

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA
BADJIMOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار عنابة

Faculté : Technologie

Département : Génie Mécanique

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Ingénierie De La Maintenance

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Elaboration d'un logiciel de suivi de la maintenance dans le cadre de la GMAO de ESP koudiet Eddraouch

Présenté par : Ziani Houssem Seif Islam

Encadrant : Kallouche Abdelkader

MCB

UMBA

Jury de Soutenance :

KHELIF RABIA	PROF	UBMA	Président
KALLOUCHE ABDELKADER	MCB	UBMA	Encadrant
DJEDDI MOHAMED LAMINE	MCA	UBMA	Examinateur



Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux.

In the name of Allah, the Most Gracious, and the Most Merciful

Remerciements

Avant de présenter le contenu de ce mémoire, je tiens à adresser mes plus vifs remerciements et ma reconnaissance aux personnes qui m'ont encouragée dans ce travail.

*J'adresse mes remerciements les plus sincères à mon encadrant, monsieur **Kallouche Abdelkader**, MCB à l'Université Badji Mokhtar de Annaba, de m'avoir dirigé ce sujet, ainsi que pour sa disponibilité, son soutien indéfectible et ses précieux conseils, j'apprécie fortement ses hautes qualités scientifiques et valeurs humaines qui ont fait énormément progresser cette recherche. Les mots ne peuvent exprimer toute ma gratitude, car quel que soit la formulation adoptée ça sera très en dessous de la réalité.*

Je tiens à remercier chaleureusement les membres de jury de mon mémoire de m'avoir accordé l'honneur d'examiner ce modeste travail.

Dédicace

Tous d'abord, nous tenons à remercier le bon Dieu, de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail pour arriver à ce jour-là.

Je dédie ce travail à :

À mon cher papa ZIANI YOUSSEF

Je ne pourrais jamais exprimer l'admiration et le respect que j'ai pour toi. Tes conseils, tes encouragements et ton soutien indéfectible m'ont toujours guidé. Puisse Dieu, le Tout-Puissant, te préserver du mal, te combler de santé et t'accorder une longue vie.

À ma chère maman

Je ne pourrais jamais exprimer le respect que j'ai pour toi. Tes prières, tes encouragements et ton soutien m'ont toujours été d'un grand secours. Puisse Dieu, le tout puissant te préserver du mal, te combler de santé et te procurer une longue vie.

À mes chères sœurs,

À toute ma famille.

Et à tous mes amis...

Ziani Houssein Seif Islam

TABLE DES MATIERES

Remerciements	i
Dédicaces	ii
TABLE DES MATIERES	iii
LISTE DES FIGURES	x
LISTE DES TABLEAUX	xiii
LISTE DES ABBREVIATIONS	xiv
INTRODUCTION GENERALE ET PROBLEMATIQUE	1
Chapitre I : présentation de l'entreprise SPE Koudiet Eddraouche	
I. Introduction	4
I.1 Présentation de l'entreprise de Koudiet Eddraouche	4
I.1.1 Histoire et origine de l'entreprise	4
I.1.2 Situation géographique	5
I.1.3. Cadre climatique	5
I.1.4. Structure sociale	6
I.2.Processus et équipements pertinents de la centrale	6
I.2.1 Processus de production électrique : le cycle combiné	7
I.2.1.1 Genèse du cycle combiné	8
I.2.2 Principaux équipements de la centrale thermique à cycle combiné	8
I.2.2.1 Turbine à gaz	9
I.2.2.2 Turbine à vapeur	10

I.2.2.3 Le compresseur	10
I.2.2.4 La chambre de combustion	11
I.2.2.5 Générateur de vapeur à récupération de chaleur (GVRC)	12
I.2.2.6 Condenseur	12
I.2.2.7 La pompe	12
I.2.2.8 L'alternateur	13
I.2.2.9 Transformateur de groupe	13
I.2.2.10 Transformateur de soutirage	14
I.2.2.11 La chaudière de récupération	14
I.2.3 Présentation des auxiliaires : Système électrique	15
I.2.3.1 Système de Black Start (démarrage à froid)	15
I.2.3.2 Poste blindé (GIS)	16
I.2.3.3 La salle de contrôle : le cœur battant de la centrale	17
I.3 Conclusion	18

Chapitre II : Généralités sur la maintenance

Introduction	20
Définition et cadre conceptuel de la maintenance	20
II.1 Définition de la maintenance	20
II.1.1 l'importance de la maintenance dans l'entreprise	21
II.1.2 Objectifs de la maintenance	22

II.1.3 Les actions de la maintenance	22
II.1.4 Management de la maintenance	22
II.1.5 Stratégie de maintenance	23
II.2 Politique de maintenance	24
II.2.1 Maintenance corrective	25
II.2.2 Maintenance préventive	26
II.2.2.1 La maintenance systématique	26
II.2.2.2 La maintenance conditionnelle	26
II.2.2.3 La maintenance prévisionnelle	26
II.3 Niveaux de maintenance	27
II.4 Les coûts de maintenance et la courbe de coût	28
II.5 Organisation des opérations de maintenance	29
II .6 Documentations en maintenance	30
II.6.1 Documentation du matériel	30
II.6.2 Documentation historique	30
II.6.3 Rôle de la documentation historique	31
II.6.4 Fiche Historique des Interventions	31
II.6.5 Fiche de demande d'intervention	32
II.6.6 Fiche de rapport d'intervention	33
II.6.7 Fiche demande sortie magasin	34

II.6.8 Ordre de travail OT	35
II.6.9 Permis de travail	36
II.7 Conclusion	37

Chapitre III : La gestion de la maintenance assister par ordinateur

Introduction	39
III.1 Gestion de la maintenance	39
III.1.1 Maintenance et informatique	40
III.1.2 Les débuts de la GMAO	40
III.2 Présentation de la GMAO	41
III.2.1 Introduction à la GMAO	41
III.2.2 Quel est un progiciel de GMAO	42
III.2.3 Pourquoi une GMAO	42
III.2.4 Les inconvénients généraux de la GMAO	43
III.2.5 Le rôle de la GMAO	43
III.2.6 Analyse des différents modules fonctionnels	44
III.3 Systèmes de Gestion des Bases de Données (SGBD) et GMAO	45
III.3.1 Structure de la base de données maintenance	45
III.3.2 Intégration d'un Système de Gestion de Base de Données (SGBD) dans la GMAO	46
III.3.3 Rôle des SGBD en GMAO	46
III.3.4 Exemple de SGBD utilisés selon l'environnement	47

III.3.5 Calculs techniques intégrés à la GMAO	48
III.4 Conclusion	50
Chapitre IV : Conception et fonctionnement d'un logiciel proposé	
Introduction	52
IV.1 Outils Utilisés	52
IV.2 Structure de la Base de Données	53
IV.2.1 Fichiers JSON Utilisés	53
IV.2.2 Avantages et Limite	54
IV.3 Structure de l'Application	55
IV.3.1 Classes Principales	55
IV.3.2 Modules Indépendants	55
IV.4 Fonctionnement de l'Application	56
IV.4.1 Connexion et Inscription	56
IV.4.2 Interface Principale	57
IV.4.3 Navigation	57
VI.5 Modules et Sous-modules	58
IV.5.1 Module Maintenance	58
IV.5.1.1 Gestion des Équipements	59
IV.5.1.2 Maintenance Préventive	60
IV.5.1.3 Maintenance Corrective	61

IV.5.1.4 Surveillance	62
IV.5.1.5 Documentation Technique	63
IV.5.1.6 Calcul de Maintenance	64
 IV.5.2 Module Stock	65
IV.5.2.1 Gestion des Articles	66
IV.5.2.2 Mouvements de Stock	67
 IV.5.3 Module Achat	68
IV.5.3.1 Demandes d'Achat	69
IV.5.3.2 Fournisseurs	70
IV.5.3.3 Commandes	71
IV.5.3.4 Factures	72
 IV.5.4 Module Ressources Humaines	73
IV.5.4.1 Demandeurs	74
IV.5.4.2 Superviseurs	75
IV.5.4.3 Techniciens	76
IV.5.4.4 Informaticiens	77
 IV.6 Gestion des Données	78
IV.7 Alertes et Notifications	78
IV.8 Conclusion	79
 CONCLUSION GENERALE	80

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE	81
ANNEXES	83

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : présentation de l'entreprise SPE Koudiet Eddraouche

Figure I.1 Vue générale de la centrale Koudiet Eddraouche	4
Figure I.2 Vue satellitaire de la centrale de Koudiet Eddraouche	5
Figure I.3 Vue de la disposition d'un cycle combiné	7
Figure I.4 Les équipements pertinents de la centrale à cycle combiné	8
Figure I.5 vue de face de la turbine à gaz	9
Figure I.6 Schéma d'une turbine à gaz	9
Figure I.7 Les composants de la Turbine à vapeur 16 A	10
Figure I.8 Un compresseur axial d'une turbine gaz électrique	11
Figure I.9 Vue du rotor du compresseur à 18 étages	11
Figure I.10 Les composants du condenseur	12
Figure I.11 Un alternateur à pole lisse	13
Figure I.12 Vue descriptive du principe de fonctionnement de l'alternateur	13
Figure I.13 Vue du transformateur de groupe	14
Figure I.14 Vue du transformateur de soutirage	14
Figure I.15 Vue de la chaudière de récupération	15
Figure I.16 Système black start	15
Figure I.17 Poste blindé (GIS)	16
Figure I.18 La salle de contrôle	17

Chapitre II : Généralités sur la maintenance

Figure II.1 Politique de maintenance	24
Figure II.2 Cout de maintenance	28
Figure II.3 Exemple d'une Fiche historique	31
Figure II.4 Exemple d'une demande d'intervention	32
Figure II.5 Exemple d'un rapport d'intervention	33
Figure II.6 Exemple d'une demande de sortie magasin	34
Figure II.7 Exemple d'un ordre de travail OT	35
Figure II.8 Exemple d'un permis de travail	36

Chapitre III : La gestion de la maintenance assister par ordinateur

Figure III.1 Structure de SGBD	45
Figure III.2 Diagramme de relation entre la fonction production et la fonction maintenance	47
Figure III.3 Exemple de calcul maintenance	49

Chapitre IV : Conception et fonctionnement d'un logiciel proposé

Figure IV.1 L'interface de l'inscription	56
Figure IV.2 L'opération de l'inscription	56
Figure IV.3 L'interface Principale de logiciel	57
Figure IV.4 Les Botton Home et Retour	57
Figure IV.5 L'interface du module Maintenance montrant les tuiles des sous-modules	58
Figure IV.6 Tableau des équipements	59

Figure IV.7 Liste des tâches préventive	60
Figure IV.8 Liste des interventions correctives	61
Figure IV.9 Les mesures capturée avec les seuilles	62
Figure IV.10 Liste des documents techniques	63
Figure IV.11 Calculs maintenance	64
Figure IV.12 L'interface du module Stock	65
Figure IV.13 Liste des articles	66
Figure IV.14 Des mouvement de Stock	67
Figure IV.15 L'interface du module Achat	68
Figure IV.16 Liste des demandes	69
Figure IV.17 Liste des fournisseurs	70
Figure IV.18 Liste des commandes	71
Figure IV.19 Liste des factures	72
Figure IV.20 L'interface du module RH	73
Figure IV.21 Liste des demandeurs	74
Figure IV.22 Liste des superviseurs	75
Figure IV.23 Liste des techniciens	76
Figure IV.24 Liste des informaticiens	77
Figure IV.25 Barre de notification avec une alerte	78

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II : Généralités sur la maintenance

Tableau II.1 Les Action De La Maintenances	22
Tableau II.2 Les deux modalités principales de Maintenance corrective	25
Tableau II.3 Les Niveaux de maintenance	27

Chapitre III : La gestion de la maintenance assister par ordinateur

Tableau III.1 Les différents modules fonctionnels de GMAO	44
-----------------------------------------------------------------	----

LISTE DES ABREVIATIONS

GMAO : Gestion Maintenance Assistée par Ordinateur.

EFNMS : European Fédération of National Maintenance Sociétés.

AFNOR : Association Française de Normalisation.

MTBF: Mean Time Between Failures.

MTTR: Mean Time to Repair.

TPM : Total Productive Maintenance.

I'A.M.D.E.C. : Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité.

RFID: Radio Frequency Identification.

ERP: Enterprise Resource Planning.

FMD : Fiabilité Maintenabilité Disponibilité.

OT : Ordre de travail.

RCM : Reliability-Centered Maintenance.

SGMI : Système de Gestion de la Maintenance Industrielle.

CMMS: Computerized Maintenance Management System.

l'AFIM: Association.

KPI: Key Performance Indicator.

PME : Petites et Moyennes Entreprises.

SGBD : Système de Gestion de Base de Données.

MARE : Maintenance, Assistance, Réparation et Entretien.

SPA : Système de Pilotage d'Activité.

SQL : Structured Query Language.

D : Disponibilité des équipements (%).

ERM / MFS / AEC / GIS / FOSC / NGA / TG / TV / STG109FB / PG9371FB / A 15 / 16 A / TBP

/ TP / PT : Ces abréviations semblent spécifiques à une centrale ou installation.

RESUME

Ce mémoire présente la conception d'un système de GMAO adapté à la centrale thermique à cycle combiné de Koudiet Eddraouche. L'objectif est d'optimiser la maintenance en remplaçant les méthodes traditionnelles par une solution informatisée, plus efficace. Le système développé permet de planifier les interventions, gérer des équipements, les pièces de rechange et le personnel, Dans le l'objectif est d'améliorer la fiabilité et la disponibilité des installations.

Mots-clés : GMAO, Maintenance, Centrale thermique à cycle combiné, Koudiet Eddraouche, Planification des interventions, Gestion des équipements, Gestion des pièces de rechange, Fiabilité, Disponibilité.

ABSTRACT

This thesis presents the design of a Computerized Maintenance Management System (CMMS) tailored for the Koudiet Eddraouche combined cycle thermal power plant. The objective is to optimize maintenance by replacing traditional methods with a more efficient computerized solution. The developed system enables the planning of interventions, management of equipment, spare parts, and personnel, with the aim of improving the reliability and availability of the facilities.

Keywords: CMMS, Maintenance, Combined cycle thermal power plant, Koudiet Eddraouche, Intervention planning, Equipment management, Spare parts management, Reliability, Availability.

ملخص

يقدم هذا البحث تصميم نظام إدارة الصيانة بمساعدة الحاسوب (GMAO) المخصص لمحطة الطاقة الحرارية ذات الدورة المركبة في قديمة الدراوش. الهدف هو تحسين الصيانة من خلال استبدال الأساليب التقليدية بحل مح osp أكثر كفاءة. يتيح النظام المطور تحديد التدخلات، وإدارة المعدات، وقطع الغيار، والموظفين، بهدف تحسين موثوقية وتوافر المنشآت.

الكلمات المفتاحية : نظام إدارة صيانة محوسبا ، لصيانة ، محطة الطاقة الحرارية ذات الدورة المركبة ، كدية الدراوش ، جدولة التدخلات ، إدارة المعدات ، إدارة قطع الغيار ، الموثوقية ، التوفير.

Introduction Générale et problématique

Dans le paysage industriel actuel, une gestion efficace de la maintenance est essentielle pour garantir la continuité opérationnelle et maximiser la durée de vie des équipements. Cela est particulièrement vrai pour des entreprises comme SPE Koudiet Eddraouch, où l'efficacité des processus de production repose en grande partie sur la fiabilité de leurs installations. Les approches traditionnelles de maintenance, bien que fondatrices, montrent souvent leurs limites face à la complexité croissante des opérations industrielles modernes. C'est ici que la technologie, et plus particulièrement les systèmes de Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO), joue un rôle précurseur. Ces systèmes rationalisent les activités de maintenance, de la planification à l'exécution, en passant par le suivi et l'analyse, permettant ainsi d'optimiser l'utilisation des ressources et de réduire les coûts opérationnels.

Ce mémoire explore la conception et la mise en œuvre d'une solution logicielle sur mesure, spécifiquement adaptée aux besoins de maintenance de SPE Koudiet Eddraouch. En intégrant les principes théoriques de la maintenance aux pratiques concrètes du développement logiciel, ce travail met en lumière l'importance de la GMAO tout en démontrant ses avantages tangibles dans un contexte réel.

Pour la confection de ce mémoire, il était nécessaire de mener des investigations au niveau de l'entreprise pour s'imprégner des besoins et nécessités du point de vue maintenance. La conception d'un logiciel sur la base de la GMAO sera sans nul doute une solution aux aspérités des responsables de l'entreprise. La plus-value engendrée se voit augmentée et principalement dans la disponibilité des équipements tout en minimisant les couts engendrés par, que ce soit les temps d'arrêt soit les couts liés à la gestion des stocks et les ressources humaines.

Une recherche bibliographique, dans le cas de notre étude, s'est avérée très importante du fait que beaucoup d'ingénieurs et informaticiens se sont penchés sur l'élaboration de logiciels répondant aux besoins d'entreprises chacune selon ses spécificités. Dans notre cas on s'est inspiré principalement des principes de la GMAO et l'assistance de professionnels dans la programmation pour l'établissement d'algorithme spécifique.

La combinaison du savoir-faire des professionnels de la maintenance et de l'informatique aboutie à la création d'un outil de travail efficace pour répondre à la gestion et suivi de tous les aspects liés à la maintenance.

Le mémoire est structuré comme suit : le chapitre un présente l'entreprise SPE Koudiet Eddraouch, posant ainsi le cadre organisationnel. Le chapitre deux aborde les concepts généraux de la

Introduction Générale et Problématique

maintenance, ses définitions et normes ; jetant les bases théoriques de la spécialité. Pour le chapitre trois, ce dernier explore en profondeur les subtilités de la GMAO, soulignant son rôle dans les pratiques modernes de maintenance. Enfin, le chapitre quatre présente la conception et le fonctionnement du logiciel proposé, illustrant son application pratique et son impact potentiel sur les processus de maintenance de SPE Koudiet Eddraouch.

Chapitre I :

Présentation de L'entreprise de SPE Koudiet Eddraouch

Introduction

Les équipements de production d'énergie jouent un rôle clé dans la conversion des ressources énergétiques en électricité ou chaleur. Qu'il s'agisse de turbines hydrauliques, d'aérogénérateurs, de panneaux photovoltaïques ou de chaudières et turbines dans les centrales thermiques, chaque technologie repose sur des dispositifs spécifiques et performants.

Ce chapitre s'intéresse aux équipements utilisés dans les centrales thermiques à cycle combiné, en prenant comme exemple la centrale de Koudiet Eddraouche, pour illustrer leur fonctionnement et leur importance dans le processus de production électrique.

I.1 Présentation de l'entreprise de Koudiet Eddraouche

I.1.1 Histoire et origine de l'entreprise

La centrale électrique de Koudiet Eddraouch, édifiée en 2007 par les entreprises General Electric (États-Unis) et Eberdrola (Espagne), dispose d'une capacité minimale de 1200 mégawatts (MW). Elle est composée de trois unités de technologie mono-arbre, chacune capable de générer 400 MW. Le projet, évalué à environ 2,7 milliards de dollars (soit 179 milliards de DA), a démarré sa production d'électricité pour le réseau national le 7 septembre 2013. Aujourd'hui, elle est devenue une société entièrement sous la propriété de SONELGAZ.



Figure I.1 Vue générale de la centrale Koudiet Eddraouche.[24]

I.1.2 Situation géographique

Le site est situé au village de « Sebâa » de la commune de Berrihane de la wilaya d'El Taref. Il est limité au Nord par la mer méditerranée (GPS : 36.885, 8.0778), au Sud par un détachement militaire, à l'ouest par des terrains vagues et à l'est par le centre de vacances FOSC Sonelgaz et le projet de station de dessalement AEC– Algerian Energy company, Le site couvre une superficie totale de 42 ha (Figure I.2).

I.1.3 Cadre climatique

- Altitude : moyenne + 40.00 mNGA ;
- Température ambiante : 35 °C ;
- Température Eau de mer : 23°C ;
- Humidité relative moyenne : 73 % ;
- Température maximale : 45 ° C (pour le dimensionnement de la climatisation et le système de réfrigération à l'air ambiant, les équipements et matériels électriques non abrités ou se trouvant dans des locaux non climatisés.



Figure I.2 Vue satellitaire de la centrale de Koudiet Eddraouche (Google map, 2025).

I.1.4 Structure sociale

La centrale de Koudiet Eddraouche emploie un personnel qualifié, réparti en plusieurs départements, tous placés sous l'autorité du directeur général. Voici une présentation des principaux services :

- **Service des études et planification** : Chargé de la recherche et de la coordination des projets ;
- **Service électrique** : Responsable des installations et opérations électriques ;
- **Service mécanique** : Gère les aspects mécaniques de la centrale ;
- **Service instrumentation et contrôle** : Supervise les systèmes de mesure et de régulation ;
- **Service exploitation** : Assure le fonctionnement quotidien de la centrale ;
- **Ressources humaines** : Administre le personnel et ses besoins ;
- **Services communs à toutes les sociétés** ;
- **Service financier et comptable** : Gère les finances et la comptabilité de l'entreprise ;
- **Service juridique** : Traite les questions légales, y compris le règlement intérieur et les cas de fraude ;
- **Service approvisionnement** : Organise l'acquisition des ressources nécessaires.

I.2 Processus et équipements pertinents de la centrale

La centrale de Koudiet Eddraouche est une centrale thermique à cycle combiné dotée de trois tranches mono-arbre (turbine à gaz, alternateur, turbine à vapeur), chacune produisant 400 MW, pour une capacité totale de 1200 MW. Chaque tranche inclut une turbine à gaz General Electric PG9371FB, une chaudière de récupération, une turbine à vapeur, un alternateur et des transformateurs. La puissance nette maximale atteint 1147 MW avec du gaz naturel et 1077 MW avec du gasoil, chaque tranche offrant 381 MW (gaz).

La centrale comprend :

- Trois tranches à cycle combiné avec HRSG et cheminée, condenseur, réchauffeur de gaz et filtre à air ;
- Systèmes auxiliaires : transformateurs (principal, soutirage, excitation), tableaux de distribution (MT/BT), groupe diesel 400V, protection incendie, poste blindé 400 kV ;
- Infrastructures : salle de contrôle MARK VIe, station black start (12 groupes 6.6 kV), ateliers, magasins, stations de gaz (56 bars), gasoil (stockage et traitement), eau (dessalement, déminéralisation, pompage), hydrogène, air comprimé, traitement des effluents, et bâtiments administratifs.

I.2.1 Processus de production électrique : le cycle combiné

Une centrale thermique à cycle combiné est une installation qui produit de l'électricité en utilisant à la fois une turbine à gaz (dans le domaine des hautes températures) et une turbine à vapeur (dans le domaine des températures moyennes et basses). La température à laquelle cesse l'extraction du travail dans la turbine à gaz est proche de celle à laquelle la turbine à vapeur commence à travailler. Il paraît intéressant de réaliser une cascade thermodynamique à deux étages, comprenant un cycle de gaz suivi d'un cycle de vapeur. D'où l'idée du cycle combiné (la Figure ci-après).



Figure I.3 Vue de la disposition d'un cycle combiné.

De nos jours, le cycle combiné est l'un des systèmes les plus couramment utilisés dans les centrales électriques. Il s'agit d'une technologie hybride qui combine un cycle de Brayton pour la production d'énergie électrique et un cycle de Rankine pour la production d'énergie thermique.

Les excellents rendements qu'atteignent aujourd'hui les centrales électriques à cycle combiné (supérieurs à 60 % sur PCI), sont le résultat de l'intégration en une seule unité de production de deux technologies complémentaires en terme de niveau de température : les turbines à gaz, qui fonctionnent à haute température (dans une machine aérodérivée les gaz entrent typiquement à 1300 °C dans la turbine de détente, et en ressortent vers 500 °C), et les centrales à vapeur, qui opèrent à des températures plus basses (entre 450 °C et 30 °C dans ce cas).

Dans les turbines à gaz modernes, la régénération est rarement possible ou économiquement intéressante. Une autre manière de valoriser l'enthalpie résiduelle des gaz d'échappement est de s'en servir comme source chaude pour un deuxième cycle de production d'énergie mécanique. Les cycles combinés correspondent à cette nouvelle génération de centrales thermiques.

