadata") else None
    })
```

FIGURE 4.11 – Service d'API Flask

La logique principale assure :

- La récupération et la validation des messages utilisateur ;
- Le transfert des requêtes à l'agent conversationnel ;
- Le retour asynchrone de la réponse, formatée pour l'interface.

4.5.2.2 Extension de l'interface utilisateur (JavaScript/CSS)

L'interface utilisateur a été développée sous forme d'une extension légère en JavaScript et CSS, injectée dynamiquement dans la page web de l'application PLM-GMAO.


```
// ===COMMUNICATION BACKEND===
async function sendToBackend(userInput) {
  addTypingMsg();
  let role = getUserRole();
  let userLogin = getUserLogin();

  try {
    let response;

    if (selectedFile) {
      const formData = new FormData();
      formData.append("message", userInput);
      formData.append("file", selectedFile);
      formData.append("role", role);
      formData.append("user_login", userLogin);

      response = await fetch(`${BACKEND_URL}/chat_file`, {
        method: "POST",
        body: formData
      });
    } else {
      response = await fetch(`${BACKEND_URL}/chat`, {
        method: "POST",
        headers: { "Content-Type": "application/json" },
        body: JSON.stringify({
          message: userInput,
          role: role,
          user_login: userLogin
        })
      });
    }
  }
}
```

Activer Windows

FIGURE 4.12 – Code JavaScript de l'extension de l'interface utilisateur

Cette extension, dont le code est illustré dans la figure 4.12 :

- Crée un bouton flottant accessible en permanence ;
- Ouvre une fenêtre de chat stylisée lorsque le bouton est cliqué ;
- Gère l'envoi des messages à l'API Flask et l'affichage des réponses.

L'interface finale, résultant de l'intégration des différents modules précédemment décrits, permet une interaction fluide et intuitive entre l'utilisateur et l'agent conversationnel dénommé "IaM-Maint". La figure 4.13 en présente l'apparence dans son environnement de déploiement opérationnel.

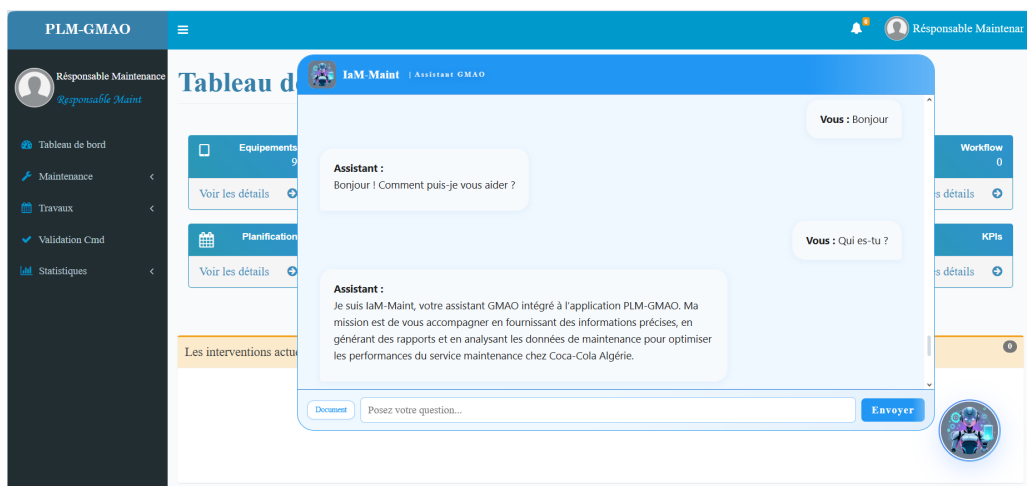


FIGURE 4.13 – Interface de l'agent conversationnel

4.5.3 Architecture Finale

L'architecture présentée dans la figure 4.14 illustre l'approche structurée et cohérente adoptée pour le traitement des requêtes par notre assistant intelligent. Elle repose sur une dis-

distinction claire entre le Frontend, chargé de la gestion des interactions utilisateur, et le Backend, responsable du traitement de l'information et de la génération des réponses à l'aide de modèles d'intelligence artificielle.

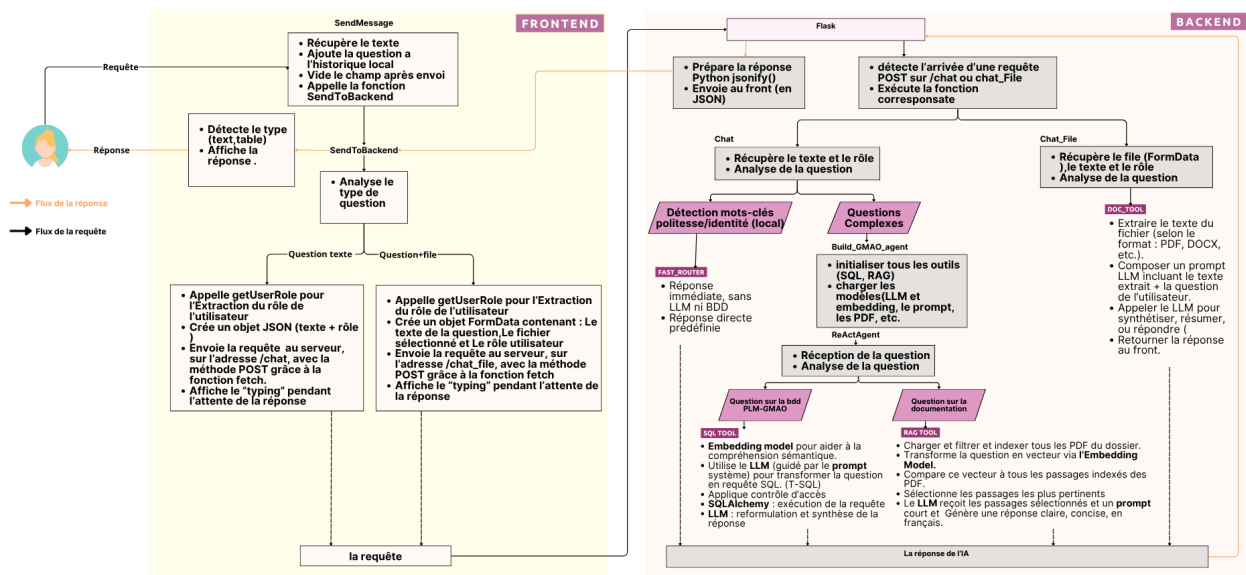


FIGURE 4.14 – Architecture finale de l'agent conversationnel

Le flux fonctionnel de cette architecture suit une logique séquentielle et modulaire, assurant une circulation fluide et optimisée de l'information entre les différents composants du système.

Dans un premier temps, l'utilisateur interagit avec l'interface via le Frontend, soit en saisissant une question, soit en téléversant un fichier. Le module SendMessage se charge de capturer cette entrée, d'en normaliser le contenu, puis de l'acheminer vers le module SendToBackend. Ce dernier procède à une analyse préliminaire de la nature de la requête (texte ou fichier), afin d'en déterminer la voie de traitement adéquate.

Dans le cas d'une question textuelle :

Une fois la requête transmise au Backend, elle est réceptionnée par le serveur Flask, qui assure un rôle central d'orchestration. Le module Chat procède alors à une interprétation sémantique de la question. En fonction des éléments détectés (mots-clés, structure syntaxique, niveau de complexité), la requête est orientée vers l'outil le plus adapté.

Plusieurs scénarios peuvent alors se présenter :

- Si la question contient des mots-clés simples associés à une solution directe ou à une information d'identification, le module Chat active le FAST_ROUTER, qui génère une réponse rapide sans mobilisation de traitement avancé.
- Les questions complexes ou multi-étapes sont confiées à des agents spécialisés, capables de raisonner en plusieurs étapes et de produire une réponse structurée. Parmi ces cas, on distingue notamment :
 - o Pour les requêtes orientées vers les données GMAO, le traitement est délégué au module SQL_TOOL, qui génère dynamiquement une requête SQL à l'aide du LLM, interroge la base de données, puis synthétise les résultats en langage naturel.

- Lorsque la question requiert une exploitation documentaire (manuels techniques, mode opératoire), elle est traitée via le RAG_TOOL, qui combine des techniques de recherche sémantique et de génération augmentée à l'aide du LLM, afin de produire une réponse contextualisée à partir des documents indexés.
- Enfin, une combinaison de plusieurs outils peut être mobilisée, en fonction de la complexité ou du caractère hybride de la requête.

Dans le cas d'un fichier transmis par l'utilisateur :

Une fois la requête transmise au Backend, elle est réceptionnée par le serveur Flask, qui en assure également l'orchestration. Le module Chat_file procède à une analyse sémantique du fichier, puis redirige la requête vers le DOC_TOOL, chargé d'en analyser le contenu et d'en extraire les éléments pertinents à la formulation de la réponse.

À l'issue du traitement, la réponse est structurée au format JSON, puis renvoyée vers le Frontend, où elle est affichée à l'utilisateur de manière claire et lisible.

La phase de développement a permis d'implémenter des fonctionnalités avancées au sein de l'agent conversationnel, en assurant leur intégration cohérente dans l'environnement GMAO et leur alignement avec les exigences fonctionnelles préalablement définies. La prochaine étape consistera en une évaluation rigoureuse de la performance et de la pertinence de la solution mise en œuvre.

4.6 Analyse de la Performance Fonctionnelle de l'Agent

La phase finale consiste à évaluer la solution développée, afin d'en mesurer la robustesse, la fiabilité et l'adéquation aux exigences opérationnelles. Des tests fonctionnels sont menés pour apprécier la pertinence des réponses fournies et la capacité du système à interagir avec des sources de données multiples.

L'analyse de la performance fonctionnelle de l'agent conversationnel intégré à la GMAO constitue une étape clé pour apprécier son impact sur l'efficacité des processus de maintenance. Elle vise à évaluer la capacité de l'agent à interpréter des requêtes formulées en langage naturel, à interagir de manière cohérente avec la base de données, et à restituer des réponses contextualisées, précises et adaptées aux contraintes du secteur industriel.

Cette démarche permet également d'identifier d'éventuelles limitations, tant sur le plan fonctionnel que technique, en vue d'améliorations futures. La démarche adoptée repose sur une méthodologie rigoureuse, fondée sur des critères objectifs regroupés en trois dimensions : la conformité aux objectifs métier, la qualité des réponses produites, et la fluidité de l'interaction avec l'utilisateur.

4.6.1 Définition des métriques d'évaluation

Dans un souci de rigueur méthodologique, il convient de formaliser les critères correspondant à chaque axe d'évaluation. Ceux-ci ont été définis d'une part, par rapport aux travaux récents relatifs à des systèmes conversationnels analogues (études [33, 49, 50, 51] ; d'autre part, l'alignement avec les objectifs fonctionnels du chatbot développé. Les critères retenus, ainsi que leurs caractéristiques et modalités d'appréciation, sont présentés ci-après selon les axes

d'évaluation prédéfinis. Afin de refléter la diversité des sollicitations possibles dans un contexte industriel, chaque critère sera analysé à travers trois niveaux de complexité des requêtes : (i) les questions simples, portant sur des données directs et facilement accessibles ; (ii) les questions intermédiaires, nécessitant le croisement de plusieurs données ou opérations ; et (iii) les questions complexes, impliquant des capacités d'analyse, d'interprétation ou de diagnostic.

4.6.1.1 Conformité aux objectifs métier

Les critères de cette catégorie évaluent la capacité de l'agent à accomplir des fonctions critiques en lien avec les objectifs opérationnels définis lors du développement du système.

- Interaction avec la base de données SQL : L'agent doit être en mesure de générer une requête SQL correcte, exempte d'erreurs de syntaxe, permettant d'extraire les données pertinentes et de les présenter de manière intelligible.
- Extraction d'informations à partir de documents techniques : lorsqu'un document est intégré dans le système, l'information extraite par l'agent doit correspondre précisément à ce qui est contenu dans le document et répondre à l'intention exprimée dans la requête.
- Génération des rapports de maintenance : L'agent doit être capable de générer un rapport contenant toutes les informations essentielles (nature de l'interventions, durée, pièces remplacées, cout, etc.).
- Assistance au diagnostic : à partir d'une description de symptômes, l'agent doit proposer au moins une hypothèse cohérente et techniquement plausible, fondée sur les données historiques ou les connaissances documentées.
- Guidage dans les routines de maintenance : L'agent doit fournir une séquence d'actions logique et conforme aux pratiques standards de maintenance, adaptée au type d'équipement et à la nature de l'intervention.
- Synthèse de documents importés : lorsqu'un utilisateur importe un document, le résumé généré doit restituer avec fidélité les informations clés, sans erreur d'interprétation ni omission importante.
- Gestion des droits et confidentialité : L'accès aux informations sensibles doit être conditionné par le profil utilisateur, de manière à ce que qu'aucune donnée critique ne soit accessible sans autorisation explicite.
- Assistance à l'utilisation du système GMAO : L'agent doit être capable de fournir une aide contextuelle claire sur les fonctionnalités de la GMAO, accompagné si nécessaires d'un exemple.

4.6.1.2 Qualité du contenu généré

Cette catégorie évalue la pertinence, la fiabilité et la valeur informative des réponses fournies par l'agent conversationnel.

- Précision : la réponse doit correspondre exactement aux données dans les sources disponibles (Base de données GMAO, Documents), sans générer d'informations erronées ou extrapolées.
- Exhaustivité : Lorsqu'une requête contient plusieurs éléments, l'agent doit fournir une réponse couvrant l'ensemble des informations demandées, sans en omettre.
- Généralisation : L'agent doit être capable de répondre à une requête même lorsque celle-ci est formulée avec des tournures inhabituelles ou imprécises, à condition qu'elle reste sémantiquement cohérente.

4.6.1.3 Qualité de l'interaction utilisateur

Cette dimension porte sur la fluidité, la clarté et l'efficacité de l'échange entre l'utilisateur et l'agent conversationnel.

- Clarté et lisibilité : le contenu généré doit être structuré, exprimé dans un langage technique accessibles et compréhensible, sans formulation ambiguë ni surcharge d'informations.
- Temps de réponse : le délai de traitement doit rester suffisamment court pour garantir une expérience fluide, idéalement inférieur à 20 secondes pour une requête simple, et ne dépassant pas 1min pour une requête complexe.
- Respect linguistique : Les réponses doivent être entièrement rédigées en français, dans un style technique approprié, sans fautes majeures ni expressions issues d'autres langues.

Lors de l'évaluation, les critères relatifs à la qualité du contenu généré et à l'interaction avec l'utilisateur seront systématiquement appliqués à l'ensemble des requêtes, indépendamment de leur niveau de complexité. En revanche, les critères relevant de la conformité aux objectifs métier correspondent aux différentes fonctionnalités activées par l'utilisateur (requêtes sur la base de données GMAO, traitement de documents, etc.). Leur évaluation ne sera effectuée que si la fonctionnalité correspondante est utilisée pendant le scénario de test.

La section suivante expose ainsi le déroulement de l'évaluation, les résultats obtenus, ainsi que l'interprétation critique de la performance fonctionnelle de l'agent conversationnel.

4.6.2 Évaluation expérimentale et interprétation des résultats

Pour mettre en œuvre cette évaluation, un corpus de requêtes a été élaboré et réparti selon les niveaux de complexité. Les questions simples et intermédiaires ont été regroupées dans un tableau synthétique (voir tableau 4.5), structuré en trois colonnes :

1. Formulation de la question
2. Réponse générée par le chatbot
3. Commentaire critique sur la pertinence et la qualité de la réponse : Ce commentaire vise à apprécier de manière critique la pertinence, la précision et la fiabilité de la réponse générée par l'agent conversationnel. L'évaluation repose sur deux référentiels fondamentaux :
 - Les données issues de la base PLM-GMAO, qui constituent la source principale d'informations techniques, opérationnelles et historiques liées à la maintenance.
 - La documentation officielle, comprenant les manuels d'utilisation et les modes opératoires.

Quant aux questions complexes, en raison de leur contenu plus détaillé, elles sont présentées séparément, et illustrées par des extraits visuels des réponses générées. Cette présentation permet d'évaluer la capacité de l'agent à formuler des réponses élaborées, intégrant des éléments de diagnostic, d'analyse et de synthèse documentaire.

4.6.2.1 Présentation des requêtes simples et intermédiaires

TABLE 4.5 – Résultats pour les questions simples et intermédiaires

| Niveau | Questions | Réponse du Chatbot | Commentaire |
|--------|--|--|--|
| Simple | 1. Combien de demandes d'intervention existent actuellement? Y a-t-il des demandes en cours? (figure H4) | <p>Actuellement, il existe 1 demande d'intervention acceptée et 215 demandes d'intervention réalisées. Cela signifie qu'il n'y a pas de demandes en cours, car les statuts "Acceptée" et "Réalisée" indiquent que les demandes ont été traitées ou sont en attente de traitement, mais il n'y a pas de statut "En cours" dans les résultats. Il est possible que les demandes en cours soient représentées par un autre statut, mais en fonction des résultats fournis, il semble qu'il n'y ait pas de demandes actuellement en cours de traitement. Voici les détails :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Demandes réalisées : 215 - Demandes acceptées : 1 <p>Il serait utile de vérifier les autres statuts possibles pour avoir une vue complète de l'état des demandes d'intervention.</p> | La réponse est correcte, conforme aux données de la base, et formulée de manière claire. La présentation est soignée, ce qui facilite la lecture et la compréhension. |
| | 2. Comment créer une demande d'intervention? (figure H5) | <p>Pour créer une demande d'intervention, vous devez suivre les étapes suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Vous devez spécifier le titre de la demande d'intervention, qui doit être clair et concis. - Vous devez définir la priorité de la demande, qui peut être 'Urgent', 'Moyen' ou 'Bas'. - Vous devez identifier le demandeur, qui est généralement l'employé qui a détecté le problème. - Vous devez spécifier le récepteur de la demande, qui est généralement le responsable de la maintenance. - Vous devez saisir la date de création de la demande d'intervention, qui est généralement la date actuelle. - Vous devez définir la date limite pour traiter la demande, qui peut | La réponse fournit un guide complet et structuré décrivant les étapes nécessaires à la création d'une demande d'intervention. La mise en forme est soignée et agréable à lire. |

Suite page suivante

| Niveau | Questions | Réponse du Chatbot | Commentaire |
|--------|--|--|--|
| Simple | | <p>être calculée en ajoutant un certain nombre de jours à la date actuelle.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Vous devez identifier l'équipement concerné par la demande d'intervention. - Vous devez fournir une description détaillée de la demande, qui peut inclure les symptômes du problème, les causes potentielles et les remèdes proposés. - Vous devez spécifier le statut initial de la demande, qui est généralement 'En cours'. - Vous devez générer un code unique pour la demande d'intervention, qui peut être utilisé pour la suivre et la gérer. <p>Voici un exemple de création d'une demande d'intervention : Titre : Demande d'intervention exemple Priorité : Urgent Demandeur : 1 Récepteur : Responsable maintenance Date de création : Date actuelle Date limite : Dans 7 jours Équipement : 1 Description : Description de la demande Statut : En cours Code : DI001. Il est important de noter que la création d'une demande d'intervention doit être effectuée en suivant les procédures et les règles définies par votre organisation, et qu'il est recommandé de consulter les documents techniques et les manuels de maintenance pour obtenir des informations plus détaillées sur les équipements et les procédures de maintenance.</p> | |
| | 3. Quels sont les coûts totaux de maintenance pour chaque équipement ? (figure H6) | <p>Les coûts totaux de maintenance pour chaque équipement sont les suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Banderoleuse : 6 422,50 DZD - Codeur : 595,00 DZD - Convoyeurs : 4 926 191,61 DZD | La réponse est exacte. La répartition des coûts par équipement est bien présentée et précise, ce qui permet une lecture analytique efficace. |

Suite page suivante

| Niveau | Questions | Réponse du Chatbot | Commentaire |
|---------------|---|---|---|
| Simple | | <ul style="list-style-type: none"> - Etiqueteuse : 374 209,02 DZD - Etiqueteuse palette : 1050,00 DZD - Fardeuse : 23 122,11 DZD - Palettiseur : 474 851,42 DZD - Souffleuse : 56 664,23 DZD - Soutireuse : 213 266,00 DZD <p>Ces coûts représentent les dépenses totales engagées pour la maintenance de chaque équipement, et peuvent aider à identifier les équipements les plus coûteux en termes de maintenance. Il est important de noter que ces coûts sont susceptibles de varier en fonction de la période considérée et des activités de maintenance réalisées.</p> | |
| Intermédiaire | 4. Analysez ce mode opératoire et indiquez-moi les étapes nécessaires, leur fréquence et les outils à utiliser. | <p>Analyse du mode opératoire des actions de maintenance préventive pour le Mixeur PET 20/18 :</p> <p>Le document fourni décrit les étapes nécessaires pour effectuer des actions de maintenance préventive sur le Mixeur PET 20/18. Voici les étapes identifiées, leur fréquence et les outils à utiliser :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Vérification et nettoyage des filtres à gaze : Cette étape est cruciale pour assurer une bonne ventilation et éviter les problèmes de fonctionnement. La fréquence de cette étape n'est pas spécifiée dans le document, mais il est recommandé de la réaliser régulièrement, par exemple tous les 3 à 6 mois, en fonction de l'utilisation du mixeur. - Vérification et maintenance des pompes à vide : Les pompes à vide sont essentielles pour le fonctionnement du mixeur. Il est important de vérifier leur état et de les maintenir régulièrement pour éviter les pannes. La fréquence de cette étape peut varier en fonction de | <p>L'analyse est détaillée et répond de manière exhaustive à la question. La réponse inclut bien les éléments demandés (étapes, fréquence, outils). Cependant, certaines fréquences mentionnées sont inexactes : le mode opératoire concerne des activités hebdomadaires à mensuelles, tandis que la réponse du chatbot indique des fréquences supérieures à un mois.</p> |

Suite page suivante

| Niveau | Questions | Réponse du Chatbot | Commentaire |
|---------------|-----------|---|---|
| Intermédiaire | | <p>l'utilisation, mais une vérification tous les 6 à 12 mois est généralement recommandée.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Vérification des lampes : Les lampes sont utilisées pour l'éclairage et la sécurité. Il est important de vérifier leur fonctionnement régulièrement, par exemple tous les 3 à 6 mois, pour assurer une bonne visibilité et sécurité. - Vérification des boutons d'urgence : Les boutons d'urgence sont essentiels pour la sécurité des opérateurs. Il est important de vérifier leur fonctionnement régulièrement, par exemple tous les 3 à 6 mois, pour assurer une réponse rapide en cas d'urgence. - Vérification des raccords des tuyaux : Les raccords des tuyaux sont critiques pour le fonctionnement du mixeur. Il est important de vérifier leur état et de les maintenir régulièrement pour éviter les fuites et les pannes. La fréquence de cette étape peut varier en fonction de l'utilisation, mais une vérification tous les 6 à 12 mois est généralement recommandée. - Vérification et maintenance des pompes : Les pompes sont essentielles pour le fonctionnement du mixeur. Il est important de vérifier leur état et de les maintenir régulièrement pour éviter les pannes. La fréquence de cette étape peut varier en fonction de l'utilisation, mais une vérification tous les 6 à 12 mois est généralement recommandée. - Vérification des vannes : Les vannes sont utilisées pour contrôler le flux de liquides. Il est important de vérifier leur fonctionnement régulièrement, par exemple tous les 3 à 6 mois, pour assurer un contrôle précis. - Vérification des échangeurs à plaques : Les échangeurs à plaques sont utilisés pour le transfert de chaleur. Il est important de vérifier leur état et de les maintenir régulièrement pour éviter les pannes. | <p>Cela crée un écart avec le référentiel attendu, bien que les informations soient présentées de manière claire et structurée.</p> |

Suite page suivante

| Niveau | Questions | Réponse du Chatbot | Commentaire |
|---------------|-----------|---|-------------|
| Intermédiaire | | <p>La fréquence de cette étape peut varier en fonction de l'utilisation, mais une vérification tous les 6 à 12 mois est généralement recommandée.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Vérification des régulateurs d'air : Les régulateurs d'air sont utilisés pour contrôler la pression de l'air. Il est important de vérifier leur fonctionnement régulièrement, par exemple tous les 3 à 6 mois, pour assurer un contrôle précis. - Purge du séparateur d'eau : Le séparateur d'eau est utilisé pour séparer l'eau des autres liquides. Il est important de purger régulièrement le séparateur d'eau pour éviter les problèmes de fonctionnement. La fréquence de cette étape peut varier en fonction de l'utilisation, mais une purge tous les 3 à 6 mois est généralement recommandée. - Vérification des verres indicateurs : Les verres indicateurs sont utilisés pour afficher les niveaux de liquides. Il est important de vérifier leur fonctionnement régulièrement, par exemple tous les 3 à 6 mois, pour assurer une bonne visibilité et sécurité. <p>Outils à utiliser :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Clés et outils de maintenance : Les clés et outils de maintenance sont nécessaires pour effectuer les vérifications et les maintenances. - Équipements de sécurité : Les équipements de sécurité, tels que les gants et les lunettes de protection, sont nécessaires pour assurer la sécurité des opérateurs. - Manuel de maintenance : Le manuel de maintenance est nécessaire pour avoir accès aux instructions de maintenance et aux schémas du mixeur. <p>En résumé, le mode opératoire des actions de maintenance préventive pour le Mixeur PET 20/18 nécessite une vérification régulière de divers</p> | |

Suite page suivante

| Niveau | Questions | Réponse du Chatbot | Commentaire |
|---------------|---|--|---|
| Intermédiaire | | composants, tels que les filtres à gaze, les pompes à vide, les lampes, les boutons d'urgence, les raccords des tuyaux, les pompes, les vannes, les échangeurs à plaques, les régulateurs d'air et les verres indicateurs. Il est important de suivre les fréquences de maintenance recommandées pour assurer un fonctionnement optimal et prévenir les pannes. Les outils à utiliser incluent les clés et outils de maintenance, les équipements de sécurité et le manuel de maintenance. | |
| | 5. Quels sont les équipements ayant subi plus de 5 interventions durant le mois de juillet 2024 ? (figure H7) | <p>Les équipements ayant subi plus de 5 interventions durant le mois de juillet 2024 sont les suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le Palettiseur, avec 14 interventions - La Soutireuse, avec 43 interventions - Les Convoyeurs, avec 7 interventions - La Fardeleuse, avec 6 interventions - La Souffleuse, avec 6 interventions <p>Ces équipements ont nécessité un nombre important d'interventions durant le mois de juillet 2024, ce qui pourrait indiquer des problèmes de maintenance ou des besoins de réparation plus fréquents. Il serait intéressant d'analyser les causes de ces interventions pour identifier les actions à prendre pour améliorer la maintenance et la disponibilité.</p> | La réponse est pertinente et correctement extraite de la base de données. Elle inclut un niveau de détail appréciable, ce qui renforce sa valeur informative. |
| | 6. Quelles sont les 3 interventions les plus coûteuses en frais de réparation ? (figure H8) | <p><u>Réponse pour le responsable maintenance :</u>
 Les 3 interventions les plus coûteuses en frais de réparation en juin 2024 sont :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. L'intervention de tâche ID 747, concernant la panne de la machine de base, avec un coût de réparation de 431 592,81 DZD. Cette intervention a été effectuée sur l'équipement "Palettiseur". La cause de la panne était un incident du servo-amplificateur, qui a nécessité son remplacement en raison de la fin de sa durée de vie. | la réponse est complète, précise et bien présentée, avec une mise en page claire facilitant l'analyse. |

Suite page suivante

| Niveau | Questions | Réponse du Chatbot | Commentaire |
|---------------|-----------|---|--|
| Intermédiaire | | <p>2. L'intervention de tâche ID 663, concernant la panne de l'étoile de transfert, avec un coût de réparation de 103 282,52 DZD. Cette intervention a été effectuée sur l'équipement "Etiqueteuse". La cause de la panne était le cisaillement du vérin d'éjection, qui a nécessité son remplacement.</p> <p>3. L'intervention de tâche ID 659, concernant également la panne de l'étoile de transfert, avec un coût de réparation de 20 625,00 DZD. Cette intervention a également été effectuée sur l'équipement "Etiqueteuse". La cause de la panne était l'usure des pinces de l'étoile de transfert, qui ont dû être changées.</p> <p>Ces interventions ont nécessité des réparations coûteuses en raison des pièces de rechange et de la main-d'œuvre nécessaires pour résoudre les problèmes techniques rencontrés sur les équipements concernés. Il est important de noter que ces coûts pourraient être réduits à l'avenir en mettant en place des mesures de maintenance préventive pour éviter les pannes et prolonger la durée de vie des équipements.</p> | |
| | | <p>Réponse pour l'opérateur :
 Désolé, cette information est confidentielle et inaccessible à votre rôle. N'hésitez pas à me poser d'autres questions sur la maintenance, je suis à votre disposition.</p> | <p>Le chatbot applique correctement une gestion différenciée des droits d'accès. Il fournit un message poli et conforme aux règles de confidentialité, indiquant que l'opérateur ne dispose pas des autorisations nécessaires pour accéder à ces informations.</p> |

Ce tableau met en évidence le bon fonctionnement du chatbot, démontrant sa capacité à interpréter des requêtes formulées en langage naturel. Il parvient ainsi à les transformer en requêtes SQL pertinentes, puis à restituer des réponses précises et compréhensibles, fondées à la fois sur les données issues de la base PLM-GMAO et sur les documents techniques fournis par l'utilisateur.

Les résultats indiquent une efficacité notable du système pour les questions simples à intermédiaires. L'ensemble des critères d'évaluation définis est globalement respecté, notamment en ce qui concerne la justesse des réponses, leur clarté, leur lisibilité, la qualité de la mise en forme, ainsi que le respect des règles de contrôle d'accès en fonction du profil de l'utilisateur. Cependant, une limite a été observée concernant les délais de réponse. Le chatbot ne respecte pas toujours les temps de réponse prédéfinis pour les requêtes simples à intermédiaires. Cette latence peut nuire à la qualité de l'interaction utilisateur, en affectant la fluidité et la réactivité attendues d'un système conversationnel.

4.6.2.2 Présentation des requêtes complexes

Cette section présente des cas complexes traités individuellement, illustrant la capacité du chatbot à gérer des requêtes à forte valeur ajoutée.

Q1. Fais-moi un rapport détaillé sur les activités de maintenance qui ont été exécutées sur la fardeuse en juillet 2024.

The screenshot shows a chatbot interface with a blue header bar containing the logo and text 'IaM-Maint | Assistant GMAO'. The main chat area has a light blue background. The assistant's response is as follows:

Assistant :
Rapport sur les activités de maintenance exécutées sur la fardeuse en juillet 2024 :

Au cours du mois de juillet 2024, plusieurs interventions de maintenance ont été réalisées sur la fardeuse. Voici les détails de ces interventions :

1. Le 14 juillet 2024, une intervention corrective a été effectuée pour réparer une panne au couloir de séparation. L'intervention a duré 15 minutes et a coûté 52,5 DZD. Les activités réalisées ont consisté à régler les pinces, notamment la pince N°10.
2. Le même jour, une autre intervention corrective a été réalisée pour changer la brosse usée du couloir de séparation. Cette intervention a duré 15 minutes et a coûté 12 744,61 DZD.
3. Le 21 juillet 2024, une intervention corrective a été effectuée pour ajuster les pignons de la machine de base. L'intervention a duré 15 minutes et a coûté 210 DZD.
4. Toujours le 21 juillet, une autre intervention corrective a été réalisée pour nettoyer la machine de base après la détection d'un corps étranger. L'intervention a duré 45 minutes et a coûté 157,5 DZD.
5. Le 23 juillet 2024, une intervention corrective a été effectuée pour régler manuellement la hauteur de la table de fardelage, qui avait été déréglée à cause de l'usure de la brosse. L'intervention a duré 20 minutes et a coûté 70 DZD.
6. Enfin, le 25 juillet 2024, une intervention corrective a été réalisée pour réparer les chaînes du couloir de séparation. L'intervention a duré 30 minutes et a coûté 105 DZD.

En résumé, les interventions de maintenance réalisées sur la fardeuse en juillet 2024 ont porté sur des réparations et des ajustements de divers composants, notamment les pinces, les brosses, les pignons et les chaînes. Les coûts totaux de ces interventions s'élèvent à 13 339,61 DZD. Il est important de noter que ces interventions ont été nécessaires pour assurer le bon fonctionnement de la fardeuse et prévenir des pannes plus graves.

