الجمهـوريـــة الجزائـريـــة الديمقـراطيـــة الشـعبيـــة
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التـــعلـيـــم العـــالـــي والبـحـــث العـلمـــي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أ حمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département Maintenance en Instrumentation

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention de diplôme Master

Filière : électromécanique
Spécialité : électromécanique

Thème

La maintenance préventive en milieu d'industrie : Étude de cas.

Présenté et soutenu publiquement par :

Foul Zakaria

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mr. MEKKI Ibrahim El Khalil	PR	Univ. Oran-2, IMSI	**Président**
Mr. ADJLOUA Abdelaziz	MCA	Univ. Oran-2, IMSI	**Encadreur**
Mr. BENFEKIR Abderrahim	MCB	Univ. Oran-2, IMSI	**Co-Encadreur**
Mr. BENARBIA Taha	MCB	Univ. Oran-2, IMSI	**Examinatrice**

Juin 2025

DEDICACES

J'ai toujours rêvé de pouvoir vous offrir un témoignage de ma reconnaissance pour tous les efforts que vous avez consentis, uniquement pour me voir réussir. Aujourd'hui, cette occasion se présente enfin.

À ceux qui m'ont donné la vie, vous êtes le symbole de la beauté et de la fierté, de la sagesse et de la patience.

À vous qui êtes la source de mon inspiration et de mon courage, à qui je dois mon amour et ma plus profonde gratitude.

A ma très chère mère, mon cher père, et Mes frères …

A tous mes amis

A toute ma famille.

Enfin je dédie ce travail à ceux qui m'ont de près ou de loin.

Foul Zakaria

Remerciements

Je souhaite avant tout exprimer ma profonde gratitude envers Dieu le Tout-Puissant de m'avoir accordé le courage, la patience, la force et la volonté nécessaires à la réalisation de ce travail.

Je tiens à adresser mes plus sincères remerciements à mes encadrants, **Monsieur A. BENFEKIR** et **Monsieur A. ADJLOUA** pour leur aide précieuse et leur accompagnement constant tout au long de mon projet. Leur disponibilité, leurs conseils avisés et leur soutien indéfectible ont été d'une aide inestimable pour la réalisation de mon travail de fin d'études.

Mes remerciements s'adressent également à **Monsieur le Président, IK. MEKKI,** pour l'honneur qu'il me fait en présidant ce jury de soutenance. Je lui témoigne ma plus profonde gratitude.

Je remercie chaleureusement **Monsieur T. BENARBIA**, qui a aimablement accepté d'évaluer et de juger mon travail, et pour l'intérêt qu'il y a porté.

Un grand merci à ma famille pour son soutien indéfectible, sa présence et ses encouragements constants, qui ont été une source de motivation essentielle.

Enfin, mes remerciements s'étendent à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce travail.

Résumé

Ce travail a pour objectif d'optimiser la maintenance préventive dans une centrale électrique à gaz vapeur en Algérie, en se focalisant sur la surveillance des équipements critiques tels que les pompes d'extraction. L'objectif principal est de développer un système automatisé capable de détecter les anomalies en temps réel afin de réduire les temps d'arrêt imprévus et d'améliorer la fiabilité des installations énergétiques, un enjeu majeur dans un contexte industriel où la continuité de la production est essentielle pour limiter les pertes économiques.

Le projet vise à concevoir une solution innovante et économique, utilisant des outils de détection pour surveiller les vibrations, des indicateurs visuels pour signaler les différents états (normal, alerte, danger), un affichage pour présenter les données, et un dispositif sonore pour les alertes critiques. Une gestion automatisée des interventions périodiques est également intégrée via un mécanisme de contrôle. La méthodologie repose sur une analyse théorique des systèmes de production d'électricité et des pratiques de maintenance, suivie d'une simulation pour valider le concept. Une alternative plus performante est proposée pour pallier les limites techniques et améliorer la connectivité.

Ce travail cherche à contribuer à l'amélioration des pratiques de maintenance industrielle en Algérie, en offrant une base pour des applications pratiques et une intégration future avec des systèmes de gestion assistée. Il vise également à ouvrir des perspectives pour des recherches ultérieures, notamment des tests sur site et l'ajout de paramètres supplémentaires comme la température et la pression.