I.2.1.1 Genèse du cycle combiné

Le développement des turbines à gaz et à vapeur en cycle combiné a progressé conjointement. Aux États-Unis, la première turbine à gaz en cycle combiné, d'une capacité de 3,5 MW, a été installée dans une compagnie d'électricité, utilisant l'énergie des gaz d'échappement pour préchauffer l'eau d'une unité à vapeur de 35 MW. Dans les années 1950 et 1960, les systèmes à cycle combiné employaient principalement des chaudières fully-fired, adaptées des centrales à vapeur classiques, où une partie des gaz d'échappement servait d'air de combustion. Ces systèmes offraient un rendement accru de 5 à 6 % par rapport aux centrales à vapeur similaires, grâce à une différence significative de température entre les gaz de combustion et l'eau/vapeur, permettant l'utilisation économique de tubes nus dans la chaudière.

I.2.2 Principaux équipements de la centrale thermique à cycle combiné

Une centrale thermique à cycle combiné est composée de divers équipements, chacun ayant un rôle spécifique. En raison de la variété des technologies utilisées par les constructeurs et de l'objectif d'optimiser la production tout en maximisant le rendement, plusieurs types de centrales à cycle combiné existent, notamment celles refroidies par aéroréfrigérants ou par eau, comme dans notre cas. Les principaux composants sont :

- Turbine à gaz ;
- Turbine à vapeur ;
- Compresseur ;
- Chambre de combustion ;
- Générateur de vapeur à récupération de chaleur (GVRC) ;
- Condenseur ;
- Pompe ;
- Générateur d'électricité.

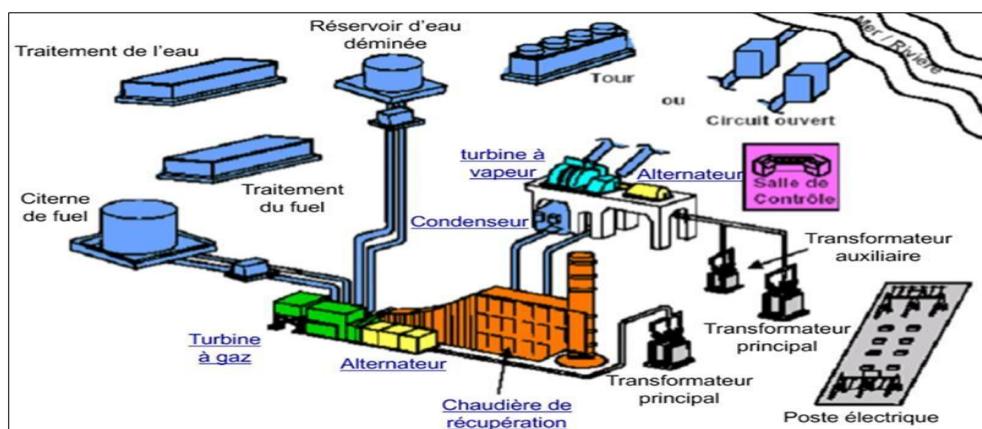


Figure I.4 Les équipements pertinents de la centrale à cycle combiné.

I.2.2.1 Turbine à gaz

La turbine à gaz comprend principalement une chambre de combustion où les gaz, après combustion, se détendent en trois étapes à travers des tuyères mobiles. Les gaz entrants, à 1396 °C, nécessitent un refroidissement des aubes par l'air du compresseur (sortie étage 8, à confirmer), circulant à l'intérieur des aubes via des orifices pour ne pas perturber l'écoulement. Les aubes sont revêtues pour résister à la corrosion, l'oxydation et la déformation. Les gaz sortent à 623 °C et 1 bar, avec un débit d'environ 2365 t/h.



Figure I.5 Vue de face de la turbine à gaz.

La turbine génère sa puissance par la détente des gaz de combustion, riches en énergie, qui entraînent les aubes fixes et mobiles du rotor à haute vitesse. Le nombre d'étages est optimisé selon la capacité et la différence de pression. Dans les turbines modernes, le refroidissement des aubes des premiers étages prolonge leur durée de vie face aux températures élevées des gaz d'échappement.

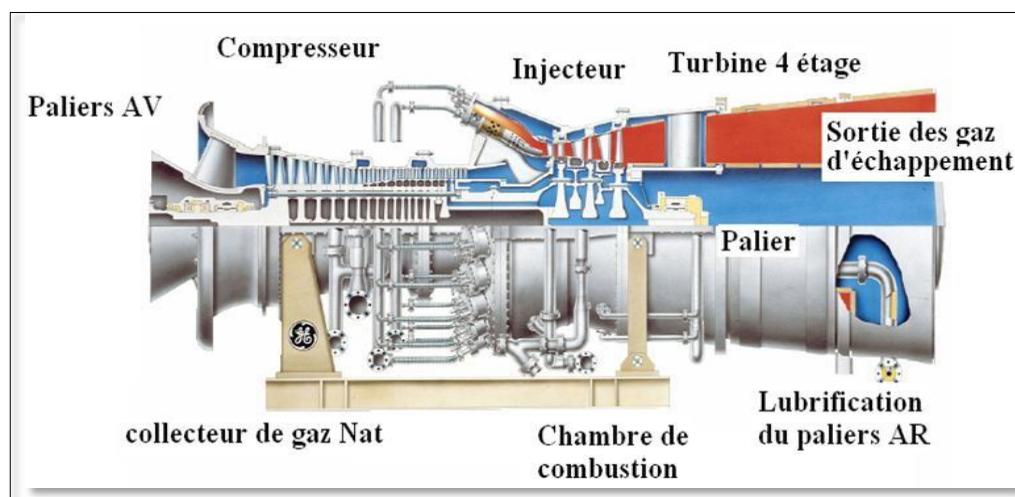


Figure I.6 Schéma d'une turbine à gaz (<https://upload.wikimedia.org/>).

I.2.2.2 Turbine à vapeur

La turbine à vapeur, moteur thermique à combustion externe, opère selon le cycle Clausius-Rankine, caractérisé par le changement d'état du fluide, généralement de l'eau. Elle convertit l'énergie thermique de la vapeur en énergie mécanique de rotation pour entraîner un dispositif.

Dans notre centrale, la turbine à vapeur, modèle « A 15 » de General Electric, comprend deux corps : un pour les hautes et moyennes pressions avec flux opposés pour équilibrer les forces axiales, et un pour la basse pression à double flux, avec une puissance de 140 MW. Elle transforme l'énergie thermique de la vapeur en rotation via des aubes fixes et mobiles, avec trois niveaux de pression :

- **HP** (haute pression) : 78-84 % de rendement, 25-30 % de la puissance, 30 étages à réaction.
- **MP** (moyenne pression) : 87-92 % de rendement, 15-22 % de la puissance, 11 étages à action.
- **BP** (basse pression) : 86-90 % de rendement, 50-60 % de la puissance, 6 étages à réaction et action.

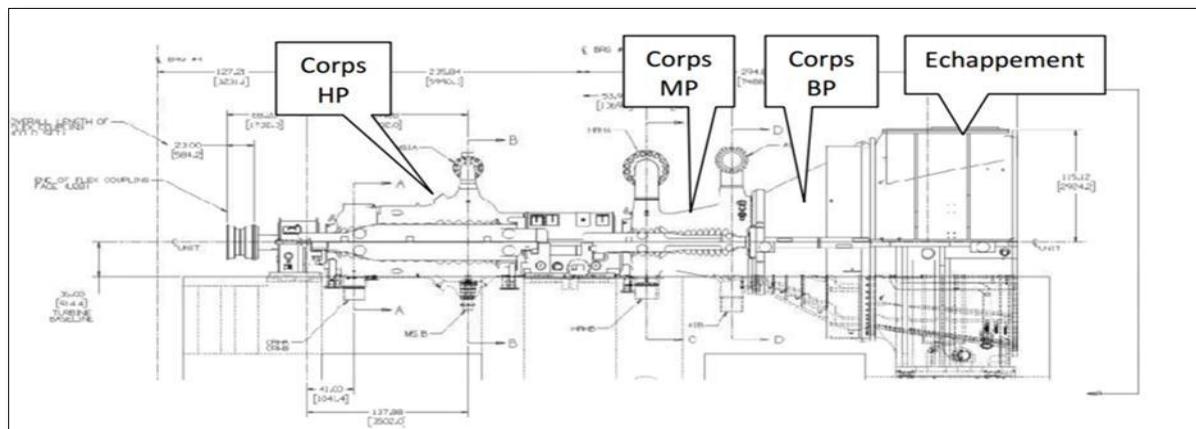


Figure I.7 Les composants de la Turbine à vapeur 16 A.

I.2.2.3 Le compresseur

Un compresseur est un dispositif mécanique conçu pour augmenter la pression de l'air, augmentant ainsi son énergie. Dans les turbines à gaz destinées à la production d'électricité, des compresseurs à flux axial sont employés pour produire un flux constant d'air comprimé, comme montré dans la figure ci-dessous.

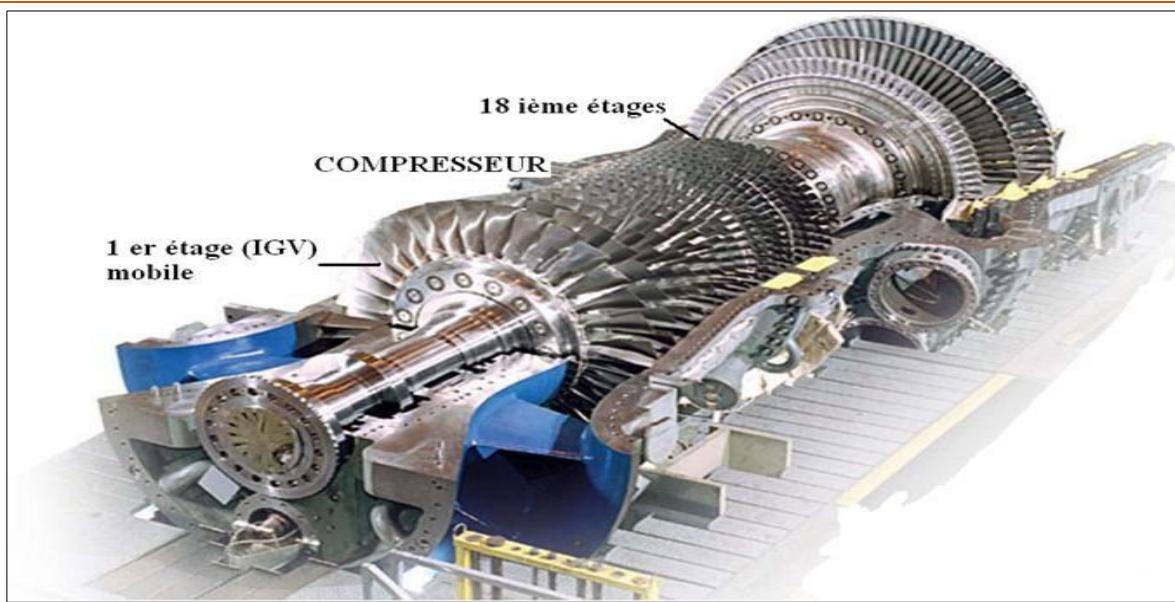


Figure I.8 Un compresseur axial d'une turbine gaz électrique. (HCEE, 2014).

Ils sont constitués d'ailettes fixes (stator) et mobiles (rotor), chaque paire rotor-stator formant un étage de compression. Plusieurs étages sont requis pour atteindre une pression élevée.

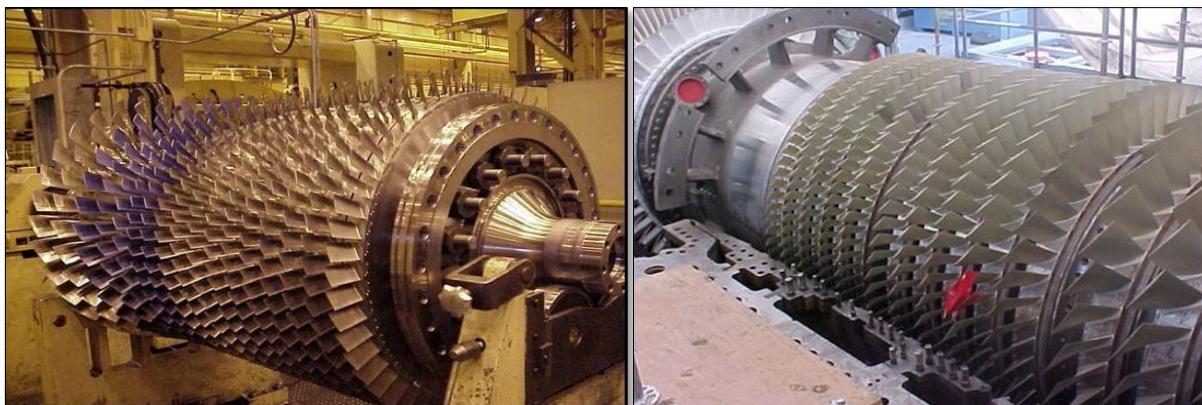


Figure I.9 Vue du rotor du compresseur à 18 étages.

I.2.2.4 La chambre de combustion

La chambre de combustion est le lieu où une réaction chimique, ou combustion, génère de l'énergie thermique. Un combustible, qu'il soit gazeux ou liquide, est injecté sous pression et brûlé avec de l'air comprimé. Conçue pour produire des gaz à haute température destinés à la turbine, elle doit maintenir cette température sous une limite précise pour éviter d'endommager la chambre ou la turbine.

I.2.2.5 Générateur de vapeur à récupération de chaleur (GVRC)

Le GVRC est une chaudière horizontale à circulation naturelle qui utilise les gaz d'échappement chauds de la turbine à gaz pour produire de la vapeur destinée à la turbine à vapeur (Alstom, 2009). Il comprend trois échangeurs en série :

- **Économiseur** : Préchauffe l'eau d'alimentation jusqu'à la température de saturation ;
- **Évaporateur** : Transforme l'eau liquide saturée en vapeur saturée ;
- **Surchauffeur** : Sèche et surchauffe la vapeur jusqu'à une température limite, sans dépasser la résistance des matériaux.

I.2.2.6 Condenseur

Le condenseur, un échangeur de chaleur à contre-courant placé sous la turbine à basse pression, condense la vapeur au contact des tubes refroidis par l'eau de la tour de refroidissement. Il stocke l'eau condensée (puits chaud) et facilite le dégazage des fluides pour atteindre la température de saturation.

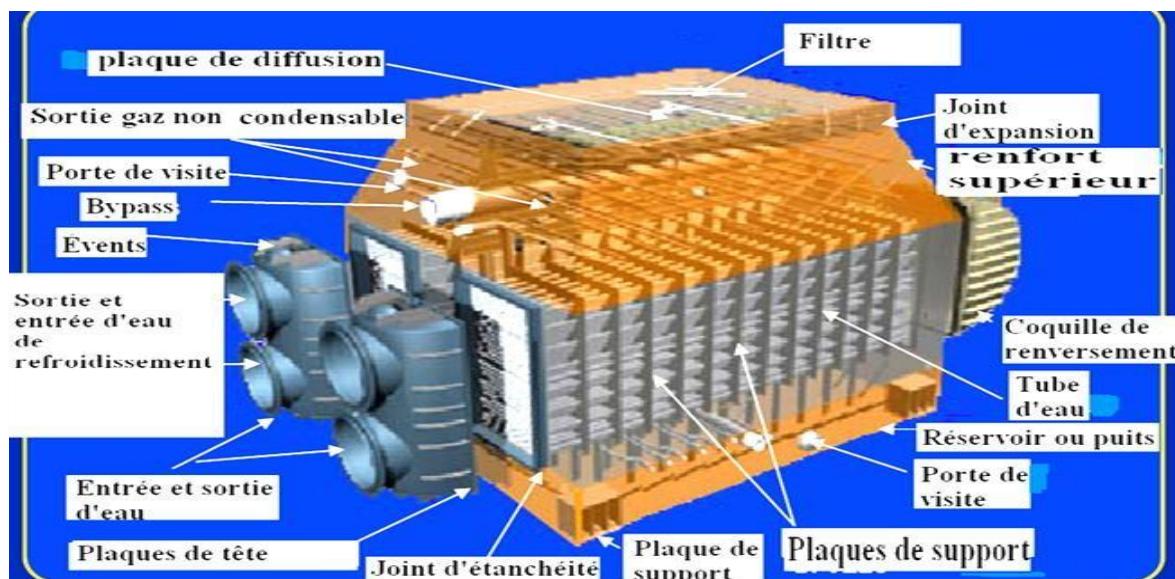


Figure I.10 Les composants du condenseur.

I.2.2.7 La pompe

Les pompes assurent la circulation des liquides dans la centrale thermique :

- **Pompes d'alimentation** : Aspirent l'eau de la bâche alimentaire vers la chaudière ;
- **Pompes d'extraction** : Transfèrent l'eau du condenseur au désaérateur ;
- **Pompes de circulation** : Acheminent l'eau de mer ou de rivière vers le condenseur pour condenser la vapeur.

I.2.2.8 L'alternateur

L'alternateur convertit l'énergie mécanique de la turbine à vapeur en énergie électrique par induction, grâce à un rotor entraîné par la turbine. Il réduit les émissions de CO₂ par rapport aux centrales au charbon. Ses composants incluent : stator (noyau, fuseaux), rotor (corps, fuseaux, anneaux), sorties de phase, réfrigération, coussinets, joints d'étanchéité, excitation et synchronisation (fréquence de 50 Hz en Algérie).



Figure I.11 Un alternateur à pole lisse.

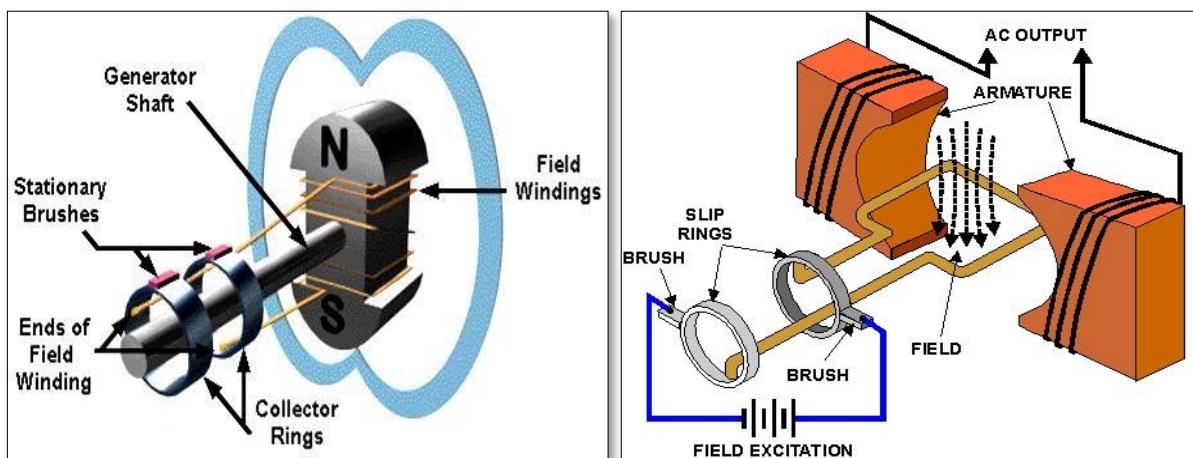


Figure I.12 Vue descriptive du principe de fonctionnement de l'alternateur.

I.2.2.9 Transformateur de groupe

Chaque tranche est connectée au réseau via un transformateur principal (TP) qui évacue l'énergie vers le poste blindé 400 kV. La tension BT correspond à celle de l'alternateur, relié par des jeux de barres sous gaine isolée (IPB). Un changeur de prises hors tension ajuste la tension haute ($\pm 5\%$, $\pm 2,5\%$, 0%). Conditions normales : tension de 0,925 à 1,075 Un, fréquence de 48 à 52 Hz.



Figure I.13 Vue du transformateur de groupe.

I.2.2.10 Transformateur de soutirage

Le transformateur de soutirage (TS), en aval du TP, alimente les auxiliaires de la tranche, qu'elle soit couplée (de l'alternateur) ou découpée (du réseau). Équipé d'un régulateur en charge, il ajuste la tension pour fournir la tension nominale aux auxiliaires MT en fonctionnement normal.



Figure I.14 Vue du transformateur de soutirage.

I.2.2.11 La chaudière de récupération

La chaudière HRSG de Koudiet Eddraouch récupère l'énergie des gaz d'échappement de la turbine à gaz (gaz naturel) pour produire de la vapeur. Conçue pour des variations de ± 14 °C, elle inclut :

- Systèmes de vapeur HP, MP, BP, resurchauffe et circuit des gaz d'échappement ;
- Composants : surchauffeurs (HP1-3, MP, BP), évaporateurs (HP, MP, BP), économiseurs (HP1-3, MP, BP), ballons, registre de cheminée, silencieux ;
- Tuyauteries, vannes, débitmètres et instrumentation.

Le système de purge gère 5 % du débit HP/MP et 15 % du débit vapeur maximal à 200 PSI pour le démarrage.

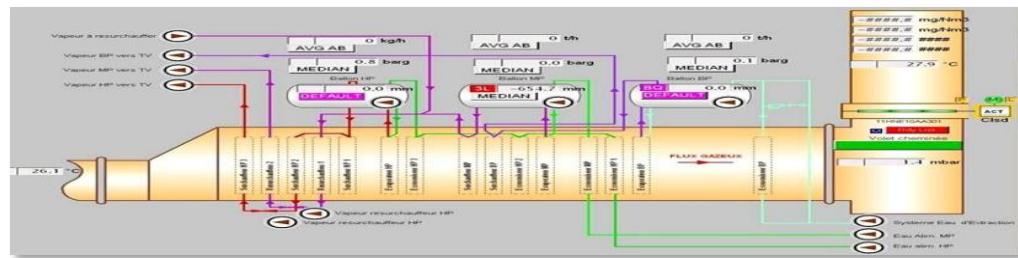


Figure I.15 Vue de la chaudière de récupération « CIMVIEW MARK VIe ».

I.2.3 Présentation des auxiliaires : Système électrique

I.2.3.1 Système de Black Start (démarrage à froid)

Le système de Black Start, composé de générateurs de 6,6 kV, permet à l'unité de fonctionner en cas de coupure de courant sur le réseau 400 kV. Il alimente les rails de la tranche moyenne tension (MT) et, en cas d'urgence, peut alimenter l'ensemble de la station selon les besoins définis par l'opérateur.

Ce système comprend les éléments suivants :

- 12 groupes électrogènes ;
- Une armoire de commande des services communs ;
- Des armoires de commande des groupes électrogènes ;
- Une armoire de commande locale des services auxiliaires.



Figure I.16 Système black start.[24]

Fonctionnement du système de Black Start :

En cas de coupure de courant, les groupes électrogènes du système de Black Start se déclenchent automatiquement et fournissent l'électricité nécessaire au démarrage de l'unité de production. Une fois l'unité synchronisée avec le réseau, le système de Black Start peut être arrêté.

I.2.3.2 Poste blindé (GIS)

C'est le point de raccordement de la centrale au réseau national algérien et le point de rejet de l'énergie produite par la centrale. Configuration :

- Double barre avec isolation au gaz (SF6) ;
- Trois postes de groupe depuis les transformateurs du cycle. ;

Autre Système de secours :

- Trois postes de sortie de ligne ;
- Poste de couplage ;
- Poste mesure de barres.



Figure I.17 Poste blindé (GIS).[24]

I.2.3.3 La salle de contrôle : le cœur battant de la centrale

Au cœur de la centrale électrique, la salle de contrôle est le centre névralgique où s'orchestre la production d'énergie. C'est là que les ingénieurs, tels des chefs d'orchestre, veillent au bon fonctionnement de l'ensemble.

La salle de contrôle est bien plus qu'une simple pièce. C'est le cerveau de la centrale électrique, où l'expertise humaine se conjugue à la technologie de pointe pour garantir un approvisionnement en énergie fiable et performant.