At the bottom of the interface, there is a 'Document' button, a text input field with the placeholder 'Posez votre question...', and an 'Envoyer' button.

FIGURE 4.15 – Réponse 1

La réponse de l'agent, illustré dans la figure 4.15, présente un rapport de maintenance conforme aux critères de format, de clarté, et de contenu attendu. Après vérification, les informations fournies s'avèrent exhaustives, exactes et cohérentes avec les données attendues. Le rapport inclut, pour chaque activité de maintenance, les couts associés à la main-d'œuvre et aux pièces de rechange, ainsi que le cout global de l'ensemble des interventions réalisées. Cette réponse répond pleinement aux attentes en matière de complétudes et démontre la capacité de l'agent à produire des rapports techniques détaillées et cohérents à partir des données disponibles.

Q2. À partir du manuel, propose des améliorations possibles pour les activités de maintenance préventive de la souffeuse.

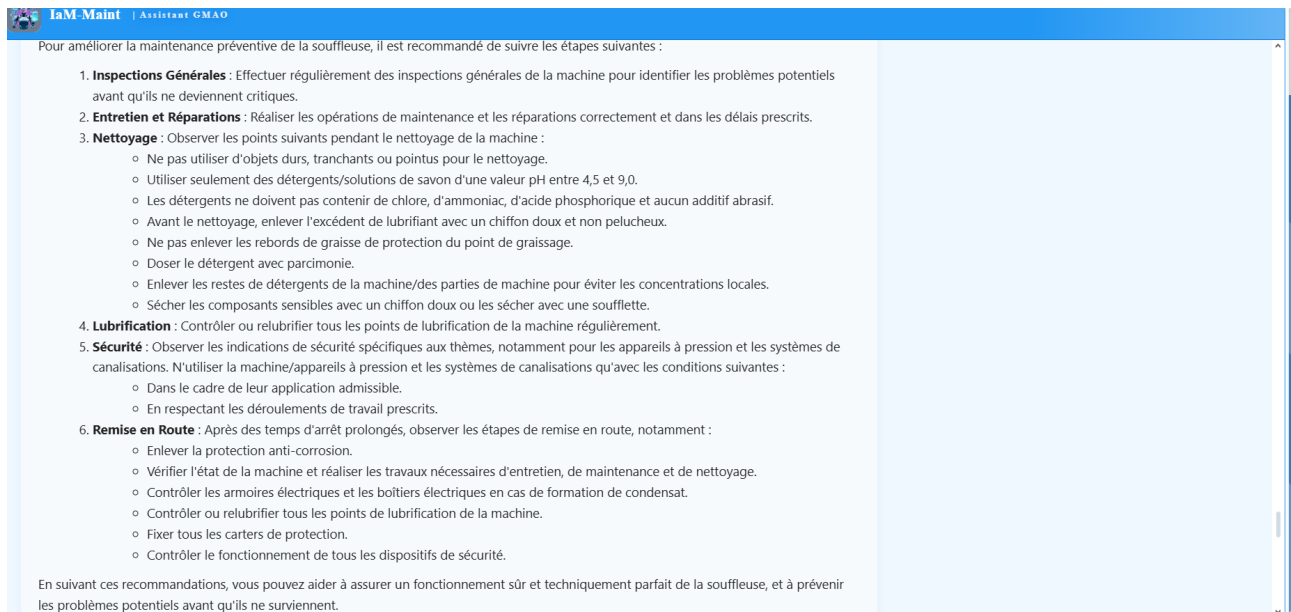


FIGURE 4.16 – Réponse 2

La figure 4.16 illustre les recommandations générées par l'agent à partir du manuel technique particulièrement volumineux. Ce dernier a su extraire de manière ciblée les informations pertinentes, qu'il a organisées selon six axes structurants : inspection, entretien, nettoyage, lubrification, sécurité et remise en route. Ces recommandations couvrent l'ensemble des exigences du constructeur et permettant d'enrichir le plan de maintenance préventive avec des actions précises, opérationnelles et adaptées aux contraintes industrielles. De plus, la réponse satisfait globalement aux critères de qualité de contenu ainsi qu'aux exigences en matière d'expérience utilisateur, notamment en termes de clarté de présentation et de temps de réponse, ce dernier étant inférieur à une minute comme spécifié.

Q3. Je rencontre un souci avec la souffeuse Krones : la machine s'arrête en cours de production et affiche l'erreur « pression d'air insuffisante ». Quelles vérifications et diagnostics dois-je effectuer pour identifier la cause de cette panne ?

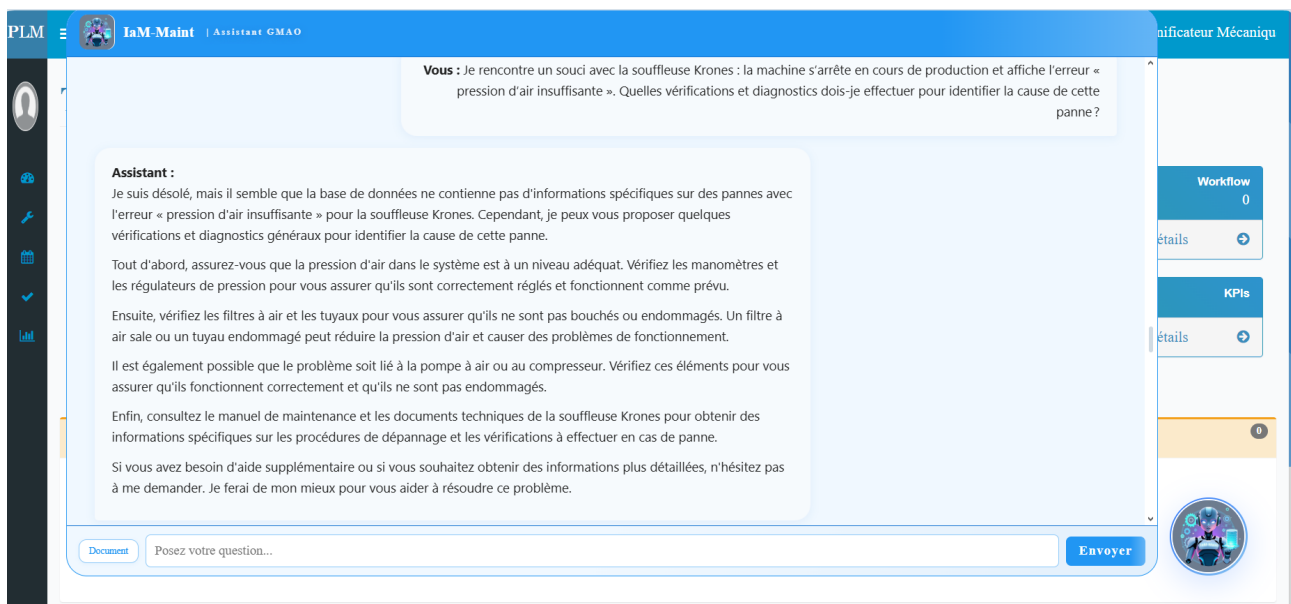


FIGURE 4.17 – Réponse 3

La figure 4.17 illustre la réponse fournie par l'agent à la troisième question issue de la catégorie des requêtes complexes, Bien que cette question ne soit pas directement couverte par les données disponibles dans la base des connaissances, l'agent parvient à accompagner l'utilisateur dans l'élaboration d'hypothèses visant à identifier la cause racine. La réponse générée se distingue par sa clarté, sa structure ainsi que par la cohérence de son raisonnement, témoignant d'une logique rigoureuse dans l'analyse. Elle répond pleinement aux critères de qualité de contenu. Toutefois, le temps de génération, qui a atteint 2 min 43 secondes, s'est révélé supérieur aux attentes, impactant négativement la fluidité de l'expérience utilisateur.

En conclusion, l'évaluation fonctionnelle du chatbot intégré à la solution PLM-GMAO met en évidence des performances globalement satisfaisantes, répondant de manière pertinente aux exigences d'un environnement industriel structuré.

L'agent conversationnel s'est montré capable de traiter avec fiabilité un large éventail de requêtes formulées en langage naturel, en assurant une interprétation précise et une restitution claire des informations sollicitées. Pour les demandes simples, telles que l'extraction de données quantitatives ou factuelles, les réponses fournies sont systématiquement exactes, bien structurées et rédigées dans un langage intelligible, facilitant ainsi leur exploitation immédiate.

Concernant les requêtes de complexité intermédiaire, impliquant des opérations de filtrage, de croisement ou de synthèse de données, le chatbot maintient une qualité de réponse élevée, alliant exhaustivité, pertinence et clarté rédactionnelle.

Pour les questions à forte complexité cognitive, nécessitant une capacité d'analyse, d'interprétation ou d'aide à la décision l'agent témoigne d'un potentiel prometteur, produisant des contenus riches et contextualisés. Toutefois, certaines latences ont été observées lors du traitement de ces requêtes complexes, notamment en lien avec l'exploitation de documents techniques ou le traitement de volumes importants de données, ce qui constitue un axe d'optimisation pour les évolutions futures.

Néanmoins, l'agent respecte rigoureusement les exigences de sécurité et de confidentialité, en s'alignant sur les droits d'accès utilisateurs, tout en s'intégrant de manière fluide aux processus métier existants. L'expérience utilisateur, portée par une interaction intuitive et ergonomique, renforce l'adhésion opérationnelle et confirme la pertinence du déploiement. A ce titre, les résultats obtenus témoignent d'un degré de maturité technologique notable et ouvrent des perspectives de développement ambitieuses, tant sur le plan des performances que de l'extension fonctionnelle vers des cas d'usage à forte valeur ajoutée.

En complément des scénarios analysés précédemment, trois scénarios additionnels sont présentés en annexe H afin d'illustrer d'autres capacités de l'agent conversationnel. Le premier porte sur la réponse de l'agent à une estimation du retour sur investissement (ROI) consécutive à une transition vers la maintenance conditionnelle (Voir figure H9) ; le deuxième décrit la démarche proposée pour l'intégration de la maintenance conditionnelle sur la ligne 20/18 (Voir figure H10) ; enfin, le troisième illustre une recherche croisée dans la base de données permettant d'identifier la liste des pièces de rechange les plus consommées (Voir figure H11).

4.7 Synthèse des résultats et perspectives : apports, limites et axes d'amélioration

À la lumière des résultats obtenus lors du développement et de l'expérimentation de l'agent conversationnel intégré à la solution GMAO, cette section propose une synthèse globale des

apports du système, tout en mettant en évidence ses limites actuelles et les perspectives d'évolution envisageables.

4.7.1 Apports de l'agent

L'implémentation d'un agent conversationnel dans le système GMAO a permis de constater de nombreux bénéfices concrets à différents niveaux de l'organisation. Ces apports, tant techniques que managérial et organisationnels, soulignent la valeur ajoutée d'une telle solution dans un contexte industriel en pleine transformation numérique.

Sur le plan technique, l'agent conversationnel améliore significativement l'accès et l'usage des données de maintenance. En autorisant les requêtes en langage naturel, il abaisse la barrière technique liée à l'usage des systèmes GMAO traditionnels, rendant l'outil plus accessible aux utilisateurs non experts. Il facilite par ailleurs l'exploration de bases de données complexes, en fournissant des réponses précises, contextualisées et directement exploitables.

D'un point de vue managérial, il soutient efficacement la prise de décision en automatisant le traitement de données clés telles que les indicateurs de performance, les historiques d'interventions ou les récurrences de pannes. Cela permet non seulement de gagner du temps dans la génération de rapports et l'analyse des tendances, mais aussi de mieux structurer la planification des actions de maintenance sur le moyen et long terme.

Enfin, sur le plan administratif, organisationnel et économique, cette technologie induit des gains mesurables en performance globale. Elle accroît la productivité en accélérant l'accès à l'information et en fluidifiant la coordination des interventions. Elle contribue également à la réduction des arrêts non planifiés en facilitant un diagnostic rapide des anomalies et en proposant des recommandations adaptées, y compris en situation critique. L'amélioration de la circulation de l'information et de la traçabilité des opérations permet une gestion optimisée des ressources, tout en renforçant la conformité aux exigences de qualité et de sécurité.

Bien que l'agent conversationnel apporte une réelle valeur ajoutée à la gestion de la maintenance, son utilisation concrète révèle certaines limites qu'il convient d'analyser avec objectivité. Ces défis, loin de remettre en cause la pertinence de la solution, soulignent plutôt la nécessité d'une amélioration continue pour en optimiser l'efficacité.

4.7.2 Limitations observées

L'expérimentation de l'agent conversationnel a mis en évidence certaines limites, que l'on peut citer :

Alternance linguistique inappropriée :

Bien que le français technique ait été défini comme langue de travail, certaines réponses sont partiellement générées en anglais. Cette déviation linguistique s'explique en partie par l'hétérogénéité de la base de données, qui comprend des champs et des libellés rédigés à la fois en français et en anglais. Par ailleurs, le modèle de langage utilisé (LLM), pré-entraîné sur des corpus multilingues, tend à produire des segments en anglais, y compris dans un contexte francophone.

Requêtes non résolues ou abandonnées silencieusement :

Dans certains cas, le chatbot entre en phase de traitement sans aboutir à une réponse exploitable. Cette absence de résultat se manifeste notamment par un délai d'exécution excessif, sans retour d'information à l'utilisateur. Un tel comportement peut découler d'une interprétation erronée de la requête en langage naturel par le modèle de langage (LLM). En effet, si la requête est ambiguë, mal structurée, ou contient des formulations que le modèle ne parvient pas à associer à des instructions SQL précises, le processus d'analyse peut se retrouver bloqué ou dévier vers une exécution infructueuse. Cette difficulté à établir une correspondance claire entre la requête en langage naturel et la structure de la base de données compromet la capacité du système à générer une réponse pertinente ou à signaler une erreur explicite.

Réponses incomplètes ou erronées malgré la présence des données :

Certaines interrogations, bien que formulées de manière claire, donnent lieu à des réponses génériques telles que : « L'information demandée ne figure pas dans la base de données ». Pourtant, dans plusieurs cas, les données recherchées sont bel et bien présentes dans la base. Ce type de réponse inappropriée s'explique le plus souvent par un défaut de contextualisation de la requête ou par un mauvais alignement entre les intentions exprimées en langage naturel et la structure effective de la base de données. Le modèle de langage peut alors ne pas identifier correctement les correspondances entre les termes de la requête et les entités de la base, entraînant une exécution partielle ou inexacte.

Risque en matière de sécurité et d'exposition des métadonnées :

Il a été constaté que certaines réponses générées par le chatbot contiennent des éléments techniques sensibles, tels que des noms explicites de tables ou de colonnes SQL. Un tel comportement constitue un risque en matière de cybersécurité, en particulier dans un environnement de production, où la confidentialité des structures internes de la base de données doit impérativement être préservée. L'absence de post-traitement et de filtrage des réponses générées par le LLM, couplée à un accès explicite aux métadonnées de la base de données dans les prompts, constitue la cause principale de ce phénomène.

Temps de réponse parfois excessif :

Dans certains cas, le délai de génération des réponses s'avère anormalement long, en particulier lorsque la requête nécessite un traitement complexe, implique plusieurs jointures ou concerne un volume important de données. Cette latence peut s'expliquer, d'une part, par l'hésitation de l'agent à sélectionner l'outil le plus adapté parmi les options disponibles, et d'autre part, par le fait que le modèle de langage (LLM) est hébergé dans le cloud, ce qui introduit un surcoût en temps de traitement lié aux échanges réseau.

Ces constats révèlent les principales faiblesses du prototype actuel, tant sur les plans linguistique, fonctionnel que sécuritaire. Ils constituent autant de leviers d'amélioration pour renforcer la robustesse, la pertinence et la fiabilité de l'agent conversationnel. C'est dans cette optique que les perspectives présentées ci-après proposent des pistes concrètes d'évolution en faveur d'une solution plus performante.

4.7.3 Perspectives d'amélioration

Afin de surmonter les limitations précédemment identifiées et de maximiser la valeur ajoutée de l'agent conversationnel dans une perspective de déploiement à grande échelle, deux grandes catégories de perspectives peuvent être dégagées :

- D'une part, l'amélioration technico-fonctionnelle de l'agent conversationnel,

- D'autre part, une réflexion plus large sur les perspectives d'évolution de la maintenance industrielle à travers l'intégration progressive de solutions conversationnelles basées sur l'IA.

4.7.3.1 Perspectives d'évolution de l'agent conversationnel

Plusieurs axes d'amélioration peuvent être envisagés pour faire évoluer le prototype actuel vers un outil robuste et industrialisable :

Élargissement et enrichissement de la base de données :

Il conviendrait d'enrichir la base de données exploitée en production, en y intégrant l'ensemble de toutes les tables pour les cas d'usage métier, Cela permettrait non seulement d'accroître la couverture fonctionnelle, mais aussi de proposer des réponses plus contextualisées, pertinentes et complètes.

Affinage linguistique et spécialisation terminologique :

L'adoption de modèles spécifiquement optimisés pour le traitement du français technique ou entraînés sur des corpus sectoriels (maintenance industrielle, GMAO, etc.) pourrait significativement améliorer la qualité des réponses. Il serait également pertinent d'explorer des techniques de fine-tuning ciblées, appliquées aux cas d'usage spécifiques de Coca-Cola Algérie.

Implémentation d'un système de gestion des échecs et de feedback utilisateur :

Un mécanisme de détection automatique des requêtes non résolues, associé à une interface de feedback, permettrait de proposer des reformulations automatiques, des suggestions de requêtes alternatives, voire une assistance contextuelle. Ce système améliorerait considérablement l'expérience utilisateur tout en renforçant la fiabilité perçue de l'outil.

Renforcement des mécanismes de sécurité et d'anonymisation :

Des filtres automatiques doivent être mis en place pour empêcher l'exposition des noms de tables, de colonnes ou de toute autre information technique sensible dans les réponses générées. Par ailleurs, l'usage d'une API locale (LLM auto-hébergé) est à privilégier pour garantir la confidentialité des échanges et le respect des normes internes de sécurité informatique.

Intégration avec des capteurs IIoT pour une maintenance prédictive :

Une autre évolution serait de coupler l'agent conversationnel à des données issues de capteurs industriels (vibrations, températures, pression, etc.) à travers une infrastructure IIoT. L'exploitation de ces données, via des agents disposant de capacités d'analyse continue, permettrait de détecter les signes avant-coureurs de défaillances, d'anticiper les pannes potentielles et d'optimiser la planification des interventions. Intégré à une GMAO, un tel système conversationnel pourrait ainsi non seulement alerter les utilisateurs de manière proactive, mais également leur fournir des diagnostics contextualisés en langage naturel, facilitant la prise de décision. Le chatbot passerait ainsi d'un rôle réactif à un rôle prédictif, en interprétant les anomalies détectées en temps réel et en suggérant des actions de maintenance adaptées.

Ces actions d'amélioration visent à garantir une utilisation fluide, fiable et sécurisée de l'agent conversationnel dans un cadre industriel réel, en renforçant à la fois la couverture fonctionnelle, la pertinence des réponses et la résilience technique du système.

4.7.3.2 Perspectives d'intégration des agents conversationnels en GMAO

Au-delà des limites techniques propres au système développé, certaines difficultés rencontrées lors de la recherche et du développement ont révélé des freins plus larges à l'intégration des chatbots dans le domaine de la maintenance. A ce titre, des perspectives de recherches se dessinent, parmi lesquelles figurent notamment :

Renforcement de la recherche appliqué dans le domaine GMAO-IA :

L'un des constats majeurs de ce travail est la rareté des études approfondies sur l'intégration concrète des grands modèles de langage (LLM) dans les environnements de GMAO. Il est donc essentiel de mener davantage de recherches ciblées, à la fois académiques et industrielles, pour évaluer l'impact réel des agents conversationnels sur la performance de la maintenance, ainsi que leur acceptabilité par le personnel.

Développement d'un LLM spécialisé en maintenance industrielle :

Une perspective serait de concevoir un LLM spécialisé dans la maintenance industrielle, entraîné sur des données issues de rapports d'interventions, historiques de pannes, manuels techniques, procédures de maintenance et documentation GMAO.

Ce modèle pourrait mieux comprendre les spécificités du vocabulaire technique, interpréter des descriptions imprécises de pannes, et fournir des recommandations contextualisées. Cela réduirait la dépendance aux modèles généralistes et améliorerait considérablement la précision des réponses.

4.8 Conclusion

Ce chapitre a présenté de manière détaillée le processus de développement et d'intégration d'un agent conversationnel intelligent au sein de la solution PLM-GMAO, dans une perspective alignée avec les exigences de l'Industrie 4.0. En s'appuyant sur une méthodologie rigoureuse qui a été conçue pour assurer une cohérence fonctionnelle, une ergonomie optimisée et une valeur ajoutée tangible pour les utilisateurs.

L'architecture implémentée permet une interaction en langage naturel avec la base de données GMAO, facilitant ainsi l'accès à l'information, l'analyse des performances et l'aide à la décision. L'évaluation expérimentale menée sur différents niveaux de complexité des requêtes a confirmé la pertinence de la solution, tout en mettant en lumière certaines limitations à prendre en compte pour de futures itérations.

En définitive, cette démarche s'inscrit pleinement dans une logique de transformation numérique de la maintenance industrielle, en apportant une solution innovante, évolutive et susceptible d'être enrichie à moyen terme par des fonctionnalités avancées telles que la maintenance prédictive, l'intégration de capteurs IoT ou les jumeaux numériques. L'agent conversationnel développé constitue ainsi une première étape structurante vers une GMAO plus intelligente, proactive et centrée sur l'utilisateur.

Conclusion générale

Ce projet de fin d'études a été mené afin d'améliorer de manière innovante et efficace la gestion de la maintenance industrielle au sein de Coca-Cola ECCBC Algérie, en intégrant de façon progressive la GMAO et l'intelligence artificielle conversationnelle, et ce, en parfaite adéquation avec les impératifs de l'Industrie 4.0.

Dans un premier temps, une réflexion approfondie a été conduite afin d'identifier de manière systématique les insuffisances techniques, organisationnelles et documentaires pouvant ralentir l'efficacité de la maintenance. Cette étape a été fondamentale afin d'établir un diagnostic fidèle de la situation actuelle, de détecter les principaux points de blocage et d'orienter le projet vers des solutions ciblées.

L'étude s'est donc attachée, d'une part, à optimiser les méthodes utilisées en s'appuyant sur les ressources internes déjà présentes, afin de démontrer que des améliorations significatives pouvaient être réalisées même en l'absence d'une mise en place instantanée de solutions digitales dédiées. D'autre part, elle a été l'opportunité d'envisager l'intégration d'une solution GMAO (PLM-GMAO) afin de structurer durablement le suivi des opérations de maintenance, de centraliser l'information, et d'améliorer le pilotage de l'activité. Une évaluation approfondie de la solution PLM-GMAO a été conduite afin d'en souligner les avantages, d'en détecter les points perfectibles et d'en dresser des perspectives d'amélioration. Cette étape a été l'amorce d'une démarche d'amélioration continue, permettant d'envisager le déploiement de fonctionnalités complémentaires, plus robustes et plus évolutives, afin de rendre le système de maintenance plus réactif, plus pertinent et plus flexible face aux besoins opérationnels.

Au cœur de cette réflexion, le développement et l'intégration d'un agent conversationnel ont été retenus afin d'enrichir PLM-GMAO, de faciliter l'accès aux données, le suivi des interventions et l'aide à la décision. Cette solution s'est inscrite dans le prolongement des améliorations déjà proposées, démontrant que le projet n'a pas été figé, mais s'est amélioré de manière continue, jusqu'à proposer une expérience de maintenance plus rapide, plus ciblée et plus performante.

Ainsi, ce travail a non seulement permis d'améliorer les pratiques de maintenance de Coca-Cola ECCBC en s'adaptant au contexte opérationnel de l'entreprise, en utilisant de manière optimale les ressources existantes et en intégrant de nouveaux outils numériques de façon ciblée et progressive, mais il a également contribué à l'évolution de la solution PLM-GMAO elle-même. Cette démarche présente en outre la particularité d'avoir été conçue et mise en œuvre par une équipe issue du domaine de la maintenance. Cette implication directe souligne la pertinence d'une approche menée de l'intérieur, par des actrices ayant une connaissance des contraintes, des méthodes de travail et des besoins des équipes de maintenance. Cette initiative s'avère donc particulièrement formatrice et stratégique, en ce sens qu'elle dote les futures professionnelles de la maintenance de compétences opérationnelles précieuses.

Au-delà de ce déploiement initial, le projet ouvre la voie à de nouvelles perspectives d'amélioration, tant sur le plan technico-fonctionnel que stratégique. D'une part, le développement de l'agent conversationnel que nous avons mis en place peut se prolonger par l'enrichissement de

la base de connaissances, le renforcement des mécanismes de sécurité, l'intégration de capteurs IIoT en vue d'une maintenance prédictive afin d'en accroître la pertinence, la robustesse et la valeur opérationnelle.

D'autre part, ce projet souligne de manière plus large le rôle stratégique que peuvent jouer les agents conversationnels dans la transformation de la maintenance. Cette expérience s'inscrit donc dans une vision prospective, où l'IA conversationnelle sera de plus en plus intégrée dans la gestion de la maintenance, afin d'en faciliter le suivi, d'en assurer l'efficacité, et d'en accroître la pertinence. Cette perspective souligne l'intérêt de poursuivre la recherche appliquée dans le domaine GMAO-IA , ou encore le développement de modèles de langage spécialisés en maintenance industrielle, afin d'offrir des solutions de plus en plus précises, contextuelles et opérationnelles.

En définitive, ce projet illustre de manière concrète comment une démarche d'amélioration continue, adossée à des solutions technologiques évolutives, peut transformer la maintenance en levier de performance industrielle, renforçant le suivi des opérations, l'efficacité des équipes et la pertinence des prises de décision. Cette expérience peut donc servir de base méthodologique afin d'étendre ce modèle à d'autres contextes, faisant de la donnée le levier d'une maintenance plus rapide, plus ciblée et plus performante.

Bibliographie

- [1] Nitin Rane. Chatgpt and similar generative artificial intelligence (ai) for smart industry : role, challenges and opportunities for industry 4.0, industry 5.0 and society 5.0. *Challenges and Opportunities for Industry*, 4, 2023.
- [2] PLM-Ressources Company. Plm ressources. <https://www.allplm.com/#/Home>.
- [3] Khairy AH Kobbacy, DN Prabhakar Murthy, Liliane Pintelon, and Alejandro Parodi-Herz. Maintenance : an evolutionary perspective. *Complex system maintenance handbook*, pages 21–48, 2008.
- [4] San Giliyana, Joakim Karlsson, Marcus Bengtsson, Antti Salonen, Vincent Adoue, and Mikael Hedelind. A testbed for smart maintenance technologies. In *International Congress and Workshop on Industrial AI*, pages 437–450. Springer, 2023.
- [5] Ewerton Gusthavo Gorski, Eduardo de Freitas Rocha Loures, Eduardo Alves Portela Santos, Ricardo Eiji Kondo, and Giovana Regina Del Negro Martins. Towards a smart workflow in cmms/eam systems : An approach based on ml and mcdm. *Journal of Industrial Information Integration*, 26 :100278, 2022.
- [6] Arne Deloose, Glenn Gysels, Bernard De Baets, and Jan Verwaeren. Combining natural language processing and multidimensional classifiers to predict and correct cmms metadata. *Computers in Industry*, 145 :103830, 2023.
- [7] Dipanwita Dash. Ai in automotive repair : Building a data driven chatbot for enhanced vehicle diagnostics, 2024.
- [8] Nihar Ranjan, Kaushal Mundada, Kunal Phaltane, and Saim Ahmad. A survey on techniques in nlp. *International Journal of Computer Applications*, 134(8) :6–9, 2016.
- [9] Prashant Johri, Sunil K Khatri, Ahmad T Al-Taani, Munish Sabharwal, Shakhzod Suvanov, and Avneesh Kumar. Natural language processing : History, evolution, application, and future work. In *Proceedings of 3rd International Conference on Computing Informatics and Networks : ICCIN 2020*, pages 365–375. Springer, 2021.
- [10] Andrew W Lo, Manish Singh, et al. From eliza to chatgpt : The evolution of nlp and financial applications. 2023.
- [11] Wayne Xin Zhao, Kun Zhou, Junyi Li, Tianyi Tang, Xiaolei Wang, Yupeng Hou, Yingqian Min, Beichen Zhang, Junjie Zhang, Zican Dong, et al. A survey of large language models. *arXiv preprint arXiv :2303.18223*, 1(2), 2023.
- [12] Humza Naveed, Asad Ullah Khan, Shi Qiu, Muhammad Saqib, Saeed Anwar, Muhammad Usman, Naveed Akhtar, Nick Barnes, and Ajmal Mian. A comprehensive overview of large language models. *arXiv preprint arXiv :2307.06435*, 2023.
- [13] Andrei Gheorghiu. *BUILDING DATA-DRIVEN APPLICATIONS WITH LLAMAINDEX : A Practical Guide on Retrieval-augmented Generation (RAG) to Enhance LLM Applications*. Packt Publishing Limited, 2024.
- [14] Muhammad Usman Hadi, Rizwan Qureshi, Abbas Shah, Muhammad Irfan, Anas Zafar, Muhammad Bilal Shaikh, Naveed Akhtar, Jia Wu, Seyedali Mirjalili, et al. A survey on large language models : Applications, challenges, limitations, and practical usage. *Authorea Preprints*, 2023.

- [15] Yunfan Gao, Yun Xiong, Xinyu Gao, Kangxiang Jia, Jinliu Pan, Yuxi Bi, Yixin Dai, Jiawei Sun, Haofen Wang, and Haofen Wang. Retrieval-augmented generation for large language models : A survey. *arXiv preprint arXiv :2312.10997*, 2(1), 2023.
- [16] Haiyan Zhao, Hanjie Chen, Fan Yang, Ninghao Liu, Huiqi Deng, Hengyi Cai, Shuaiqiang Wang, Dawei Yin, and Mengnan Du. Explainability for large language models : A survey. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 15(2) :1–38, 2024.
- [17] Zirui Song, Bin Yan, Yuhao Liu, Miao Fang, Mingzhe Li, Rui Yan, and Xiuying Chen. Injecting domain-specific knowledge into large language models : a comprehensive survey. *arXiv preprint arXiv :2502.10708*, 2025.
- [18] Jie Huang and Kevin Chen-Chuan Chang. Towards reasoning in large language models : A survey. *arXiv preprint arXiv :2212.10403*, 2022.
- [19] Scott Barnett, Stefanus Kurniawan, Srikanth Thudumu, Zach Brannelly, and Mohamed Abdelrazek. Seven failure points when engineering a retrieval augmented generation system. In *Proceedings of the IEEE/ACM 3rd International Conference on AI Engineering-Software Engineering for AI*, pages 194–199, 2024.
- [20] Louis-François Bouchard and Louie Peters. *Building LLMs for production : enhancing LLM abilities and reliability with prompting, fine-tuning, and RAG*. Towards AI, Inc., 2024.
- [21] Keyi Zhong, Tom Jackson, Andrew West, and Georgina Cosma. Natural language processing approaches in industrial maintenance : A systematic literature review. *Procedia Computer Science*, 232 :2082–2097, 2024.
- [22] Omar Enrique López Casado. Improving industrial maintenance : Leveraging ml and nlp for better breakdown log analysis and automated workflows, 2024.
- [23] Jonne Myöhänen. Improving industrial performance with language models : a review of predictive maintenance and process optimization. 2023.
- [24] Sarah Lukens and Asma Ali. Evaluating the performance of chatgpt in the automation of maintenance recommendations for prognostics and health management. In *Annual Conference of the PHM Society*, volume 15, pages 1–18, 2023.
- [25] NF EN ISO 9001 :2015 – systèmes de management de la qualité – exigences. Norme française, October 2015. Organisation internationale de normalisation (ISO), AFNOR.
- [26] FSSC Foundation. Annex 1.5 – fssc 22000 version 6 : Main changes, 2023. https://www.fssc.com/wp-content/uploads/2023/03/Annex-1-5_FSSC-22000-Version-6_Main-changes.pdf.
- [27] I Rizkya, RM Sari, K Syahputri, and U Tarigan. Evaluation of total productive maintenance implementation in manufacture. In *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, volume 1122, page 012059. IOP Publishing, 2021.
- [28] Marc Frédéric. *Mettre en oeuvre une GMAO : Maintenance industrielle, service après-vente, maintenance immobilière*. Dunod, 2011.
- [29] Leila Zemmouchi-Ghomari, Sameh Chergui, and Abdelfetah Ouadah. Proposal of an approach of selection and impact study of cmms use on maintenance functioning, a case study. In *2020 1st International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET)*, pages 1–6. IEEE, 2020.
- [30] Mothibeli Pita and Kem Ramdass. Selection of a computerized maintenance management system for mechanical and industrial lab equipment of university of south africa. *SAIIEnXXXXt Proceedings*, 2019.
- [31] J. Heng. *Pratique de la maintenance préventive - 4e éd.* Gestion industrielle. Dunod, 2017.
- [32] Rohit Tamrakar and Niraj Wani. Design and development of chatbot : A review. *ResearchGate*, 2021.

-
- [33] Thomas Kern, Julian Stang, Michael Milde, Andreas Hofer, Lasse Streibel, and Michael F Zaeh. A modular chatbot framework for assisting workers in diverse production tasks. *Procedia CIRP*, 130 :1268–1275, 2024.
 - [34] Andrew Kiruluta and Priscilla Burity. Breaking the million-token barrier : A non-attention based llm architecture for ultra-long context language modeling. *Journal of Machine Learning Research*, 23 :1–28, 2022.
 - [35] Limin Ma, Ken Pu, and Ying Zhu. Evaluating llms for text-to-sql generation with complex sql workload. *arXiv preprint arXiv :2407.19517*, 2024.
 - [36] Liang Shi, Zhengju Tang, Nan Zhang, Xiaotong Zhang, and Zhi Yang. A survey on employing large language models for text-to-sql tasks. *ACM Computing Surveys*, 2024.
 - [37] Ali Mohammadjafari, Anthony S Maida, and Raju Gottumukkala. From natural language to sql : Review of llm-based text-to-sql systems. *arXiv preprint arXiv :2410.01066*, 2024.