Mots clé *: Maintenance, Maintenance préventive, supervision industriel, traitement des données, fiabilité, sécurité, central de production d'électricité.*

Sommaire

Dédicace i
Remerciement ii
Résumé iii
Sommaire iv
Liste des tableaux vii
Liste des figures viii
Introduction générale 12
Chapitre I - Généralités sur les systèmes de production d'électricité
I.1. Introduction 15
I.2 Les différentes ressources d'énergie 15
I.2.1 Les sources d'énergie 16
I.2.1.1 Les énergies fossiles (non renouvelables) 16
I.2.1.2. Les Énergies Renouvelables 17
I.3. Généralités sur la production de l'énergie électrique 22
I.3.1. Le réseau électrique 22
I.3.2. Principe général de la production d'énergie électrique 22
I.3.3. Généralité sur les alternateurs 23
I.4. Différents types des centrales électriques 24
I.4.1. Centrale thermique à vapeur 24
I.4.2. Centrale thermique à gaz 26
I.4.3. Centrale thermique à cycle combiné 28
I.4.4. Centrale hydraulique 29
I.4.5. Central photovoltaïque 30
I.4.6. Central à énergie éolienne 32
I.5. Production d'électricité en Algérie : Focus sur les centrales à cycle combiné 34
I.6. Conclusion 35
Chapitre II : Description de la maintenance et aperçu sur la société de stage
II.1 Introduction 37
II.2 Description de la maintenance 37
II.2.1 Le rôle de la maintenance 37
II.2.2 Les objectifs de la maintenance 38
II.2.3 Méthodologie de la maintenance 38
II.2.4 Les niveaux de maintenance 40
II.2.5 Les différents types de maintenances 42
II.2.6 Maintenance préventive 42
II.2.7 Maintenance préventive systématique 43
II.2.8 Les travaux de maintenance préventive systématique 43
II.2.9 Plan de maintenance préventive systématique 43
II.2.10 Maintenance conditionnelle 44
II.2.11 Les travaux de maintenance préventive conditionnelle 44
II.2.12 Mise en œuvre de la maintenance préventive conditionnelle 45

II.2.13 Techniques de la maintenance conditionnelle (prédictive) 45
II.2.14 Opération de maintenance préventive 46
II.3 Aperçu sur la société de stage 47
II.3.1 Le déroulement des travaux 47
II.3.2 La situation géométrique 48
II.3.3 Fiche technique 48
II.3.4 Le rôle de la centrale de JIJEL 49
II.3.5 Constitution de la centrale 49
II.3.6 Fonctionnement technologique de la centrale.....58
II.4 Conclusion …… ……60
Chapitre III : Description et étude de la méthode de maintenance utilisée dans la société
III.1 Introduction.....63
III.2 Logistique de maintenance.....63
III.2.1. Les moyens matériels 64
III.2.2. Les moyens humains 64
III.3 Forme de maintenance 65
III.4 Description d'une intervention de la maintenance.....67
III.5 La Gestion de maintenance assistée par ordinateur (GMAO) 67
III.5.1 Fonctionnalités d'une GMAO 68
III.5.2 Bénéfices attendus 69
III.5.3 Intégration de la GMAO dans le systéme d'information de l'entreprise.....71
III.6. Circuit de demande d'intervention et l'ordre de travail (DI/OT) 74
III.7. Application de la maintenance préventive sur les pompes d'extraction 75
III.7.1 Diagnostic Vibratoire Conditionnel et Historique des Interventions : Cas des Pompes d'Extraction...76
III.7.2 Description générale du tableau 77
III.7.3 Programmation d'une intervention 77
III.7.4 Analyse vibratoire 79
III.7.5 Liste des travaux sur la pompe d'extraction RM (de 29/09 /2024 à 26/02/2025) 81
III.7.7 Guide d'Entretien Périodique des Moteurs de Pompes RM 81
III.8. Conclusion 82
Chapitre IV : conceptions de système de maintenance proposé
IV.1. Introduction 84
IV.2. Analyse des Besoins et Justification de l'Automatisation 84
IV.2.1. Analyse des Besoins de l'Entreprise 85
IV.2.2. Justification de l'Automatisation 85
IV.3. Bénéfices de l'Automatisation 86
IV.4. Conception du Système de Surveillance et de Maintenance Automatisé 86
IV.4.1. Identification des Variables Critiques des Machines 86
IV.4.2. Principe Général du Système Proposé.....86
IV.4.2.1. Indicateurs Visuels pour la Surveillance en Temps Réel 87
IV.4.2.2. Détection des Données par des Capteurs.....88
IV.4.2.3. Gestion Automatisée des Maintenances Périodiques.....89
IV.4.3. Avantages de la Conception Proposée 89