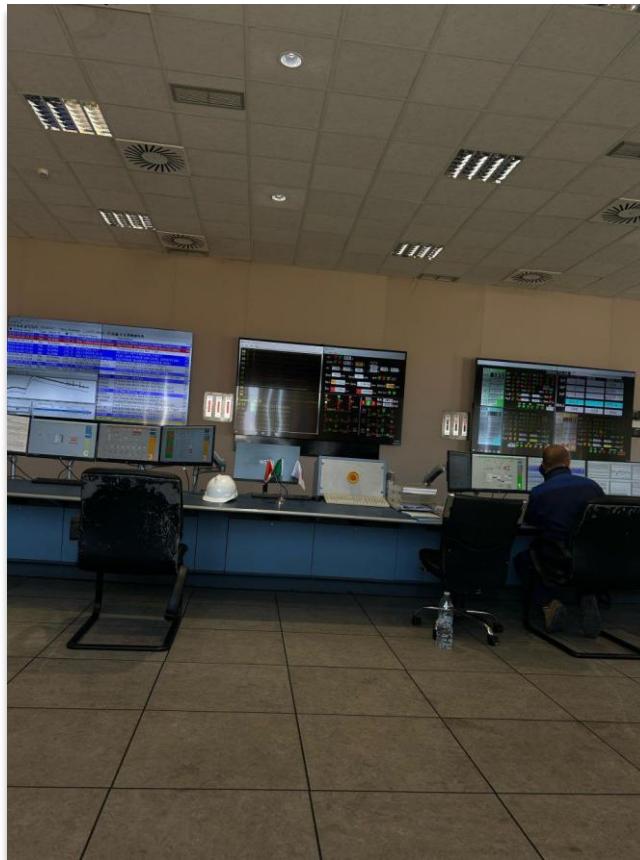


Figure I.18 La salle de contrôle.[24]

I.3 Conclusion

Ce chapitre nous plonge au cœur des centrales thermiques à cycle combiné, un domaine essentiel dans la production d'énergie. Notre objectif est de comprendre en profondeur les différents composants principaux de ces centrales ainsi que leur mode de fonctionnement. Les centrales thermiques à cycle combiné sont des installations énergétiques sophistiquées qui associent deux cycles thermodynamiques distincts pour maximiser l'efficacité globale. Ses éléments clés sont :

- Turbine à Gaz : Cette composante convertit l'énergie thermique des gaz brûlés en énergie mécanique. Elle entraîne le compresseur et génère de l'électricité ;
- Chaudière à Vapeur : La chaleur résiduelle des gaz d'échappement de la turbine à gaz est utilisée pour produire de la vapeur à haute pression. Cette vapeur alimente ensuite une turbine à vapeur ;
- Turbine à Vapeur : La turbine à vapeur détend la vapeur haute pression, générant une énergie mécanique supplémentaire ;
- Condenseur : Le condenseur refroidit la vapeur de la turbine à vapeur, la transformant en eau liquide pour la réutiliser dans le cycle.

En comprenant ces concepts, nous sommes mieux préparés à explorer les détails spécifiques des centrales thermiques à cycle combiné.

Chapitre II :

Généralités sur la maintenance

Introduction

L'entretien industriel est un élément crucial pour la performance des sociétés de fabrication, passant d'une simple fonction réparatrice à une stratégie globale. Dans un contexte où la digitalisation et la productivité sont de plus en plus exigées, les entités doivent reconsidérer leurs procédures de maintenance afin d'équilibrer la performance opérationnelle, le contrôle des dépenses et la sûreté des équipements. Ce changement implique l'utilisation de méthodes novatrices (maintenance prédictive, analyse de données) et une coordination améliorée entre les diverses parties concernées, tout en demeurant conforme aux buts stratégiques de la société. Devant ces défis complexes, l'amélioration des systèmes de maintenance est devenue une nécessité concurrentielle pour garantir la fiabilité des équipements et la profitabilité des opérations industrielles.

Définition et cadre conceptuel de la maintenance

II.1 Définition de la maintenance

Selon les normes **FD X 60-000** et **NF EN 13306 (2018)**, la maintenance se définit comme :

« L'ensemble des actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état lui permettant d'accomplir sa fonction requise. ». [1]

Cette définition met en évidence trois dimensions fondamentales :

1. **Technique** : Interventions directes (réparation, contrôle, lubrification, etc.) ;
2. **Administrative** : Gestion des coûts, documentation, stocks, etc ;
3. **Management** : Planification, stratégie, optimisation des ressources.

Analyse critique :

- **Maintenir** (préventif) : Préserver l'état fonctionnel d'un équipement ;
- **Rétablissement** (curatif) : Corriger une défaillance après une panne ;
- **État** : Fait référence au niveau de performance requis, en cohérence avec les objectifs de l'entreprise.

II.1.1 l'importance de la maintenance dans l'entreprise [2]

Pendant longtemps, les gestionnaires ont vu la maintenance comme une contrainte plutôt qu'un ensemble d'activités visant à maintenir ou rétablir un équipement dans un état optimal, permettant notamment :

- Permettre le déroulement normal des opérations aux meilleures conditions de coûts, de sécurité et de qualité (le cas échéant la production) ;
- Obtenir le service dans les meilleures conditions de confort et de coût ;
- Ainsi, pour nous, le mot entretenir signifie dépanner, réparer, effectuer des opérations préventives dont la finalité principale est garantie à la fois l'utilisation du matériel de production. D'une manière générale, entretenir veut dire subir ;
- Les avancées technologiques et l'évolution des pratiques de gestion ont transformé la maintenance en une fonction essentielle au sein des entreprises. Elle repose sur des techniques cruciales pour atteindre les objectifs stratégiques de l'organisation ;
- Ainsi la fonction maintenance est l'affaire de tous et cette priorité est ce qu'il faut à tous les niveaux dans les entreprises et services. Elle est devenue un enjeu économique décisif pour tous les pays souhaitant disposer d'outils de production disponibles, performants ;
- Si l'entretien se limitait à des actions, la maintenance serait bien plus qu'une simple tâche. C'est avant tout une approche proactive, une mentalité, puis une discipline moderne utilisant des méthodes et moyens optimisés pour prévenir les pannes, réduire les arrêts et minimiser les coûts globaux ;
- La maintenance ne doit pas être considérée comme une fonction subsidiaire et elle doit recevoir toute l'attention qu'elle mérite ;
- La modernisation des outils de production, principal changement dans les entreprises, impacte directement la maintenance. Cette dernière évolue d'une simple tâche vers une discipline à part entière, nécessitant une profonde transformation des mentalités.

II.1.2 Objectifs de la maintenance

Les objectifs de la maintenance incluent :

- Assurer la continuité de la production conformément aux prévisions ;
- Respecter les délais fixés pour les tâches et procédures ;
- Garantir la qualité des produits ou services fournis ;
- Optimiser les coûts de maintenance en équilibrant dépenses et résultats attendus ;
- Adopter des pratiques durables, minimisant les déchets, utilisant des technologies écoresponsables et intégrant des considérations écologiques.

Ces objectifs visent à maintenir le bon fonctionnement des équipements, réduire les interruptions, satisfaire les clients et renforcer la performance, la rentabilité, la compétitivité et la durabilité de l'entreprise.[3]

II.1.3 Les actions de la maintenance

La maintenance repose sur deux grands piliers :

Actions techniques	Actions administratives & management
- Contrôle d'état	- Méthodes et études
- Diagnostic et localisation de pannes	- Ordonnancement et planification
- Réparation et remplacement	- Gestion des coûts et budgets
- Lubrification et réglages	- Documentation et traçabilité
- Essais post-intervention	- Gestion des stocks (pièces, outillages)
	- Management des ressources humaines

Tableau II.1 Les Action de la Maintenance. [4]

II.1.4 Management de la maintenance [5]

Le management de la maintenance consiste à superviser toutes les activités de l'organisation, définir les objectifs, stratégies et responsabilités en matière de maintenance, et les mettre en œuvre à travers

la planification, la gestion, le contrôle et l'amélioration des méthodes, tout en tenant compte des aspects économiques.

Il englobe la coordination des actions pour atteindre les objectifs fixés, en favorisant une communication fluide avec les autres fonctions de l'entreprise via des tableaux de bord, des suivis de métriques et des rapports, tout en conseillant sur les impacts des choix industriels.

Fonctions clés :

- **Pilotage** : Tableaux de bord, indicateurs (MTBF, MTTR) ;
- **Coordination** : Communication interservices (production, logistique) ;
- **Optimisation** : Analyse des coûts, choix technologiques (Industrie 4.0).

II.1.5 Stratégie de maintenance [6]

La stratégie de maintenance, dérivée de la politique de maintenance, guide les décisions pour atteindre ou dépasser les objectifs fixés. Elle implique de :

- Développer, ajuster ou mettre en place des techniques de maintenance ;
- Concevoir et améliorer les plans de maintenance ;
- Définir des normes de travail ;
- Établir des techniques et ressources pour la sécurité ;
- Mettre en œuvre des schémas de flux d'informations (Flow Charts) ;
- Organiser les équipes de maintenance ;
- Gérer et optimiser les stocks ;
- Administrer le personnel : sélection, recrutement, formation, motivation et communication.

Ainsi, on peut voir les différents types de maintenance (corrective, systématique, conditionnelle, prévisionnelle, de routine et améliorative) comme des stratégies d'entretien.

Exemple :

- Une stratégie prédictive utilise l'IoT et l'analyse de données pour prévenir les pannes ;
- La TPM (Total Productive Maintenance) engage les opérateurs dans la maintenance préventive.

II.2 Politique de maintenance

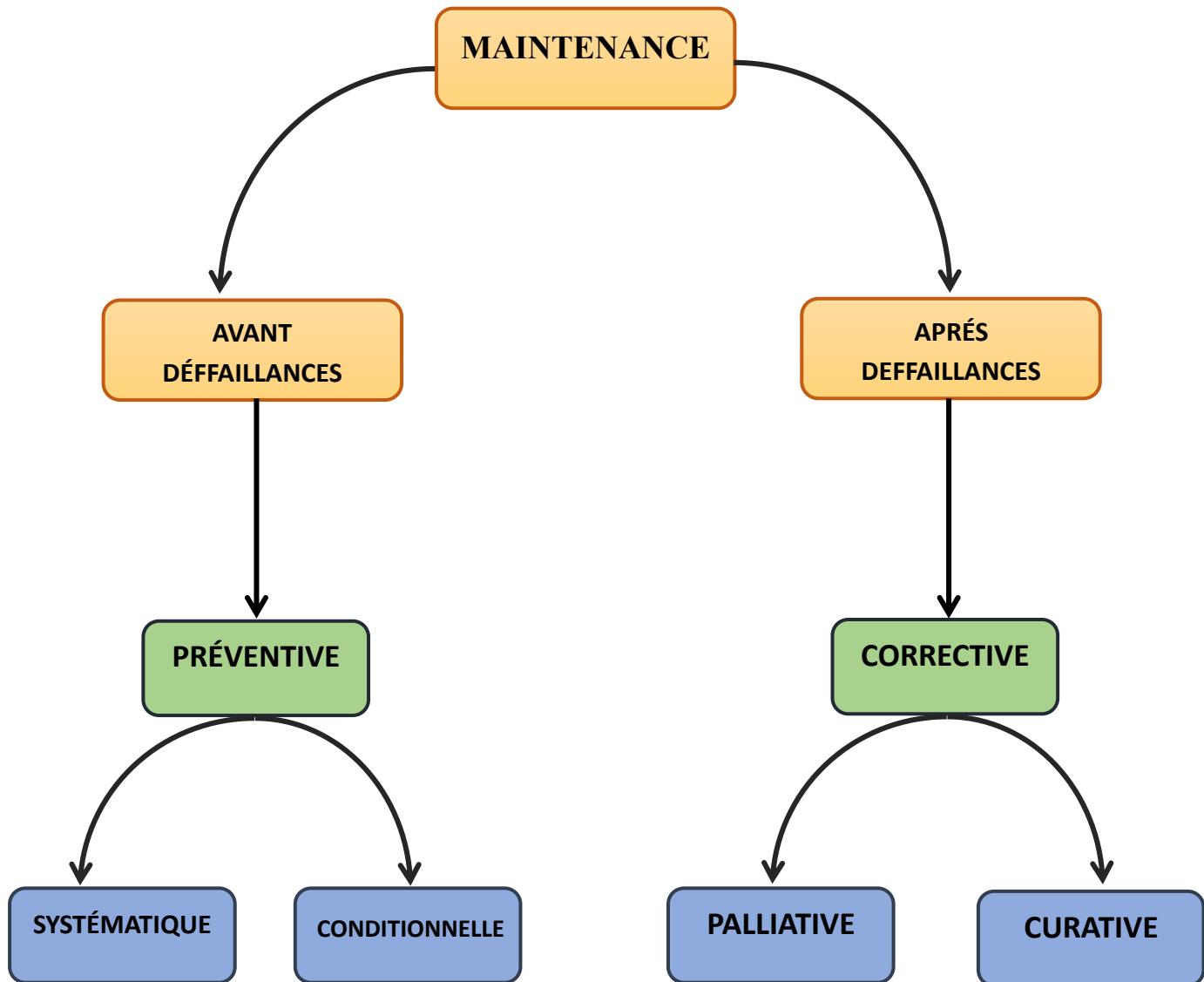


Figure II.1 Politique de maintenance.

II.2.1 Maintenance corrective [1]

La maintenance corrective, selon la norme NF EN 13306 :2018, désigne l'ensemble des interventions effectuées après la survenue d'une défaillance, visant à rétablir le fonctionnement d'un système. Elle se subdivise en deux modalités principales :

Type	Caractéristiques	Exemples
Urgente	<p>Intervention immédiate pour éviter des impacts critiques (sécurité, production).</p> <p>Justifiée lorsque la défaillance entraîne :</p> <ul style="list-style-type: none"> Un risque pour la sécurité des personnes Un arrêt critique de la production Des dommages environnementaux 	<p>Réparation d'une rupture de convoyeur bloquant la chaîne de production.</p> <p>Remplacement d'un joint défectueux sur une vanne de sécurité</p>
Différée	<p>Planifiée selon des contraintes opérationnelles.</p> <p>Appliquée lorsque la défaillance :</p> <ul style="list-style-type: none"> N'affecte pas la sécurité Permet une continuation temporaire de la production Concerne des équipements redondants 	<p>Remplacement d'un moteur hors pic de production.</p> <p>Changement programmé d'un moteur électrique</p>

Tableau II.2 Les deux modalités principales de Maintenance corrective.

II.2.2 Maintenance préventive [1]

Selon la norme NF EN 13306 :2018, la maintenance préventive regroupe les tâches programmées à intervalles fixes ou selon des critères prédéfinis pour réduire le risque de panne ou de dégradation fonctionnelle des équipements.

Elle a pour principaux objectifs :

- Améliorer la fiabilité des équipements pour réduire les pannes en fonctionnement ;
- Réduire les coûts liés aux pannes et augmenter la disponibilité ;
- Prolonger la durée de vie des équipements ;
- Optimiser la planification des tâches en coordination avec la production ;
- Stabiliser la charge de travail ;
- Simplifier la gestion des stocks grâce à des prévisions anticipées ;
- Assurer la sécurité en réduisant les situations imprévues à risque ;
- Réduire l'aléatoire et améliorer les relations humaines en évitant les tensions liées aux pannes.

Il existe les différentes formes de maintenance préventive suivantes :

II.2.2.1 La maintenance systématique

Interventions planifiées à intervalles prédéfinis (jours, semaines, mois, années) ou selon des indicateurs d'utilisation (heures de fonctionnement, pièces produites, distance parcourue), visant à remplacer les pièces usées avant une défaillance.

II.2.2.2 La maintenance conditionnelle

Surveillance continue des équipements pour détecter les signes de détérioration, suivie d'interventions préventives basées sur les données collectées, afin d'anticiper les pannes et maintenir l'état opérationnel des équipements.

II.2.2.3 La maintenance prévisionnelle

Analyse des paramètres (température, vibrations, qualité des huiles, etc.) pour anticiper les défaillances. Définie comme une maintenance préventive basée sur l'extrapolation des données de dégradation. Elle repose sur :

- L'inspection des paramètres opérationnels ou de l'état des équipements ;
- Des décisions préalables ciblant :

- ❖ Les composants critiques pour le fonctionnement ;
- ❖ Les composants à risque identifiés par des analyses comme l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité).

II.3 Niveaux de maintenance [1]

Hiérarchisation des interventions (d'après NF X 60-010) :

Niveau 1	Le fabricant prévoit des réglages simples qui peuvent être effectués sans démontage d'équipement ou remplacement de composants, tous facilement accessibles et sûrs. Par le personnel d'exploitation sur site/Personnel de production. Avec des outils légers spécifiés dans des procédures.
Niveau 2	Service de dépannage comprenant le remplacement standard d'éléments destinés à cet usage ou la réalisation d'opérations mineures de maintenance préventive (rondes) par un technicien qualifié, sur site. À l'aide d'un matériel léger spécifié dans des procédures, ainsi que des pièces de remplacement disponibles sur place, sans délai.
Niveau 3	Identification et diagnostic des pannes, réparation par remplacement de pièces fonctionnelles, réparations mécaniques mineures. Par un technicien qualifié, soit sur le site, soit dans l'atelier de maintenance. Avec l'équipement prévu, y compris un appareil de mesure, un banc d'essai et des dispositifs de contrôle...
Niveau 4	Travaux significatifs de maintenance corrective ou préventive. Sous la supervision d'un technicien expert, dans un atelier central. Avec des équipements généralement plus spécialisés, du matériel d'expérimentation et de vérification...
Niveau 5	Des travaux de rénovation, de reconstruction ou de réparations majeures sont attribués à un atelier central. Formé par une équipe complète et polyvalente dans l'atelier central. Avec des méthodes similaires à celles utilisées par le fabricant.

Tableau II.3 Les Niveaux de maintenance.

II.4 Les coûts de maintenance et la courbe de coût

La maintenance industrielle constitue un poste de dépense majeur, comprenant :

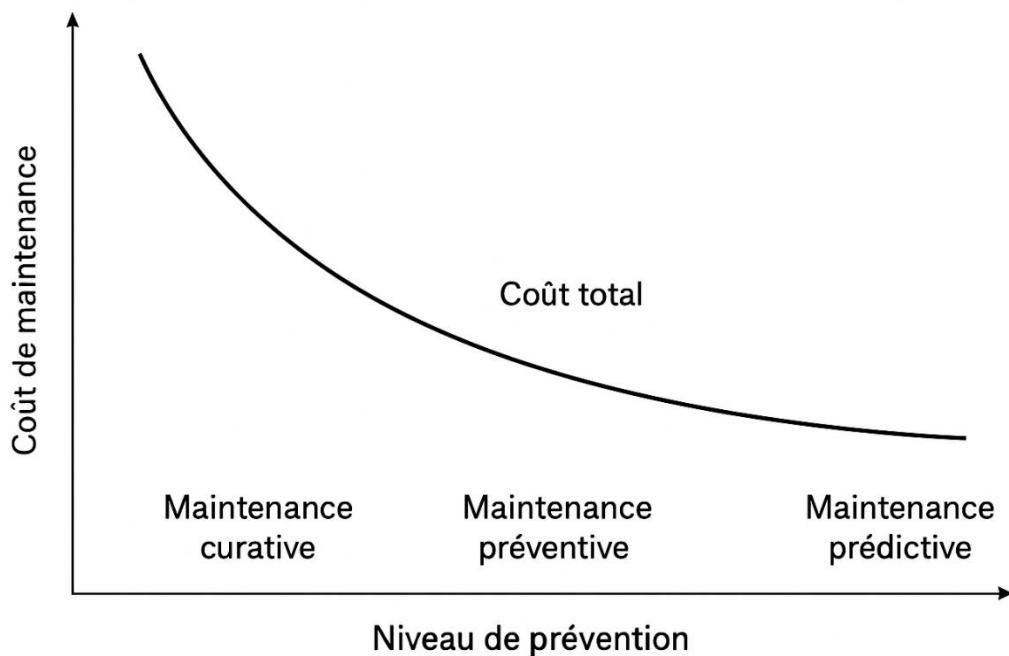
- **Coûts directs** : main-d'œuvre, pièces de rechange, consommables ;
- **Coûts indirects** : arrêts de production, pertes de qualité, pannes imprévues.

La maîtrise de ces coûts est cruciale pour la rentabilité et la compétitivité. Trois types de maintenance influencent différemment les coûts :

- ❖ **Maintenance curative** : Interventions post-défaillance, économiques à court terme, mais coûteuses en cas de pannes critiques (arrêts, pertes) ;
- ❖ **Maintenance préventive** : Tâches planifiées pour prévenir les pannes, nécessitant un investissement initial, mais réduisant les coûts à long terme ;
- ❖ **Maintenance prédictive** : Surveillance via capteurs IoT et GMAO pour anticiper les défaillances, optimisant fiabilité et disponibilité.

Courbe de coût de maintenance

Elle montre une diminution du coût total avec une anticipation accrue. La maintenance curative entraîne des coûts élevés à long terme, tandis que les approches préventive et prédictive, malgré des coûts initiaux plus élevés (systèmes de surveillance, GMAO), réduisent les pannes, prolongent la durée de vie des équipements et optimisent la disponibilité, diminuant ainsi le coût global.



Figuier II.2 Cout de Maintenance.

II.5 Organisation des opérations de maintenance

1. Planification des travaux de maintenance

La planification optimale des interventions de maintenance s'articule autour du modèle PPOR (Préparation-Planification-Ordonnancement-Réalisation). La fonction Préparation implique l'élaboration des gammes d'intervention et l'estimation des durées via des méthodes probabilistes comme PERT. La fonction Ordonnancement utilise des algorithmes d'optimisation avancés pour la séquence des interventions, tandis que la Réalisation s'appuie sur des méthodologies éprouvées comme le TPM et des technologies émergentes (réalité augmentée, RFID). [7] [11]

2. Gestion des pièces de rechange

L'optimisation du stock de pièces détachées repose sur des modèles mathématiques sophistiqués combinant classification ABC/XYZ et politiques de réapprovisionnement.

Ces approches visent à concilier disponibilité des pièces et minimisation des coûts de possession, avec des niveaux de service cibles $\geq 95\%$. L'intégration de systèmes ERP et d'algorithmes prédictifs permet d'automatiser et d'affiner ces processus. [8]

3. Tableau de bord de maintenance

C'est un outil de gestion qui permet de suivre le déroulement des activités de maintenance. Il sert de guide aux techniciens en leur permettant de suivre et/ou évaluer graphiquement l'état des équipements et prendre des bonnes décisions dans l'immédiat. Toutes les données du Tableau de Bord sont actualisées en temps réel à partir des actions et des transactions quotidiennes dans le système de GMAO. Il est à la fois :

- **Un outil de mesure** des situations et des comportements humains, économiques et matériels qui doit donner des mesures précises et irréfutables ;
- **Un moyen de diagnostic** une augmentation des micros arrêts sur une ligne de fabrication, un accroissement d'absentéisme, de l'énergie consommée, des pannes a forcément des causes directes ou indirectes qu'il faut rechercher en augmentant les moyens d'analyse ;
- **Un moyen de dialogue** et de délégation qui permet le travail en groupe sur des éléments d'évaluation délimitant et canalisaient le domaine d'application et les efforts à fournir ;
- **Un outil de décision** qui permet de réagir très vite dès les premiers symptômes et les premiers écarts annonciateurs de dérives plus importantes. [9] [10]

II.6 Documentations en maintenance

La documentation en maintenance joue un rôle fondamental dans la gestion efficace du cycle de vie des équipements.