 - [38] Hugo Touvron, Louis Martin, Kevin Stone, Peter Albert, Amjad Almahairi, Yasmine Babaei, Nikolay Bashlykov, Soumya Batra, Prajjwal Bhargava, Shruti Bhosale, et al. Llama 2 : Open foundation and fine-tuned chat models. *arXiv preprint arXiv :2307.09288*, 2023.
 - [39] Baptiste Roziere, Jonas Gehring, Fabian Gloeckle, Sten Sootla, Itai Gat, Xiaoqing Ellen Tan, Yossi Adi, Jingyu Liu, Romain Sauvestre, Tal Remez, et al. Code llama : Open foundation models for code. *arXiv preprint arXiv :2308.12950*, 2023.
 - [40] Aaron Grattafiori, Abhimanyu Dubey, Abhinav Jauhri, Abhinav Pandey, Abhishek Kadian, Ahmad Al-Dahle, Aiesha Letman, Akhil Mathur, Alan Schelten, Alex Vaughan, et al. The llama 3 herd of models. *arXiv preprint arXiv :2407.21783*, 2024.
 - [41] Kensuke Ono and Akira Morita. Evaluating large language models : Chatgpt-4, mistral 8x7b, and google gemini benchmarked against mmlu. *Authorea Preprints*, 2024.
 - [42] Hugo Touvron, Thibaut Lavril, Gautier Izacard, Xavier Martinet, Marie-Anne Lachaux, Timothée Lacroix, Baptiste Rozière, Naman Goyal, Eric Hambro, Faisal Azhar, et al. Llama : Open and efficient foundation language models. *arXiv preprint arXiv :2302.13971*, 2023.
 - [43] Andrei Gheorghiu. *BUILDING DATA-DRIVEN APPLICATIONS WITH LLAMAINDEX : A Practical Guide on Retrieval-augmented Generation (RAG) to Enhance LLM Applications*. Packt Publishing Limited, 2024.
 - [44] Eleni Adamopoulou and Lefteris Moussiades. An overview of chatbot technology. In *Artificial Intelligence Applications and Innovations : 16th IFIP WG 12.5 International Conference, AIAI 2020, Neos Marmaras, Greece, June 5–7, 2020, Proceedings, Part II 16*, pages 373–383. Springer, 2020.
 - [45] Hugging Face. Hugging face – the ai community building the future. <https://huggingface.co>.
 - [46] Niklas Muennighoff, Nouamane Tazi, Loïc Magne, and Nils Reimers. Mteb : Massive text embedding benchmark. *arXiv preprint arXiv :2210.07316*, 2022.
 - [47] Mathieu Ciancone, Imene Kerboua, Marion Schaeffer, and Wissam Siblini. Mteb-french : Resources for french sentence embedding evaluation and analysis. *arXiv preprint arXiv :2405.20468*, 2024.
 - [48] Lukasz Pawlik. How the choice of llm and prompt engineering affects chatbot effectiveness. *Electronics*, 14(5) :888, 2025.
 - [49] Beatriz A de Miranda and Claudio EC Campelo. How effective is an llm-based data analysis automation tool ? a case study with chatgpt’s data analyst. In *Simpósio Brasileiro de Banco de Dados (SBBD)*, pages 287–299. SBC, 2024.
 - [50] Rozana Veselica, Gordana Dukic, and Khalid Hammes. Economic and social development : 36th international scientific conference on economic and social development- " building resilient society " : book of proceedings : Zagreb, 14-15 december 2018. In *Economic*

and social development : 36th International Scientific Conference on Economic and Social Development- " Building Resilient Society" : book of proceedings : Zagreb, 14-15 December 2018. Varazdin, Croatia : Varazdin Development and Entrepreneurship Agency, 2018.

- [51] BOUDOUR BARKIA, FAOUZI Masmoudi, EMNA Masmoudi, and OMAR Ayedi. Human-machine dialogue : Chabots revolutionizing maintenance in industry 5.0. *Available at SSRN 5127620*.
- [52] Prakash Choudhary and Sumit Chauhan. An intelligent chatbot design and implementation model using long short-term memory with recurrent neural networks and attention mechanism. *Decision Analytics Journal*, 9 :100359, 2023.

Annexes

Annexe A : Approfondissements ; évolution des chatbots et présentation de l'environnement industriel

A.1 Les Agents Conversationnel (Chatbots)

Parmi les applications les plus emblématiques et les plus répandues des grands modèles de langage, les agents conversationnels, communément appelés *chatbots*, occupent une place de choix. Ils représentent l'une des manifestations les plus visibles et les plus marquantes de l'intelligence artificielle générative, en particulier depuis l'apparition de modèles avancés tels que *ChatGPT*, *Bard* ou encore *Claude*, qui ont profondément transformé la manière dont les utilisateurs interagissent avec les systèmes informatiques par le biais du langage naturel.

Un chatbot peut être défini comme un programme informatique conçu pour simuler une conversation avec un utilisateur humain. Ces agents sont également désignés sous diverses appellations telles que bots intelligents, assistants virtuels, agents interactifs ou entités conversationnelles artificielles [44].

Dans le contexte de l'Industrie 4.0, les chatbots jouent un rôle de plus en plus stratégique. Ils contribuent significativement à l'intelligence des systèmes de production en automatisant les échanges d'informations, en facilitant l'analyse de données, en optimisant les processus et en soutenant des fonctions clés telles que la maintenance prédictive [1]. Leur évolution technologique leur permet aujourd'hui de s'adapter à des environnements complexes et à des besoins variés, allant de la simple assistance utilisateur à l'exécution autonome de tâches spécialisées.

Afin de mieux appréhender la diversité fonctionnelle et technologique de ces agents, il convient d'en explorer les différentes catégories telles que décrites dans la littérature. Cette typologie, qui sera présentée dans la section suivante, permet de situer tout chatbot donné, y compris celui développé dans le cadre du présent projet, dans un cadre conceptuel rigoureux et structuré.

A.1.1 Types de chatbots

Les chatbots peuvent être classés selon plusieurs dimensions qui reflètent leurs modes d'interaction, leurs objectifs, leurs domaines de spécialisation ainsi que les approches techniques mobilisées pour leur développement [44, 52]. Ces critères offrent un éclairage essentiel sur l'architecture, les performances et les cas d'usage des agents conversationnels.

- **Mode d'interaction** : Cette dimension distingue les chatbots selon la nature de l'échange avec l'utilisateur. On distingue principalement les agents **textuels**, où les interactions s'effectuent via des messages écrits, et les agents **vocaux**, qui s'appuient sur la reconnaissance vocale pour permettre une communication orale [44, 52].
- **Objectif** : Les chatbots peuvent également être différenciés selon leur finalité principale. On distingue [44, 52] :
 - Les chatbots orientés tâches, conçus pour exécuter des actions spécifiques.

- Les chatbots informatifs, destinés à fournir des réponses à des questions précises en s'appuyant sur une base de données ou sur un corpus préétabli.
- Les chatbots conversationnels, axés sur des échanges ouverts et fluides avec l'utilisateur, simulant une discussion humaine.
- **Domaine de connaissance** : Cette classification distingue les chatbots à domaine ouvert (*open-domain*), capables d'interagir sur une grande variété de sujets, des chatbots à domaine fermé (*closed-domain*), spécialisés dans un domaine particulier [44, 52].
- **Approche d'implémentation** : Sur le plan technique, les chatbots peuvent être [44, 52] :
 - Basés sur des règles prédéfinies, où les réponses sont déterminées à partir de mots-clés ou de phrases exactes présentes dans la requête.
 - Basés sur l'extraction, en utilisant des techniques de recherche sémantique pour interroger des bases de données ou documents et sélectionner la réponse la plus appropriée.
 - Génératifs, construits à l'aide de méthodes d'apprentissage automatique et d'apprentissage profond, capables de générer des réponses contextuelles et nuancées. Bien que cette dernière catégorie offre des performances supérieures, elle implique des coûts de développement et d'entraînement considérables.

A.1.2 Historique d'évolution des chatbots

L'histoire des agents conversationnels s'inscrit dans le prolongement direct des premières interrogations sur l'intelligence artificielle. Dès 1950, Alan Turing introduit la notion de Test de Turing, questionnant la capacité des machines à « penser » et, par extension, à dialoguer avec des humains [44]. Ce cadre théorique a jeté les bases du développement des premiers programmes de simulation de dialogue.

Le premier chatbot notable est ELIZA, conçu en 1966 par Joseph Weizenbaum. Simulant un psychothérapeute à travers des reformulations simples de l'entrée utilisateur, ELIZA reposait sur une technique rudimentaire de correspondance de motifs (*pattern matching*). Bien que ses capacités fussent limitées, l'effet produit sur les utilisateurs marqua un tournant dans l'histoire de l'interaction homme-machine [10, 32].

Quelques années plus tard, PARRY (1972), développé à Stanford, introduit des éléments de personnalité simulée, en imitant un patient atteint de paranoïa. En 1995, ALICE (*Artificial Linguistic Internet Computer Entity*), mis au point par Richard Wallace, utilise le langage AIML (*Artificial Intelligence Markup Language*), permettant une structuration plus avancée des réponses. Il se distingue notamment en remportant à plusieurs reprises le prix Loebner, attribué au chatbot le plus humain [44, 32].

L'intégration des chatbots dans les services de messagerie avec *SmarterChild* (2001), puis l'arrivée des assistants vocaux intelligents tels que Siri, Cortana, Alexa, ou Google Assistant, marquent l'entrée des agents conversationnels dans le quotidien des utilisateurs. Ces systèmes combinent traitement du langage naturel, exécution de commandes et interaction contextuelle [44, 32].

Depuis 2016, l'essor des technologies d'apprentissage profond (*deep learning*) et la disponibilité de grands corpus de données textuelles ont considérablement accéléré l'innovation dans ce domaine, notamment dans les secteurs industriel, éducatif et de la recherche [44, 32].

Une étape décisive a été franchie avec l'émergence des modèles de langage de grande taille (*Large Language Models – LLMs*), dont GPT (*Generative Pre-trained Transformer*), développé par OpenAI, constitue l'exemple le plus marquant. Le lancement de ChatGPT en décembre 2022 symbolise cette rupture technologique : pour la première fois, un agent conversationnel est capable de générer des réponses fluides, nuancées et contextuelles sur une large gamme de sujets. Contrairement aux systèmes à règles ou à extraction, ChatGPT repose sur une architecture générative, offrant une simulation de dialogue humain d'une qualité sans précédent [1].

Afin de mettre en œuvre concrètement les principes liés aux solutions GMAO et aux agents conversationnels, et d'exploiter pleinement leur potentiel dans un contexte industriel, il est essentiel de s'appuyer sur des outils technologiques adaptés et performants.

La section suivante présente ainsi les principales technologies mobilisées dans le cadre de ce projet, en lien avec les objectifs d'optimisation des processus, d'implémentation, de modernisation et d'automatisation de la GMAO.

A.2 Organisation du service maintenance et choix de la ligne de production

A.2.1 Organisation du service maintenance de Coca-Cola Algérie

Le Service de Production et de Maintenance, axe central de l'organisation industrielle, est dirigé par un Responsable Production et Maintenance. Sous cette responsabilité, l'organisation se décompose comme suit : **Les Chefs de Zone** Trois chefs de zone supervisent les lignes de production :

- **Chefs de zone** : Trois chefs de zone supervisent les lignes de production, ils sont chargé du suivi des rapports de production journaliers, incluant les consommations de matières premières, les arrêts de production et les interventions de maintenance. Il coordonne également les révisions annuelles des lignes, élabore les listes de pièces de rechange, et veille à leur mise à disposition.

Chaque chef de zone collabore étroitement avec des **chefs de ligne** et des **opérateurs** pour assurer la continuité de la production et le respect des standards de qualité et de sécurité. **Le Bureau des Méthodes** Il constitue le centre de planification et d'optimisation des activités de maintenance. Il est composé de :

- **Un Responsable Méthodes**, en charge du suivi et de l'estimation du budget annuel, du pilotage des demandes d'offres et du choix des prestataires externes.
- **Deux planificateurs mécaniques** :
 - o Le premier couvre quatre lignes de production.
 - o Le second supervise trois lignes. Leur mission inclut l'élaboration des listes de pièces de rechange nécessaires aux révisions, l'attribution des tâches aux techniciens en fonction de leurs compétences, le suivi des interventions, l'optimisation des plans de maintenance préventive, ainsi que la production de rapports hebdomadaires, mensuels et annuels, notamment les comparatifs entre budgets prévisionnels et réels.
- **Un planificateur électrique**, chargé de définir et mettre en œuvre les plans de maintenance préventive des équipements électriques, d'analyser les défaillances récurrentes et de sélectionner les prestataires appropriés.
- **Un responsable magasin**, assurant la gestion des stocks, l'approvisionnement en consommables, la validation des demandes d'achats et la réception des commandes.

Le Service Électrique et Automatique Sous la direction du **Manager Électrique et Automatique**, ce service regroupe :

- Un **Chef de service**, qui coordonne les actions entre les équipes.
- Deux **chefs d'équipe** (électrique et automatique), encadrant les électriciens et les automaticiens en charge de la maintenance des équipements.

A.2.2 Lignes de production de l'entreprise Coca-Cola Algérie

L'entreprise exploite sept lignes de production, organisées en fonction du type d'emballage utilisé pour le conditionnement des boissons : bouteilles en plastique (PET), bouteilles en verre (RGB) et canettes métalliques.

Cinq de ces lignes sont dédiées au conditionnement en bouteilles plastiques PET, à savoir : PET 20/18, PET 14/20, PET 10/10, PET 10/14, ainsi que la ligne KHS, une installation PET automatisée de dernière génération. Ces lignes permettent de proposer une large gamme de formats et volumes, adaptés aux exigences variées du marché.

Une ligne est consacrée à la production en bouteilles en verre, la ligne RGB, principalement utilisée pour des produits spécifiques ou à forte valeur ajoutée.

Enfin, une ligne unique est réservée à la production en canettes, la ligne Canette 2, qui assure le conditionnement des boissons dans des emballages métalliques conformes aux standards de la distribution moderne.

Sur le plan organisationnel, la production est répartie en trois zones distinctes :

- **Zone 1** : lignes PET 20/18, 14/20, 10/10
- **Zone 2** : lignes PET 10/14 et KHS
- **Zone 3** : lignes RGB et Canette

Cette structuration industrielle confère à l'entreprise une grande flexibilité dans sa capacité de production, lui permettant de s'adapter rapidement aux fluctuations de la demande et aux évolutions du marché. Elle favorise également une meilleure gestion des ressources et une optimisation des processus de conditionnement, garantissant ainsi une compétitivité accrue.

A.2.3 Choix de la ligne de production

Afin de choisir la ligne sur laquelle réaliser le projet d'implémentation d'une solution de Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO), une analyse comparative a été menée sur l'ensemble des lignes de production, en s'appuyant sur les données de performance, illustré dans la Figure A1. Trois critères principaux ont guidé cette analyse : la contribution en volume physique (Physical Cases Net), la contribution en unités vendables (Unit Cases Net) et la performance technique mesurée par l'indicateur USLE (ou TRS).

La ligne PET 20/18 se distingue nettement à travers ces trois critères. Elle représente 25% de la production physique totale et 27% des unités vendables, ce qui en fait l'une des lignes les plus productives et stratégiques du site. Par ailleurs, son USLE actuel est de 50%, bien en deçà de l'objectif fixé à 65%, ce qui révèle un potentiel d'amélioration considérable en matière d'efficacité opérationnelle et de gestion des interventions.

Ainsi, le choix a été porté sur la ligne PET 20/18, à la fois pour son importance dans le volume de production et pour les perspectives concrètes d'optimisation qu'offre l'implémentation d'une

solution GMAO. Ce projet permettra de structurer davantage les actions de maintenance, de réduire les arrêts non planifiés et d'améliorer durablement la performance globale de la ligne.

| Physical Cases Net | | Unite Cases Net | |
|--------------------|--------------------|----------------------|----------------|
| Ligne | Physical Cases Net | Étiquettes de lignes | Unit Cases Net |
| LIGNE CANETTE 2 | 16% | LIGNE CANETTE 2 | 9% |
| LIGNE V30 CL | 1% | LIGNE V30 CL | 2% |
| PET 10/10 | 8% | PET 10/10 | 8% |
| PET 10/14 | 14% | PET 10/14 | 24% |
| PET 14/20 | 11% | PET 14/20 | 6% |
| PET 20/18 | 25% | PET 20/18 | 27% |
| PET 20/18 KHS | 25% | PET 20/18 KHS | 24% |
| Total général | 100% | Total général | 100% |
| USLE / TRS | | | |
| Ligne | USLE | Objectif | |
| LIGNE CANETTE 2 | 40,0 | | |
| LIGNE V30 CL | 39,0 | | |
| PET 10/10 | 72,0 | | |
| PET 10/14 | 62,0 | | |
| PET 14/20 | 65,0 | | |
| PET 20/18 | 50,0 | 65% | |
| PET 20/18 KHS | 65,0 | | |
| Total général | 56,1 | | |

FIGURE A1 – Critères de performance des lignes de production

La figure A1 illustre les performances des lignes de production de Coca-Cola ECCBC Algérie, en se basant sur trois indicateurs clés : le *Physical Cases Net*, l'*Unite Cases Net* et le *TRS*.

Annexe B : Documentation de l'entreprise

B.1 Documents lié à la maintenance corrective

B.1.1 Rapport des arrêt électriques



| Rapport des arrêts Eléctrique journalier | | | | | | | | | | | |
|--|------------------|-----------------|----------------------|---------------|---------------|-------------------------|--------------|----------------------|---------------------------------|---------|--|
| Date : | | | | | | | | | | | |
| Shift : 6h00 - 14h00 | | | | | | | | | | | |
| Ligne: | Heure de l'arrêt | Equipement | Poste Technique | Type de panne | Mode de panne | Durée de l'intervention | Intervenant | Anomalie | Actions | Réf PDR | |
| Pet20.18 | 06h00 | Codeur | Vérification | Electrique | Vérification | TM | KAHIA BELAID | Vérification | mise en marche des codeurs | | |
| Pet20.18 | 06h01 | codeur réserve | Vérification | Electrique | Vérification | TM | KAHIA BELAID | Vérification | mise en marche des codeurs | | |
| Pet20.18 | 06h02 | Codeur | Vérification | Electrique | Vérification | TM | KAHIA BELAID | Vérification | mise en marche des codeurs | | |
| Pet20.18 | 06h03 | codeur réserve | Vérification | Electrique | Vérification | TM | KAHIA BELAID | Vérification | mise en marche des codeurs | | |
| Pet14.20 | 07h00 | Codeur | Vérification | Electrique | Vérification | TM | KAHIA BELAID | Vérification | mise en marche des codeurs | | |
| Pet10.10 | 08h00 | Codeur | Changement de format | Electrique | Réglage | TM | KAHIA BELAID | Changement de format | changement de format et message | | |
| Pet10.10 | 08h00 | Etiqueteuse PET | Armoire Electrique | Electrique | Réarmement | TM | KAHIA BELAID | défaut ABB | Réarmement | | |

FIGURE B1 – Rapport des arrêt électriques

La figure B1 présente le rapport journalier des arrêts électriques, élaboré par les ingénieurs du service automatisme et électricité. Ce rapport regroupe l'ensemble des interventions réalisées, qu'elles soient correctives ou préventives.

B.2 Documents lié a la maintenance préventive hebdomadaire

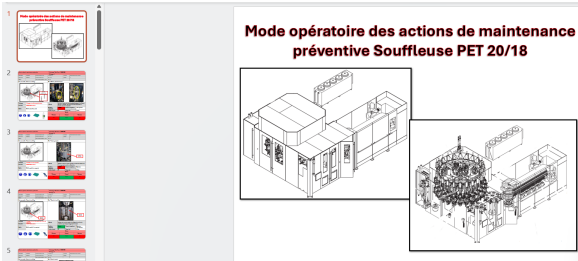
B.2.1 Plan de maintenance Préventive (PMP) hebdomadaire et mensuelle

| Plan de maintenance préventive (hebdomadaire et mensuel) de la souffeuse | | | | | | |
|--|-------------------|---|---|-----------------|-------|--------------|
| Direction industrielle | | | | | | |
| Machine | Sous ensemble | Organe | Hebdomadaire (125 H) et mensuel (500 H) | outil | Temps | Fréquence |
| Souffleuse | Roue de soufflage | Paroi pneumatique | Contrôler les branchements, les joints d'étanchéité et les caches du distributeur rotatif d'air | | | Hebdomadaire |
| | | Paroi d'eau | Vérifier les branchements, joints d'étanchéité, conduites de fuites de distributeur rotatif d'eau | | | Hebdomadaire |
| | | Cellules photoélectriques | Contrôler et nettoyer les cellules photoélectriques et les réflecteurs. | Chiffon/alcool | | Hebdomadaire |
| | | Vannes groupées | Nettoyer les blocs des vannes groupées et vérifier les fuites d'air | | | Hebdomadaire |
| | | Unité porte moule | Contrôler l'état des coquilles de moule et des fond de moule | | | Hebdomadaire |
| | | | Nettoyage des inserts de moules de soufflage et les orifices de ventilation. | Chiffon mouillé | | Hebdomadaire |
| | | | Nettoyage des inserts du fond de moule et des orifices de ventilation. | Chiffon mouillé | | Hebdomadaire |
| | | | Vérifier l'état et l'ajustement des galets de verrouillage | | | Hebdomadaire |
| | | | Contrôler les branchements des stations de soufflage (Raccords, flexible d'air et de refroidissement, polier, joints d'étanchéité et joint de compensation) | | | Hebdomadaire |
| | | | Nettoyage des supports coquilles | Chiffon mouillé | | Mensuel |
| | Système d'étréage | Contrôler le mouvement libre, l'usure et l'endommagement de la tige d'étréage | | | | Mensuel |
| | | Canes | Contrôle des galets de came d'ouverture fermeture moule et le mécanisme monté/décanté moule | | | Mensuel |
| | Module de chauffe | Chaine des tournettes | Contrôle visuelle de l'état de la courroie dentée du système de rotation des tournettes (unité de renvoi) | | | Hebdomadaire |
| | | Cellules photoélectriques | Nettoyage du pyromètre et contrôle de la fixation des pyromètres du sortie module de chauffe | Chiffon/alcool | | Hebdomadaire |
| | | | Nettoyage et contrôle des barrières photoélectriques et des réflecteurs | Chiffon/alcool | | Hebdomadaire |
| | | Filtre | Contrôler l'état des filtres et les nettoyer si nécessaire | | | Hebdomadaire |
| | Module de chauffe | Guidage préforme | Nettoyage des surfaces de guidage d'alimentation préforme | | | Hebdomadaire |

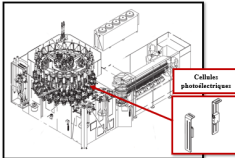
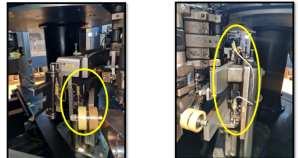
FIGURE B2 – Plan de maintenance Préventive (PMP) hebdomadaire et mensuelle

La figure B2 présente un extrait du plan de maintenance préventive de la ligne de production 20/18. Il précise les équipements concernés, les organes à inspecter, les outils requis, les tâches à exécuter ainsi que leur fréquence.

B.2.2 Mode opératoire



(a) Page de garde

| Révision plan de maintenance préventive | | | Nettoyage - Souffleuse - KRONES | |
|--|---|--|---------------------------------|----------------------|
| Nettoyage 1 | | | | |
| Équipement | Souffleuse | Date de révision initiale | Janvier 2017 | Créateur |
| Fournisseur | KRONES | Date de révision finale | Mai 2024 | Vérifier |
| Modèle | | Heure de fonctionnement annuel | 4000 H | |
| Sous ensemble : Roues de soufflage | | Ou ? Cellules photoélectriques | | |
|  | |  | | |
| Nettoyage | Nettoyage des cellules photoélectriques | Méthode | | |
| Intervalle | 120 H - Hebdomadaire | Vérifiez la fixation de la barrière photoélectrique et le réflecteur. Ensuite, les nettoyer avec un chiffon doux. Et nettoyer les barrières avec l'air comprimé. | | |
| Outils | Chiffon microfibre, alcool | Condition équipement | ARRÊT | Niveau de compétence |
| | | Nombre de point | 4 | Temps total |
| | | | | 10 min |
| | | Critère | | |
| | | Minimum | Nominal | Maximum |
| | | Sat | Progr | N/A |

(b) Tache de Nettoyage

FIGURE B3 – Exemple d'un mode opératoire

La figure B3 illustre le mode opératoire utilisé par le service maintenance de Coca-Cola ECCBC Algérie. Ce document regroupe l'ensemble des tâches prévues dans le plan de maintenance préventive (PMP) pour chaque équipement, en détaillant les organes concernés ainsi que les informations nécessaires à l'exécution des interventions, accompagnées d'illustrations explicatives.

B.2.3 Planning de maintenance préventive

| Ligne PET 2018 | | Planning de maintenance préventive hebdomadaire | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|-----|--|------------------|--------------|------------|------|-----|------------------|------------|------|-----|-----------------|------------|------|-----|--------------|------------|
| | | Decembre | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sous ensemble | Num | Action | Outil | OP | Date | Note | S50 | OP | Date | Note | S51 | OP | Date | Note | S52 | OP | Date |
| Vanne, soupapes, canalisation | 1 | Contrôler visuelle et vérification de l'étanchéité de toutes les vannes, soupapes et la soupape | | Boubba Hamza | 09/12/2024 | | | Mokadem Mourapha | 09/12/2024 | | | Houassa Mohamed | 12/12/2024 | | | Boubba Hamza | 29/12/2024 |
| Raccords latiers | 2 | Vérifier si le liquide s'échappe des raccords latiers. En cas de présence de traces du produit transporté sur un raccord latier, resserrer ce dernier à l'aide de la clé à ergot articulée | | Boubba Hamza | 09/12/2024 | | | Mokadem Mourapha | | | | Houassa Mohamed | | | | Boubba Hamza | 29/12/2024 |
| Machine | 3 | Nettoyer puis essuyer les surfaces et les sols | | Boubba Hamza | 09/12/2024 | | | Mokadem Mourapha | | | | Houassa Mohamed | | | | Boubba Hamza | 29/12/2024 |
| | 4 | Effectuer le test des lampes. Faire remplacer les lampes défectueuses par le personnel d'entretien | | Boubba Hamza | 09/12/2024 | | | Mokadem Mourapha | | | | Houassa Mohamed | | | | Boubba Hamza | 29/12/2024 |
| | 5 | Contrôler les éléments de commande, les dispositifs de protection, les plaques, etc. | | Boubba Hamza | 09/12/2024 | | | Mokadem Mourapha | | | | Houassa Mohamed | | | | Boubba Hamza | 29/12/2024 |
| Joint | 6 | Vérifier si le fluide s'échappe des points d'étanchéité | | Boubba Hamza | 09/12/2024 | | | Mokadem Mourapha | | | | Houassa Mohamed | | | | Boubba Hamza | 29/12/2024 |
| Pompes | 7 | Vérifier si le fluide s'échappe des pompes | | Boubba Hamza | 09/12/2024 | | | Mokadem Mourapha | | | | Houassa Mohamed | | | | Boubba Hamza | 29/12/2024 |
| Echangeur de chaleur à plaques | 8 | Vérifier si l'échangeur de chaleur à plaques est déformé ou si des fluides s'échappent. L'accumulation de liquides à proximité ou en dessous de l'échangeur de chaleur à plaques indique souvent une fuite | | Boubba Hamza | 09/12/2024 | | | Mokadem Mourapha | | | | Houassa Mohamed | | | | Boubba Hamza | 29/12/2024 |
| Conduites pneumatiques | 9 | Contrôler les éléments pneumatiques, les branchements et les conduites à la recherche des fuites. | | Boubba Hamza | 09/12/2024 | | | Mokadem Mourapha | | | | Houassa Mohamed | | | | Boubba Hamza | 29/12/2024 |
| Symboles de sécurité | 10 | Nettoyer les symboles de sécurité encrassés. Et remplacer les symboles de sécurité manquants ou endommagés. | Chiffon mouillée | Boubba Hamza | 09/12/2024 | | | Mokadem Mourapha | | | | Houassa Mohamed | | | | Boubba Hamza | 29/12/2024 |
| Verres indicateurs | 11 | Vérifier si les verres indicateurs sont endommagés et les nettoyer | | Boubba Hamza | 09/12/2024 | | | Mokadem Mourapha | | | | Houassa Mohamed | | | | Boubba Hamza | 29/12/2024 |
| Verres indicateurs | 12 | Vérifier si les verres indicateurs sont endommagés | | Boubba Hamza | 09/12/2024 | | | Mokadem Mourapha | | | | Houassa Mohamed | | | | Boubba Hamza | 29/12/2024 |

FIGURE B4 – Planning de maintenance préventive

Le planning de maintenance préventive illustré dans la figure B4 présente un exemple de gamme de maintenance, élaborée à partir du plan de maintenance préventive global (cf. figure B2).

B.3 Documents lié a la maintenance préventive annuelle

B.3.1 Liste des pièces

| Plan d'action Maintenance 1er Partiel 2024 - Ligne: PET 20/18 - Machine: Souffleuse | | | | | | | |
|---|-----------------------|-------------|---|------------------------------------|------------------------|------|------------------|
| S/ensemble | Organe | N° d'action | Action | Désignation PDR | Référence | Qté | Gisement magasin |
| Alimentateur préformes | Etoile d'entrée | 1 | Révision du bloc d'entrée préformes | Cylindre (vérin de chargement) | 900060033 | 1 | W3002 |
| | | | | Cylindre (vérin de guide) | 900913266 | 1 | W2710 |
| | | | | Guide (trappe) | 901495989 | 1 | W2110 |
| | | | | Guide | 901877086 | 1 | W2711 |
| | | | | Guide | 901877140 | 1 | W2712 |
| | | | | Fiche | 901236279 | 1 | W2710 |
| Four infra-rouge | Chaine des tournettes | 2 | Révision des embouts (nez) des tournettes | Joint torique | 902489527 | 278 | W0903 |
| | | | | Joint torique | 902407885 | 278 | W0905 |
| | | | | Rondelle d'appui 10x16x1 St DIN988 | 0562314181 | 278 | W1503 |
| | | | | Goupilles | 723411242 | 278 | W0209 |
| | | | | Ressort-assiettes | 900046030 | 1120 | W1501 |
| | Système de chauffe | 3 | Nettoyage, vérification et changement si nécessaire des réflecteurs et lampes infra-rouge | | | | |
| | | | | Roulement a billes 61800 2RS | 954003001 | 144 | A0205 |
| | | | | Galet de came | 902719884 | 72 | W1304 |
| | | | | Galet de came | 902744274 ou 904962235 | 24 | W1306 |
| | | | | Ressort de tension | 902211895 | 24 | W1603 |

FIGURE B5 – Liste des PDR

La figure B5 illustre la liste des pièces de rechange (PR) nécessaires à la révision annuelle, établie par les planificateurs mécaniques du service méthodes.

B.3.2 Diagramme de Gantt

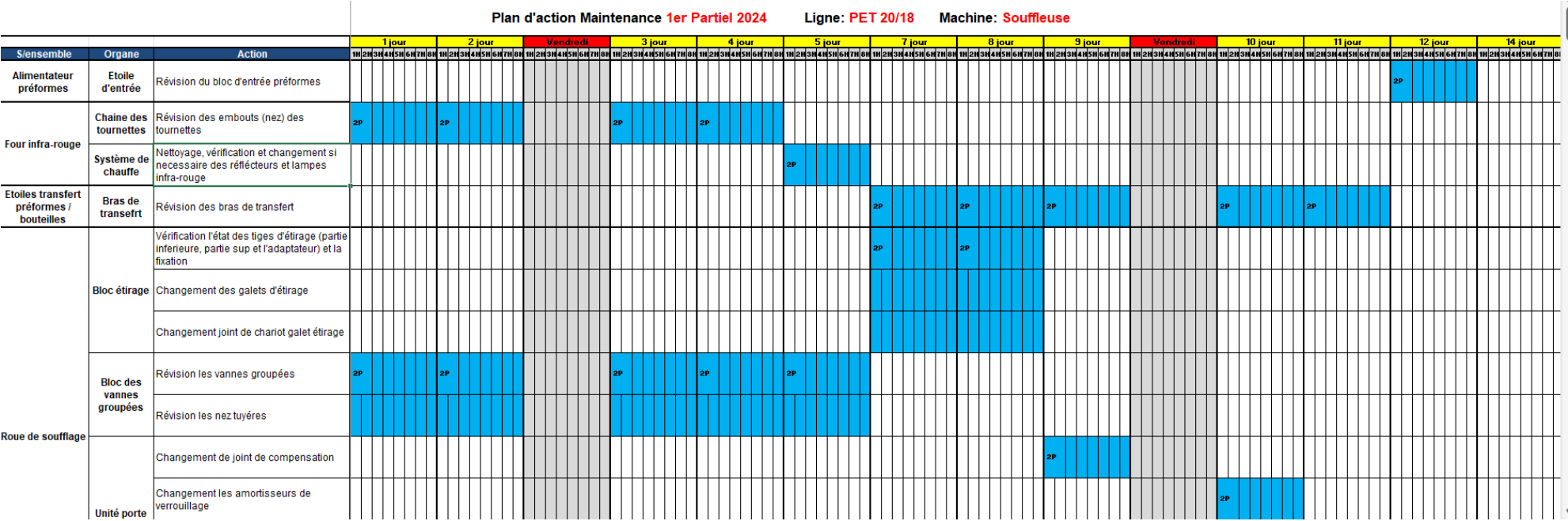


FIGURE B6 – Diagramme de Gantt

La figure B6 illustre le diagramme de Gantt utilisé par les planificateurs mécaniques pour le suivi de l'exécution des interventions annuelles. Il détaille les tâches à réaliser, le nombre d'intervenants affectés à chaque tâche, ainsi que leur répartition sur la durée globale de révision allouée.

B.4 Autre Documents

B.4.1 Résultat de l'étude de criticité des équipement

Usine : FRUITAL
Année : 2024
Période du risk assesment : A

| Equipement - Ligne | Constructeur | Année fabrication | Sécurité | Qualité | Environnement | Quantité / Délais | Etat / Age | Maintenance actuelle | Documentation | Complexité d'entretien | Criticité | Occurrence | MTTR | Risque | Commentaires |
|-------------------------------------|--------------|-------------------|----------|---------|---------------|-------------------|------------|----------------------|---------------|------------------------|-----------|------------|------|--------|------------------------|
| SOUTIREUSE-PET20/18 | Krones | 2013 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 3 | 432 | 4 | 4 | 6 912 | Problème des problèmes |
| SOUFFLEUSE-PET20/18 | Krones | 2013 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 | 1 | 3 | 648 | 3 | 3 | 5 832 | problème caufreies |
| PALETTISEUR-PET20/18 | Krones | 2013 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 192 | 3 | 4 | 2 304 | défaut robobox et |
| FARDELAUSE-PET20/18 | Krones | 2013 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 192 | 2 | 3 | 1 152 | |
| INSPECTRICE BOUTEILLE REMPLIE | Krones | 2013 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 192 | 3 | 2 | 1 152 | |