IV.5. Mise en œuvre du Système Proposé 89
IV.5.1. Choix des Composants Techniques 90
IV.5.2. Connexion des Composants au Système 90
IV.5.3. Logique de Programmation 91
IV.5.4. Avantages de la Mise en œuvre 92
IV.6. Simulation et Tests sur Wokwi 92
IV.6.1. Objectif de la Simulation 92
IV.6.2. Présentation de Wokwi 92
IV.6.3. Équipements Simulés dans Wokwi 93
IV.6.4 Connexion des Composants dans Wokwi 95
IV.6.5. Analyse des Résultats Préalables 95
IV.6.6. Simulation sans Capteur Réel 95
IV.6.7. Explication du Code et Organisation Temporelle 97
IV.6.8. Fonctionnement du Système pendant la Simulation 99
IV.6.9. Gestion de la LED Bleue 100
IV.6.10. Résultats de la Simulation 101
IV.7. Partie Expérimentale 101
IV.7.1. Matériel Utilisé 103
IV.7.2. Montage du Circuit 103
IV.7.3. Méthodologie Expérimentale 104
IV.7.4. Description du Programme 105
IV.7.5. Résultats et Analyse 106
IV.8. Les Limites de la Proposition 108
IV.9. Proposition d'un Outil Plus Efficace pour Traiter Plusieurs Variables 108
IV.9.1. Contexte et Besoin d'un Outil Plus Puissant 108
IV.9.2. Proposition : Utilisation du Raspberry Pi 108
IV.9.3. Avantages du Raspberry Pi par Rapport à l'Arduino 109
IV.10. Conclusion 109
Conclusion générale 112
Bibliographie 113

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur les systèmes de production d'électricité
Tableau 1.1 : Avantages et inconvénients des centrales thermiques à vapeur 27
Tableau 1.2 : Avantages et inconvénients des centrales à gaz à cycle combiné 29
Tableau 1.3 : Avantages et inconvénients des Centrale hydraulique 30
Tableau 1.4 : Avantages et inconvénients des Central photovoltaïque 31
Tableau 1.5 : Avantages et inconvénients des Central à énergie éolienne 33
Chapitre II : Description de la maintenance et aperçu sur la société de stage
Tableau 2.1. Les objectifs de la maintenance 38
Chapitre III : Description et étude de la méthode de maintenance utilisée dans la société
Tableau 3.1 : Calcule vibratoire des pompes d'extraction 75
Tableau 3.2 : Intervalles de fonctionnement des vibrations en mm/s rms 76
Tableau 3.3: Intervalles de fonctionnement des vibrations en g rms 76
Tableau 3.4: Liste des travaux sur la pompe d'extraction RM (de 29/09 /2024 à 26/02/2025) 79
Tableau 3.4: Liste des interventions systématiques sur la pompe d'extraction 81
Chapitre IV : conceptions de système de maintenance proposé
Tableau 4.1 : L'état des pompes d'extractions selon les calculs de vibration 95
Tableau 4.2 : Programme de l'évolution pondant la simulation 96
Tableau 4.3 : Matériel utilisé 102

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les systèmes de production d'électricité

Figure 1.1 : L'énergie dans tous ses états 16
Figure 1.2 : quelque énergie fossile 17
Figure 1.3 : Panneaux solaires 18
Figure 1.4 : Éoliennes 19
Figure 1.5 : Schéma de fonctionnement d'une centrale hydraulique 20
Figure 1.6 : Schéma de principe d'une usine biomasse 21
Figure 1.7 : Quelques échangeurs thermiques utilisés pour la géothermie 21
Figure 1.8 : Structure des réseaux électriques 22
Figure 1.9 : Principe de Production de l'énergie électrique 23
Figure 1.10 : Centrale thermique à vapeur 24
Figure 1.11 : Centrale à gaz 26
Figure 1.12 : Schéma de principe de fonctionnement d'une turbine à gaz 26
Figure 1.13 : Centrale à gaz à cycle combiné 28
Figure 1 .14 : Principe d'une centrale à gaz à cycle combiné 28
Figure 1.15 : Centrale hydraulique 29
Figure 1.16 : Fonctionnement D'une Centrale Hydroélectrique 29
Figure 1.17 : Central photovoltaïque 30
Figure 1.18 : Schéma de principe d'un générateur photovoltaïque 31
Figure 1.19 : Central éolienne 32
Figure 1.20 : Schéma d'ensemble d'une éolienne 32
Figure 1.20 : Un cercle relatif indiquant le pourcentage de chaque type de production nationale 35

Chapitre II : Description de la maintenance et aperçu sur la société de stage

Figure 2.1 : Exemple d'arbre de décision appliqué au choix des méthodes de maintenance 39
Figure 2.2 : Les niveaux de maintenance 41
Figure 2.3: La situation géométrique de centrale 48
Figure 2.4 : Station de pompage 50
Figure 2.5 : Station de dessalement d'eau de mer 50
Figure 2.6 : Station d'électrolyseur 52
Figure 2.7 : Station de stockage de FUEL 53
Figure 2.8 : la turbine 55
Figure 2.9 : Pompes d'extractions 55