II.6.1 Documentation technique du matériel

La documentation technique constitue une base essentielle pour garantir l'opérabilité et la sûreté des équipements. Elle est généralement dérivée de la documentation fournie par le constructeur et comprend :

- **Consignes de conduite** : instructions normalisées pour le pilotage des équipements ;
- **Consignes de sécurité** : procédures de prévention des risques mécaniques, électriques ou chimiques ;
- **Fiches de graissage** : planification du lubrifiant, types de graisses, intervalles ;
- **Fiches de visite** : points de contrôle systématiques périodiques ;
- **Fiches de diagnostic** : protocoles pour la recherche de défaillances ;
- **Fiches d'intervention** : retours normalisés post-maintenance. [12]

II.6.2 Documentation historique

Elle constitue une mémoire opérationnelle du cycle de vie de l'équipement. On y trouve :

- Historique des modifications techniques ;
- Commandes extérieures de sous-traitance ou d'expertise ;
- Ordres de travaux, rapports d'expertise, suivis réglementaires ;
- Fichier historique : enregistrement des événements critiques et leur traçabilité. [13]

II.6.3 Rôle de la documentation historique

Cette base permet une analyse stratégique de la performance et aide à :

- Déterminer les stratégies de maintenance adaptées (préventive, corrective, prédictive) ;
- Évaluer l'efficacité des interventions et affiner les indicateurs de fiabilité (MTBF, MTTR) ;
- Gérer les ressources et coûts associés ;
- Aider à la décision de renouvellement ou d'amélioration technique (retour sur expérience) ;
- Fournir un socle pour les études FMD (Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité). [14]

II.6.4 Fiche Historique des Interventions

Objectif :

Tracer l'ensemble des actions sur un équipement.

Contenu :

- Dates des interventions, techniciens impliqués ;
- Nature des travaux (réparation, contrôle, remplacement) ;
- Pièces utilisées, temps passé, coût.

Utilité :

- Analyse des pannes récurrentes ;
- Optimisation des plans de maintenance.

N° d'OT	État OT	Équipement	Description de l'équipement	Intervention	Description de l'intervention	début prévu	Date de début	Date de fin	Type d'interventions
1	2024119895 V	11PAC11AP001	CIRCULATING PUMP 1	CURA024297	Déclenchement de la pompe suite vibration HH	20/04/2024	21/04/2024 10:39		maintenance corrective
2	2024119651 T	11PAC11AP001	CIRCULATING PUMP 1	CURA024054	Fuite importante d'huile de graissage du palier pompe	03/02/2024	04/02/2024 08:51	04/02/2024 09:51	maintenance corrective
3	2023119445 T	11PAC11AP001	CIRCULATING PUMP 1	CURA023849	Fuite par la tresse	16/12/2023	18/02/2024 14:01	18/02/2024 15:01	maintenance corrective
4	2023119371 T	11PAC11AP001	CIRCULATING PUMP 1	CURA023775	Transmetteur de température PHASE T(11PAC11AP001xz21) en défaut	04/12/2023	11/12/2023 08:35	11/12/2023 09:35	maintenance corrective
5	2023119370 D	11PAC11AP001	CIRCULATING PUMP 1	CURA023774	Transmetteur de température palier (11PAC11AP001ct001xz11) en défaut	04/12/2023	11/12/2023 08:25	11/12/2023 09:25	maintenance corrective
6	2023119355 T	11PAC11AP001	CIRCULATING PUMP 1	CURA023759	Vibration très imprévisible sur le moteur .	29/11/2023	30/11/2023 08:43	30/11/2023 09:43	maintenance corrective
7	2023119303 T	11PAC11AP001	CIRCULATING PUMP 1	CURA023707	Bruit abnormal sur le ventilateur refroidissement Moteur.	18/11/2023	20/11/2023 08:41	20/11/2023 09:41	maintenance corrective
8	2023119276 T	11PAC11AP001	CIRCULATING PUMP 1	CURA023680	Tubing circuit-refroidissement-debrancher	10/11/2023	12/11/2023 08:57	12/11/2023 09:57	maintenance corrective
9	2023118956 T	11PAC11AP001	CIRCULATING PUMP 1	CURA023360	Fuite par tresse de la pompe eau de circulation N°1	07/10/2023	08/10/2023 10:54	08/10/2023 11:54	maintenance corrective
10	2023116818 V	11PAC11AP001	CIRCULATING PUMP 1	CURA023103	Transmetteur de température S(11PAC11AP001xz21) en défaut	16/09/2023	17/09/2023 08:24		maintenance corrective
11	2023116817 V	11PAC11AP001	CIRCULATING PUMP 1	CURA023102	Bruit abnormal sur le ventilateur refroidissement Moteur.	16/09/2023	17/09/2023 08:24		maintenance preventive
12	2023116801 T	11PAC11AP001	CIRCULATING PUMP 1	CURA023086	Bruit abnormal sur la pompe	12/09/2023	13/09/2023 14:00	13/09/2023 15:00	maintenance preventive
13	2023116703 V	11PAC11AP001	CIRCULATING PUMP 1	CURA022988	Manque le cache moteur de la vanne de refoulement	26/08/2023	27/08/2023 08:45		maintenance preventive
14	2023116683 T	11PAC11AP001	CIRCULATING PUMP 1	CURA022968	Serrage des tresses	25/08/2023	27/08/2023 08:35	27/08/2023 09:35	maintenance corrective
15	2023115292 A	11PAC11AP001	CIRCULATING PUMP 1	CURA022826	Vérifier température palier 55.2C°	06/08/2023	06/08/2023 08:41		maintenance corrective
16	2023114619 T	11PAC11AP001	CIRCULATING PUMP 1	CURA022776	Fuite par tresse de la pompe	28/07/2023	30/07/2023 15:45	30/07/2023 16:45	maintenance corrective
17	2023114063 T	11PAC11AP001	CIRCULATING PUMP 1	CURA022220	Fuite par tresse de la pompe	09/05/2023	10/05/2023 08:29	10/05/2023 09:29	maintenance corrective
18	2023114062 A	11PAC11AP001	CIRCULATING PUMP 1	CURA022219	Augmentation de la température plier pompe PAC11 CC1 de 43 ° a 51 ° (NB: circuits gris	09/05/2023	10/05/2023 17:19		maintenance corrective
19	2022113219 T	11PAC11AP001	CIRCULATING PUMP 1	CURA021376	Vérifié le capteur de vibration Axial1 (pièce à 26.1mm/s)	22/11/2022	23/11/2022 15:59	23/11/2022 16:59	maintenance corrective
20	2022112615 V	11PAC11AP001	CIRCULATING PUMP 1	CURA020772	Fuite par tresse de la pompe	30/07/2022	21/10/2022 09:05		maintenance corrective
21	2022111995 T	11PAC11AP001	CIRCULATING PUMP 1	CURA020149	Fuite de tresse	28/02/2022	10/04/2022 13:21	10/04/2022 14:21	maintenance corrective
22	2022111954 T	11PAC11AP001	CIRCULATING PUMP 1	CURA020108	Fuite d'eau au niveau de tresse de la pompe	05/03/2022	10/04/2022 13:36	10/04/2022 14:36	maintenance corrective
23	2022111739 T	11PAC11AP001	CIRCULATING PUMP 1	CURA019893	Trip moteur 11PAC11AP001	11/01/2022	16/01/2022 11:02	16/01/2022 12:02	maintenance corrective

Figure II.3 Exemple d'une Fiche historique.[24]

II.6.5 Fiche de demande d'intervention

Objectif :

Formaliser une demande de maintenance corrective ou préventive.

Contenu :

- Localisation, ID équipement, nom du demandeur, date/heure ;
- Description du problème, urgence, état actuel ;
- Priorité (Ex : Haute si arrêt production).

Bonnes pratiques :

- Utiliser un système numérique (GMAO) pour le suivi ;
- Valider la demande par le responsable avant intervention.

		Imprimé le: 22/04/2025	
 Demande d'intervention	SPE / DCD / DCD1 Code : SPE.MAINT.DI.01 Version: 1.0 Date document: 01/01/2021 N° de référence : DCD1/2025/1062 Date Demande d'intervention: 22/04/2025		
	N° DI: DCD1/2025/1062	Etat de la DI: 3.LANCE EN OT	Crée le: 22/04/2025 08:48
	Informations sur la		
	Demandé par: _____ Téléphone mobile: _____ Code équipement: DCD31LAB50AT001 Designation équipement: Filtre aspiration		Problème constaté: Fuite importante sur le joint du filtre de la pompe HP01
Priorité: Elevée: Effet potentiel ou immédiat sur la sécurité, l'environnement et/ou la disponibilité Circuit de validation: Demande validée du: 22/04/2025 08:47 Au: 23/04/2025 08:47			
Demande validée du:		Informations sur OT:	
Equipement: Filtre aspiration Zone: CC3 Fonction: 387 C. Charge: 933157176 Superviseur: Réalisation Mécanique Intervention: Vérification et élimination de la fuite		Numéro OT: DCD1/2025/01868 Etat OT: OT Lancé OT achevé le:	
Note 1: Note 2: Visa 2: Combinée à: Lancement: Planifier le: /			
Page 1 / 1			

Figure II.4 Exemple d'une demande d'intervention.[24]

II.6.6 Fiche de rapport d'intervention

Objectif : Documenter les actions réalisées et leurs résultats.

Contenu :

- Diagnostic, actions correctives, tests effectués ;
 - Temps passé, pièces remplacées ;
 - Statut final (Résolu, En attente, À surveiller).

Importance :

- Preuve de conformité (audits) ;
 - Base pour le suivi qualité.

Figure II.5 Exemple d'un rapport d'intervention.

II.6.7 Fiche demande sortie magasin

Objectif : Gérer les flux de pièces détachées ou consommables.

Contenu :

- Référence et quantité des pièces ;
- N° de la demande d'intervention associée ;
- Signatures (demandeur, magasinier).

Bonnes pratiques :

- Lier systématiquement la demande à une intervention ;
- Mettre à jour le stock en temps réel.

	Demande de sortie magasin		Imprimé le: 22/04/2025 SPE / DCD / DCD1 Code : SPE.STK.DSM.01 Version: 1.0 Date document: 01/01/2021 N° de référence : DCD1/2025/0172 Date Demande: 20/04/2025													
Demandé par : <u>.....</u> C. Charge : 933157116 Objet : Appoint d'huile de compresseur de black start		N° OT : DCD1/2025/01854	Du : 20/04/2025													
		Code magasin : 819_Non_valo														
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Groupe article</th> <th>Article/Service</th> <th>Ancien code</th> <th>Désignation</th> <th>Emplacement/magasin</th> <th>Quantité demandée</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>01</td> <td>180100092611</td> <td>GEREH00010</td> <td>OIL CAN 5L SAE30HD</td> <td></td> <td>1,00</td> </tr> </tbody> </table>					Groupe article	Article/Service	Ancien code	Désignation	Emplacement/magasin	Quantité demandée	01	180100092611	GEREH00010	OIL CAN 5L SAE30HD		1,00
Groupe article	Article/Service	Ancien code	Désignation	Emplacement/magasin	Quantité demandée											
01	180100092611	GEREH00010	OIL CAN 5L SAE30HD		1,00											
Chef de travaux Le : / /		Le Responsable de la maintenance Le : / /														
1																

Figure II.6 Exemple d'une demande de sortie magasin.[24]

II.6.8 Ordre de travail OT [15]

Objectif : Planifier et assigner une tâche de maintenance à un technicien.

Contenu :

- N° de l'ordre de travail et demande associée ;
- Équipement (ID, nom) ;
- Tâche à réaliser (description) ;
- Technicien assigné ;
- Date/heure prévues, priorité ;
- Outils/pièces nécessaires ;
- Instructions spécifiques.

 Ordre de travail - OT		Imprimé le: 22/04/2025		
SPE / DCD / DCD1 Code : SPE.MAINT.OT.01 Version: 1.0 Date document: 01/01/2021 N° de référence : DCD1/2025/01868 Date Ordre travail: 22/04/2025				
Numéro OT:	DDC1/2025/01868	Niveau:	3	
Equipement:	DDC31LAB50AT001	Filtre aspiration		
Système:	CC3	CC3		
Zone:	107	FILTRATION		
Fonction:	933157176	Entretien curatif du bloc6 TV TR3 KOUDIET EDDRDAOUCHE CC		
C. Charge:	DDC1-INT000013	Vérification et élimination de la fuite		
Intervention:	Centrale Draouche	Entité réalis: Siège		
Entité émettrice:	Réalisation Mécanique	N° Série Equip:	Priorité: 1	
Superviseur:	PT/DDC1/2025/00270			
Permis travail:				
Date début prévue:	22/04/2025 08:47	Contrat:		
Date fin prévue:	23/04/2025 08:47	N° DI:	DDC1/2025/1062	
Equipe:	48.5 Heure	Demandé par:		
	Type de l'intervention:	MCO		
	Classe :	01	OT pere :	
Ressources requises				
Stock requis				
Commentaires				
PROBLEME A REGLER: Fuite importante sur le joint du filtre de la pompe HP01				
Diagnostic				
Symptome:				
Défaut:				
Cause:				
Remède:				
Feedback employés				
Nom	Date & Hr début	Date & Hr fin	Heures planifiées	Taux horaire
BATALLAH Mohamed Iamine	22/04/2025 00:00	22/04/2025 10:00	0.0	TAUXHORAIRE1

Page 1 /2

Figure II.7 Exemple d'un ordre de travail OT.[24]

II.6.9 Permis de travail [15]

Objectif : Sécuriser les interventions à risques (électricité, hauteur, chimique).

Contenu :

- Risques identifiés (Ex : travaux sous tension) ;
- Équipements de protection requis ;
- Dates de validité, signatures (HSE, responsable) ;
- PT électrique ;
- PT feu ;
- PT confinement.

ORIGINAL (Chef de travaux)		APPROUVE
Centrale : DCD1	BON DE CONSIGNATION	N° : PT/DCD1/2025/00270 N°OT: DCD1/2025/01868
INSTALLATION OU EQUIPEMENT CONCERNÉ		REALISATION
DCD31LAB50AT001 Filtre aspiration		Chef subdivision réalisation Durée probable des travaux : Nom: Signature :
DESIGNATION DES TRAVAUX		EXECUTION DES TRAVAUX
DCD1-INT0000013 Vérification et élimination de la fuite		Chef des travaux désigné : Début des travaux 22/04/2025 00:00 Nom: Signature :
Manoeuvres - Condamnations - Mesures de sécurité - Recommandations particulières		CHEF D'EXPLOITATION Accord pour retrait de l'exploitation et consignation <input type="checkbox"/> J <input type="checkbox"/> M <input type="checkbox"/> H Nom: Signature :
1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8. 9. 10.		CHEF DE CONSIGNATION Consignation prononcée le <input type="checkbox"/> J <input type="checkbox"/> M <input type="checkbox"/> H Nom: Signature :
		CHEF DE TRAVAUX Bon de consignation reçu le : <input type="checkbox"/> J <input type="checkbox"/> M <input type="checkbox"/> H Nom: Signature :
Centrale : Centrale Draouche		AUTORISATION DU TRAVAIL N° PT/DCD1/2025/00270
INSTALLATION MATERIEL OU EQUIPEMENT		RETRAIT DE L'EXPLOITATION
DCD31LAB50AT001 Filtre aspiration		Le chef de consignation Mr déclare que l'équipement a été consigné et retiré de l'exploitation le à et autorise Mr chef de travaux à engager les travaux
DESIGNATION DES TRAVAUX		Le chef de Le chef de
DCD1-INT0000013 Vérification et élimination de la fuite		AVIS DE FIN DE TRAVAIL Le chef de travaux Mr BATALLAH Mohamed lamine..... déclare que les travaux objet de cette autorisation sont terminés et l'installation remise à la disposition du chef de consignation Mr le à
Manoeuvres - Condamnations - Mesures de sécurité - Recommandations particulières		Le chef de Le chef de
1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8. 9. 10.		

Figure II.8 Exemple d'un permis de travail.[24]

II.7 Conclusion

La maintenance industrielle moderne joue aujourd’hui un rôle stratégique dans la performance globale des entreprises. Elle ne se limite plus à une simple fonction de réparation, mais s’intègre pleinement dans une démarche globale de prévention et de correction, visant à garantir la disponibilité, la fiabilité et la longévité des équipements. Grâce à une politique de maintenance adaptée, chaque entreprise peut définir une stratégie pertinente fondée sur la connaissance du matériel, son état, sa durée de vie, la probabilité de pannes, la disponibilité des pièces de rechange, ainsi que les moyens d’intervention.

L’intégration des technologies 4.0 (Internet des objets, Intelligence Artificielle, Réalité Augmentée), combinée à des méthodes éprouvées telles que le TPM (*Total Productive Maintenance*, ou Maintenance Productive Totale) et le RCM (*Reliability-Centered Maintenance*, ou Maintenance Centrée sur la Fiabilité), permet d’optimiser les coûts d’exploitation tout en renforçant la qualité, la sécurité et la performance durable.

La GMAO, en tant qu’outil incontournable, facilite cette gestion en offrant une vision claire, centralisée et structurée des opérations. Elle constitue un levier essentiel pour la transition vers une maintenance intelligente, prédictive et connectée, participant activement à la transformation numérique et écologique de l’industrie.

Chapitre III :

La gestion de maintenance assister par ordinateur

Introduction

Dans un environnement industriel en constante mutation, la gestion de la maintenance se doit d'évoluer afin de pouvoir traiter, consulter, modifier et exploiter un volume croissant d'informations techniques. L'essor de l'industrie et des technologies modernes ouvre de nouvelles perspectives en matière de gestion, notamment grâce à des outils numériques performants. Parmi ceux-ci, la Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO) s'impose comme une solution incontournable. Elle constitue une approche intégrée visant à optimiser l'organisation, le suivi et le pilotage des activités de maintenance à l'aide de systèmes informatisés et de technologies avancées.

L'un des atouts majeurs de la GMAO réside dans sa capacité à centraliser et stocker l'ensemble des données liées aux équipements, aux actifs industriels et aux interventions de maintenance. Cette centralisation permet aux entreprises de bénéficier d'une vision globale et structurée des opérations, en intégrant des informations précises sur la maintenance préventive et corrective, les pièces de rechange, les coûts, ainsi que la performance opérationnelle. L'analyse facilitée de ces données favorise une prise de décision rationnelle et stratégique, contribuant ainsi à une gestion optimale des ressources techniques et humaines.

III.1 Gestion de la maintenance

La gestion de la maintenance via la **GMAO (Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur)** regroupe les activités de suivi et d'entretien des actifs industriels pour optimiser leur performance et leur durabilité. Outre les réparations, elle inclut des processus clés comme l'inspection, le nettoyage et la vérification régulière des équipements pour prévenir les défaillances.

Dans un contexte industriel, la GMAO assure une gestion rigoureuse des parcs d'équipements, essentielle pour maintenir la fluidité et l'efficacité des opérations. Cet outil stratégique permet de :

- Centraliser le suivi des flux de maintenance ;
- Créer et gérer des listes de contrôle ;
- Planifier automatiquement les interventions ;
- Répartir efficacement les tâches aux équipes.

En structurant, automatisant et optimisant les processus, la GMAO est indispensable pour une gestion moderne et performante de la maintenance industrielle.

III.1.1 L'informatique dans la maintenance

L'intégration de l'informatique dans le processus de maintenance s'est imposée naturellement afin de renforcer les tâches administratives et de gestion associées à cette fonction stratégique. Le module de gestion de la maintenance repose sur un système d'information spécifique, conçu pour centraliser, suivre et contrôler l'ensemble des données nécessaires à la mission de maintenance.

Ce système assure le bon fonctionnement de la maintenance en s'appuyant sur une base de données documentaire, enrichie au fil du temps par des informations actualisées relatives aux équipements (ou « biens »). Il permet non seulement de gérer les opérations quotidiennes, mais également de soutenir les décisions d'intervention et les choix stratégiques, qu'il s'agisse de remise en état, de remplacement, ou de planification de la maintenance.

Grâce à un large éventail de fonctionnalités, ce système informatique offre une vision globale et une maîtrise en temps réel des opérations de maintenance, contribuant ainsi à une prise de décision éclairée, tant sur le plan opérationnel que stratégique. [16]

III.1.2 Les débuts de la GMAO

Historiquement, la maintenance s'est appuyée sur des méthodes classiques d'organisation, fondées sur des plans d'externalisation, des outils méthodologiques et des stratégies d'accroissement de performance. Dans les entreprises industrielles, cela se traduisait par une gestion structurée, souvent rigide, dans des organigrammes verticaux, où chaque service intervenait selon des fonctions bien définies.

C'est dans ce contexte que la maintenance a progressivement évolué pour devenir une fonction stratégique de l'entreprise. Cette évolution a été accompagnée par l'automatisation des processus d'information, notamment par la mise en place de Fichiers Informatisés d'Équipement et de bases de données centralisées. L'intégration de ces systèmes autonomes (souvent appelés "îlots d'automatisation") a permis une meilleure coordination et un partage d'informations plus fluide.

Cependant, les premières solutions logicielles proposées restaient limitées, ne répondant pas toujours aux exigences spécifiques de propreté, de rigueur et de traçabilité propres à la maintenance industrielle. C'est dans cette dynamique que des entreprises comme Metalcaucho, sous l'impulsion

de leur Responsable Développement Produit, ont initié le développement de systèmes plus complets et mieux adaptés.

Cela a donné naissance à la Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO), également appelée Système de Gestion de Maintenance Informatisé (SGMI). Ces systèmes permettent aujourd’hui une automatisation avancée des processus de maintenance, intégrant :

- La planification des interventions ;
- Le traitement des ordres de travail (OT) ;
- La gestion des pièces détachées en stock ;
- Ainsi que le suivi des indicateurs de performance. [10]

III.2 Présentation de la GMAO

III.2.1 Introduction à la GMAO

La GMAO (Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur), initialement un simple répertoire d'équipements et d'interventions, s'est développée en un outil complet de gestion de la maintenance. Les logiciels actuels permettent de :

- Répertorier et suivre les équipements ;
- Planifier les interventions et gérer les ordres de travail (OT) ;
- Suivre les stocks de pièces détachées ;
- Produire des rapports pour optimiser interventions et achats ;
- Intégrer des modules « workflow » pour fluidifier les processus.

Avantages :

- Réduction des temps d'arrêt et des durées d'intervention ;
- Gestion simplifiée des pièces et maîtrise des coûts ;
- Optimisation des opérations de maintenance.

Choix du logiciel :

Face à une offre variée, choisir la bonne GMAO est crucial. Un sondage de l'**AFIM** (plus de 800

professionnels) montre que, malgré des fonctionnalités communes (gestion OT, stocks, interventions), les logiciels diffèrent :

- **Entrée de gamme** : Abordables, adaptés aux petites entreprises avec besoins simples ;
- **Solutions avancées** : Conçues pour grandes entreprises (transport, télécoms, eau/gaz) avec besoins complexes.

III.2.2 Quel est un progiciel de GMAO

Un progiciel de GMAO (Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur) est un système informatique de management de la maintenance structuré autour d'une base de données centralisée. Il permet de planifier, suivre et analyser l'ensemble des activités de maintenance selon trois axes : technique, budgétaire et organisationnel.

Ce type de progiciel assure la gestion des équipements (machines, lignes de production, sous-ensembles, pièces de rechange, etc.) et des opérations associées (préventives, correctives, inspections, etc.) à partir de différents terminaux répartis dans les bureaux techniques, les ateliers, les magasins, et les services d'approvisionnement.

L'objectif est d'avoir une vision globale et actualisée de la maintenance, tout en améliorant la traçabilité, la réactivité, et la maîtrise des coûts.

III.2.3 Pourquoi une GMAO

La Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO) optimise le pilotage des activités de maintenance en entreprise. Elle améliore l'utilisation des ressources humaines, matérielles et financières, tout en augmentant la disponibilité et la fiabilité des équipements.

Les avantages clés d'une GMAO sont :

- **Optimisation des moyens** : Gestion efficace des équipes, des pièces détachées et des équipements ;
- **Contrôle budgétaire** : Réduction des coûts grâce à une planification précise et un suivi financier optimisé ;
- **Fiabilité renforcée** : Amélioration de la disponibilité des installations en réduisant les interventions imprévues ;
- **Efficacité et compétitivité** : Gains opérationnels et réactivité accrue face aux imprévus ;
- **Prévention des défaillances** : Anticipation des pannes pour minimiser les arrêts et optimiser les performances ;
- **Qualité et traçabilité** : Suivi rigoureux des opérations et satisfaction des besoins internes.