| MIXEUR-PET20/18 | Krones | 2013 | 2 | 4 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 3 | 576 | 1 | 1 | 576 | |
| INSPECTRICE BOUTEILLE | Krones | 2013 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 1 | 2 | 384 | 1 | 1 | 384 | |
| RINCEUSE-PET20/18 | Krones | 2013 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 288 | 1 | 1 | 288 | |
| CONVOYEUR PACK-PET20/18 | Krones | 2013 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 32 | 2 | 4 | 256 | |
| ETIQUETEUSE-PET20/18 | Krones | 2013 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 128 | 1 | 1 | 128 | |
| CODEUR-PET20/18 | Krones | 2013 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 64 | 1 | 2 | 128 | |
| BANDROLEUSE-PET20/18 | Robopack | 2013 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 64 | 1 | 2 | 128 | |
| Maselli-PET 20/ 18 | Maselli | 2023 | 1 | 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 | 72 | 1 | 1 | 72 | |
| CONVOYEUR BOUTEILLE - | Krones | 2013 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 16 | 1 | 4 | 64 | |
| MAGASIN PREFORME- | Krones | 2013 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 64 | 1 | 1 | 64 | |
| Etiqueteuse palettes-PET20/18 | Zetes | 2015 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 64 | 1 | 1 | 64 | |
| CONVOYEUR A AIR-PET20/18 | Krones | 2013 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 32 | 1 | 1 | 32 | |
| CENTRALE DE LUBRIFICATION-PET20/ 18 | Dry EXX | 2020 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 3 | 1 | 24 | 1 | 1 | 24 | |

FIGURE B7 – Résultat de l'étude de criticité des équipement

La figure B7 présente les résultats de l'étude de criticité des équipements de la ligne 20/18, réalisée en interne par les équipes de Coca-Cola ECCBC Algérie.

Annexe C : Filtrage et Structuration de l'historique des arrêts

C.1 Filtrage et Structuration de l'historique des arrêts

| DATE | Équipement | Poste technique | mes. d' | Type de Pann | Mode de Pann | Commentaire | Symptôme | Cause | Remède |
|------------|------------|----------------------------|---------|--------------|-------------------|--|--|---|--|
| 1 mai 2024 | Soutiseuse | Remplisseuse (Idex K12776) | 45 | Micronique | Pilgrage | mauvais transfert des bouteilles, problème des pince cad | de la cadence ou Mauvais transfert des | Usure des pinces de la remplisseuse | Changement de pince de la remplisseuse |
| 1 mai 2024 | Soutiseuse | Alimentation bouchons | 15 | Micronique | Blocage | | Bouchons des bouchons | Bouchons inversés | Réguler les bouchons |
| 1 mai 2024 | Soutiseuse | Remplisseuse (Idex K12776) | 13 | Micronique | Gratage | gratage la machine | Alerte sur l'IRM | fait lors du préventive ou système de graissage automatique | Graissage de la remplisseuse |
| 1 mai 2024 | Soutiseuse | Remplisseuse (Idex K12776) | 25 | Micronique | Pilgrage | mauvais transfert des bouteilles, problème des pince cad | de la cadence ou Mauvais transfert des | Usure des pinces de la remplisseuse | Changement de pince de la remplisseuse |
| 1 mai 2024 | Soutiseuse | Alimentation bouchons | 15 | Micronique | Blocage | bouchons | Bouchons des bouchons | Bouchons inversés ou le types des bouchons | es bouchons ou demander un changement de type des |
| 1 mai 2024 | Soutiseuse | Remplisseuse (Idex K12776) | 45 | Micronique | Blocage | mauvais transfert des bouteilles | Mauvais transfert des bouteilles | ment incorrect des pinces de la remplisseuse ou problème | Changement de pince ou enlèvement des bouteilles mal soufflées |
| 1 mai 2024 | Soutiseuse | Alimentation bouchons | 15 | Micronique | Blocage | | Bouchons des bouchons | Bouchons inversés | Réguler les bouchons |
| 2 mai 2024 | Soutiseuse | Remplisseuse (Idex K12776) | 45 | Micronique | Pilgrage | mauvais transfert des bouteilles, problème des pince cad | de la cadence ou Mauvais transfert des | Usure des pinces de la remplisseuse | Changement de pince de la remplisseuse |
| 2 mai 2024 | Soutiseuse | Alimentation bouchons | 15 | Micronique | Blocage | | Bouchons des bouchons | Bouchons inversés | Réguler les bouchons |
| 2 mai 2024 | Soutiseuse | Remplisseuse (Idex K12776) | 15 | Micronique | Gratage | gratage la machine | Alerte sur l'IRM | fait lors du préventive ou système de graissage automatique | Graissage de la remplisseuse |
| 2 mai 2024 | Soutiseuse | Remplisseuse (Idex K12776) | 35 | Micronique | Pilgrage | mauvais transfert des bouteilles, problème des pince cad | de la cadence ou Mauvais transfert des | Usure des pinces de la remplisseuse | Changement de pince de la remplisseuse |
| 2 mai 2024 | Soutiseuse | Alimentation bouchons | 20 | Micronique | Blocage | bouchons | Bouchons des bouchons | Bouchons inversés ou le types des bouchons | es bouchons ou demander un changement de type des |
| 2 mai 2024 | Soutiseuse | Remplisseuse (Idex K12776) | 40 | Micronique | Blocage | mauvais transfert des bouteilles | Mauvais transfert des bouteilles | ment incorrect des pinces de la remplisseuse ou problème | Changement de pince ou enlèvement des bouteilles mal soufflées |
| 2 mai 2024 | Soutiseuse | Alimentation bouchons | 10 | Micronique | Blocage | | Bouchons des bouchons | Bouchons inversés | Réguler les bouchons |
| 3 mai 2024 | Soutiseuse | Remplisseuse (Idex K12776) | 25 | Micronique | Pilgrage | mauvais transfert des bouteilles, problème des pince cad | de la cadence ou Mauvais transfert des | Usure des pinces de la remplisseuse | Changement de pince de la remplisseuse |
| 3 mai 2024 | Soutiseuse | Alimentation bouchons | 10 | Micronique | Blocage | bouchons | Bouchons des bouchons | Bouchons inversés ou le types des bouchons | es bouchons ou demander un changement de type des |
| 4 mai 2024 | Soutiseuse | Flower de transfert | 15 | Micronique | Changement de PDR | chute des bouteilles, changement d'une pince | Chute des bouteilles | Défaillance d'une pince | Changement de la pince défaillante |
| 4 mai 2024 | Soutiseuse | Alimentation bouchons | 5 | Micronique | Blocage | bouchons des bouchons et bouchons inversés | Bouchons des bouchons | Bouchons inversés | Réguler les bouchons |
| 4 mai 2024 | Soutiseuse | entrée machine | 4 | Micronique | Blocage | blocage entrainement | de des étoiles au niveau de l'entrée machine | | |
| 4 mai 2024 | Soutiseuse | Flower de transfert | 40 | Micronique | Changement de PDR | chute des bouteilles, changement d'une pince | Chute des bouteilles | Défaillance d'une pince | Changement de la pince défaillante |
| 4 mai 2024 | Soutiseuse | Alimentation bouchons | 10 | Micronique | Blocage | blocage des bouchons et bouchons inversés | Bouchons des bouchons | Bouchons inversés | Réguler les bouchons |
| 4 mai 2024 | Soutiseuse | Remplisseuse (Idex K12776) | 25 | Micronique | Pilgrage | mauvais transfert des bouteilles, problème des pince cad | de la cadence ou Mauvais transfert des | Usure des pinces de la remplisseuse | Changement de pince de la remplisseuse |
| 4 mai 2024 | Soutiseuse | Alimentation bouchons | 10 | Micronique | Blocage | bouchons | Bouchons des bouchons | Bouchons inversés ou le types des bouchons | es bouchons ou demander un changement de type des |
| 5 mai 2024 | Soutiseuse | Remplisseuse (Idex K12776) | 25 | Micronique | Blocage | mauvais transfert des bouteilles | Mauvais transfert des bouteilles | ment incorrect des pinces de la remplisseuse ou problème | Changement de pince ou enlèvement des bouteilles mal soufflées |
| 5 mai 2024 | Soutiseuse | Alimentation bouchons | 25 | Micronique | Blocage | | Bouchons des bouchons | Bouchons inversés | Réguler les bouchons |
| 5 mai 2024 | Soutiseuse | Remplisseuse (Idex K12776) | 15 | Micronique | Gratage | Graissage du collecteur | Alerte sur l'IRM | Système de graissage automatique en défaillance | Graissage du collecteur |
| 5 mai 2024 | Soutiseuse | Remplisseuse (Idex K12776) | 40 | Micronique | Pilgrage | mauvais transfert des bouteilles, problème des pince cad | de la cadence ou Mauvais transfert des | Usure des pinces de la remplisseuse | Changement de pince de la remplisseuse |
| 5 mai 2024 | Soutiseuse | Flower de transfert | 10 | Micronique | Changement de PDR | chute des bouteilles, changement d'une pince | Chute des bouteilles | Défaillance d'une pince | Changement de la pince défaillante |
| 5 mai 2024 | Soutiseuse | Alimentation bouchons | 8 | Micronique | Blocage | blocage des bouchons et bouchons inversés | Bouchons des bouchons | Bouchons inversés | Réguler les bouchons |
| 5 mai 2024 | Soutiseuse | Flower de transfert | 5 | Micronique | Blocage | blocage entrainement | e des étoiles au niveau des roues de transfert | | |
| 5 mai 2024 | Soutiseuse | Flower de transfert | 40 | Micronique | Changement de PDR | chute des bouteilles, changement d'une pince | Chute des bouteilles | Défaillance d'une pince | Changement de la pince défaillante |
| 5 mai 2024 | Soutiseuse | Alimentation bouchons | 9 | Micronique | Blocage | blocage des bouchons et bouchons inversés | Bouchons des bouchons | Bouchons inversés | Réguler les bouchons |
| 5 mai 2024 | Soutiseuse | Flower de transfert | 10 | Micronique | Blocage | blocage entrainement | e des étoiles au niveau des roues de transfert | | |
| 6 mai 2024 | Soutiseuse | Remplisseuse (Idex K12776) | 15 | Micronique | Blocage | mauvais transfert des bouteilles | Mauvais transfert des bouteilles | ment incorrect des pinces de la remplisseuse ou problème | Changement de pince ou enlèvement des bouteilles mal soufflées |
| 6 mai 2024 | Soutiseuse | Alimentation bouchons | 15 | Micronique | Blocage | | Bouchons des bouchons | Bouchons inversés | Réguler les bouchons |
| 6 mai 2024 | Soutiseuse | Remplisseuse (Idex K12776) | 37 | Micronique | Pilgrage | mauvais transfert des bouteilles, problème des pince cad | de la cadence ou Mauvais transfert des | Usure des pinces de la remplisseuse | Changement de pince de la remplisseuse |
| 6 mai 2024 | Soutiseuse | Alimentation bouchons | 15 | Micronique | Blocage | bouchons des bouchons et bouchons inversés | Bouchons des bouchons | Bouchons inversés | Réguler les bouchons |
| 6 mai 2024 | Soutiseuse | Flower de transfert | 5 | Micronique | Blocage | blocage entrainement | e des étoiles au niveau des roues de transfert | | |
| 6 mai 2024 | Soutiseuse | Remplisseuse (Idex K12776) | 50 | Micronique | Pilgrage | mauvais transfert des bouteilles, problème des pince cad | de la cadence ou Mauvais transfert des | Usure des pinces de la remplisseuse | Changement de pince de la remplisseuse |
| 6 mai 2024 | Soutiseuse | Alimentation bouchons | | Micronique | Blocage | bouchons des bouchons et bouchons inversés | Bouchons des bouchons | Bouchons inversés | Réguler les bouchons |

FIGURE C1 – Le nouvel historique d'arrêts

La figure C1 présente le rapport des arrêts enrichi et structuré, incluant les informations essentielles telles que les causes, les symptômes et les solutions, en vue de faciliter l'analyse approfondie des défaillances.

Annexe D : Work Breakdown Structure (WBS)

D.1 Le WBS de la maintenance corrective

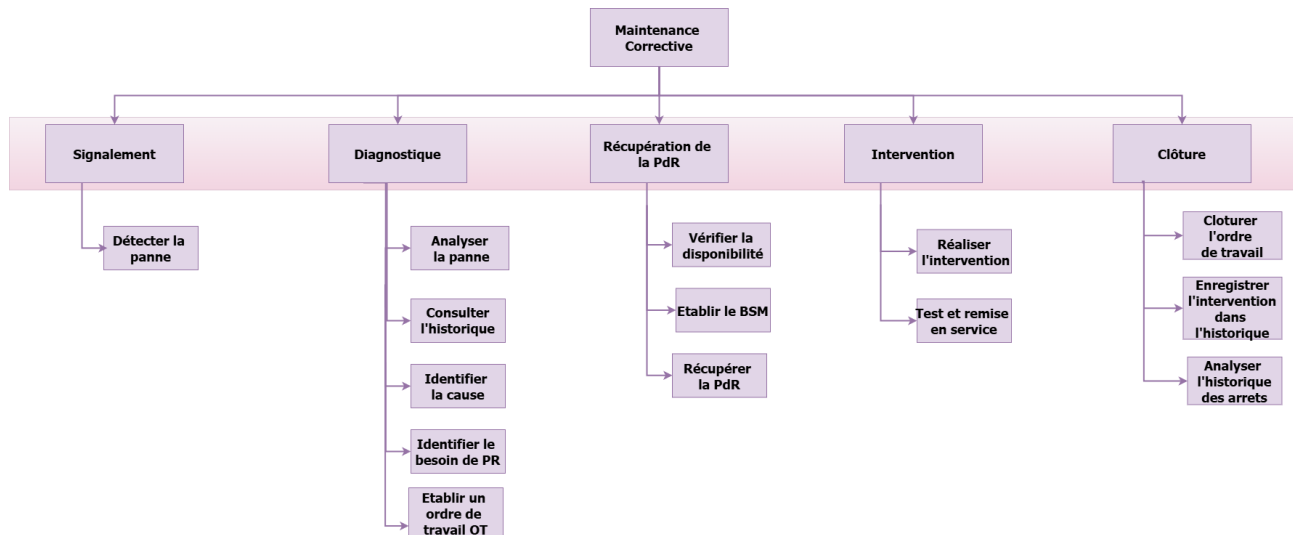


FIGURE D1 – Le WBS de la maintenance corrective

La figure D1 illustre le WBS détaillant l'ensemble des tâches réalisées dans le cadre d'une maintenance corrective, depuis le déclenchement de la panne jusqu'à la clôture de l'intervention.

D.2 Le WBS de la maintenance préventive hebdomadaire

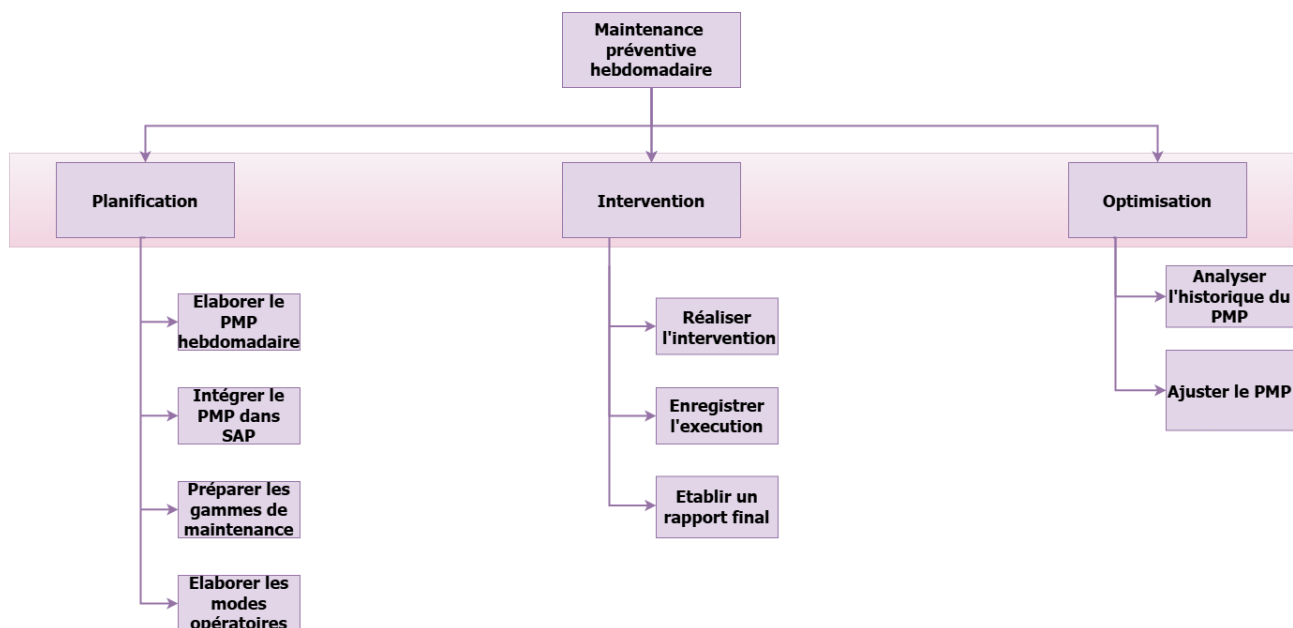


FIGURE D2 – Le WBS de la maintenance préventive hebdomadaire

La figure D2 présente le WBS des actions nécessaires à la réalisation d'une maintenance préventive hebdomadaire, en distinguant ses trois phases principales : Planification, Intervention et Optimisation.

D.3 Le WBS de la maintenance préventive annuelle

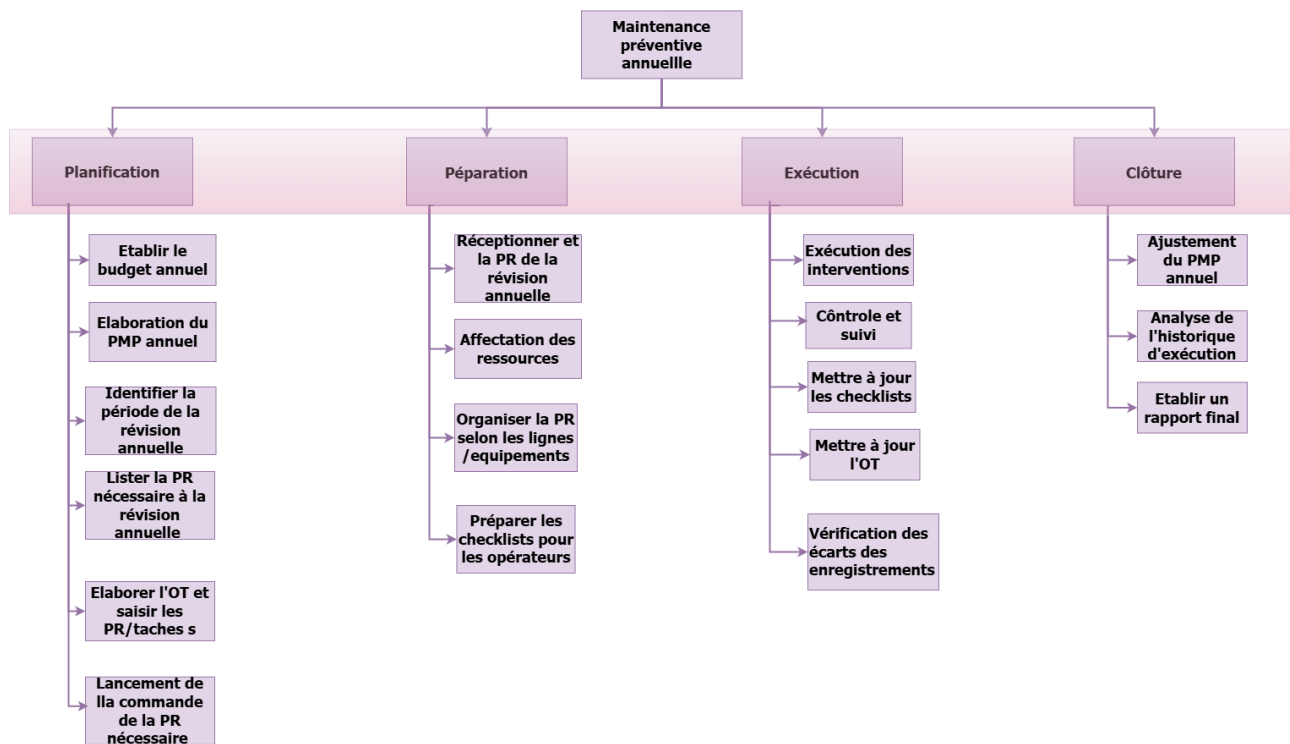


FIGURE D3 – Le WBS de la maintenance préventive annuelle

La figure D3 présente le WBS des actions nécessaires à la réalisation d'une maintenance préventive annuelle, en distinguant ses quatres phases principales : Planification, Préparation, Exécution, et Clôture.

Annexe E : Organisation des données d'implémentation (PDR et équipements)

E.1 Table des équipements

E.1.1 Abréviation des équipements et Catégories

TABLE E.1 – Liste des abréviations des catégories et des équipements

| | Désignation Complète | Abréviation |
|--------------------|----------------------------------|-------------|
| Catégories | Production des Bouteilles | PB |
| | Conditionnement primaire | CP |
| | Étiquetage et Marquage | EM |
| | Palettisation et emballage | PE |
| | Manutention et Transport Interne | MTI |
| Équipements | Souffleuse | SF |
| | Soutireuse | ST |
| | Codeur | CD |
| | Étiqueteuse | ETI |
| | Étiqueteuse palette | ETP |
| | Fardeuse | FAR |
| | Palettiseur | PAL |
| | Banderoeuleuse | BND |
| | Convoyeurs | CNV |

Le tableau E.1 présente la liste des abréviations des équipements et de leurs catégories, servant de base à la codification utilisée pour l'identification des équipements.

E.1.2 Arborescence Fonctionnelle des équipements

E.1.2.1 Catégorie 1 : Production des Bouteilles

TABLE E.2 – Décomposition fonctionnelle des équipements de la première catégorie

| Décomposition fonctionnelle | | | | | | | | |
|---|------------|---------------------|-----------|----------|------------------------------------|--------|-----------------------------------|-----------------|
| Secteur : PET 20/18 | | | | | | | | |
| Unité de production : Production des Bouteilles | | | | | | | | |
| Équipement | | Unité fonctionnelle | | Ensemble | | Organe | | Codification |
| 01 | Souffleuse | 01 | Soufflage | 01 | Roue de soufflage | 01 | Paroi pneumatique | L2018-PB-SF-001 |
| | | | | | | 02 | Paroi d'eau | |
| | | | | | | 03 | Cellule photoélectrique | |
| | | | | | | 04 | Vannes groupées | |
| | | | | | | 05 | Unité porte moule | |
| | | | | | | 06 | Système d'étirage | |
| | | | | | | 07 | Cames | |
| | | | | 02 | Module de chauffe | 01 | Chaîne de tournette | |
| | | | | | | 02 | Cellule photoélectrique | |
| | | | | | | 03 | Filtre | |
| | | | | | | 04 | Guidage pré-forme | |
| | | | | | | 05 | Etoile d'entrée | |
| | | | | | | 06 | Système de chauffe | |
| | | | | 03 | Module de transfert | 01 | Étoile de transfert | |
| | | | | | | 02 | Cellule photoélectrique | |
| | | | | 04 | Système pneumatique et hydraulique | 01 | Conduite pneumatique | |
| | | | | | | 02 | Filtre | |
| | | | | 05 | Machine | 01 | Carter | |
| | | | | | | 02 | Châssis | |
| | | | | | | 03 | Dispositif de protection | |
| | | | | | | 04 | Centrale de graissage automatique | |

Suite page suivante

| Décomposition fonctionnelle | | | | | | | | |
|---|--|---------------------|--|----------|--------------------|--------|----------------------------------|--------------|
| Secteur : PET 20/18 | | | | | | | | |
| Unité de production : Production des Bouteilles | | | | | | | | |
| Équipement | | Unité fonctionnelle | | Ensemble | | Organe | | Codification |
| | | | | 07 | Armoire électrique | 01 | Armoire électrique | |
| | | | | 08 | Magasin préforme | 01 | Convoyeur à rouleaux | |
| | | | | | | 02 | Convoyeur élévateur | |
| | | | | | | 03 | Rail de sortie | |
| | | | | | | 04 | Bande de transport intermédiaire | |
| | | | | | | 05 | Silo | |
| | | | | | | 06 | Machine | |
| Réalisé par I.ZERROUK et M.GUENDOUZI le 05/05/2025 MAJ le : Folio : | | | | | | | | |

Le tableau E.2 présente la décomposition fonctionnelle des équipements de la catégorie «Production des bouteilles». Cette catégorie ne comprend que la souffleuse. La décomposition détaille l'équipement, sa codification, ses unités fonctionnelles, les sous-ensembles associés ainsi que les organes correspondants.

E.1.2.2 Catégorie 2 : Conditionnement primaire

TABLE E.3 – Décomposition fonctionnelle des équipements de la deuxième catégorie

| Décomposition fonctionnelle | | | | | | | | |
|--|------------|---------------------|-----------|----------|---------------------|--------|-----------------------------------|-----------------|
| Secteur : PET 20/18 | | | | | | | | |
| Unité de production : Conditionnement primaire | | | | | | | | |
| Équipement | | Unité fonctionnelle | | Ensemble | | Organe | | Codification |
| 01 | Soutireuse | 01 | Soutirage | 01 | Zone Blanche | 01 | Zone blanche | L2018-CP-ST-002 |
| | | | | | | 02 | Zone blanche | |
| | | | | 02 | Système électrique | 01 | Capteur | |
| | | | | | | 02 | Armoire électrique | |
| | | | | 03 | Remplisseuse | 01 | Soupape de soutirage | |
| | | | | | | 02 | La partie supérieure de soutirage | |
| | | | | 04 | Étoile de transfert | 01 | Étoile de transfert | |
| | | | | 05 | Rinceuse | 01 | Circuit d'eau | |

Suite page suivante

| Décomposition fonctionnelle | | | | | | | | |
|--|--|---------------------|--|----------|------------------------|--------|-------------------------------|--------------|
| Secteur : PET 20/18 | | | | | | | | |
| Unité de production : Conditionnement primaire | | | | | | | | |
| Équipement | | Unité fonctionnelle | | Ensemble | | Organe | | Codification |
| | | | | 06 | Visseuse | 02 | Pinces | |
| | | | | | | 01 | Tête | |
| | | | | | | 02 | Étoile de transfert | |
| | | | | | | 03 | Came de levage | |
| | | | | | | 04 | Tapis transporteur | |
| | | | | 07 | Machine | 01 | Buses | |
| | | | | | | 02 | Dispositif de protection | |
| | | | | | | 03 | Machine | |
| | | | | | | 04 | Pièces de format | |
| | | | | | | 05 | Carter, porte | |
| | | | | | | 06 | Groupe de soupape | |
| | | | | | | 07 | Système pneumatique | |
| | | | | | | 08 | Centrale de lubrification | |
| | | | | | | 09 | Réducteurs | |
| | | | | | | 10 | Panneaux | |
| | | | | 08 | Unité de maintenance | 01 | Séparateur d'eau | |
| | | | | 09 | Sécheur d'air comprimé | 01 | Sécheur d'air comprimé | |
| | | | | 11 | Mixeur | 01 | Conduite de gaz de production | |
| | | | | | | 02 | Vanne | |
| | | | | | | 03 | Raccords laitiers | |
| | | | | | | 04 | Armoire électrique | |
| | | | | | | 05 | Machine | |
| | | | | | | 06 | Joint | |

| Décomposition fonctionnelle | | | | | | | | |
|---|--------|---------------------|--------|----------|---------------|--------|--------------------------------|-----------------|
| Secteur : PET 20/18 | | | | | | | | |
| Unité de production : Conditionnement primaire | | | | | | | | |
| Équipement | | Unité fonctionnelle | | Ensemble | | Organe | | Codification |
| | | | | | | 07 | Pompes | |
| | | | | | | 08 | Échangeur de chaleur à plaques | |
| | | | | | | 09 | Conduites pneumatiques | |
| | | | | | | 10 | Symboles de sécurité | |
| | | | | | | 11 | Unité de maintenance | |
| | | | | | | 12 | Verres indicateurs | |
| 02 | Codeur | 02 | Codage | 01 | Système laser | 01 | Tête de laser | L2018-CP-CD-003 |
| | | | | | | 02 | Lentille de Laser | |
| | | | | 02 | Machine | 01 | Photocellule | |
| | | | | | | 02 | Encodeur | |
| | | | | | | 03 | Extracteur de fumé | |
| | | | | | | 04 | Tuyau d'aspiration | |
| Réalisé par I.ZERROUK et M.GUENDOUZI le 05/05/2025 MAJ le : Folio : | | | | | | | | |

Le tableau E.3 présente la décomposition fonctionnelle des équipements de la catégorie «Conditionnement primaire». Cette catégorie comprend la soutireuse et le codeur. La décomposition détaille l'équipement, sa codification, ses unités fonctionnelles, les sous-ensembles associés ainsi que les organes correspondants.

E.1.2.3 Catégorie 3 : Étiquetage et Marquage

TABLE E.4 – Décomposition fonctionnelle des équipements de la troisième catégorie

| Décomposition fonctionnelle | | | | | | | | |
|--|-------------|---------------------|---------------------------|----------|---------------------------|--------|------------------------|------------------|
| Secteur : PET 20/18 | | | | | | | | |
| Unité de production : Étiquetage et Marquage | | | | | | | | |
| Équipement | | Unité fonctionnelle | | Ensemble | | Organe | | Codification |
| 01 | Etiqueteuse | 01 | Étiquetage des bouteilles | 01 | Etoile de transfert | 01 | Pincés de transfert | L2018-EM-ETI-004 |
| | | | | 02 | Installations électriques | 01 | Dispositif de sécurité | |
| | | | | | | 02 | Armoire électrique | |
| | | | | | | 03 | Capteurs | |
| | | | | | | 04 | Câbles électriques | |
| | | | | 03 | Sellettes | 01 | Sellettes | |
| | | | | | | 02 | Table | |
| | | | | 04 | Tulipes de centrage | 01 | Tulipe de centrage | |
| | | | | | | 02 | Came de levage | |
| | | | | 05 | Brossage d'étiquettes | 01 | Brosse d'étiquette | |
| | | | | 06 | Dispositif de coupe | 01 | Couteau | |
| | | | | | | 02 | Rouleaux de coupe | |
| | | | | 07 | Tambour à vide | 01 | Patins | |
| | | | | | | 02 | Tambour à vide | |
| | | | | 08 | Porte bobine | 01 | Porte bobine | |
| | | | | 09 | Encolleur | 01 | Rouleaux encolleur | |
| | | | | | | 02 | Racleur | |
| | | | | 10 | Machine | 01 | Machine | |
| | | | | | | 02 | Panneaux | |
| | | | | | | 03 | Réducteur | |
| | | | | | | 04 | Cartouche de graisse | |
| | | | | | | 05 | Carter, porte | |
| | | | | | | 06 | Système pneumatique | |

Suite page suivante

| Décomposition fonctionnelle | | | | | | | | |
|---|---------------------|---------------------|-------------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------|-----------------------------------|------------------|
| Secteur : PET 20/18 | | | | | | | | |
| Unité de production : Étiquetage et Marquage | | | | | | | | |
| Équipement | | Unité fonctionnelle | | Ensemble | | Organe | | Codification |
| | | | | 11 | Partie inférieure de la machine | 01 | Centrale de graissage automatique | |
| | | | | | | 02 | Encodeur | |
| | | | | | | 03 | Servomoteurs des postes | |
| | | | | 12 | Unité de maintenance | 01 | Séparateur d'eau | |
| 02 | Étiqueteuse Palette | 02 | Étiquetage des palettes | 01 | Plaque à vide | 01 | Plaque à vide | L2018-EM-ETP-008 |
| | | | | 02 | Filtre d'air | | | |
| | | | 02 | Pupe de soufflage | 01 | Pupe de soufflage | | |
| | | | 03 | Portes bobines | 01 | Portes bobines | | |
| | | | | | 02 | Bras | | |
| | | | 04 | Surfaces et vitres | 01 | Surfaces et vitres | | |
| Réalisé par I.ZERROUK et M.GUENDOUZI le 05/05/2025 MAJ le : Folio : | | | | | | | | |

Le tableau E.4 présente la décomposition fonctionnelle des équipements de la catégorie «Étiquetage et Marquage». Cette catégorie comprend l'Étiqueteuse et l'Étiqueteuse palette. La décomposition détaille l'équipement, sa codification, ses unités fonctionnelles, les sous-ensembles associés ainsi que les organes correspondants.

E.1.2.4 Catégorie 4 : Palettisation et emballage

TABLE E.5 – Décomposition fonctionnelle des équipements de la quatrième catégorie

| Décomposition fonctionnelle | | | | | | | | |
|--|------------|---------------------|-----------|----------|------------------------|--------|----------------------|------------------|
| Secteur : PET 20/18 | | | | | | | | |
| Unité de production : Palettisation et emballage | | | | | | | | |
| Équipement | | Unité fonctionnelle | | Ensemble | | Organe | | Codification |
| 01 | Fardeleuse | 01 | Fardelage | 01 | Entrée machine | 01 | Tapis d'alimentation | L2018-PE-FAR-005 |
| | | | | | | 02 | Guides de séparation | |
| | | | | 02 | Couloirs de séparation | 01 | Chaîne de convoyage | |
| | | | | | | 02 | Accordéant | |
| Suite page suivante | | | | | | | | |

| Décomposition fonctionnelle | | | | | | | | |
|--|--|---------------------|--|----------|----------------------------|--------|---|--------------|
| Secteur : PET 20/18 | | | | | | | | |
| Unité de production : Palettisation et emballage | | | | | | | | |
| Équipement | | Unité fonctionnelle | | Ensemble | | Organe | | Codification |
| | | | | | | 03 | Système d'entraînement doigts de séparation | |
| | | | | | | 01 | Bandes | |
| | | | | 03 | Station alimentation filme | 02 | Rouleaux gommés | |
| | | | | | | 03 | Rouleaux passage filme | |
| | | | | | | 04 | Couteau | |
| | | | | 01 | Station soudage filme | 01 | Mandrins | |
| | | | | | | 02 | Porte bobine | |
| | | | | | | 03 | Rouleaux passage filme | |
| | | | | | | 04 | Lame de coupe | |
| | | | | | | 05 | Résistance | |
| | | | | 07 | Station de fardelage | 01 | Chaîne et tapis | |
| | | | | | | 02 | Table de transfert | |
| | | | | | | 03 | Module mise sous film | |
| | | | | 08 | Cycleur supérieur | 01 | Barres de guidages | |
| | | | | | | 02 | Chaînes de cycleur | |
| | | | | 09 | Tunnel de rétraction | 01 | Tapis grillagé | |
| | | | | | | 02 | Rideau | |
| | | | | | | 03 | Réservoir de lubrification | |
| | | | | | | 04 | Tapis grillagé | |
| | | | | | | 05 | Buses d'air | |
| | | | | | | 06 | Moteurs | |
| | | | | 10 | Machine | 01 | Porte | |
| | | | | | | 02 | Machine | |
| | | | | | | 03 | Séparateur d'eau | |

Suite page suivante

| Décomposition fonctionnelle | | | | | | | | |
|--|-------------|---------------------|--------------|----------|--|--------|----------------------------|------------------|
| Secteur : PET 20/18 | | | | | | | | |
| Unité de production : Palettisation et emballage | | | | | | | | |
| Équipement | | Unité fonctionnelle | | Ensemble | | Organe | | Codification |
| | | | | | | 05 | Système pneumatique | |
| | | | | | | 06 | Conduite de lubrification | |
| | | | | | | 07 | Réservoir de lubrification | |
| | | | | | | 08 | Motoréducteurs | |
| | | | | 11 | Système électrique | 01 | Arrêt d'urgence | |
| | | | | | | 02 | Conduite électrique | |
| | | | | | | 03 | Armoire électrique | |
| 02 | Palettiseur | 02 | Palettissage | 01 | Robobox 1 et 2 | 01 | Tapis à chaîne | L2018-PE-PAL-006 |
| | | | | | | 02 | Têtes pre-neuses | |
| | | | | | | 03 | Vitre et carter | |
| | | | | 02 | Regroupement et pré-regroupement | 01 | Tapis à chaîne | |
| | | | | | | 02 | Pousseur | |
| | | | | | | 03 | Stoppeur | |
| | | | | 03 | Module pale | 01 | Cellules photoélectriques | |
| | | | | | | 02 | Jalousie | |
| | | | | 04 | Dispositifs transporteurs intercalaires 1 et 2 | 01 | Système anti-chute | |
| | | | | | | 02 | Transporteurs intercalaire | |
| | | | | 05 | Table de transfert intercalaire | 01 | Guide de centrage | |
| | | | | | | 02 | Table | |
| | | | | 06 | Machine | 01 | Cellules photoélectriques | |
| | | | | | | 02 | Machine | |
| | | | | | | 03 | Séparateur d'eau | |
| | | | | | | 04 | Réducteur | |

| Décomposition fonctionnelle | | | | | | | | |
|--|---------------|---------------------|-------------|----------|--|--------|----------------------------------|------------------|
| Secteur : PET 20/18 | | | | | | | | |
| Unité de production : Palettisation et emballage | | | | | | | | |
| Équipement | | Unité fonctionnelle | | Ensemble | | Organe | | Codification |
| | | | | 07 | Système pneumatique | 01 | Filtre d'air | |
| | | | | | | 02 | Conduite pneumatique | |
| | | | | 08 | Système de lubrification | 01 | Station de graissage automatique | |
| | | | | 09 | Armoire électrique | 02 | Câblage électrique | |
| 03 | Bandero leuse | 03 | Banderolage | 01 | Machine de base | 01 | Unité de maintenance | L2018-PE-BND-007 |
| | | | | | | 02 | Roue | |
| | | | | | | 03 | Système de levage | |
| | | | | | | 04 | Système anti-chute | |
| | | | | | | 05 | Réducteur | |
| | | | | | | 06 | Support batterie | |
| | | | | | | 07 | Anneau rotatif | |
| | | | | 02 | Groupe chariot pré-étirage et porte bobine | 01 | Chariot pré-étirage | |
| | | | | | | 02 | Rouleaux d'entraînement | |
| | | | | | | 03 | Rouleau fou | |
| | | | | | | 04 | Brosse moteur | |
| | | | | | | 05 | Batteries | |
| | | | | 03 | Groupe pince coupe et soudage filme | 01 | File de coupe | |
| | | | | | | 02 | Tissu en téflon | |
| | | | | | | 03 | Résistance | |
| | | | | | | 04 | Bras | |
| | | | | | | 05 | Guidages à billes | |
| | | | | 04 | Élévateur palette | 01 | Guide de coulissement | |

Suite page suivante

| Décomposition fonctionnelle | | | | | | | | |
|---|--|---------------------|--|----------|--|--------|---------------|--------------|
| Secteur : PET 20/18 | | | | | | | | |
| Unité de production : Palettisation et emballage | | | | | | | | |
| Équipement | | Unité fonctionnelle | | Ensemble | | Organe | | Codification |
| | | | | | | 02 | Ressort à air | |
| | | | | | | 03 | Chambre à air | |
| Réalisé par I.ZERROUK et M.GUENDOUZI le 05/05/2025 MAJ le : Folio : | | | | | | | | |

Le tableau E.5 présente la décomposition fonctionnelle des équipements de la catégorie «Palettisation et emballage». Cette catégorie comprend la Fardeleuse, le Palettiseur, et la Bande-rouleuse. La décomposition détaille l'équipement, sa codification, ses unités fonctionnelles, les sous-ensembles associés ainsi que les organes correspondants.

E.1.2.5 Catégorie 5 : Manutention et Transport Interne

TABLE E.6 – Décomposition fonctionnelle des équipements de la cinquième catégorie

| Décomposition fonctionnelle | | | | | | | | | | |
|--|------------|---------------------|-----------------|----------|--------------------------|-----------------|---------------------------|-------------------|-----------|-----------------------------|
| Secteur : PET 20/18 | | | | | | | | | | |
| Unité de production : Manutention et Transport Interne | | | | | | | | | | |
| Équipement | | Unité fonctionnelle | | Ensemble | | Organe | | Codification | | |
| 01 | Convoyeurs | 01 | Convoyage à air | 01 | Guides | 01 | Guide sous-cols | L2018-MTI-CNV-009 | | |
| | | | | | | 02 | Guides latéraux | | | |
| | | | | | 02 | Filtres | 01 | | Filtres | |
| | | | | | 03 | Convoyeur à air | 01 | | Convoyeur | |
| | | | | 02 | | | Cellules photoélectriques | | | |
| | | | | 02 | Convoyeur des bouteilles | 01 | Convoyeur à chaîne | | 01 | Chaîne bouteille |
| | | | | | | | | | 02 | Support et rampe de guidage |
| | | | | | | | | | 03 | Capteurs |
| | | 04 | Pignons | | | | | | | |
| | | 05 | Paliers | | | | | | | |
| | | 06 | Motoréducteurs | | | | | | | |
| | | 07 | Carter | | | | | | | |
| | | 08 | Chaînes | | | | | | | |

Suite page suivante

| Décomposition fonctionnelle | | | | | | | | |
|--|--|---|---------------------|----------|------------------------------------|--------|--------------------------|--------------|
| Secteur : PET 20/18 | | | | | | | | |
| Unité de production : Manutention et Transport Interne | | | | | | | | |
| Équipement | | Unité fonctionnelle | | Ensemble | | Organe | | Codification |
| | | | | 02 | Système électrique | 01 | Bouton d'arrêt d'urgence | |
| | | | | | | 02 | Câblage électrique | |
| | | | | 03 | Lubrification de bande automatique | 01 | Buses | |
| | | 03 | Convoyeur des packs | 01 | Convoyeur à chaîne | 01 | Tapis à chaîne | |
| | | | | | | 02 | Motoréducteur | |
| | | | | | | 03 | Carter | |
| | | Réalisé par I.ZERROUK et M.GUENDOUZI le 05/05/2025 MAJ le : Folio : | | | | | | |

Le tableau E.6 présente la décomposition fonctionnelle des équipements de la catégorie «Manutention et transport interne». Cette catégorie ne comprend que les Convoyeurs. La décomposition détaille l'équipement, sa codification, ses unités fonctionnelles, les sous-ensembles associés ainsi que les organes correspondants.

E.2 Les PDR

E.2.1 Script de catégorisation des PDR