III.2.4 Les inconvénients généraux de la GMAO

Bien que la GMAO offre de nombreux bénéfices, son implémentation comporte des défis qu'il est essentiel de prendre en compte lors de son déploiement :

- **Complexité d'assimilation** : la prise en main du progiciel peut s'avérer difficile, notamment pour les utilisateurs non familiarisés avec les outils informatiques, nécessitant un temps d'adaptation conséquent ;
- **Mise en œuvre progressive** : l'implémentation complète d'un système GMAO est généralement longue, avec une phase de transition parfois délicate entre l'ancien système et le nouveau ;
- **Charge de saisie quotidienne** : la rigueur exigée dans la saisie régulière des données (interventions, consommables, relevés) peut entraîner une perte de temps si elle n'est pas automatisée ou bien organisée ;
- **Incompatibilités humaines et informatiques** : certaines contraintes techniques de la GMAO (codification, temps de réponse, volume d'information) peuvent être mal acceptées sur le terrain par les équipes opérationnelles ;
- **Investissement initial élevé** : l'acquisition du logiciel, la formation du personnel et la mise en œuvre du système représentent un coût important, dont la rentabilité peut être difficile à mesurer à court terme. [17]

III.2.5 Le rôle de la GMAO

La Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO) est un outil clé pour optimiser la fonction maintenance sous ses aspects techniques, organisationnels et financiers. Elle permet d'améliorer la disponibilité des équipements, de réduire les coûts associés à la maintenance et de prolonger la durée de vie des actifs.

L'objectif principal de la GMAO est d'harmoniser les activités de maintenance avec les ambitions de performance de l'entreprise, en s'appuyant sur deux axes essentiels :

- **Planification des interventions** : Organise les tâches de maintenance préventive et corrective ;
- **Suivi des équipements** : Gère l'état, l'historique et la performance des actifs ;
- **Réduction des coûts** : Analyse et optimise les dépenses de maintenance ;
- **Gestion des stocks** : Contrôle les pièces détachées pour éviter ruptures ou surstocks ;
- **Automatisation des processus** : Simplifie les tâches administratives (bons de travail, rapports) ;
- **Indicateurs de performance** : Fournit des KPI pour un pilotage stratégique.

III.2.6 Analyse des différents modules fonctionnels

La plupart des logiciels de GMAO adoptent une structure modulaire, offrant des fonctionnalités similaires, bien que leur terminologie, leur organisation et leur ergonomie diffèrent selon les éditeurs. Un exemple notable est un progiciel GMAO conçu pour les PME, développé en France, qui a grandement contribué à standardiser les pratiques de maintenance. Ce système sert de référence pour structurer les fonctions de maintenance dans les bureaux techniques (services méthodes, ordonnancement, logistique, travaux neufs, etc.), en s'appuyant sur une dizaine de modules fonctionnels.

Le cahier des charges de chaque module n'est pas rigide : il vise à identifier les besoins essentiels, souvent négligés dans les services de maintenance, tout en permettant aux entreprises d'adapter les modules à leurs besoins opérationnels spécifiques. Les modules étudiés sont présentés dans le tableau ci-dessous :

N	Nom du module	Fonction principale
1	Gestion des équipements	Suivi des machines, lignes de production, installations (fiche technique, historique...)
2	Planification des interventions	Organisation des opérations préventives et correctives.
3	Gestion des demandes d'intervention	Centralisation et suivi des demandes d'intervention internes.
4	Gestion de la maintenance préventive	Programmation automatique selon des périodicités, compteurs, alertes.
5	Maintenance curative (corrective)	Suivi des pannes, temps d'arrêt, délais de remise en service.
6	Gestion des stocks	Suivi des pièces de rechange, seuils de réapprovisionnement, mouvements de stock.
7	Gestion des achats	Demande de prix, bons de commande, suivi des fournisseurs.
8	Gestion des coûts	Calcul et analyse des coûts d'entretien, par équipement ou intervention.
9	Tableaux de bord et indicateurs	Suivi des KPI (MTBF, MTTR, taux de disponibilité, taux de panne...).

Tableau III.1 Les différents modules fonctionnels de la GMAO.

III.3 Systèmes de Gestion des Bases de Données (SGBD) et GMAO

III.3.1 Structure de la base de données maintenance

L'organisation de base d'un progiciel de GMAO repose sur l'utilisation d'un SGBD (Système de Gestion de Base de Données) opérant comme une plaquette pour récupérer, stocker, afficher et diffuser des informations à destination des diverses composantes de la GMAO. Le SGBD occupe au sein de l'architecture de la GMAO le poste clé de stockage et de gestion des données. Il permet de mettre en place, de conserver et d'éditer les données des équipements, des travaux d'entretien, des visites, des historiques. [18]

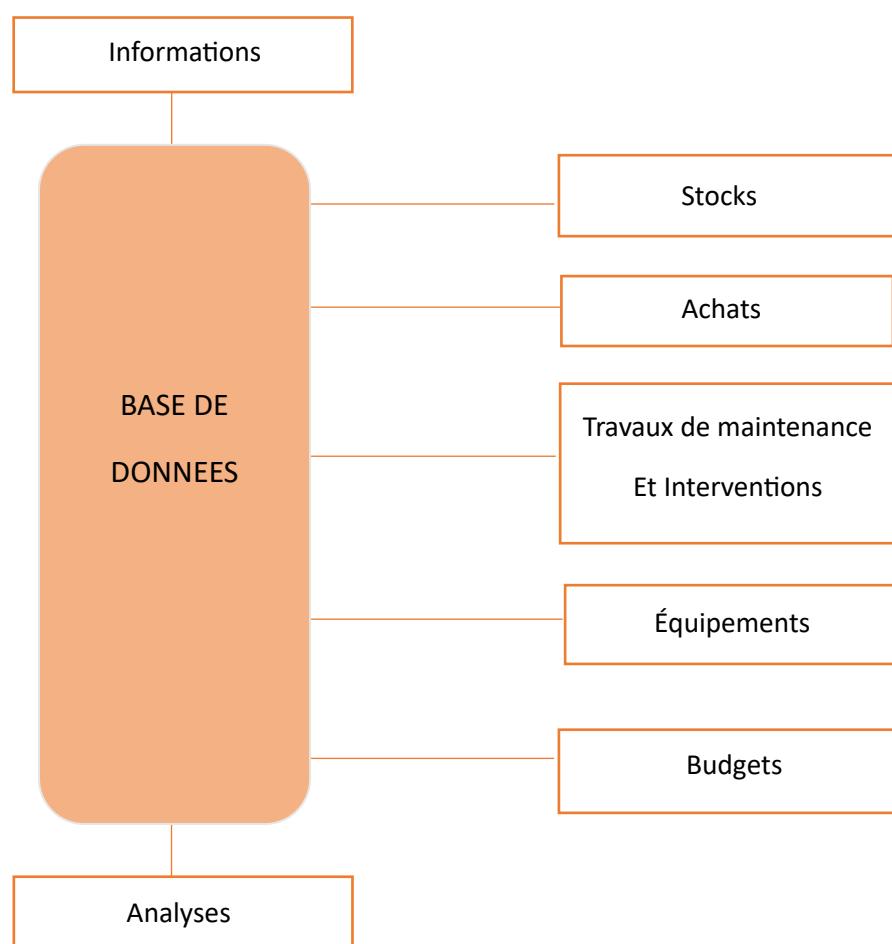


Figure III.1 Structure de SGBD.

III.3.2 Intégration d'un Système de Gestion de Base de Données (SGBD) dans la GMAO

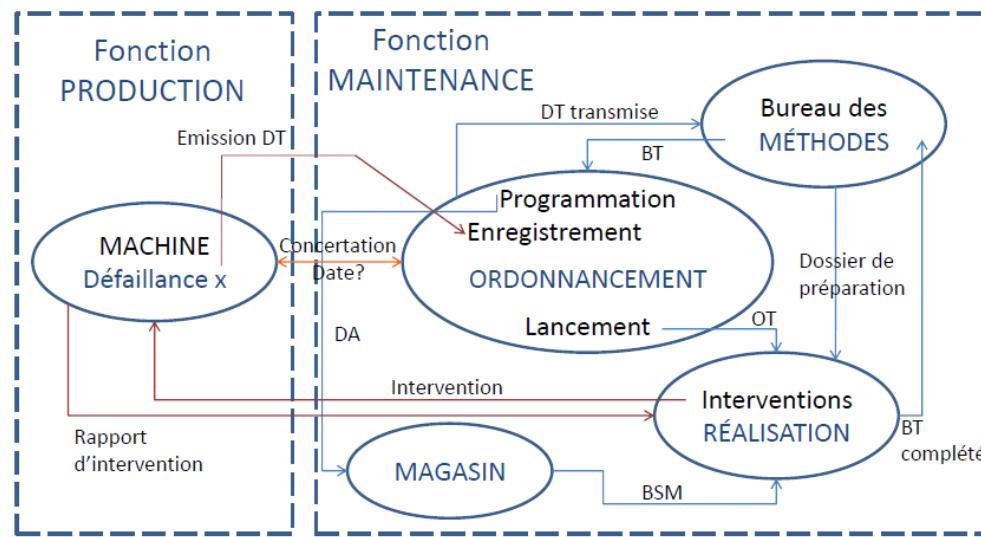
Dans un système de Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO), le **SGBD** joue un rôle central dans l'organisation, le traitement et la conservation de l'information technique et historique liée aux équipements industriels. Son intégration vise à :

- 1. Centraliser l'information** : Tous les ordres de travail, historiques de maintenance, interventions, pièces de rechange et temps d'arrêt sont stockés dans une base unique, facilitant l'analyse et le pilotage ;
- 2. Assurer la cohérence et l'intégrité des données** : Grâce à des modèles relationnels ou orientés objet ;
- 3. Améliorer la traçabilité** des opérations de maintenance ;
- 4. Supporter des outils décisionnels** comme les indicateurs de performance (MTTR, MTBF...).

III.3.3 Rôle des SGBD en GMAO

Les Systèmes de Gestion de Bases de Données (SGBD) jouent un rôle central dans la gestion des informations relatives aux équipements, aux interventions de maintenance et à l'historique des opérations. Leur rôle en GMAO est multiple :

- **Structuration des données** : Les SGBD permettent une organisation structurée des données pour faciliter leur gestion, leur recherche et leur analyse ;
- **Sécurité des données** : Ils assurent la protection des données, garantissant que les informations critiques sur les équipements et les interventions sont sécurisées contre les pertes ou les accès non autorisés ;
- **Cohérence des données** : Ils assurent que les informations restent cohérentes, même en cas de modifications ou de mises à jour simultanées ;
- **Sauvegarde** : Les SGBD gèrent les sauvegardes régulières des données, minimisant le risque de perte de données en cas d'incident. [19][20]



Figuier III.2 Diagramme de relation entre la fonction production et de la maintenance.

III.3.4 Exemple de SGBD utilisés selon l'environnement [21][22]

La GMAO peut être intégrée à différents systèmes en fonction de l'environnement et des besoins spécifiques des entreprises. Voici des exemples de SGBD utilisés dans divers contextes industriels et de maintenance :

- **Industrie lourde :**
 - ❖ **SGBD utilisés** : Oracle, IBM DB2 ;
 - ❖ **Intégration GMAO** : Intégration dans des systèmes comme SAP PM et Maximo.
 - **PME :**
 - ❖ **SGBD utilisés** : Microsoft Access, SQL Server ;
 - ❖ **Intégration GMAO** : Intégration dans des outils comme OptiMaint et Coswin.
 - **Web/Mobile :**
 - ❖ **SGBD utilisés** : MySQL, PostgreSQL ;
 - ❖ **Intégration GMAO** : GMAO basée sur le cloud comme Mobility Work et autres solutions SaaS modernes.

III.3.5 Calculs techniques intégrés à la GMAO

Les indicateurs de fiabilité jouent un rôle essentiel dans l'évaluation des performances des équipements et la gestion des actions de maintenance. Voici les principaux indicateurs et leurs calculs associés.

1. MTBF (Mean Time Between Failures)

$$\text{MTBF} = \frac{\text{Temps de fonctionnement}}{\text{Nombre de pannes}} \text{ (heures)}$$

Le **MTBF** permet de mesurer la fiabilité d'un équipement en calculant le temps moyen entre deux pannes successives.

2. MTTR (Mean Time to Repair)

$$\text{MTTR} = \frac{\text{Temps total de réparation}}{\text{Nombre d'interventions}} \text{ (heures)}$$

Le **MTTR** mesure le temps moyen nécessaire pour réparer un équipement après une panne, et il reflète l'efficacité du processus de réparation.

3. Disponibilité des équipements (%)

La disponibilité des équipements peut être calculée en utilisant le MTBF et le MTTR :

$$D = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \times 100$$

Cette formule permet de calculer la proportion de temps pendant lequel l'équipement est opérationnel par rapport au temps total disponible.

4. Taux de défaillance (λ)

Formule :

$$\lambda = \frac{\text{Nombre de pannes}}{\text{Temps de fonctionnement total}} \text{ (panne/heure)}$$

Le taux de défaillance mesure la fréquence des pannes d'un équipement par unité de temps. Il est souvent exprimé en **pannes/heure** ou **pannes/an**. [23][13]

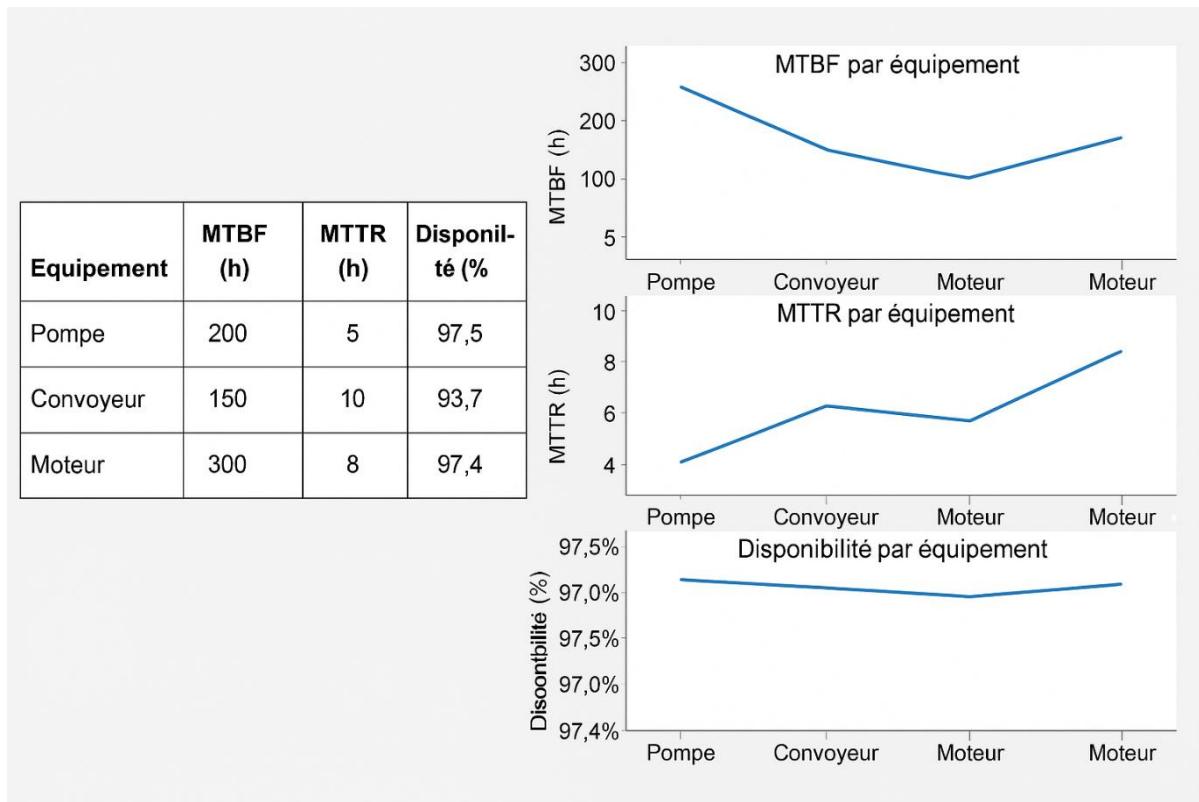


Figure III.3 Exemple de calcul des indicateurs de maintenance.

III.4 Conclusion

Ce chapitre présente une vision globale de la **GMAO** (Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur), considéré comme un outil clé pour rationaliser et optimiser les activités de maintenance. En centralisant les données techniques, en automatisant les processus de planification et en offrant des indicateurs de performance. La GMAO simplifie la gestion des équipements et des interventions.

La conception d'une **base de données adaptée** a été au cœur de cette démarche, servant de fondation pour structurer les informations nécessaires à une maintenance efficace. Cette base permettra de développer, dans le chapitre suivant, un **logiciel GMAO sur mesure**, conçu pour répondre aux besoins spécifiques identifiés et renforcer la gestion proactive des actifs industriels.

Chapitre IV :

Conception et fonctionnement d'un logiciel proposé

Introduction

L'application GMAO (Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur) a été développée pour répondre aux défis rencontrés par les entreprises industrielles dans la gestion de leurs opérations de maintenance, de leurs stocks, de leurs achats et de leurs ressources humaines. L'objectif principal est de centraliser ces processus complexes dans une seule plateforme intuitive, permettant ainsi une gestion plus efficace et une réduction des erreurs humaines.

L'application a été programmée en **Python**, un langage choisi pour sa simplicité, sa puissance et sa large communauté de développeurs. Pour l'interface utilisateur, nous avons utilisé **Tkinter**, une bibliothèque graphique intégrée à Python, qui offre une solution légère et facile à personnaliser. Cette combinaison garantit une application portable et accessible, ne nécessitant pas de dépendances lourdes pour fonctionner sur des systèmes de bureau standards.

La structure de l'application repose sur une **approche modulaire**. Chaque fonctionnalité principale (Maintenance, Stock, Achat, Ressources Humaines) est organisée en un module indépendant. Cette modularité permet une maintenance aisée du code et facilite l'ajout de nouvelles fonctionnalités sans perturber les autres parties de l'application. Les données sont stockées dans des **fichiers JSON**, un format simple et structuré qui assure une persistance des données sans nécessiter une base de données complexe.

L'interface utilisateur a été conçue avec une attention particulière à l'ergonomie. Un thème sombre a été choisi pour réduire la fatigue oculaire lors d'une utilisation prolongée. Les modules sont accessibles via des tuiles cliquables sur l'écran principal, accompagnées d'images illustratives pour une identification rapide. Une barre de notification animée en bas de l'écran informe les utilisateurs des alertes critiques en temps réel, comme les tâches de maintenance en retard ou les seuils de stock dépassés.

Ce chapitre détaille la structure de l'application, les outils utilisés, la base de données, les modules et sous-modules, ainsi que le fonctionnement général de l'application. Des captures d'écran sont intégrées pour illustrer les différentes interfaces et fonctionnalités.

IV.1 Outils Utilisés

L'application GMAO a été développée en utilisant une série d'outils et de technologies qui garantissent sa robustesse, sa portabilité et sa facilité de maintenance. Voici les principaux outils utilisés :

- **Langage de Programmation :** Python a été choisi pour sa simplicité, sa puissance et sa large communauté de développeurs. Python est également un langage interprété, ce qui facilite le débogage et le développement itératif ;
- **IDE (Environnement de Développement Intégré) :** Spyder a été utilisé pour l'écriture et le débogage du code. Spyder est particulièrement adapté aux projets Python grâce à ses fonctionnalités de complétion de code, de débogage avancé et d'intégration avec des bibliothèques scientifiques.
- **Bibliothèques Python :**
 - ❖ Tkinter : Bibliothèque standard pour la création d'interfaces graphiques en Python. Elle a été utilisée pour développer toutes les interfaces utilisateurs de l'application ;
 - ❖ PIL (Pillow) : Pour la gestion des images, notamment le logo et les icônes des modules ;
 - ❖ Json : Pour la manipulation des fichiers JSON qui servent de base de données à l'application ;
 - ❖ Hashlib : Pour le hachage sécurisé des mots de passe des utilisateurs avec l'algorithme SHA-256 ;
 - ❖ Pathlib, os, csv : Pour la gestion des fichiers, des chemins et l'exportation de rapports.
- **Autres Outils :**
 - ❖ Git : Pour le contrôle de version du code source (bien que non explicitement mentionné dans le code, il est recommandé pour tout projet de cette envergure) ;
 - ❖ Virtualenv : Pour isoler les dépendances du projet et garantir la portabilité.

Ces outils ont été sélectionnés pour leur compatibilité, leur légèreté et leur capacité à répondre aux besoins spécifiques de l'application GMAO.

IV.2 Structure de la Base de Données

L'application GMAO n'utilise pas une base de données relationnelle traditionnelle comme MySQL ou PostgreSQL. À la place, elle repose sur des **fichiers JSON** pour la persistance des données. Cette approche simplifie le déploiement et la maintenance, tout en étant adaptée à des volumes de données modérés.

IV.2.1 Fichiers JSON Utilisés

Chaque type de donnée est stocké dans un fichier JSON spécifique, ce qui permet une gestion claire et structurée des informations :

- **users.json** : Contient les informations des utilisateurs, notamment les noms d'utilisateur et les mots de passe hachés ;
- **equipments.json** : Stocke les données sur les équipements, y compris leur ID, nom, type, localisation, statut, et les relevés des capteurs (température, pression, vibration) ;
- **preventive_tasks.json** : Liste les tâches de maintenance préventive planifiées ;
- **corrective_interventions.json** : Enregistre les interventions correctives nécessaires ;
- **documents.json** : Contient les documents techniques liés aux équipements (manuelles, fiches techniques, etc.) ;
- **sensor_data.json** : Stocke les historiques des données des capteurs pour la surveillance ;
- **maintenance_logs.json** : Conserve les logs des actions de maintenance effectuées ;
- **stock.json** : Gère les articles en stock, avec leurs quantités et seuils critiques ;
- **purchase_requests.json** : Suit les demandes d'achat soumises ;
- **suppliers.json** : Informations sur les fournisseurs ;
- **purchase_orders.json** : Détails des commandes d'achat passées ;
- **invoices.json** : Gestion des factures (statut : en attente, payée, etc.) ;
- **demandeurs.json, techniciens.json, superviseurs.json** : Informations sur le personnel impliqué dans les processus de maintenance.

IV.2.2 Avantages et Limites

Avantages

- **Facilité d'utilisation et de maintenance** : L'application est simple à installer et à gérer, grâce à son utilisation de fichiers JSON pour stocker les données, ce qui ne nécessite pas de configuration complexe ;
- **Indépendance des serveurs externes** : Aucun serveur de base de données n'est requis, ce qui rend l'application légère et facile à déployer sur des systèmes de bureau standards ;
- **Sauvegarde et restauration simples** : Les fichiers JSON permettent de sauvegarder et de restaurer les données rapidement, assurant une gestion sécurisée et pratique des informations.

Limites

- **Performance limitée pour de très grands volumes de données :** L'utilisation de fichiers JSON peut ralentir l'application si les données deviennent très volumineuses, mais elle reste adaptée pour des entreprises de taille petite à moyenne ;
- Pas de gestion avancée des transactions ou des accès concurrents (bien que des verrous soient utilisés pour éviter les conflits d'accès).

IV.3 Structure de l'Application

L'application GMAO est structurée de manière modulaire, avec une séparation claire entre l'interface utilisateur et la gestion des données. Elle est composée de deux classes principales et de plusieurs modules indépendants.

IV.3.1 Classes Principales

- **Classe LoginApp :** Gère l'authentification et l'inscription des utilisateurs. Elle constitue le point d'entrée de l'application. Un logo personnalisé est affiché en haut pour renforcer l'identité visuelle ;
- **Classe GMAOApp :** Représente l'interface principale une fois l'utilisateur connecté, offrant un accès aux différents modules via des tuiles cliquables.

IV.3.2 Modules Indépendants

Chaque module est implémenté dans un fichier Python distinct et importé dans le fichier principal :

- **maintenance_module.py :** Gère la maintenance des équipements ;
- **stock_module.py:** Gère les stocks d'articles;
- **purchase_module.py :** Gère les processus d'achat ;
- **ressources_humaines_module.py :** Gère les ressources humaines (demandeurs, techniciens, etc.).

Cette modularité permet une maintenance aisée du code et facilite l'ajout de nouvelles fonctionnalités sans perturber les autres parties de l'application.

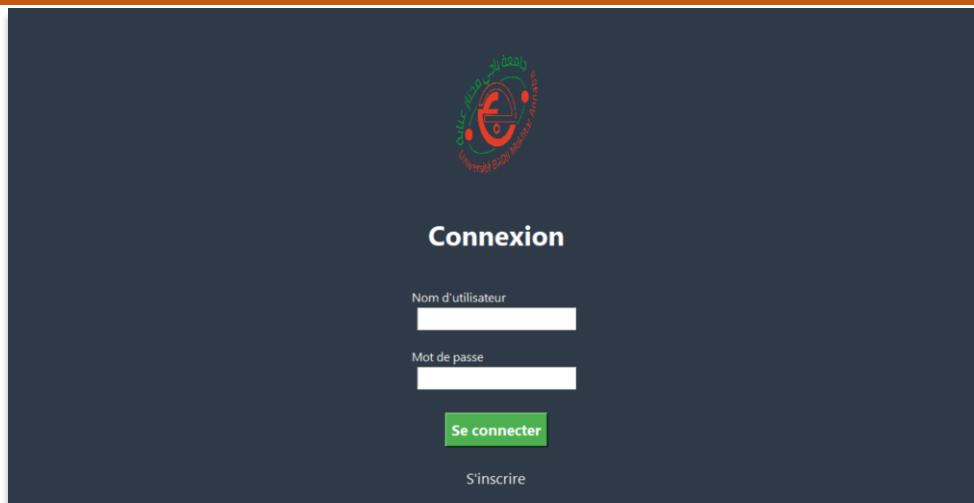


Figure IV.1 L'interface de l'inscription.

IV.4 Fonctionnement de l'Application

IV.4.1 Connexion et Inscription

- L'application démarre par un écran de connexion où l'utilisateur doit saisir son nom d'utilisateur et son mot de passe via l'interface LoginApp ;
- Les mots de passe sont hachés avec **SHA-256** pour garantir la sécurité ;
- Une option d'inscription permet d'ajouter de nouveaux utilisateurs directement depuis l'interface (nom d'utilisateur, mot de passe, rôle) ;
- Une fois connecté, l'utilisateur est redirigé vers l'interface principale GMAOApp.

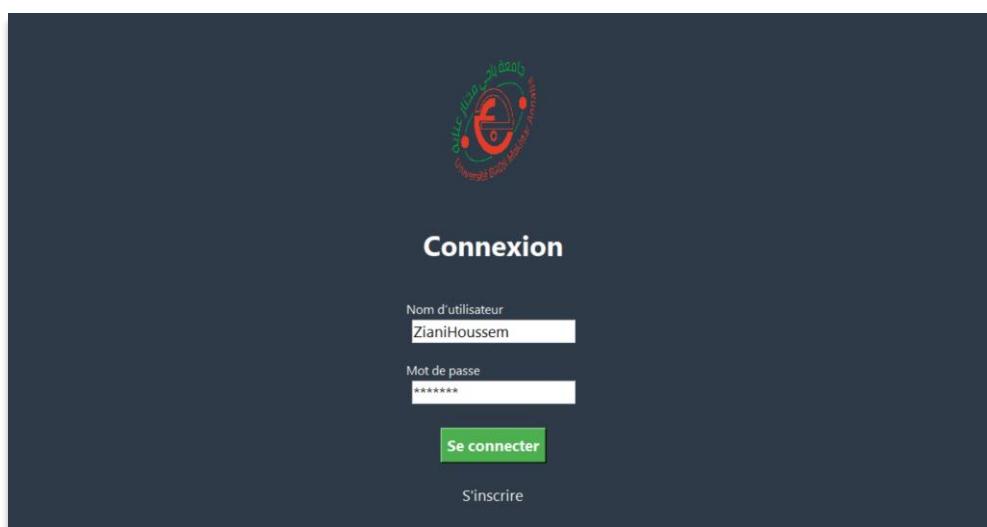


Figure IV.2 L'opération de l'inscription.

IV.4.2 Interface Principale

- L'interface principale affiche les quatre modules sous forme de tuiles cliquables : **Maintenance**, **Stock**, **Achat**, et **Ressources Humaines** ;
- Chaque tuile est accompagnée d'une image illustrative pour une identification rapide ;
- Une **barre de notification animée** en bas de l'écran affiche des messages défilants pour les alertes en temps réel (ex. : "Tâche de maintenance en retard").



Figure IV.3 L'interface Principale de logiciel.

IV.4.3 Navigation

•Boutons de Navigation :

- ❖ **Retour** : Permet de revenir à l'écran précédent (désactivé sur l'écran principal) ;
- ❖ **Home** : Ramène à l'interface principale depuis n'importe quel module.

L'utilisateur peut cliquer sur une tuile pour accéder à un module, puis naviguer entre les sous-modules via des interfaces dédiées.



Figure IV.4 Les Boutons Home et Retour.

IV.5 Modules et Sous-modules

IV.5.1 Module Maintenance

Le module Maintenance est le cœur de l'application, conçu pour gérer tous les aspects liés à la maintenance des équipements industriels. Il permet de suivre les équipements, de planifier et d'exécuter des tâches de maintenance, de surveiller les performances des machines, et de gérer la documentation technique. Chaque sous-module est interconnecté pour assurer une gestion fluide et intégrée.

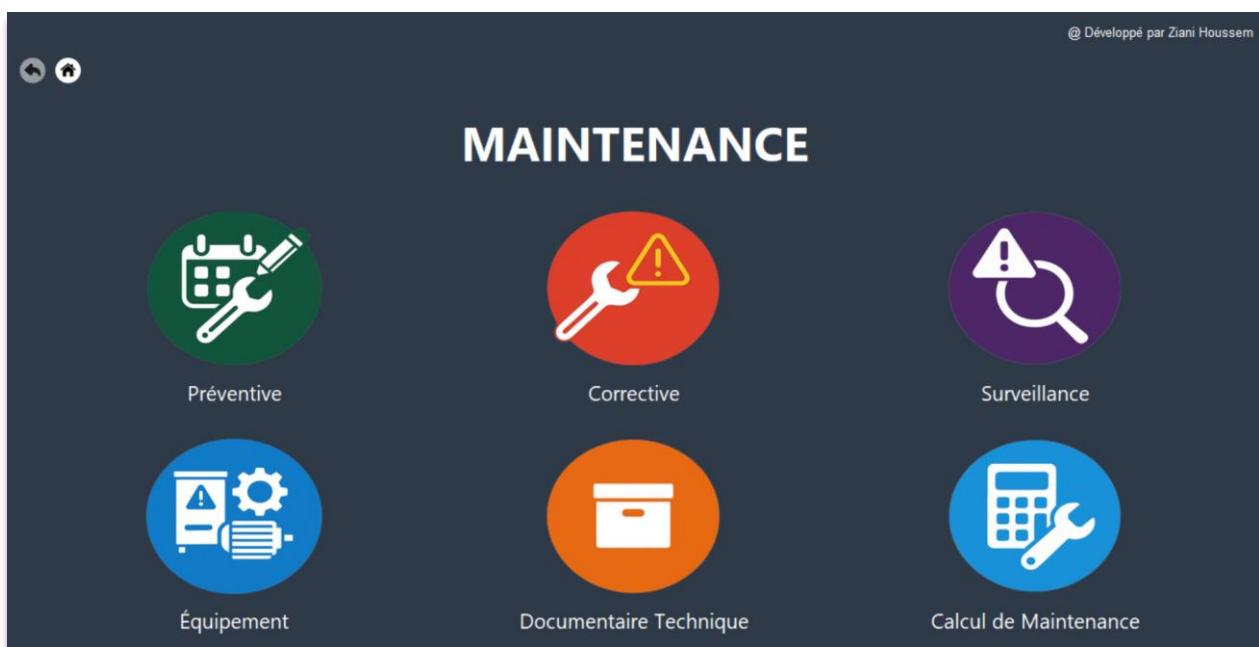


Figure IV.5 L'interface du module Maintenance montrant les tuiles des sous-modules.

IV.5.1.1 Gestion des Équipements

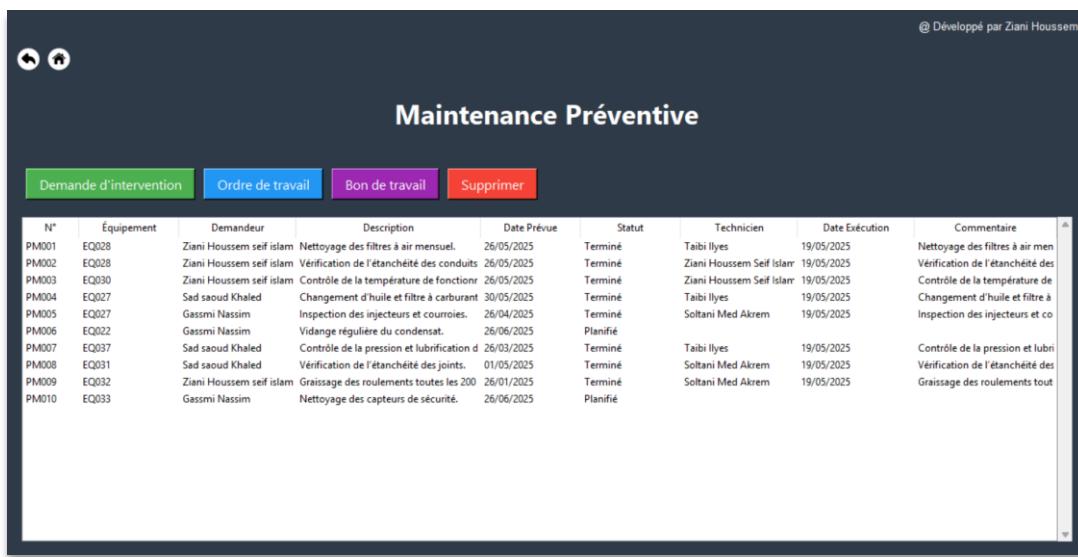
- Description :** Ce sous-module permet de gérer l'inventaire complet des équipements industriels. Chaque équipement est identifié par un ID unique et associé à des informations détaillées telles que le nom, le type, la localisation, le statut, et les paramètres de surveillance. Il sert de base pour les autres sous-modules du module.
- Fonctionnalités :**
 - ❖ Crédation d'un nouvel équipement avec un formulaire détaillé incluant les champs pour le type, la marque, le numéro de série, et la date d'achat ;
 - ❖ Mise à jour des informations pour refléter les changements (ex. : changement de localisation) ;
 - ❖ Suppression d'équipements obsolètes après confirmation pour éviter les erreurs ;
 - ❖ Recherche rapide par nom, ID, ou type pour localiser un équipement spécifique.
- Boutons :**
 - ❖ **Ajouter Équipement** : Ouvre un formulaire pour saisir les détails d'un nouvel équipement ;
 - ❖ **Modifier** : Permet de mettre à jour les informations de l'équipement sélectionné ;
 - ❖ **Supprimer** : Supprime l'équipement après une boîte de dialogue de confirmation ;
 - ❖ **Rechercher** : Filtre la liste des équipements en fonction d'un mot-clé entré dans un champ de recherche.

ID	Nom de l'équipement	Type	Localisation	Statut
EQ022	Secheur	Air	C	Actif
EQ027	Générateur diesel	Diesel	Unite 01	Actif
EQ028	Compresseur d'air 1	Air	Unite 01	Actif
EQ029	Compresseur d'air 2	Air	Unite 02	Actif
EQ030	Compresseur d'air 3	Air	Unite 03	Actif
EQ031	Pompe centrifuge	Hydraulique	Unite 01	Actif
EQ032	Réservoir sous pression	Pneumatique	Unite 02	Actif
EQ033	Convoyeur à bande	Électrique	Unite 02	Actif
EQ034	Moteur électrique haute puissance	Électrique	Unite 01	Actif
EQ035	Vérin hydraulique	Pneumatique	Unite 01	Actif
EQ036	Groupe hydraulique	Pneumatique	Unite 01	Actif
EQ037	Vanne de régulation pneumatique	Air	Unite 02	Actif
EQ038	Système de nettoyage par air comprimé	Pneumatique	Unite 03	Actif

Figure IV.6 Tableau des équipements.

IV.5.1.2 Maintenance Préventive

- Description :** Ce sous-module planifie et suit les tâches de maintenance préventive, qui visent à prévenir les pannes en effectuant des interventions régulières. Les tâches sont associées à des équipements spécifiques et incluent des informations comme la fréquence et les ressources nécessaires.
- Fonctionnalités :**
 - ❖ Création de tâches avec des détails tels que la description (ex. : "Vérifier les roulements"), la date prévue, et l'équipement concerné ;
 - ❖ Suivi du statut des tâches (planifiée, en cours, terminée) ;
 - ❖ Notification automatique des tâches en retard via la barre de notification ;
 - ❖ Association d'un technicien à la tâche, en lien avec le sous-module Ressources Humaines.
- Boutons :**
 - ❖ **Nouvelle Intervention** : Ouvre un formulaire pour créer une tâche préventive ;
 - ❖ **Modifier** : Permet de modifier les détails d'une tâche (ex. : changer la date prévue) ;
 - ❖ **Supprimer** : Supprime une tâche après confirmation ;
 - ❖ **Exécuter** : Marque la tâche comme terminée, en enregistrant la date et les commentaires du technicien.



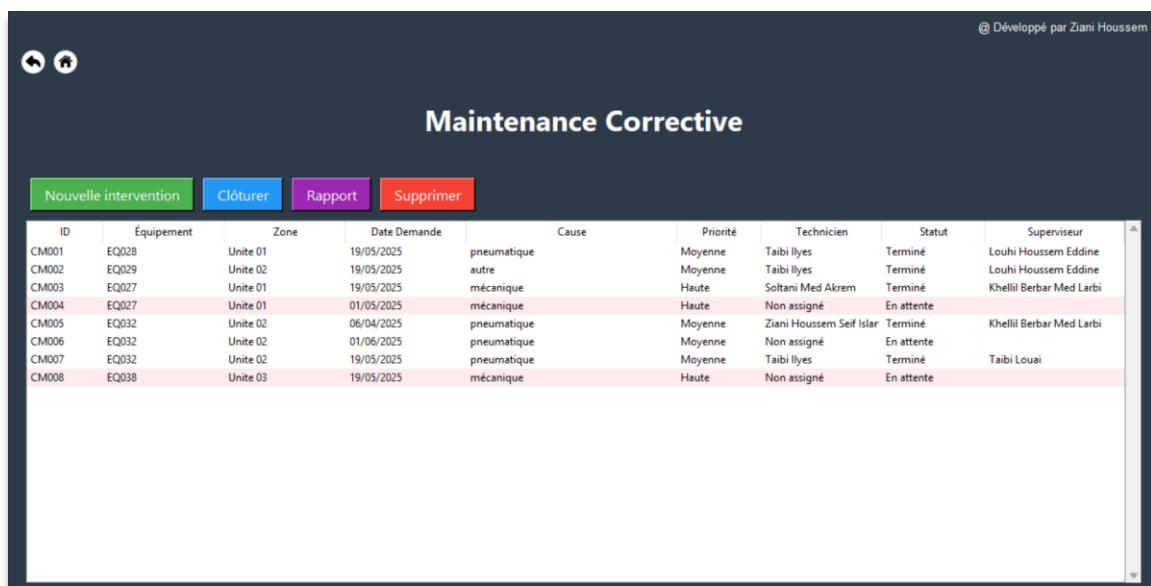
The screenshot shows a dark-themed application window titled "Maintenance Préventive". At the top, there are four buttons: "Demande d'intervention" (green), "Ordre de travail" (blue), "Bon de travail" (purple), and "Supprimer" (red). Below these buttons is a table listing ten preventive maintenance tasks. The columns are: N° (ID), Équipement (Equipment), Demandeur (Requester), Description (Description), Date Prévu (Planned Date), Statut (Status), Technicien (Technician), Date Exécution (Execution Date), and Commentaire (Commentary). The tasks are as follows:

N°	Équipement	Demandeur	Description	Date Prévu	Statut	Technicien	Date Exécution	Commentaire
PM001	EQ028	Ziani Houssem seif islam	Nettoyage des filtres à air mensuel.	26/05/2025	Terminé	Taibi Ilyes	19/05/2025	Nettoyage des filtres à air men
PM002	EQ028	Ziani Houssem seif islam	Vérification de l'étanchéité des conduits	26/05/2025	Terminé	Ziani Houssem Seif Islam	19/05/2025	Vérification de l'étanchéité des
PM003	EQ030	Ziani Houssem seif islam	Contrôle de la température de fonction	26/05/2025	Terminé	Ziani Houssem Seif Islam	19/05/2025	Contrôle de la température de
PM004	EQ027	Sad saoud Khalid	Changement d'huile et filtre à carburant	30/05/2025	Terminé	Taibi Ilyes	19/05/2025	Changement d'huile et filtre à
PM005	EQ027	Gassmi Nassim	Inspection des injecteurs et courroies.	26/04/2025	Terminé	Soltani Med Akrem	19/05/2025	Inspection des injecteurs et co
PM006	EQ022	Gassmi Nassim	Vidange régulière du condensat.	26/06/2025	Planifié			
PM007	EQ037	Sad saoud Khalid	Contrôle de la pression et lubrification d	26/03/2025	Terminé	Taibi Ilyes	19/05/2025	Contrôle de la pression et lubri
PM008	EQ031	Sad saoud Khalid	Vérification de l'étanchéité des joints.	01/05/2025	Terminé	Soltani Med Akrem	19/05/2025	Vérification de l'étanchéité des
PM009	EQ032	Ziani Houssem seif islam	Graissage des roulements toutes les 200	26/01/2025	Terminé	Soltani Med Akrem	19/05/2025	Graissage des roulements tout
PM010	EQ033	Gassmi Nassim	Nettoyage des capteurs de sécurité.	26/06/2025	Planifié			

Figure IV.7 Liste des tâches préventives.

IV.5.1.3 Maintenance Corrective

- Description :** Ce sous-module gère les interventions correctives, qui sont des réparations effectuées en réponse à une panne ou un dysfonctionnement. Il est étroitement lié au sous-module Surveillance, car les alertes de capteurs peuvent déclencher des interventions correctives.
- Fonctionnalités :**
 - Enregistrement des interventions avec des détails comme la cause de la panne, les pièces utilisées, et le temps nécessaire ;
 - Suivi de l'historique des interventions pour chaque équipement ;
 - Génération de rapports sur les pannes fréquentes pour identifier les équipements problématiques.
- Boutons :**
 - Nouvelle Intervention** : Crée une intervention corrective ;
 - Modifier** : Met à jour les détails de l'intervention ;
 - Supprimer** : Supprime une intervention ;
 - Terminer** : Marque l'intervention comme terminée, en enregistrant les détails dans maintenance_logs.json.



The screenshot shows a web-based application titled "Maintenance Corrective". At the top, there is a navigation bar with four buttons: "Nouvelle intervention" (New Intervention) in green, "Clôturer" (Close) in blue, "Rapport" (Report) in purple, and "Supprimer" (Delete) in red. Below the navigation bar is a table displaying a list of corrective interventions. The table has columns for ID, Équipement (Equipment), Zone (Zone), Date Demande (Request Date), Cause (Cause), Priorité (Priority), Technicien (Technician), Statut (Status), and Superviseur (Supervisor). The data in the table is as follows:

ID	Équipement	Zone	Date Demande	Cause	Priorité	Technicien	Statut	Superviseur
CM001	EQ028	Unité 01	19/05/2025	pneumatique	Moyenne	Taibi Ilyes	Terminé	Loui Houssem Eddine
CM002	EQ029	Unité 02	19/05/2025	autre	Moyenne	Taibi Ilyes	Terminé	Loui Houssem Eddine
CM003	EQ027	Unité 01	19/05/2025	mécanique	Haute	Soltani Med Akrem	Terminé	Khellil Berbar Med Larbi
CM004	EQ027	Unité 01	01/05/2025	mécanique	Haute	Non assigné	En attente	
CM005	EQ032	Unité 02	06/04/2025	pneumatique	Moyenne	Ziani Houssem Seif Islar	Terminé	Khellil Berbar Med Larbi
CM006	EQ032	Unité 02	01/06/2025	pneumatique	Moyenne	Non assigné	En attente	
CM007	EQ032	Unité 02	19/05/2025	pneumatique	Moyenne	Taibi Ilyes	Terminé	Taibi Louai
CM008	EQ038	Unité 03	19/05/2025	mécanique	Haute	Non assigné	En attente	

Figure IV.8 Liste des interventions correctives.

IV.5.1.4 Surveillance

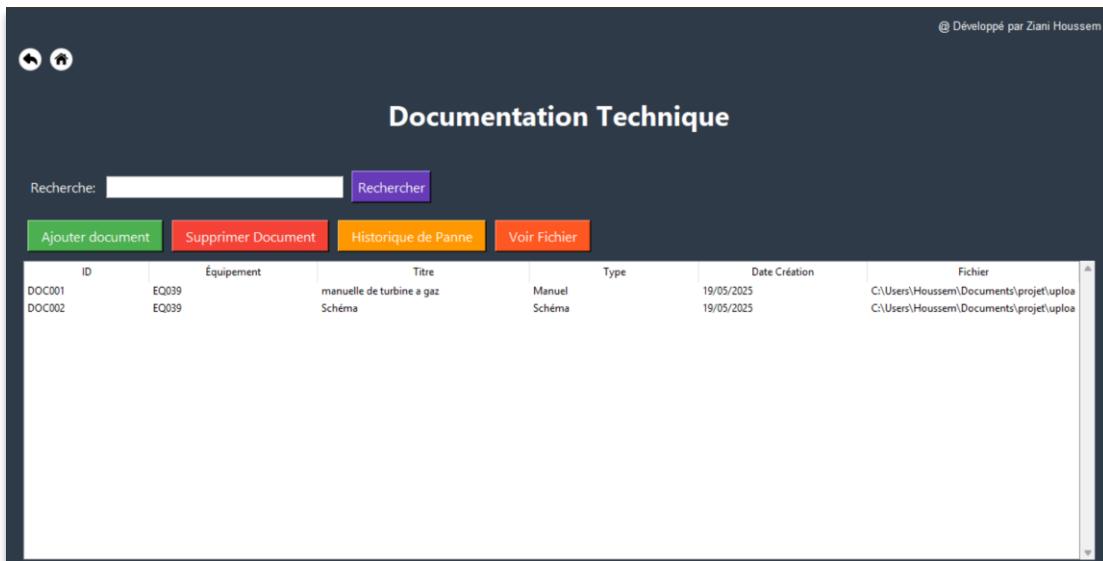
- **Description :** Ce sous-module surveille en temps réel les données des capteurs installés sur les équipements (température, pression, vibration). Il interactif et génère des alertes si les seuils définis sont dépassés.
- **Fonctionnalités :**
 - ❖ Affichage des données en temps réel sous forme de courbes ou de jauge ;
 - ❖ Configuration des seuils d'alerte pour chaque capteur (ex. : température max. 80°C) ;
 - ❖ Historique des données pour analyser les tendances (ex. : augmentation progressive de la température) ;
 - ❖ Intégration avec le sous-module Maintenance Corrective pour déclencher des interventions en cas d'alerte.
- **Boutons :**
 - ❖ **Rafraîchir** : Met à jour les données des capteurs en temps réel ;
 - ❖ **Définir Seuils** : Ouvre un formulaire pour configurer les limites d'alerte.

The screenshot shows a dark-themed web application for equipment monitoring. At the top, there are two circular icons (one with a gear, one with a house). Below them is the title "Surveillance des Équipements". On the left, there's a dropdown menu labeled "Équipement: EQ028 - Compresseur". To its right are three input fields: "Seuil Température (°C): 53.0", "Seuil Pression (bar): 3.7", and "Seuil Vibration (mm/s): 8.4". Below these is a blue button labeled "Enregistrer Seuils". In the center, there's a summary of current sensor values: "Température: 83.0°C (Seuil: 53.0°C)", "Pression: 6.8 bar (Seuil: 3.7 bar)", and "Vibration: -6.2 mm/s (Seuil: 8.4 mm/s)". A red warning message at the bottom states "Température: 83.0°C > 53.0°C; Pression: 6.8 bar > 3.7 bar". In the top right corner, there's a small note "@ Développé par Ziani Houssem".

Figure IV.9 Les mesures capturée avec les seuilles.