```
# Définition des mots clés
categories_keywords = {
    'Filtration': ['filtre'],
    'Transmission mécanique': ['courroie', 'chaîne', 'roue à chaîne', 'poulie', 'pignon', 'engrenage'],
    'Roulement et paliers': ['roulement', 'palier', 'galet', 'bride', 'came', 'roue', 'rond'],
    'Système d'étanchéité': ['joint', 'bague', 'étanchéité', 'anneau', 'garniture'],
    'Guidage': ['guide', 'rail', 'glissière'],
    'Composants pneumatiques et Hydraulique': ['distributeur', 'régulateur', 'vanne', 'tuyau', 'membrane', 'cylindre', 'verin', 'amortisseur', 'piston'],
    'Système de fixation': ['entretoise', 'goupille', 'vis', 'écrou', 'rondelle', 'ressort', 'clip', 'circlip', 'anneau', 'clips', 'circlips', 'doville', 'pointe'],
    'Structure/Châssis': ['plaque', 'support', 'cadre', 'châssis'],
    "Kit d'assemblages": ['jeu de pièces', 'kit', 'ensemble', 'montage'],
    'Motorisation et entraînement': ['moteur', 'motoréducteur', 'réducteur', 'variateur', 'servomoteur', 'entraînement', 'inverter'],
    'Pièce/organe mobile': ['axe', 'arbre', 'axe porte galet'],
    'Composant de transport': ['tapis à chaîne', 'tapis à chaîne', 'conoyeur', 'transporteur', 'system de retour'],
    'Instrumentation': ['capteur', 'détecteur', 'cellule', 'photoélectrique', 'inductif', 'proximité'],
    'Pièces spécifiques': ['selette', 'pince', 'brosse', 'lame', 'couteau'],
    'Composants électrique et automatisme': ['contacteur', 'automate', 'cable', 'fusible'],
}