IV.5.1.5 Documentation Technique

- **Description :** Ce sous-module gère les documents techniques associés aux équipements, tels que les manuels d'utilisation, les fiches techniques, ou les certificats de conformité. Il permet de centraliser la documentation pour un accès rapide par les techniciens.
- **Fonctionnalités :**
 - ❖ Téléchargement de fichiers (PDF, images, etc.) liés à un équipement spécifique ;
 - ❖ Visualisation des documents directement depuis l'interface ;
 - ❖ Organisation des documents par équipement pour une recherche facile.
- **Boutons :**
 - ❖ **Ajouter Document** : Permet de télécharger un nouveau fichier ;
 - ❖ **Ouvrir** : Ouvre le document sélectionné dans une visionneuse externe ;
 - ❖ **Supprimer** : Supprime un document après confirmation.



The screenshot shows a web-based application titled "Documentation Technique". At the top, there are two circular icons, a search bar with placeholder "Recherche:", and a purple "Rechercher" button. Below the search bar are four buttons: "Ajouter document" (green), "Supprimer Document" (red), "Historique de Panne" (orange), and "Voir Fichier" (yellow). A copyright notice "@ Développé par Ziani Houssem" is in the top right corner. The main content area displays a table with two rows of data:

ID	Équipement	Titre	Type	Date Création	Fichier
DOC001	EQ039	manuelle de turbine a gaz	Manuel	19/05/2025	C:\Users\Houssem\Documents\projet\upload\DOC001.pdf
DOC002	EQ039	Schéma	Schéma	19/05/2025	C:\Users\Houssem\Documents\projet\upload\DOC002.pdf

Figure IV.10 Liste des documents techniques.

IV.5.1.6 Calculs de Maintenance

- **Description :** Ce sous-module analyse les données de maintenance pour produire des rapports sur les performances, les coûts, et les temps d'arrêt. Il aide à identifier les opportunités d'optimisation (ex. : remplacement d'un équipement fréquemment en panne).
- **Fonctionnalités :**
 - ❖ Génération de rapports sur les coûts totaux de maintenance (pièces, main-d'œuvre) ;
 - ❖ Analyse des temps d'arrêt pour chaque équipement ;
 - ❖ Exportation des rapports en CSV ou PDF pour partage avec la direction.
- **Boutons :**
 - ❖ **Calculer** : Pour afficher les résultats des calculs.

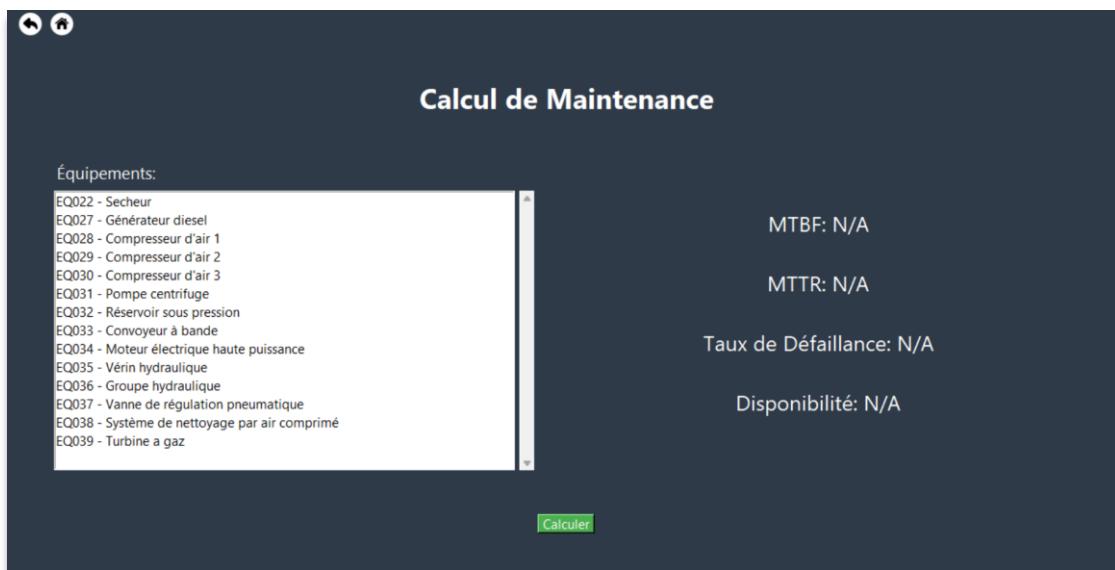


Figure IV.11 Calculs maintenance.

IV.5.2 Module Stock

Le module Stock gère l'inventaire des pièces détachées et des consommables nécessaires à la maintenance. Il assure que les articles sont disponibles en quantités suffisantes et génère des alertes pour éviter les ruptures de stock.

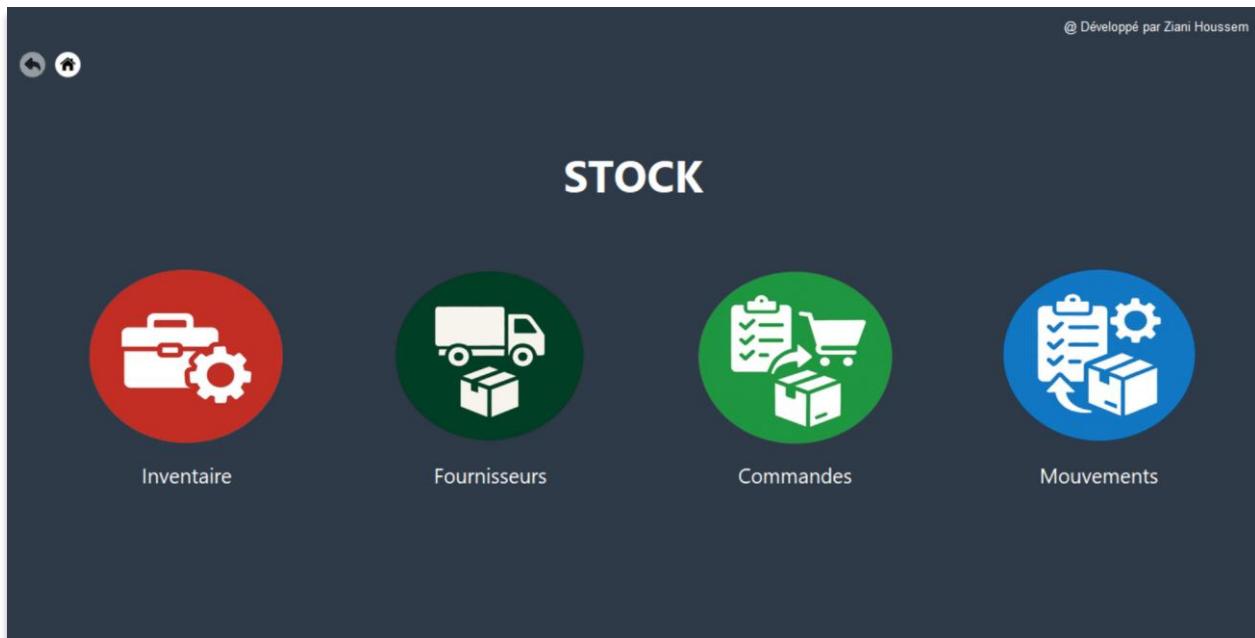


Figure IV.12 L'interface du module Stock.

IV.5.2.1 Gestion des Articles

- Description :** Ce sous-module permet de gérer l'inventaire des articles, tels que les pièces détachées (joints, filtres), les outils, et les consommables (huile, lubrifiants). Chaque article est identifié par un code unique, une désignation, une quantité en stock, et un seuil critique.
- Fonctionnalités :**
 - ❖ Ajout d'un nouvel article avec des détails comme la référence, le fournisseur, et le prix unitaire ;
 - ❖ Mise à jour des quantités et des seuils critiques ;
 - ❖ Recherche par code ou désignation pour localiser un article ;
 - ❖ Génération d'alertes lorsque la quantité atteint le seuil critique, en lien avec le module Achat.
- Boutons :**
 - ❖ **Ajouter Article** : Ouvre un formulaire pour un nouvel article ;
 - ❖ **Modifier** : Met à jour les détails de l'article sélectionné ;
 - ❖ **Supprimer** : Supprime un article ;
 - ❖ **Rechercher** : Filtre les articles par mot-clé.

The screenshot shows a user interface for managing an inventory. At the top, there are three buttons: "Ajouter article" (green), "Modifier" (blue), and "Supprimer" (red). Below these buttons is a table with the following data:

Référence	Désignation	Catégorie	Quantité	Seuil d'alerte	Prix unitaire
ART0002	Engrenage 100mm	Mécanique	14	10	22,75 €
ART0003	Roulement à billes	Mécanique	9	10	8,90 €
ART0004	Filtre à huile	Filtration	25	10	12,30 €
ART0005	Filtre à air	Filtration	4	2	9,25 €
ART0006	Courroie 200mm	Transmission	7	9	18,00 €
ART0007	Joint d'étanchéité	Pneumatique	10	7	20,00 €
ART0008	Piston compresseur	Mécanique	4	2	35,20 €
ART0009	Aube de turbine	Mécanique	10	5	42,75 €
ART0010	Roulement turbine	Mécanique	7	4	28,60 €
ART0011	Joint turbine haute pression	Pneumatique	9	3	15,80 €
ART0012	Thermocouple	Électrique	12	6	11,40 €
ART0013	Filtre à eau	Filtration	8	4	14,40 €
ART0014	Poulie 150mm	Transmission	5	3	32,00 €
ART0015	Capteur de température	Électrique	7	4	27,30 €

Figure IV.13 Liste des articles.

IV.5.2.2 Mouvements de Stock

- Description :** Ce sous-module enregistre les entrées et sorties de stock, permettant de suivre l'historique des mouvements pour chaque article. Il est essentiel pour maintenir un inventaire précis.
- Fonctionnalités :**
 - Enregistrement des entrées (ex. : réception d'une commande) et des sorties (ex. : utilisation pour une réparation) ;
 - Consultation de l'historique des mouvements pour un article spécifique ;
 - Vérification automatique des quantités pour éviter les sorties excessives.
- Boutons :**
 - Entrée de Stock** : Ajoute une quantité à l'article sélectionné ;
 - Sortie de Stock** : Retire une quantité, avec validation pour éviter les erreurs ;
 - Historique** : Affiche l'historique des mouvements pour un article.

ID	Date	Article	Type	Quantité	Utilisateur	Référence
MVT0011	01/01/2025	Engrenage 100mm	Sortie	1	Taibi Ilyes	REF-20250519-0009
MVT0012	04/02/2025	Roulement à billes	Entrée	10	Soltani Med Akrem	REF-20250519-0010
MVT0015	10/04/2025	Joint d'étanchéité	Sortie	6	Soltani Med Akrem	REF-20250519-0013
MVT0016	28/04/2025	Filtre à huile	Entrée	10	Soltani Med Akrem	REF-20250519-0014
MVT0017	29/04/2025	Filtre à huile	Entrée	5	Taibi Ilyes	REF-20250519-0015
MVT0018	30/04/2025	Aube de turbine	Sortie	1	Taibi Ilyes	REF-20250519-0016
MVT0019	31/04/2025	Roulement turbine	Sortie	1	Taibi Ilyes	REF-20250519-0017
MVT0020	02/05/2025	Joint turbine haute pression	Entrée	5	Ziani Houssem Seif Islam	REF-20250519-0018
MVT0021	05/05/2025	Thermocouple	Entrée	2	Soltani Med Akrem	REF-20250519-0019
MVT0022	08/05/2025	Poulie 150mm	Entrée	4	Soltani Med Akrem	REF-20250519-0020
MVT0023	10/05/2025	Capteur de température	Sortie	1	Ziani Houssem Seif Islam	REF-20250519-0021

Figure IV.14 Des mouvement de Stock.

IV.5.3 Module Achat

Le module Achat gère le processus d'approvisionnement, de la demande initiale à la réception des factures. Il est intégré avec le module Stock pour automatiser les commandes lorsque les seuils critiques sont atteints.



Figure IV.15 L'interface du module Achat.

IV.5.3.1 Demandes d'Achat

- **Description :** Ce sous-module permet de créer et de suivre les demandes d'achat pour les articles nécessaires. Les demandes sont soumises par les utilisateurs (ex. : magasiniers) et doivent être approuvées par un superviseur.
- **Fonctionnalités :**
 - ❖ Création d'une demande avec des détails comme l'article, la quantité, et l'urgence ;
 - ❖ Suivi du statut (en attente, approuvée, rejetée) ;
 - ❖ Notification aux superviseurs pour approbation rapide.
- **Boutons :**
 - ❖ **Nouvelle Demande** : Crée une nouvelle demande d'achat ;
 - ❖ **Approuver** : Valide la demande pour passer à la commande ;
 - ❖ **Rejeter** : Refuse la demande avec un commentaire.

Figure IV.16 Liste des demandes.

IV.5.3.2 Fournisseurs

- **Description** : Ce sous-module gère les informations sur les fournisseurs, y compris leurs coordonnées, les articles fournis, et les conditions de paiement.
- **Fonctionnalités** :
 - ❖ Ajout d'un nouveau fournisseur avec des détails comme le nom, l'adresse, et le numéro de téléphone ;
 - ❖ Association des fournisseurs aux articles dans le module Stock ;
 - ❖ Recherche rapide par nom ou article fourni.
- **Boutons** :
 - ❖ **Ajouter Fournisseur** : Crée un nouveau profil de fournisseur ;
 - ❖ **Modifier** : Met à jour les informations du fournisseur ;
 - ❖ **Supprimer** : Supprime un fournisseur.

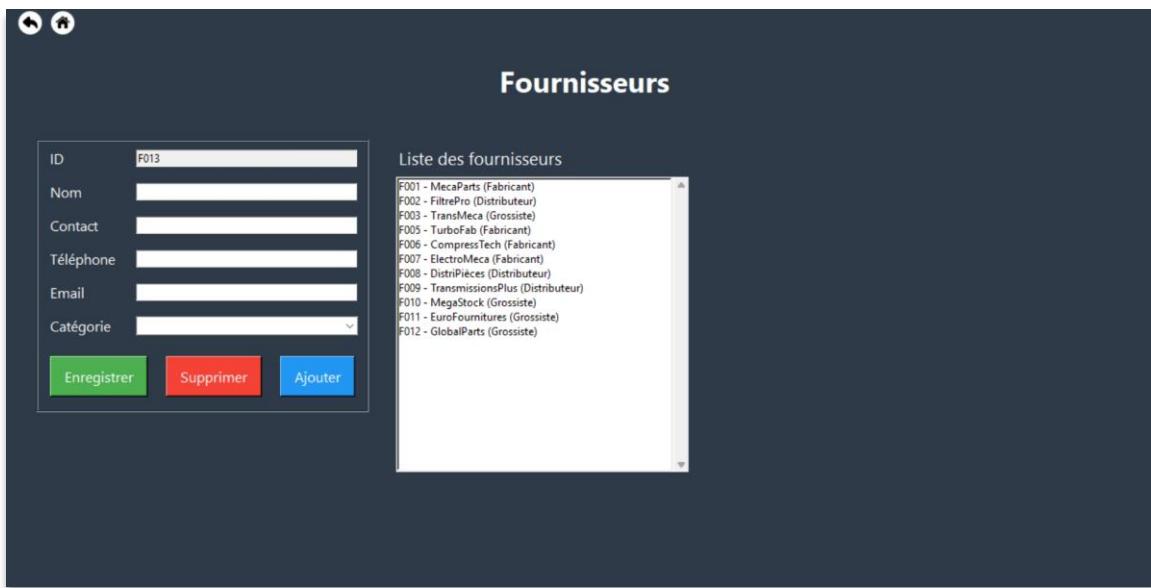


Figure IV.17 Liste des fournisseurs.

IV.5.3.3 Commandes

- **Description :** Ce sous-module suit les commandes passées auprès des fournisseurs, de la création à la réception.
- **Fonctionnalités :**
 - ❖ Création d'une commande basée sur une demande d'achat approuvée ;
 - ❖ Suivi du statut (en cours, livrée, annulée) ;
 - ❖ Mise à jour automatique du stock à la réception de la commande.
- **Boutons :**
 - ❖ **Nouvelle Commande** : Crée une commande à partir d'une demande approuvée ;
 - ❖ **Valider** : Confirme la réception de la commande ;
 - ❖ **Annuler** : Annule la commande.

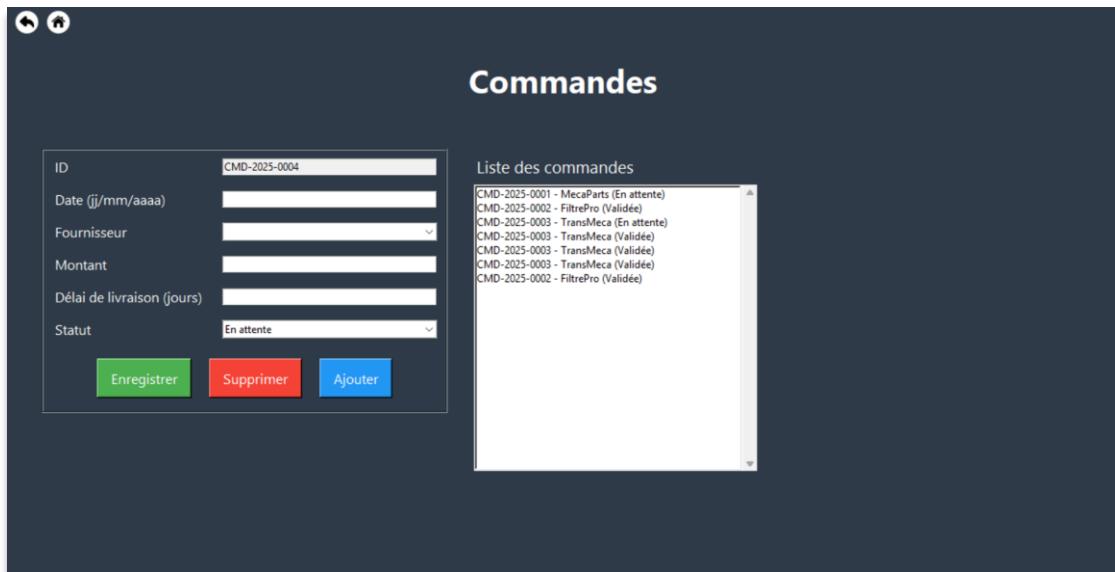


Figure IV.18 Liste des commandes.

IV.5.3.4 Factures

- **Description :** Ce sous-module gère les factures reçues des fournisseurs, permettant de suivre les paiements et d'archiver les documents.
- **Fonctionnalités :**
 - ❖ Enregistrement des factures avec des détails comme le montant, la date d'échéance, et le statut ;
 - ❖ Marquage des factures comme payées ou archivées ;
 - ❖ Recherche par numéro de facture ou fournisseur.
- **Boutons :**
 - ❖ **Ajouter Facture** : Enregistre une nouvelle facture ;
 - ❖ **Payer** : Marque la facture comme payée ;
 - ❖ **Archiver** : Archive la facture.

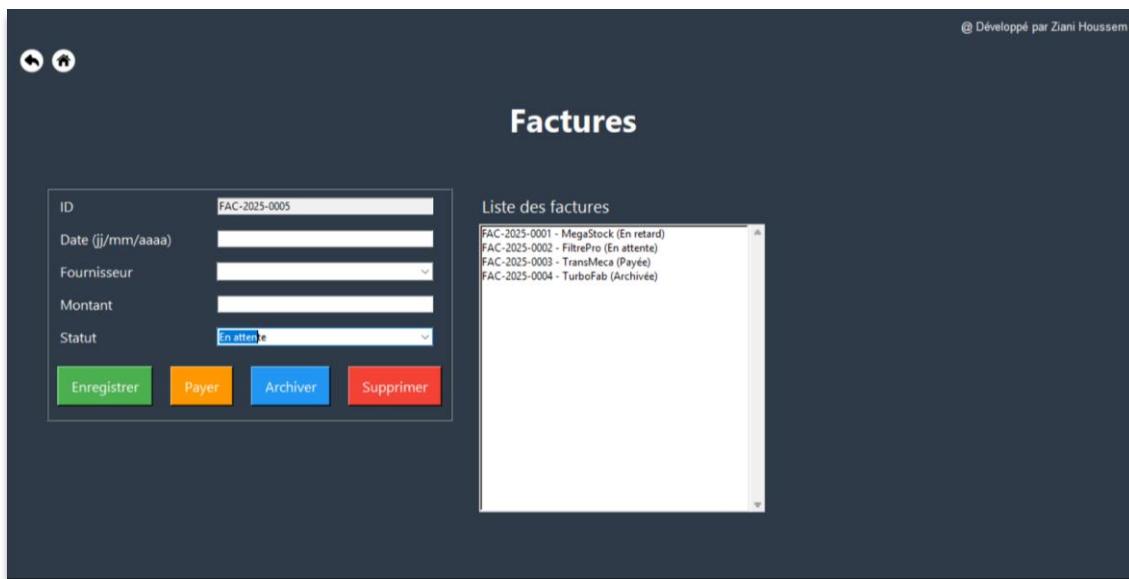


Figure IV.19 Liste des factures.

IV.5.4 Module Ressources Humaines

Le module Ressources Humaines gère les employés impliqués dans la maintenance, en suivant leurs rôles, compétences, et responsabilités.



Figure IV.20 L'interface du module RH.

IV.5.4.1 Demandeurs

- **Description** : Ce sous-module gère les employés qui soumettent des demandes (ex. : demandes d'achat ou d'intervention). Chaque demandeur est identifié par un code unique (ex. : DEM-001).
- **Fonctionnalités** :
 - ❖ Ajout d'un demandeur avec des détails comme le nom, le poste, et le département ;
 - ❖ Association des demandeurs aux demandes dans le module Achat ;
 - ❖ Recherche par code ou nom.
- **Boutons** :
 - ❖ **Ajouter Demandeur** : Crée un nouveau profil ;
 - ❖ **Modifier** : Met à jour les informations ;
 - ❖ **Supprimer** : Supprime le demandeur.

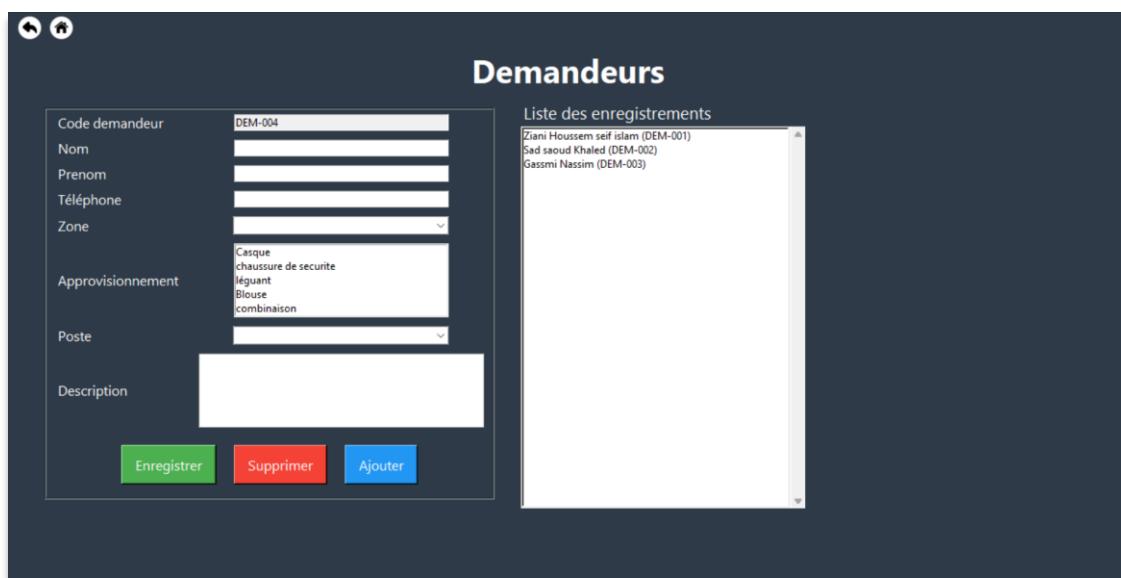


Figure IV.21 Liste des demandeurs.

IV.5.4.2 Superviseurs

- **Description :** Ce sous-module gère les superviseurs responsables de l'approbation des demandes et de la supervision des tâches de maintenance.
- **Fonctionnalités :**
 - ❖ Enregistrement des superviseurs avec leurs domaines de responsabilité ;
 - ❖ Consultation de l'historique des approbations ;
 - ❖ Intégration avec les modules Achat et Maintenance pour assigner des tâches.
- **Boutons :**
 - ❖ **Ajouter Superviseur** : Crée un nouveau profil ;
 - ❖ **Modifier** : Met à jour les informations ;
 - ❖ **Supprimer** : Supprime le superviseur.

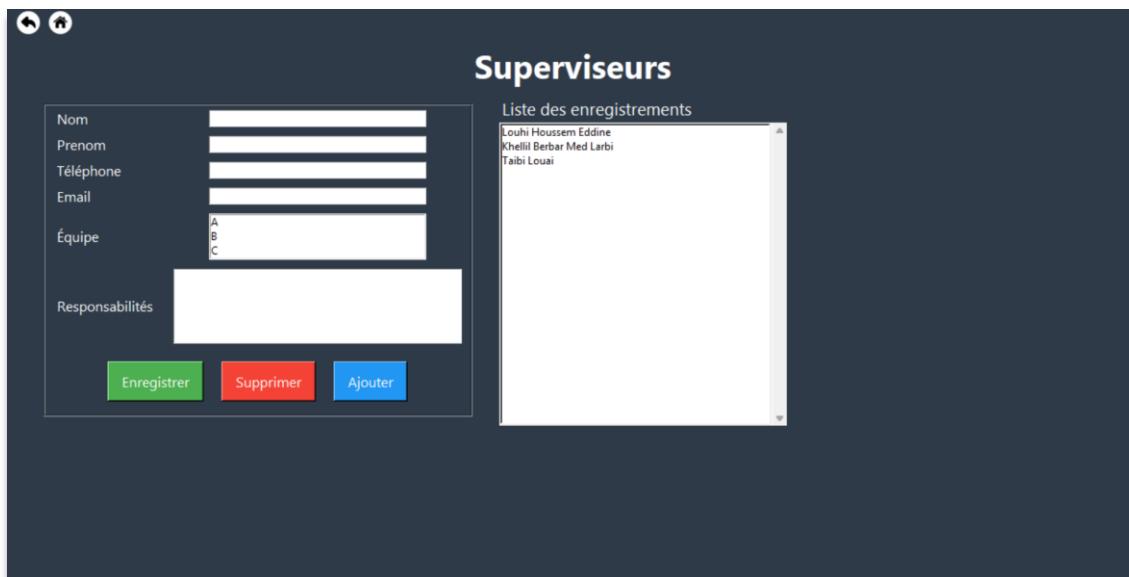


Figure IV.22 Liste des superviseurs.

IV.5.4.3 Techniciens

- **Description :** Ce sous-module gère les techniciens qui effectuent les tâches de maintenance, avec un suivi de leurs compétences (ex. : mécanique, électricité).
- **Fonctionnalités :**
 - ❖ Ajout d'un technicien avec des détails comme les certifications et les spécialisations ;
 - ❖ Assignation de tâches de maintenance préventive ou corrective ;
 - ❖ Consultation de l'historique des interventions par technicien.
- **Boutons :**
 - ❖ **Ajouter Technicien** : Crée un nouveau profil ;
 - ❖ **Modifier** : Met à jour les informations ;
 - ❖ **Supprimer** : Supprime le technicien.

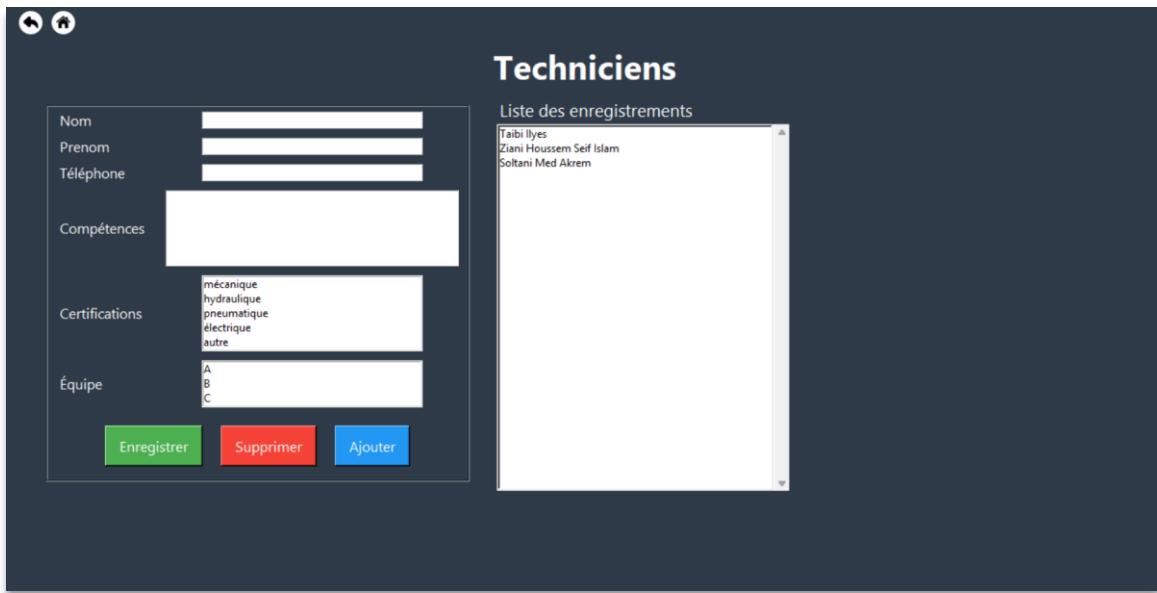


Figure IV.23 Liste des techniciens.

IV.5.4.4 Informaticiens

- **Description** : Ce sous-module gère les informaticiens responsables de la maintenance des systèmes informatiques ou des logiciels liés aux équipements.
- **Fonctionnalités** :
 - ❖ Enregistrement des informaticiens avec leurs spécialisations (ex. : réseaux, automatisation) ;
 - ❖ Assignation de tâches spécifiques ;
 - ❖ Recherche par spécialisation pour trouver le bon profil.
- **Exemple d'utilisation** : Un informaticien (INF-001) met à jour le logiciel de surveillance des capteurs pour la pompe "PMP-001". Son profil indique une expertise en automatisation.
- **Boutons** :
 - ❖ **Ajouter Informaticien** : Crée un nouveau profil ;
 - ❖ **Modifier** : Met à jour les informations ;
 - ❖ **Supprimer** : Supprime l'informaticien.

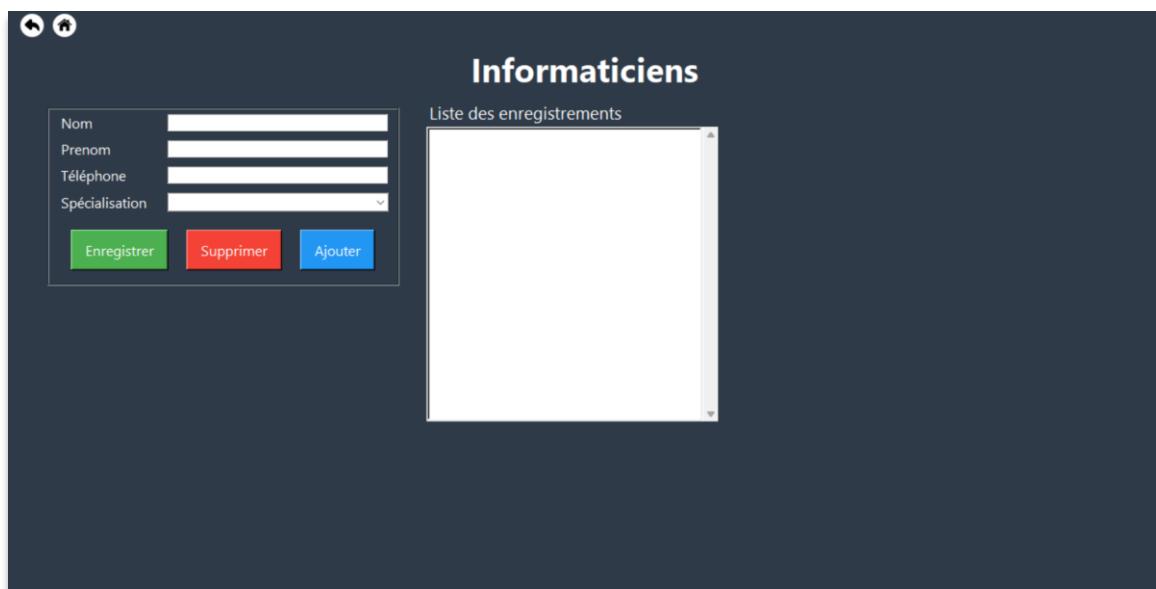


Figure IV.24 Liste des informaticiens.

IV.6 Gestion des Données

Les données sont stockées dans des fichiers JSON (ex. : equipements.json, stock.json). Elles sont chargées au démarrage de l'application et sauvegardées après chaque modification. Cette méthode convient à une application de petite échelle, garantissant que les données sont toujours à jour sans nécessiter une connexion à un serveur de base de données externe. Pour des volumes plus importants, une base de données relationnelle comme SQLite ou MySQL pourrait être envisagée.

IV.7 Alertes et Notifications

Les alertes (tâches en retard, stock critique) sont affichées dans la barre de notification animée en bas de l'écran. Elles sont générées automatiquement en fonction des seuils définis dans les données des capteurs ou des tâches de maintenance, offrant une réactivité immédiate aux situations critiques.

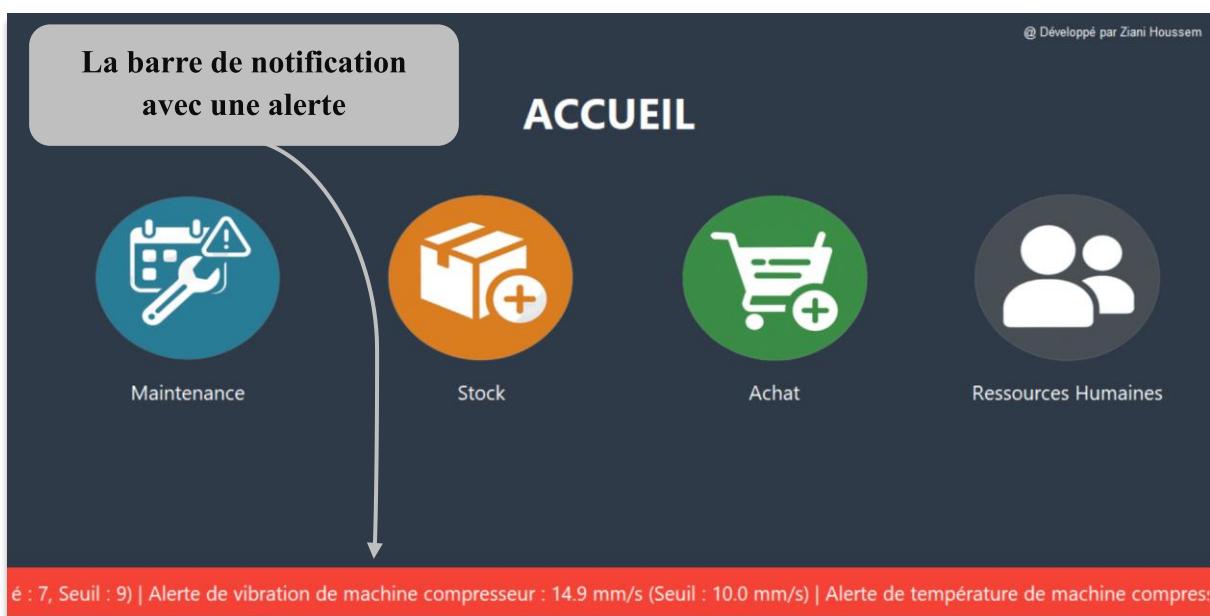


Figure IV.25 Barre de notification avec une alerte.

IV.8 Conclusion

L'application GMAO a été conçue pour **simplifier la gestion de la maintenance** et des opérations associées dans les entreprises industrielles. Elle permet de réduire les temps d'arrêt, d'optimiser les stocks, de rationaliser les achats et de mieux gérer les ressources humaines. Grâce à ses alertes en temps réel et sa centralisation des données, elle améliore l'efficacité opérationnelle et soutient une prise de décision éclairée, rendant les processus industriels plus fluides et économiques.

Conclusion Générale

Ce mémoire a mis en évidence l'impact majeur d'une GMAO adaptée sur la performance de la maintenance industrielle, à travers le développement d'un logiciel modulable et sans serveur, spécifiquement pour la centrale à cycle combiné de Koudiet Eddraouche. En centralisant l'historique des équipements, en automatisant la planification des interventions et en optimisant la gestion des stocks et des ressources humaines, la solution présentée permet de réduire significativement les temps d'arrêt et les coûts associés.

Sur le plan organisationnel, la standardisation des processus et la centralisation des données facilitent la coordination des équipes et la prise de décision. Côté humain, la formation ciblée des techniciens garantit une adoption efficace de l'outil et un transfert de compétences durable. Enfin, l'architecture légère et conviviale offre une mise en œuvre rapide et une évolutivité aisée.

Vers l'avenir, l'intégration de l'intelligence artificielle pour la maintenance prédictive et l'analyse avancée des données ouvrira de nouvelles perspectives pour anticiper les pannes et optimiser encore davantage la disponibilité des installations, confirmant ainsi le rôle stratégique de la GMAO dans la compétitivité et la pérennité des opérations.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIES

- [1] NF EN 13306 (2018), FD X 60-000 (AFNOR, 2017).
- [2] S. BENSAADA, D. FELIACHI, « La Maintenance industrielle », office des publications universitaires.1, place centrale de ben aknoun, Alger, (07/2002).
- [3] EFNMS (2020), "Maintenance Excellence Indicators".
- [4] Adapté de NF EN 13306 (2018) et AFNOR (2017).
- [5] AFNOR FD X 60-000 (2017), Pintelon & Parodi-Herz (2008).
- [6] Nakajima (1988) - TPM, Mobley (2002) - Maintenance Engineering Handbook.
- [7] NF E60-310, 2020; Kerzner, 2022; Garey & Johnson, 1979; Nakajima, 1988; ISO 9001:2015.
- [8] DIN 31051 :2019 ; Silver et al., 2016 ; Zipkin, 2000 ; IEEE Std 1856-2017.
- [9] IEC 62541 ; SEMI E10-0709 ; ISO 22400-2 :2014 ; ISA-95.
- [10] JEAN-PIERRE VERNIER : Aide-mémoire Maintenance et GMAO, Tableaux de bord ; Organisation ; Procédures. Dunod, 2010.
- [11] NF E60-310 (2020) - Maintenance industrielle - Gammes d'intervention.
- [12] AFNOR NF EN 13306 — Maintenance – Terminologie.
- [13] IEC 60300-3-11 — Dependability management – Application guide – Reliability centered maintenance.
- [14] ISO 55000 — Asset management – Overview, principles and terminology.
- [15] SAP PM — Plant Maintenance Fonctionnalités / IBM Maximo documentation.
- [16] MARC FREDERIC : Mettre en œuvre une GMAO, Maintenance industrielle ; Service après-vente ; Maintenance immobilière, Dunod, 2011.
- [17] Ravilly, J. (2018). La GMAO – Guide pratique de la maintenance assistée par ordinateur. Éditions Techniques de l'Ingénieur.
- [18] Groupe de réflexion et d'orientation en Maintenance « Réussir sa maintenance », MARE NOSTRUM, 1996.
- [19] Blanchard, B. S., & Fabrycky, W. J. (2006). Systems Engineering and Analysis, Prentice Hall.

- [20] ISO 10303-239 PLCS: Product Life Cycle Support.
- [21] Moubray, J. (1997). Reliability-Centered Maintenance.
- [22] Gartner, Magic Quadrant for Field Service Management, 2023.
- [23] ISO 14224:2016.
- [24] SPE Sonelgaz Koudiet Eddraouch, (2025).

```

1 import tkinter as tk
2 from tkinter import messagebox, filedialog
3 from tkinter import ttk
4 import os
5 import hashlib
6 from pathlib import Path
7 import json
8 import csv
9
10 try:
11     from PIL import Image, ImageTk
12 except ImportError:
13     messagebox.showerror("Error", "PIL module not found. Please install it: pip install pillow")
14     raise
15
16 # Import des modules
17 from maintenance_module import open_maintenance_module, get_maintenance_alerts
18 from stock_module import open_stock_module, get_stock_alerts
19 from purchase_module import open_purchase_module
20 from ressources_humaines_module import open_ressources_humaines_module
21
22 # Dossier du fichier courant
23 BASE_DIR = Path(__file__).resolve().parent
24 IMAGES_DIR = BASE_DIR / "images" # Dossier pour les images
25 USERS_FILE = BASE_DIR / "users.json"
26
27 # Définition du thème sombre uniquement
28 THEMES = {
29     "dark": {
30         "bg": "#2e3a47",
31         "fg": "white",
32         "hover_bg": "#3b4756",
33         "placeholder_bg": "#2e3a47",
34         "placeholder_fg": "white"
35     }
36 }
37
38 # Fonction de hash
39 def hash_password(password):
40     return hashlib.sha256(password.encode()).hexdigest()
41
42 # Function to load users from JSON
43 def load_users():
44     if not USERS_FILE.exists():
45         return {}
46     try:
47         with open(USERS_FILE, "r") as f:
48             return json.load(f)
49     except Exception as e:
50         print(f"Error loading users: {e}")
51         return {}
52
53 # Function to save users to JSON
54 def save_users(users_dict):
55     with open(USERS_FILE, "w") as f:
56         json.dump(users_dict, f, indent=4)
57
58 # Classe principale pour la fenêtre de connexion
59 class LoginApp(tk.Tk):
60     def __init__(self):
61         super().__init__()
62         self.title("Connexion - GMAO")
63         self.geometry("500x600")
64         self.theme = "dark" # Thème fixé à "dark"
65         self.configure(bg=THEMES[self.theme]["bg"])
66
67         self.logo_img = None
68
69         self.build_ui()
70

```

ANNEXES

```
72         messagebox.showerror("Erreur", f"Impossible de sauvegarder les demandes d'achat: {e}")
73
74     def load_suppliers():
75         logging.debug(f"Loading suppliers from {SUPPLIERS_FILE}")
76         if not SUPPLIERS_FILE.exists():
77             logging.info(f"Suppliers file does not exist, creating with default data")
78             save_suppliers(DEFAULT_SUPPLIERS)
79             return DEFAULT_SUPPLIERS
80         try:
81             with open(SUPPLIERS_FILE, "r", encoding='utf-8') as f:
82                 data = json.load(f)
83                 logging.debug(f"Loaded {len(data)} suppliers")
84                 return data
85         except Exception as e:
86             logging.error(f"Error loading suppliers: {e}")
87             return DEFAULT_SUPPLIERS
88
89     def save_suppliers(suppliers):
90         logging.debug(f"Saving {len(suppliers)} suppliers to {SUPPLIERS_FILE}")
91         try:
92             with open(SUPPLIERS_FILE, "w", encoding='utf-8') as f:
93                 json.dump(suppliers, f, indent=4, ensure_ascii=False)
94                 logging.info("Suppliers saved successfully")
95         except Exception as e:
96             logging.error(f"Error saving suppliers: {e}")
97
98     def load_purchase_orders():
99         logging.debug(f"Loading purchase orders from {PURCHASE_ORDERS_FILE}")
100        if not PURCHASE_ORDERS_FILE.exists():
101            logging.info(f"Purchase orders file does not exist, creating with default data")
102            save_purchase_orders(DEFAULT_PURCHASE_ORDERS)
103            return DEFAULT_PURCHASE_ORDERS
104        try:
105            with open(PURCHASE_ORDERS_FILE, "r", encoding='utf-8') as f:
106                data = json.load(f)
107
108    def load_stock():
109        if not STOCK_FILE.exists():
110            save_stock(DEFAULT_STOCK)
111            return DEFAULT_STOCK
112        try:
113            with open(STOCK_FILE, "r") as f:
114                return json.load(f)
115        except Exception as e:
116            print(f"Erreur lors du chargement du stock : {e}")
117            return DEFAULT_STOCK
118
119    def save_stock(stock):
120        try:
121            with open(STOCK_FILE, "w") as f:
122                json.dump(stock, f, indent=4)
123        except Exception as e:
124            print(f"Erreur lors de la sauvegarde du stock : {e}")
125
126    def load_suppliers():
127        if not SUPPLIERS_FILE.exists():
128            save_suppliers(DEFAULT_SUPPLIERS)
129            return DEFAULT_SUPPLIERS
130        try:
131            with open(SUPPLIERS_FILE, "r") as f:
132                return json.load(f)
133        except Exception as e:
134            print(f"Erreur lors du chargement des fournisseurs : {e}")
135            return DEFAULT_SUPPLIERS
136
137    def save_suppliers(suppliers):
138        try:
```

ANNEXES

```
908     def pay_invoice():
909         logging.debug("Payer button clicked")
910         if current_index.get() == -1:
911             messagebox.showwarning("Avertissement", "Sélectionnez une facture à payer.")
912             return
913         index = current_index.get()
914         if invoices[index]["statut"] == "Payée":
915             messagebox.showwarning("Avertissement", "Facture déjà payée.")
916             return
917         invoices[index]["statut"] = "Payée"
918         logging.debug(f"Marked invoice as paid at index {index}")
919         save_invoices(invoices)
920         refresh_listbox()
921         clear_form()
922         messagebox.showinfo("Succès", "Facture marquée comme payée.")
923
924     def archive_invoice():
925         logging.debug("Archiver button clicked")
926         if current_index.get() == -1:
927             messagebox.showwarning("Avertissement", "Sélectionnez une facture à archiver.")
928             return
929         index = current_index.get()
930         if invoices[index]["statut"] == "Archivée":
931             messagebox.showwarning("Avertissement", "Facture déjà archivée.")
932             return
933         invoices[index]["statut"] = "Archivée"
934         logging.debug(f"Archived invoice at index {index}")
935         save_invoices(invoices)
936         refresh_listbox()
937         clear_form()
938         messagebox.showinfo("Succès", "Facture archivée.")
939
940     def delete_data():
941         logging.debug("Delete button clicked (Factures)")
942         if current_index.get() == -1:
943             messagebox.showwarning("Avertissement", "Sélectionnez une facture à supprimer.")
944             return
945         if messagebox.askyesno("Confirmation", "Voulez-vous vraiment supprimer cette facture ?"):
946
946     def show_frame(self, frame):
947         if self.current_frame:
948             self.frame_stack.append(self.current_frame)
949             self.current_frame.pack_forget()
950             frame.pack(expand=True, fill="both")
951             self.current_frame = frame
952             self.btn_retour.config(state="normal" if self.frame_stack else "disabled")
953
954     def go_back(self):
955         if self.frame_stack:
956             self.current_frame.pack_forget()
957             self.current_frame = self.frame_stack.pop()
958             self.current_frame.pack(expand=True, fill="both")
959             self.btn_retour.config(state="normal" if self.frame_stack else "disabled")
960
961     def go_home(self):
962         """Retour à l'interface principale de main_app."""
963         while self.frame_stack:
964             self.current_frame.pack_forget()
965             self.current_frame = self.frame_stack.pop()
966             self.current_frame.pack_forget()
967             self.main_app.show_main_interface()
968
969     def open_submodule(self, title):
970         logging.debug(f"Opening submodule: {title}")
971         if title == "Demande d'Achat":
972             self.show_frame(self.create_purchase_request_frame())
973         elif title == "Fournisseur":
974             self.show_frame(self.create_supplier_frame())
975         elif title == "Commande":
976             self.show_frame(self.create_order_frame())
977         elif title == "Facture":
978             self.show_frame(self.create_invoice_frame())
979
980     def create_purchase_request_frame(self):
981         frame = tk.Frame(self, bg="#2e3a47")
982
983         tk.Label(frame, text="Demandes d'Achat",
984                 font=("Segoe UI", 28, "bold")).
```