# Fonction pour la catégorisation
def detect_category(description): 1 usage
    if pd.isna(description):
        return 'Autre'
    desc = description.lower()
    for category, keywords in categories_keywords.items():
        if any(keyword in desc for keyword in keywords):
            return category
    return 'Pièces spécifiques'
```

FIGURE E1 – Extrait du code python pour catégoriser les PDR

Le script Python illustré dans la figure E1 met en œuvre un processus de catégorisation automatique des pièces de rechange (PR) selon 15 catégories distinctes.

E.2.2 Les PDR du magasin I

TABLE E.7 – Inventaire du Magasin 1 (MAG I)

| Zone | Catégorie | Codif | Fournisseur | Pièce | Code |
|------|---------------------|-------|-------------|------------------------------|--------|
| W | Joints d'étanchéité | JET | F.I. PARTS | BAGUE JOINT A LEVRES 46X54X7 | 209662 |
| | | | | BAGUE JOINT A LEVRES 62X72X7 | 209660 |
| | | | | ANNEAU DE GUIDAGE 12X18X19,8 | 209657 |
| | | | | JOINT D'ETANCHEITE 55X2 NBR | 209533 |
| | | | | JOINT D'ETANCHEITE 20X2 FPM | 209532 |
| | | | | JOINT D'ETANCHEITE 15X2 FKM | 210577 |
| | | | | JOINT D'ETANCHEITE 30X5 60S | 210582 |
| | | | | JOINT D'ETANCHEITE 51X2,5 | 210581 |
| | | | | JOINT D'ETANCHEITE 15X2 VMQ | 210580 |
| | | | | JOINT D'ETANCHEITE | 215084 |
| | | | | ANNEAU DE GUIDAGE 61,8X7X5,4 | 223230 |
| | | | | JOINT D'ETANCHEITE 56X1,5 NB | 210636 |
| | | | | ANNEAU | 224924 |
| | | | | JOINT TORIQUE 43X2 NBR | 225114 |
| | Pièces de guidage | GUD | KRONES | GUIDE | 216663 |

| Zone | Catégorie | Codif | Fournisseur | Pièce | Code |
|------|--|-------|-------------|--|--------|
| | | | | Guide bouteilles | 210843 |
| | | | | GUIDE
EXTERIEUR | 228508 |
| | | | | GUIDE SOUS COLE
15X7.1 (BOBINE
30mt) | 209523 |
| | | | | Glissière | 217059 |
| | Pièces de
fixation et de
montage | FMT | F.I. PARTS | ANNEAU | 209659 |
| | | | | RAIL | 210482 |
| | | | F.I. PARTS | GOUPILLE | 210937 |
| | | | | RESSORT-
ASSIETTE | 210936 |
| | | | | CIRCLIPS 15X1 ST
DIN 47 | 209739 |
| | | | | ENTRETOISE
L=10,1 | 210857 |
| | | | | CLIP | 210858 |
| | | | | DOUILLE XSM
12X14X8 | 210663 |
| | | | | GOUPILLE ISO 8752
M4X10 A2 | 210695 |
| | | | | PIECE DE
PRESSION | 210653 |
| | | | | RESSORT A LAME
L=52 B=7,9 S=1,5 | 210651 |
| | | | | RESSORT DE
PRESSION | 210649 |
| | | | | CIRCLIPS EXT
Ø62X2 | 210264 |
| | | | | CLIPS 1150 | 208636 |
| | | | | CLIPS R=12.8 2.5m | 208627 |
| | | | | ENTRETOISE /
TUBE | 213959 |
| | | | | VIS SANS TETE /
GOUPILLE
FILETEE | 224929 |
| | | | | Pointe | 210844 |
| | Pièces
spécifiques | SPC | KRONES | Zone de transfert
(brosse) | 231045 |
| | | | | Rideau | 209429 |

| Zone | Catégorie | Codif | Fournisseur | Pièce | Code |
|------|---------------------------|-------|-------------------------------|---|--------|
| | | | | Lame de couteau | 215290 |
| | | | | LAMPE
INFRAROUGE
IR3000-400V
KRONES | 214746 |
| | | | | LAMPE
FLUORESCENTE
18W 1200Im | 213052 |
| | | | | VENTOUSE | 210963 |
| | | | | ROULEAUX
TEFLON GM | 215609 |
| | | | | Pince souffleuse | 230608 |
| | | | | Pince étiqueteuse | 230609 |
| | | | | Pince Soutireuse | 230607 |
| | | | | Sellette | 209685 |
| X | Transmission
mécanique | TRM | Transport
SYSTEM-
PLAST | Tapis à chaîne
SR1000BMR | 231043 |
| | | | | GUIDAGE DE
CHAÎNE | 216863 |
| | | | | ROUE A CHAÎNE
1005 D40 Z=14 | 210446 |
| | | | | POULIE DE
RENOI | 210026 |
| | Roulements
et paliers | RLP | Rexnord | GALET DE CAME | 210939 |
| | | | | GALET DE CAME
LR607 2RS TN | 209750 |
| | | | | PORTE-GALET | 210421 |
| | | | | ROULEAU / GALET | 210423 |
| | | | | PALIER-BRIDE D30 | 210410 |
| | | | | PALIER - BRIDE
PCST AH23 30x115 | 202312 |
| | | | Transport
SYSTEM-
PLAST | ROUE CHAÎNE 2120
Z=28 D40 | 210019 |
| | | | | ROUE A CHAÎNE
D30 SSW1000-18 | 209853 |
| | | | F.I. PARTS | GALET DE CAME | 210939 |
| | | | | ROULEMENT 6005
2RS /606101 /
0400301411 | 201566 |

| Zone | Catégorie | Codif | Fournisseur | Pièce | Code |
|------|---|-------|---------------|---|--------|
| | | | | RONDELLE D'APPUI | 210862 |
| | | | | PORTE-GALET | 210421 |
| | | | | ROULEMENT 626-LL | 220127 |
| | | | | ROND / ROND TUBE | 208126 |
| U | Composants pneumatiques et hydrauliques | CPH | Aventics | TUYAU | 210945 |
| | | | | AMORTISSEUR | 209695 |
| | | | | CYLINDRE | 210932 |
| | | | | AMORTISSEUR M20X1.5M-110 | 209707 |
| | | | | MEMBRANE / DIAPHRAGME | 210631 |
| | | | | KIT VERIN D32-30 | 213871 |
| | Motorisation et entraînement | MTR | France Baumer | MOTEUR A FREIN 112 B5 P4 4KW MULTITENSION | 222304 |
| | | | | SERVOMOTEUR COMMANDE POSTE D'ETIQUETAGE | 207865 |
| | | | | SERVOMOTEUR 14.9NM | 215596 |
| | | | | MOTEUR REDUCTEUR | 214740 |
| | | | | SERVOMOTEUR NM2.4 | 213792 |
| | Instrumentation | IST | France Baumer | DETECTEUR DE PROXIMITE NBB4-12GM50-E2-V1 | 219318 |
| | | | | DETECTEUR DE PROXIMITE | 213819 |
| | | | | CELLULE PHOTO-ELECTRIQUE KRTM 20M/V-20-0 | 212275 |
| | | | | PHOTOCELLULE Wenglor HW11PA3S901 | 216810 |

| Zone | Catégorie | Codif | Fournisseur | Pièce | Code |
|------|--|-------|---------------|-----------------------|--------|
| | Composants électriques et automatismes | ELE | France Baumer | FUSIBLE 10X38 32A GI | 204304 |
| | | | | DISJONCTEUR | 218252 |
| | | | | CONTACTEUR 3POL 24VDC | 231191 |

Le tableau E.7 présente la nouvelle organisation proposée pour le premier magasin, dédié aux pièces légères. Pour chaque zone, il indique les catégories de PR correspondantes, la codification des catégories, le fournisseur, la liste des PR ainsi que leurs codes respectifs.

E.2.3 Les PDR du magasin II

Le tableau E.8 présente la nouvelle organisation proposée pour le deuxième magasin, destiné au stockage des PR semi-lourdes à lourdes. Pour chaque zone, il indique les catégories de PR correspondantes, la codification des catégories, le fournisseur, la liste des PR ainsi que leurs codes respectifs

TABLE E.8 – Magasin 2 (MAG II)

| Zone | Catégorie | Codif | Fournisseur | Pièce | Code |
|------|-------------------------|-------|------------------------|------------------------|--------|
| A | Composants de transport | CTP | Transport SYSTEM-PLAST | Transporteur | 210530 |
| B | Structures et châssis | STR | KRONES | Plaque de transfert | 216846 |
| | | | | SUPPORT | 210850 |
| C | Arbres et axes | AAX | Rexnord | AXE | 208617 |
| D | Filtres | FIL | | FILTRE D'AMORTISSEMENT | 209528 |
| | | | | FILTRE 635X635X98 | 212816 |

Annexe F : Cahier Des Charges (CDC) et Complément de fonctionnalités de PLM-GMAO

F.1 Cahier de charges GMAO

Cahier des charges

Introduction :

Ce projet s'inscrit dans le cadre d'un Projet de Fin d'Études (PFE) et vise à implémenter la solution GMAO au sein de l'entreprise Fruitall Coca-Cola Algérie. L'objectif principal est d'améliorer la gestion de la maintenance sur la ligne de production 20/18, dédiée à la production de bouteilles PET de 1L.

Actuellement, la gestion de la maintenance au sein du service maintenance de l'entreprise présente plusieurs inefficacités, principalement dues à l'utilisation de processus manuels et d'outils informatiques dont l'exploitation est peu optimisée. Ces limitations réduisent l'efficacité de l'organisation et du suivi des interventions, entraînant un manque de centralisation des données et des difficultés dans la planification, l'exécution et le suivi des opérations de maintenance.

Contexte :

Fruitall Coca-Cola ECCBC Algérie, leader dans le secteur des boissons gazeuses en Algérie, exploite sept lignes de production, dont la ligne 20/18, spécialisée dans la fabrication de bouteilles PET de 1 litre. Cette ligne, stratégique pour la chaîne de production, a été choisie comme pilote pour l'implémentation de la solution GMAO, afin d'optimiser la gestion de la maintenance et d'améliorer la performance globale.

L'entreprise souhaite moderniser et structurer son système de maintenance pour augmenter la disponibilité des équipements et réduire les coûts d'intervention. Actuellement, plusieurs outils sont utilisés pour la gestion de la maintenance, mais leur exploitation n'est pas optimale :

- **ERP SAP** : Utilisé principalement pour la gestion des stocks de pièces de rechange, les demandes d'ordre de travail et les bons de sortie magasin. Toutefois, ces processus restent manuels et non automatisés.
- **EVOCON** : Logiciel de suivi de production mais non intégré à la maintenance.
- **MES SAP** : Utilisé pour la gestion des opérations de production, permettant l'enregistrement des arrêts de production sans lien direct avec la maintenance.

Ces pratiques ne permettent pas une gestion centralisée et automatisée de la maintenance, ce qui entraîne :

- Des temps d'arrêt imprévus et une réactivité limitée face aux pannes.

- Des retards dans les interventions et une difficulté à suivre l'historique des opérations.

L'implémentation de la solution GMAO permettra :

- D'optimiser les flux de travail.
- Centraliser les données de maintenance.
- Automatiser les processus manuels (demandes d'ordre de travail, bons de sortie magasin).
- Améliorer la réactivité en cas de panne.
- Fournir des rapports détaillés pour une meilleure prise de décision.

Objectifs :

- Améliorer l'efficacité des processus de maintenance :
 - Centraliser les données techniques et historiques des équipements pour une meilleure prise de décision.
 - Standardiser et structurer les procédures de maintenance afin de réduire les temps d'arrêt imprévus.
- Réduction des MTTR (Mean Time To Repair) en facilitant l'accès aux historiques de maintenance et aux plans d'action prédéfinis :
 - Mise à disposition rapide des interventions passées pour accélérer le diagnostic des pannes.
 - Intégration de plans d'action préétablis pour guider les techniciens et réduire les erreurs d'intervention.
- Prolongation de la durée de vie des équipements :
 - Suivi des indicateurs de performance et des tendances de dégradation pour anticiper les défaillances.
- Automatiser la gestion des interventions et la planification des tâches :
 - Génération automatique des ordres de maintenance en fonction des échéances planifiées.
- Optimiser la gestion des stocks de pièces de rechange :
 - Réduction des surstocks et des ruptures grâce à une gestion dynamique des niveaux de stock.
 - Suivi précis de l'utilisation des pièces pour améliorer les prévisions d'approvisionnement.
- Assurer la traçabilité des interventions pour une meilleure conformité aux réglementations :
 - Enregistrement automatique de toutes les opérations de maintenance pour garantir un suivi rigoureux.

Description de projet :

Le projet se déroulera en trois phases principales :

Partie 1

| | |
|---|---|
| Phase 1 : Étude analytique | <ol style="list-style-type: none"> 1. Analyse du modèle de maintenance existant et identification des inefficacités. 2. Proposition d'améliorations et standardisation des méthodes de travail. 3. Proposition d'un modèle de maintenance optimisé basé sur les fonctionnalités de la solution GMAO. |
| Phase 2 : Implémentation de la solution GMAO | <ol style="list-style-type: none"> 1. Configuration de la solution pour la ligne 20/18. 2. Automatiser les processus manuels. 3. Déploiement de la solution et tests techniques. |
| Phase 3 : Formation et validation | <ol style="list-style-type: none"> 1. Formation des utilisateurs à l'utilisation de la solution. 2. Tests et validation des fonctionnalités. |

Portée :

Inclus :

- Diagnostic approfondi du modèle de maintenance actuelle.
- Identification des lacunes et défis dans la gestion de la maintenance.
- Proposition d'un modèle optimisé de maintenance.
- Implémentation et configuration de la solution GMAO.
- Réalisation de tests pour assurer le bon fonctionnement de la solution.
- Validation de la solution : Test et validation pour s'assurer qu'elle répond aux besoins de l'entreprise.
- Formation des utilisateurs.

Exclus :

- Évaluation des performances post-implémentation pour mesurer l'impact du GMAO.
- Implémentation sur les autres lignes de production.
- Modification des infrastructures réseau existantes.

Exigences :

Exigences Fonctionnelles :

- Gestion des équipements :
 - Enregistrement (ajout, modification, suppression).
 - Localisation des équipements.

Partie 2

- Ajout des pièces détachées et des consommables pour chaque équipement.
- Gestion des maintenances correctives :
 - Création, modification, et suppression des DI.
 - Assignment des DI aux techniciens et conversion en OT
 - Suivi de l'état d'avancement des interventions.
- Planification des maintenances préventives :
 - Planifier et déclencher automatiquement les maintenances périodiques.
- Suivi des indicateurs de performance :
 - Temps moyen entre pannes MTBF.
 - Taux de rendement synthétique d'un équipement TRS.
 - Temps moyen de réparation MTTR.
 - Ratio maintenance préventive/corrective.
- Gestion des stocks :
 - Gestion des niveaux de stock.
 - Définir des seuils d'alerte.
 - Gestion des approvisionnements.
 - Enregistrement des mouvements de stock.
- Reporting et analyse :
 - Génération de rapports et des analyses sur les temps d'arrêt, coûts de maintenance, et performance des équipements.
 - Rapport d'intervention.
 - Tableau de bord : Affichage des indicateurs clés sous forme de graphiques interactifs et tableaux de synthèse pour une meilleure visualisation des données de la performance de l'entreprise.
- Possibilité d'intégration de la documentation technique.
- Interface utilisateur intuitive.

Exigences Techniques :

- Base de données sécurisée et Gestion des rôles et permissions.
- Sauvegarde : Sauvegardes automatiques quotidiennes des données de maintenance.
- Intégration avec les systèmes existants :
 - La capacité de récupérer des données à partir de systèmes tiers (ERP SAP, EVOCON, MES SAP)
 - Respecter les normes de sécurité de l'entreprise en matière d'intégration.
- Performance :
 - Temps de chargement rapide.
 - Vitesse de traitement rapide.
 - Capacité à gérer un nombre élevé de données.
- Fiabilité :
 - Disponibilité de la solution la plupart du temps,
 - Stabilité de la solution, elle ne doit pas contenir des erreurs qui peuvent affecter la qualité du service.
 - Capacité à résister aux pannes, elle doit être conçue pour résister à des pannes de serveur, de réseau ou d'autres types de pannes susceptibles de se produire.
- Collaboration en temps réel entre les utilisateurs de la solution GMAO.

Contraintes :

- Délais : 2 mois et demi.

Partie 3

Partie 4

- o Ressources humaines : L'équipe est composée de deux étudiantes en dernière année du cycle ingénieur, deux encadrants académiques et deux encadrants industriels.
- o Budget : Limité aux ressources existantes (solution GMAO).
- o Disponibilité des données : Migration des données de la ligne 20/18.

Livrables :

| Titre du livrable | Format |
|---|--------------------------------------|
| Rapport de l'étude analytique. | Document PDF |
| Modèle de maintenance optimisé. | Schéma/diagramme |
| Solution GMAO déployée. | Logiciel/Application/Base de données |
| Documentation technique et utilisateur. | Document PDF |
| Rapport final de PFE incluant les résultats et recommandations. | Document PDF |

Planning :

| Semaine 1-2 |
|---|
| Étude analytique du modèle existant. |
| Semaine 3-4 |
| Proposition du modèle optimisé et validation par l'entreprise |
| Semaine 5-6 |
| Configuration et déploiement de GMAO |
| Semaine 7 |
| Formation des utilisateurs et tests techniques |
| Semaine 8 |
| Validation finale, rédaction du rapport et présentation |

Partie 5

Ressources :

- o Personnels : Deux étudiantes en dernière année de cycle ingénieur, tuteurs académique, tuteurs industriel, techniciens de maintenance.
- o Logiciels : Solution GMAO, ERP SAP, EVOCON, MES SAP.
- o Matériel : Équipements de la ligne 20/18.
- o Documentation : Documentations techniques des équipement, procédures de l'entreprise, manuels, historique des interventions.

Gestion du projet :

- o Un binôme en dernière année de cycle ingénieur : Réalisation et rédaction des rapports.
- o Tuteurs académiques : Suivi académique et validation.
- o Tuteurs industriels : Fourniture des données et validation des livrables.
- o Suivi : Réunions hebdomadaires et rapports d'avancement.

Évaluation et validation :

Critères d'évaluation :

- Respect des délais et des objectifs.
- Qualité de l'étude analytique et du modèle optimisé proposé
- Fonctionnalité et performance de la solution GMAO
- Satisfaction des utilisateurs.
- Validation par tests techniques et rapport final.

Mécanismes de validation :

- Tests techniques
- Validation par les tuteurs
- Rapport final.

Merci !

Partie 6

FIGURE F1 – Cahier des charges pour la solution GMAO (Parties 1 à 6)

La figure F1 illustre les différentes parties du cahier des charges élaboré dans le cadre du choix de la solution GMAO la plus adaptée au contexte du projet. Ce document regroupe les éléments clés tels que les objectifs principaux, les exigences fonctionnelles et techniques, ainsi que les différentes phases du projet.

F.2 Intégration des données de base

F.2.1 Liste des équipement

| Réf | Équipement | Catégorie | Marque | Date d'achat | Code à barre | Prix d'achat | Coût maintenance | Date de mise en service | Etat | Criticité | | | | | |
|-------------------|---------------------|----------------------------------|---------|------------------|---------------|---------------|------------------------|-------------------------|------------|-------------------|---|----|---|---|---|
| L2018-PB-SF-001 | Souffleuse | Production des bouteilles | KRONES | 01/01/2013 08:00 | 4759770861914 | 102000000 DZD | 56664.229999999996 DZD | 01/01/2015 08:00 | En panne | Haute criticité | 🕒 | ✏️ | ❌ | 🔄 | 📅 |
| L2018-CP-ST-002 | Soutireuse | Conditionnement Primaire | KRONES | 01/01/2013 08:00 | 0238697256585 | 145000000 DZD | 213266 DZD | 01/01/2015 08:00 | En service | Haute criticité | 🕒 | ✏️ | ❌ | 🔄 | 📅 |
| L2018-EM-ETI-004 | Étiqueteuse | Étiquetage et Marquage | KRONES | 01/01/2013 08:00 | 1584779418099 | 58000000 DZD | 374209.02 DZD | 01/01/2015 08:00 | En service | Moyenne criticité | 🕒 | ✏️ | ❌ | 🔄 | 📅 |
| L2018-PE-FAR-005 | Fardeuse | Palettisation et emballage | KRONES | 01/01/2013 08:00 | 9080406078074 | 72000000 DZD | 23122.11 DZD | 01/01/2015 08:00 | En service | Moyenne criticité | 🕒 | ✏️ | ❌ | 🔄 | 📅 |
| L2018-PE-PAL-006 | Palettiseur | Palettisation et emballage | KRONES | 01/01/2013 08:00 | 3495935678231 | 116000000 DZD | 474851.42 DZD | 01/01/2015 08:00 | En service | Haute criticité | 🕒 | ✏️ | ❌ | 🔄 | 📅 |
| L2018-CP-CD-003 | Codeur | Conditionnement Primaire | KRONES | 01/01/2013 08:00 | 6009628662521 | 4000000 DZD | 595 DZD | 01/01/2015 08:00 | En service | Faible criticité | 🕒 | ✏️ | ❌ | 🔄 | 📅 |
| L2018-PE-BND-007 | Banderoleuse | Palettisation et emballage | ROBOPAC | 01/01/2013 08:00 | 5608474399411 | 17000000 DZD | 6422.5 DZD | 01/01/2015 08:00 | En service | Moyenne criticité | 🕒 | ✏️ | ❌ | 🔄 | 📅 |
| L2018-EM-ETP-008 | Étiqueteuse palette | Étiquetage et Marquage | ZETES | 01/01/2013 08:00 | 5608474399415 | 15000000 DZD | 1050 DZD | 01/01/2015 08:00 | En service | Faible criticité | 🕒 | ✏️ | ❌ | 🔄 | 📅 |
| L2018-MTI-CNV-009 | Convoyeurs | Manutention et Transport Interne | KRONES | 01/01/2013 08:00 | 0145876 | 43000000 DZD | 4926191.61 DZD | 01/01/2015 08:00 | En service | Faible criticité | 🕒 | ✏️ | ❌ | 🔄 | 📅 |

FIGURE F2 – Liste des équipements dans l'application PLM-GMAO

La figure F2 présente la liste des équipements intégrés dans l'application PLM-GMAO, incluant pour chacun d'eux l'ensemble des informations spécifiques telles que la codification, la marque, ainsi que les coûts associés à leur maintenance.

F.2.2 Liste des PR

| Réf | Désignation | Catégorie | Quantité en Stock | Seuil d'alerte | Criticité | | | | | | |
|--------|------------------------------|---|-------------------|----------------|-------------------|---|---|---|---|---|---|
| 228508 | GUIDE EXTERIEUR | Guidage | 10 U | 1 U | Moyenne criticité | 👤 | 🕒 | ❌ | 🔄 | 📅 | 🔄 |
| 210945 | TUYAU | Composants pneumatiques et hydrauliques | 5 U | 1 U | Moyenne criticité | 👤 | 🕒 | ❌ | 🔄 | 📅 | 🔄 |
| 216663 | GUIDE | Guidage | 10 U | 1 U | Moyenne criticité | 👤 | 🕒 | ❌ | 🔄 | 📅 | 🔄 |
| 209662 | BAGUE JOINT A LEVRES 46X54X7 | Système d'étanchéité | 25 U | 5 U | Moyenne criticité | 👤 | 🕒 | ❌ | 🔄 | 📅 | 🔄 |
| 209660 | BAGUE JOINT A LEVRES 62X72X7 | Système d'étanchéité | 25 U | 5 U | Moyenne criticité | 👤 | 🕒 | ❌ | 🔄 | 📅 | 🔄 |
| 209659 | ANNEAU | Guidage | 25 U | 5 U | Moyenne criticité | 👤 | 🕒 | ❌ | 🔄 | 📅 | 🔄 |
| 209657 | ANNEAU DE GUIDAGE 12X18X19,8 | Système d'étanchéité | 25 U | 5 U | Moyenne criticité | 👤 | 🕒 | ❌ | 🔄 | 📅 | 🔄 |
| 209528 | FILTRE D'AMORTISSEMENT | Filtration | 25 U | 5 U | Moyenne criticité | 👤 | 🕒 | ❌ | 🔄 | 📅 | 🔄 |
| 209533 | JOINT D'ETANCHEITE 55X2 NBR | Système d'étanchéité | 25 U | 5 U | Moyenne criticité | 👤 | 🕒 | ❌ | 🔄 | 📅 | 🔄 |
| 209532 | JOINT D'ETANCHEITE 20X2 FPM | Système d'étanchéité | 25 U | 5 U | Moyenne criticité | 👤 | 🕒 | ❌ | 🔄 | 📅 | 🔄 |

FIGURE F3 – Liste des PR dans l'application PLM-GMAO

La figure F3 présente la liste des pièces de rechange (PR) intégrées dans l'application PLM-GMAO, offrant une vue d'ensemble sur les informations clés de chaque PR, telles que les seuils limites, les références, le niveau de criticité et la désignation.

F.3 Fonctionnalités PLM-GMAO

F.3.1 Informations relatives aux équipements

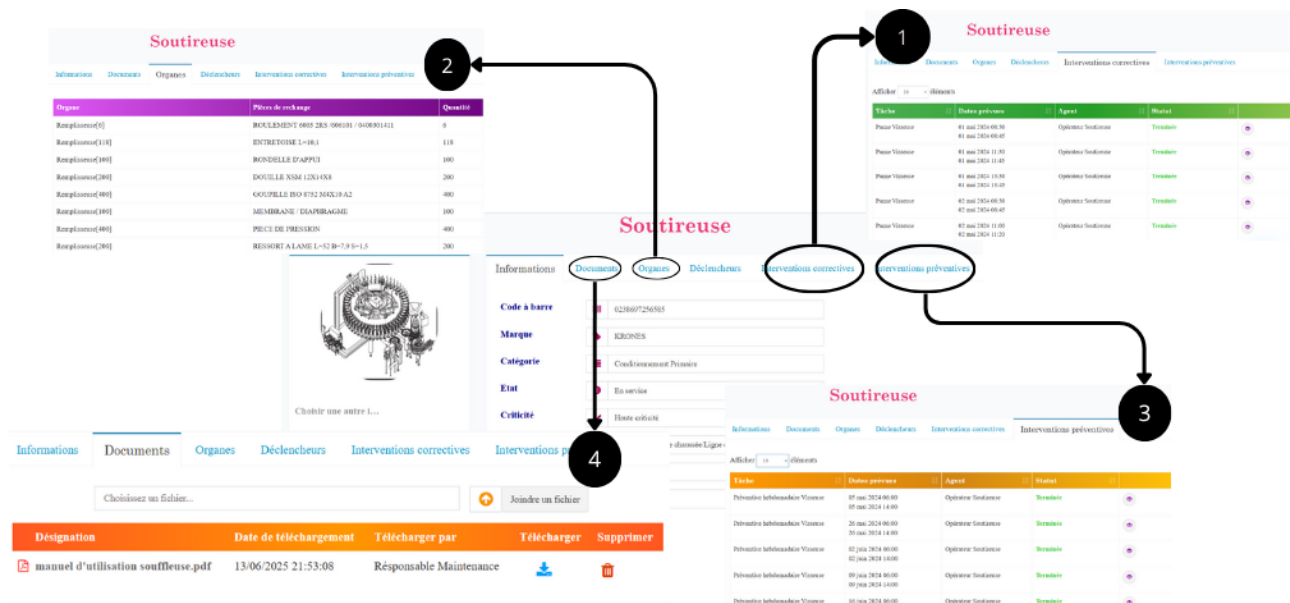


FIGURE F4 – Accès à des informations générales sur les équipements

La figure F4 présente une fonctionnalité de l'application PLM-GMAO offrant une vue globale sur les informations liées à un équipement. Elle permet d'accéder, depuis une rubrique centralisée, aux pièces de rechange qui lui sont dédiées et à leurs quantités, aux interventions correctives et préventives effectuées, ainsi qu'à sa documentation technique.

F.3.2 Intégration d'un Workflow

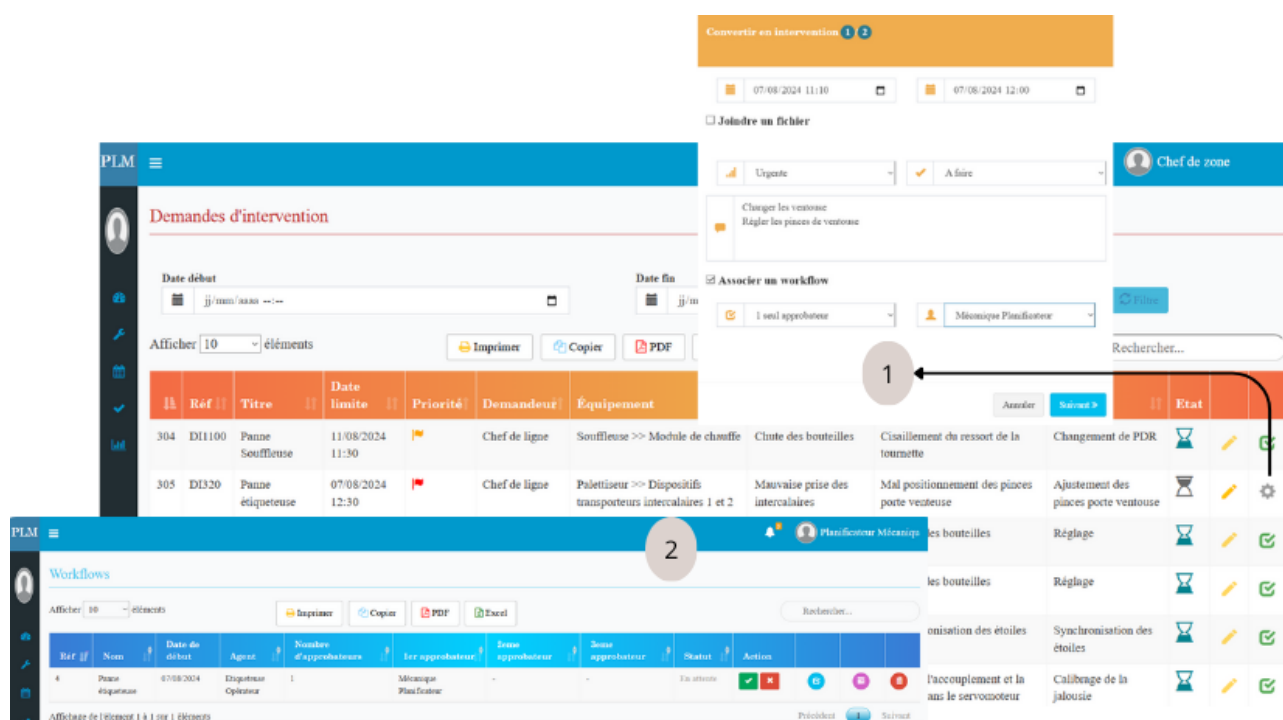


FIGURE F5 – Intégration d'un Workflow

La figure F5 illustre le fonctionnement du workflow dans l'application PLM-GMAO pour le traitement d'une maintenance corrective. Cette fonctionnalité permet aux responsables de valider ou non l'exécution d'une intervention. Dans l'élément (1), le chef de zone initie un workflow à destination du planificateur mécanique. L'élément (2) montre la notification reçue par ce dernier, lui permettant de valider ou non l'arrêt de l'équipement.

F.3.3 Maintenance conditionnelle



FIGURE F6 – Intégration d'une maintenance conditionnelle

La figure F6 illustre le processus d'intégration d'une maintenance conditionnelle dans l'application PLM-GMAO. Il commence par la définition des paramètres des déclencheurs (1), suivie de l'intégration de la tâche préventive à exécuter en cas de dépassement du seuil défini (éléments 2 et 3).

F.3.4 Rapport d'intervention

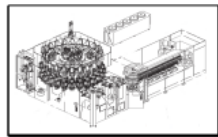
Fiche d'intervention

Informations sur l'équipement

Equipement Souffleuse

Catégorie Production des bouteilles

Localisation Batiment 1/Rez de chaussée/Ligne de production PET 20/18



Informations sur l'intervention

Date de début 16/07/2024 07:40

Type de maintenance Maintenance corrective

Titre Panne module de transfert

Date de fin 16/07/2024 08:00

Coût 19960

| Agent/Equipe | | Role | | | |
|----------------------|--|----------------------|--|--|--|
| Souffleuse Opérateur | | Agent de maintenance | | | |

| Travail effectué | Début | Fin | Duré | Coût | Réalisé par |
|--|------------------|------------------|------|------|----------------------|
| Changement des pinces de transfert (2) | 16/07/2024 07:50 | 16/07/2024 08:10 | 20 | 70 | Souffleuse Opérateur |

Pièces de rechange consommables

| Reference | Désignation | Famille | Organe | Quantité | Coût |
|-----------|------------------|--------------------|---------------------|----------|-------|
| 230608 | Pince souffleuse | Pièces spécifiques | Module de transfert | 2 | 19890 |

FIGURE F7 – Génération d'un rapport d'intervention

Le rapport illustré dans la figure F7 est généré par l'application PLM-GMAO. Il regroupe des informations essentielles sur l'intervention réalisée, telles que la durée d'intervention, l'intervenant, les pièces de rechange consommées, ainsi que les coûts associés à la main-d'œuvre, aux pièces de rechange et le coût global de l'intervention.

Annexe G : Embedding

G.1 Critère de filtrage

TABLE G.1 – Filtres appliqués pour la sélection des modèles d’embedding dans le cadre de l’assistant GMAO

| Catégorie | Filtre / Élément | Explication |
|------------------|--|---|
| Task Type | Classification | Évalue la capacité d’un modèle à catégoriser des textes. Utile pour structurer automatiquement les demandes ou incidents. |
| | InstructionRetrieval | Mesure la capacité à associer une instruction (requête utilisateur) avec une réponse ou documentation correspondante. |
| | Retrieval | Tâche principale pour la vectorisation : trouver les documents les plus proches d’une requête dans un corpus. Essentiel pour RAG. |
| | STS (Semantic Textual Similarity) | Mesure le degré de similarité sémantique entre deux phrases. Important pour savoir si le modèle peut comprendre deux formulations différentes comme équivalentes. |
| Domain | Academic | Pré-entraînement sur un contenu scientifique ou technique, souvent structuré. Pertinent dans notre cas (documents techniques). |
| | Legal | Pré-entraînement sur des documents juridiques, réglementaires. Intéressant pour un contexte de GMAO avec des contraintes normatives (procédures et normes). |
| | News | Pré-entraînement sur des articles d’actualité, aide à tester la compréhension de textes bien structurés mais variés. |
| | Non-fiction | Pré-entraînement sur textes explicatifs, documentaires, rapports — proche de la documentation industrielle. |
| | Written | Pré-entraînement sur des contenus écrits de manière générale. |
| Modality | Text | Indique que seules des données textuelles sont considérées. C’est la modalité utilisée ici. |

| Catégorie | Filtre / Élément | Explication |
|-----------------|---|--|
| Language | fra (français), multilingues | Le filtrage linguistique est essentiel pour garantir la pertinence des résultats dans un contexte industriel francophone. Il permet d'évaluer la capacité des modèles à comprendre et traiter efficacement la langue française. L'inclusion de modèles multilingues est également justifiée, dans la mesure où plusieurs d'entre eux présentent de bonnes performances en français, comme le souligne la référence [28]. |
| Task | AlloprofReranking | Classement de documents par pertinence. Intéressant pour évaluer la hiérarchisation de contenus. |
| | BelebeleRetrieval | Corpus multilingue pour la recherche. Permet d'évaluer les capacités multilingues d'un modèle. |
| | HALClusteringS2S.v2 | Corpus universitaire francophone, évalue la structuration sémantique de textes longs. |
| | MultiHateClassification | Classification de discours haineux. Pas directement utile, mais teste la sensibilité à des tons/émotions extrêmes. |
| | STS17 | Benchmark de similarité multilingue. Très pertinent dans notre cas. |
| | STS22.v2 | Benchmark amélioré de STS pour l'évaluation fine. |
| | StatcanDialogueDatasetRetrieval | Dialogue en français, permet d'évaluer la performance sur des requêtes conversationnelles. Très utile pour notre assistant GMAO. |
| Filtres avancés | Compatibility : SentenceTransformers | Le modèle doit être compatible avec SentenceTransformers (bibliothèque utilisée dans LlamaIndex). |
| | Exécution locale : <500 Mo | Pour usage local sur PC standard, sans GPU massif. |
| | Licence : open source | Important pour l'indépendance économique du projet. |
| | Zero-shot : | Teste la capacité d'un modèle à généraliser sans entraînement supplémentaire. |

Le tableau G.1 présente les filtres appliqués sur la plateforme *HuggingFace* pour sélectionner l'ensemble des modèles d'*embedding* les plus adaptés au contexte du projet.

G.2 Script pour le choix d'embedding

```
# Modèles à tester
embedding_models = {
    'Modèle1': {
        'model_name': 'paraphrase-multilingual-MiniLM-L12-v2',
        'max_length': 512,
        'pooling_type': 'mean',
        'normalize': True,
        'kwargs': {'device_map': 'auto', 'torch_dtype': torch.float16}
    },
    'Modèle2': {
        'model_name': 'all-mpnet-base-v2',
        'max_length': 512,
        'pooling_type': 'mean',
        'normalize': True,
        'kwargs': {'device_map': 'auto', 'torch_dtype': torch.float16}
    },
    'Modèle3': {
        'model_name': 'text2vec-base-multilingual',
        'max_length': 512,
        'pooling_type': 'mean',
        'normalize': True,
        'kwargs': {'device_map': 'auto', 'torch_dtype': torch.float16}
    },
    'Modèle4': {
        'model_name': 'all-MiniLM-L6-v2',
        'max_length': 512,
        'pooling_type': 'mean',
        'normalize': True,
        'kwargs': {'device_map': 'auto', 'torch_dtype': torch.float16}
    },
}

# Exécution de l'évaluation
def run_evaluation(): 1usage
    engine = get_engine()
    df = load_data(engine)
    results = []

    for model_id, spec in embedding_models.items():
        print(f"\n Évaluation du modèle : {model_id}")
        tokenizer = AutoTokenizer.from_pretrained(spec['model_name'])
        model = AutoModel.from_pretrained(spec['model_name'], **spec['kwargs'])

        start = time.time()
        try:
            score = evaluate_embedding(
                df,
                tokenizer,
                model,
                spec['max_length'],
                spec['pooling_type'],
                spec['normalize']
            )
        except Exception as e:
            print(f"Erreur pour le modèle {model_id}: {e}")
            score = 0
        duration = time.time() - start

        results.append((model_id, round(score * 100, 2), round(duration, 2)))

    df_results = pd.DataFrame(results, columns=["Model", "Hit@5 (%)", "Duration (s)"])
    print("\n Résultats finaux :")
    print(df_results.sort_values(by="Hit@5 (%)", ascending=False))
```

(a) les modèles d'embedding à évaluer

(b) Code d'exécution de l'évaluation

FIGURE G1 – Script pour le choix d'embedding

La figure G1 illustre le script Python développé pour appliquer la méthode Hit@5, dans le but d'évaluer l'ensemble des modèles précédemment sélectionnés et d'identifier le modèle d'*embedding* le plus performant..

Annexe H : Implémentation Complémentaire et Réponses de l'Agent

H.1 Extraits de Code Complémentaire

H.1.1 Réponse rapide

```
# Module réponse rapide
def get_simple_reply_tool():
    def reply_tool(question):
        if any(word in question.lower() for word in ["bonjour", "salut", "coucou"]):
            return "Bonjour ! Comment puis-je vous aider ?"
        if any(word in question.lower() for word in ["qui es-tu", "quel est ton role"]):
            return "Je suis IaM-Maint, votre assistant GMAO intégré à l'application PLM-GMAO. Je suis là pour vous fournir des informations, générer des rapports et analyser des données."
        if "merci" in question.lower() :
            return "Avec plaisir ! Si vous avez besoin de plus d'informations, n'hésitez pas à me le demander."
        return "Je ne sais pas quoi répondre."
    return FunctionTool.from_defaults(
        fn=reply_tool,
        name="simple_reply",
        description="Répond simplement aux questions générales ou de politesse."
    )
```

FIGURE H1 – Router pour réponses rapides

Le script Python illustré dans la figure H1 présente le développement du routeur destiné à la gestion des réponses rapides générées par l'agent conversationnel.

H.1.2 Gestion des droits d'accès

```
# Controle d'accès
def is_sensitive_table(tablename): 1 usage
    sensitive_keywords = ["users"]
    return any(word in tablename.lower() for word in sensitive_keywords)

def allowed_tables_for_role(tables, user_role): 1 usage
    user_role = user_role.strip().replace('\xa0', ' ').replace(' ', ' ').lower()
    if user_role in ["opérateur", "chef de ligne"]:
        return [t for t in tables if not is_sensitive_table(t)]
    else:
        return tables

def is_sensitive_column(colname): 1 usage
    sensitive_keywords = ["cout", "cost"]
    return any(word in colname.lower() for word in sensitive_keywords)

def allowed_columns_for_role(columns, user_role): 1 usage
    user_role = user_role.strip().replace('\xa0', ' ').replace(' ', ' ').lower()
    if user_role in ["opérateur", "chef de ligne"]:
        return [col for col in columns if not is_sensitive_column(col)]
    else:
        return columns
```

FIGURE H2 – Implémentation de la gestion des droits d'accès

La figure H2 présente le module de contrôle d'accès développé pour restreindre l'accès aux tables colonnes sensibles de la base de données, en fonction des rôles des utilisateurs

H.1.3 Résumé des documents

```
# Résumé des documents
def summarize_large_text(llm_func, text, prompt_prefix, prompt_suffix, chunk_size=2000): 1 usage
    # Découpage et synthèse de texte long
    chunks = [text[i:i+chunk_size] for i in range(0, len(text), chunk_size)]
    summaries = []
    for chunk in chunks:
        prompt = prompt_prefix + "\n" + chunk + "\n" + prompt_suffix
        summary = llm_func(prompt)
        summaries.append(summary)
    # Refusion finale
    if len(summaries) == 1:
        return summaries[0]
    else:
        return llm_func(prompt_prefix + "\n" + "\n".join(summaries) + "\n" + prompt_suffix)
```

FIGURE H3 – Module de résumé de contenu importé par l'utilisateur

La figure H3 illustre le module intégré au chatbot permettant de résumer automatiquement les documents soumis par l'utilisateur, tout en extrayant les informations essentielles, en vue de les exploiter dans les interactions ou les réponses générées.

H.2 Interactions Utilisateur–Agent

H.2.1 Résultats pour les questions simples

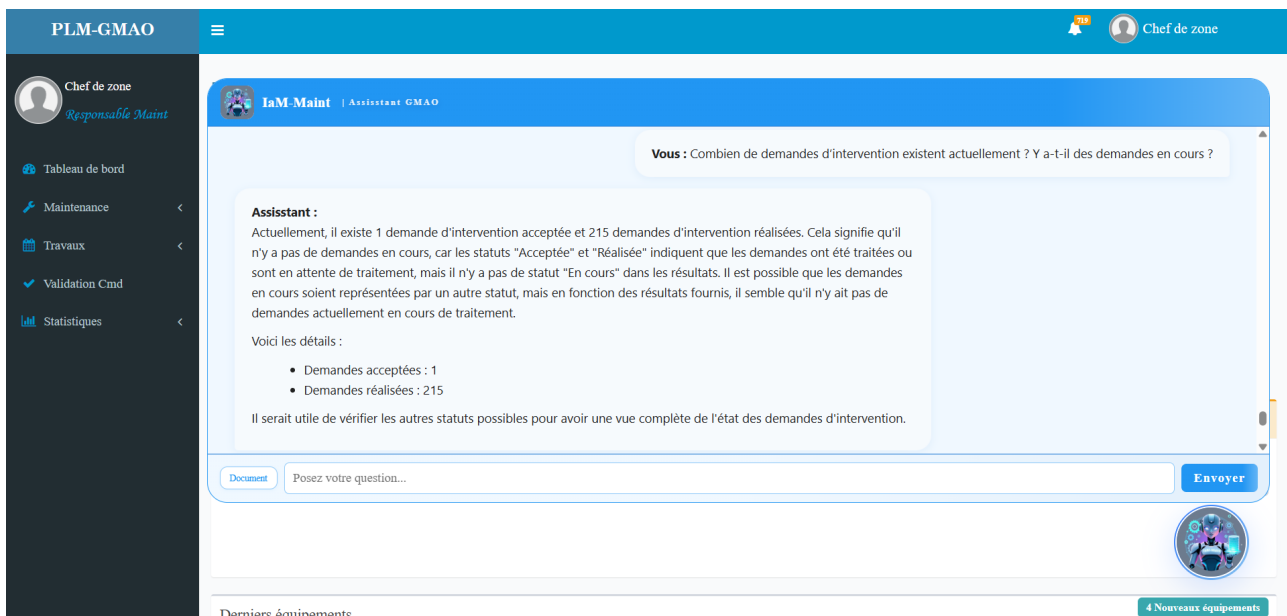


FIGURE H4 – Réponse à la question simple 1

La figure H4 présente la réponse fournie par l'agent conversationnel à une première question représentative des scénarios d'évaluation simples, utilisés pour tester la compréhension de la BDD GMAO.



FIGURE H5 – Réponse à la question simple 2

La figure H5 présente la réponse générée par l'agent conversationnel à une deuxième question issue des scénarios d'évaluation simples, visant à tester sa capacité à accompagner l'utilisateur dans l'utilisation de l'application PLM-GMAO.

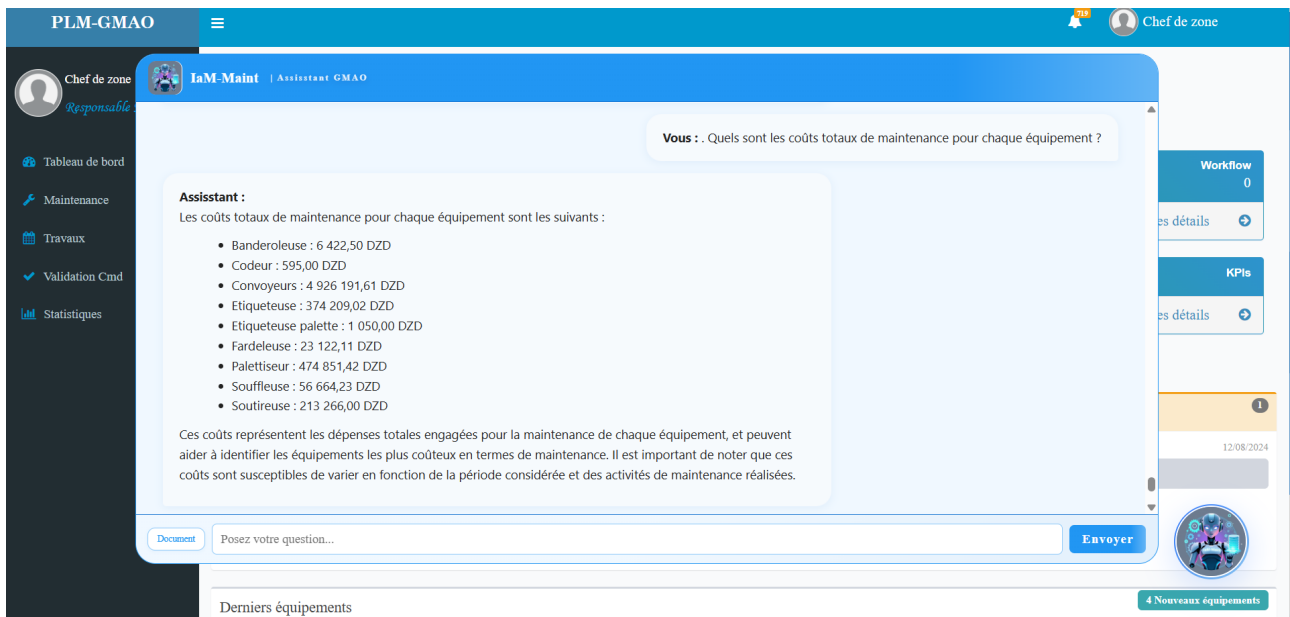


FIGURE H6 – Réponse à la question simple 3

La figure H6 présente la réponse générée par l'agent conversationnel à la troisième question issue des scénarios d'évaluation simples, visant à tester sa capacité à interroger plusieurs requêtes sur la base de données GMAO et à formuler une réponse claire et compréhensible pour l'utilisateur.

H.2.2 Résultats pour les questions intermédiaires

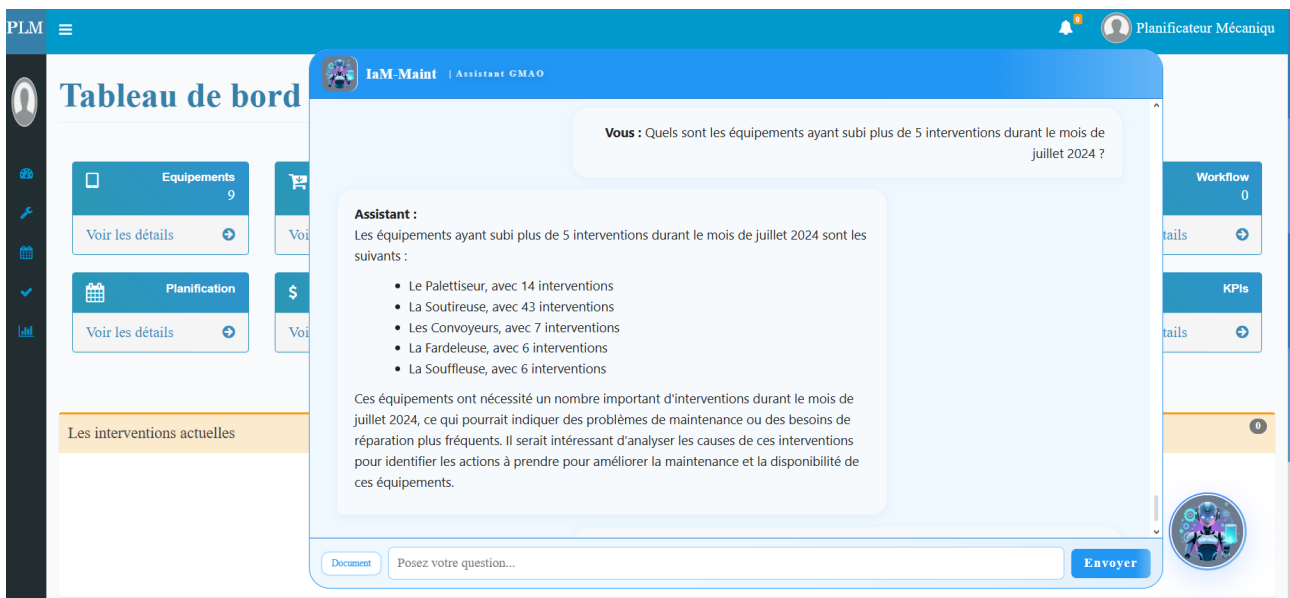


FIGURE H7 – Réponse à la question intermédiaires 2

La figure H7 présente la réponse générée par l'agent conversationnel à la deuxième question issue des scénarios d'évaluation intermédiaires. Elle vise à évaluer sa capacité à exécuter des requêtes croisées sur la base de données, intégrant plusieurs agrégations, et à formuler une réponse claire et lisible pour l'utilisateur.



FIGURE H8 – Réponse à la question intermédiaires 3

La figure H8 présente la réponse générée par l'agent conversationnel à la troisième question issue des scénarios d'évaluation intermédiaires. Elle vise à évaluer sa capacité à générer des rapports de maintenance complets, intégrant l'ensemble des informations nécessaires et exactes.

H.2.3 Résultats de requêtes diverses

Cette section présente des scénarios d'évaluation supplémentaires visant à démontrer les différentes capacités du chatbot.

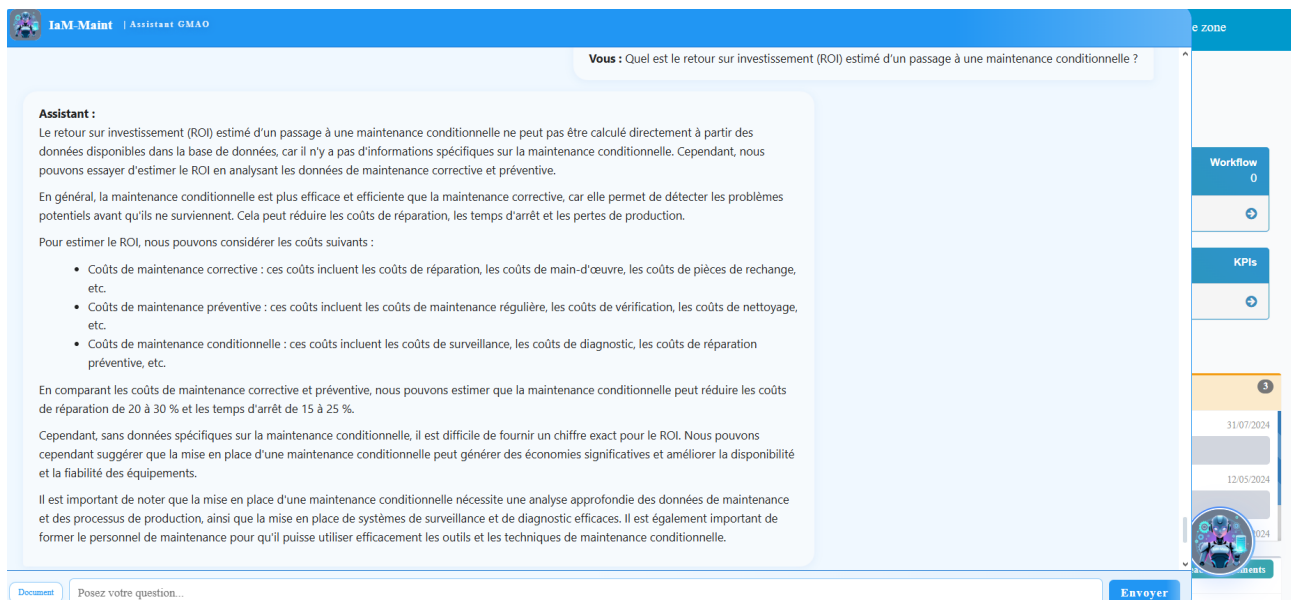


FIGURE H9 – Estimation du ROI

La figure H9 présente la réponse générée par l'agent conversationnel à une question portant sur l'estimation du retour sur investissement (ROI), à partir de données non directement disponibles dans ses sources. Cette réponse illustre sa capacité à formuler une estimation logique en s'appuyant uniquement sur les historiques accessibles.

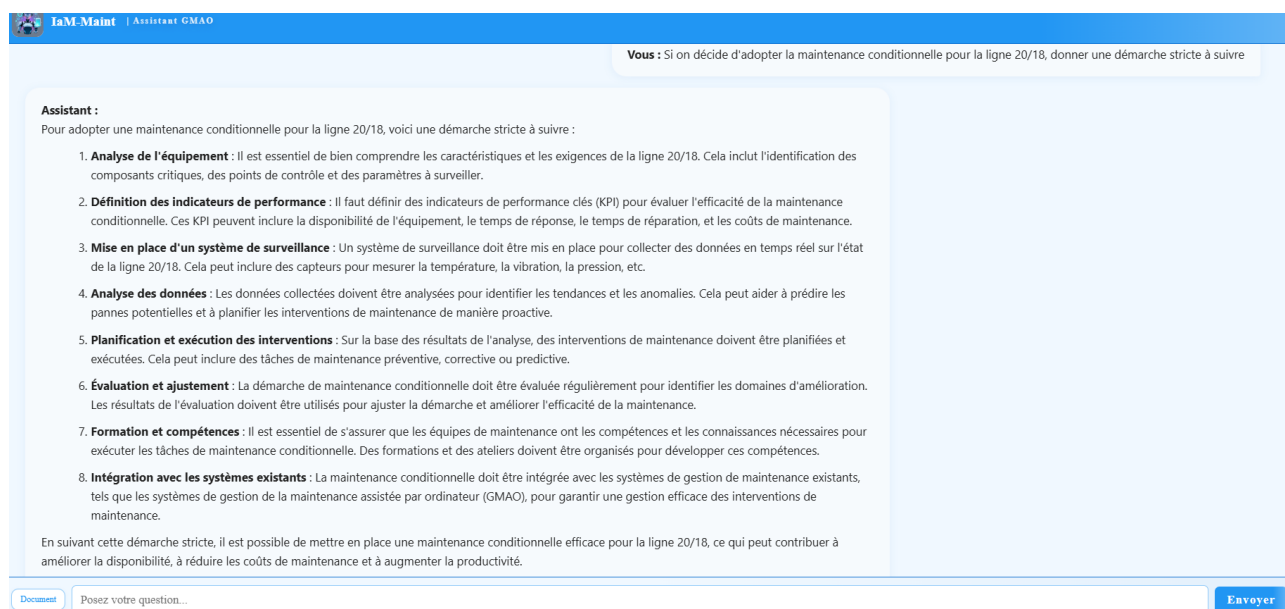


FIGURE H10 – Proposition d'une démarche de maintenance conditionnelle

La figure H10 présente la réponse générée par l'agent conversationnel à une question portant sur la proposition d'une démarche à suivre pour la mise en œuvre d'un nouveau type de maintenance non encore adopté par l'entreprise, en s'appuyant sur ses besoins spécifiques



FIGURE H11 – Recherche croisée dans la BDD sur les PR

La figure H11 illustre la capacité de l'agent conversationnel à interagir avec la base de données GMAO en générant des requêtes complexes, intégrant potentiellement des jointures, des filtres avancés ou des agrégations, en réponse à une demande utilisateur