Figure 2.10 : Transformateur principal 57
Chapitre III : Description et étude de la méthode de maintenance utilisée dans la société
Figure 3.1 : Organigramme de Circuit de demande d'intervention et l'ordre de travail (DI/OT) 65
Chapitre IV : conceptions de système de maintenance proposé
Figure 4.1 : les leds industriel 87
Figure 4.2 : Ecran d'affichage LCD 87
Figure 4.3 : capteur de vibration 88
Figure 4.4 : carte Arduino uno 93
Figure 4.2 : les leds de simulations 93
Figure 4.3 : buzzer de simulation 94
Figure 4.7 : Écran LCD (I2C) 94
Figure 4.8 : Bouton 94
Figure 4.9 : simulation de la phase initiale 97
Figure 4.10 : simulation de la 2ém phase 98
Figure 4.11 : simulation de 3ém phase 98
Figure 4.12 : redémarrage du système 99
Figure 4.13 : simulation de la maintenance systématique 100
Figure 4.14 : Capteur SW 420 101
Figure 4.15 : Montage de circuit. 103

Introduction général

Introduction générale

Dans un monde industrialisé où la continuité de la production est un impératif économique, la maintenance des équipements joue un rôle stratégique pour garantir la fiabilité, la sécurité et l'efficacité des installations. L'Algérie, en tant que pays riche en ressources énergétiques, s'appuie fortement sur ses infrastructures industrielles, notamment dans le secteur de la production d'électricité, pour répondre aux besoins croissants en énergie. Les centrales électriques, qu'elles soient thermiques, hydrauliques ou renouvelables, sont des systèmes complexes où les temps d'arrêt imprévus peuvent engendrer des pertes financières significatives et compromettre la stabilité du réseau national. Dans ce contexte, la maintenance préventive émerge comme une approche proactive, visant à anticiper les défaillances avant qu'elles ne surviennent, réduisant ainsi les coûts d'exploitation et prolongeant la durée de vie des équipements.

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'une étude approfondie de la maintenance préventive en milieu industriel, avec un focus particulier sur une centrale électrique à gaz vapeur en Algérie. À travers une analyse détaillée des pratiques de maintenance, ce travail vise à évaluer l'efficacité des méthodes existantes et à proposer des solutions innovantes pour optimiser la gestion des équipements critiques, tels que les pompes d'extraction. L'objectif principal est de concevoir un système automatisé de surveillance basé sur des capteurs de vibrations, capable de détecter les anomalies en temps réel et de programmer des interventions périodiques, tout en s'intégrant aux outils de gestion de maintenance assistée par ordinateur (GMAO).

Ce travail est structuré en quatre chapitres. Le premier chapitre présente les généralités sur les systèmes de production d'électricité, en explorant les différentes sources d'énergie et les types de centrales, avec un accent sur les centrales à cycle combiné en Algérie. Le deuxième chapitre introduit les concepts fondamentaux de la maintenance, ses objectifs et ses méthodologies, tout en décrivant la société d'accueil et son contexte opérationnel. Le troisième chapitre analyse les pratiques de maintenance actuelles dans la centrale étudiée, en mettant en lumière l'utilisation du diagnostic vibratoire et de la GMAO. Enfin, le quatrième chapitre propose un système automatisé, basé sur la plateforme Arduino, pour améliorer la surveillance et la maintenance des équipements, avec des tests réalisés via la plateforme de simulation Wokwi. Une alternative utilisant le Raspberry Pi est également suggérée pour répondre à des limitations techniques.

Ce mémoire ambitionne de contribuer à l'amélioration des pratiques de maintenance industrielle en Algérie, en proposant une solution pratique et adaptable, tout en sensibilisant aux défis liés à la transition vers des technologies modernes de surveillance. À travers une combinaison d'analyse théorique et d'application pratique, ce travail vise à offrir une base solide pour des recherches ultérieures dans le domaine de la maintenance préventive.

Ce mémoire comporte de quatre chapitres :

Le premier chapitre explore les systèmes de production d'électricité, en mettant l'accent sur les centrales à cycle combiné.

Le deuxième chapitre définit les concepts de maintenance, ses objectifs, et décrit la société d'accueil.

Le troisième chapitre analyse les pratiques actuelles de maintenance, incluant le diagnostic vibratoire et l'utilisation de la GMAO.

Le quatrième chapitre propose un système automatisé utilisant une carte Arduino, avec des LED pour indiquer les états (normal, alerte, danger), un écran LCD pour afficher les données, et un mécanisme d'arrêt automatique.

Et finalement une conclusion générale de ce travail.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes de production d'électricité

I.1. Introduction

L'électricité est devenue aujourd'hui une composante essentielle de notre quotidien, au cœur du développement économique et social des nations. Comprendre comment elle est produite permet non seulement de mieux appréhender les enjeux énergétiques actuels, mais aussi d'anticiper les défis futurs liés à la transition énergétique. Ce chapitre présente un panorama général des systèmes de production d'électricité, en abordant d'abord les différentes ressources énergétiques disponibles, les formes d'énergies exploitables, ainsi que les principes fondamentaux de la production d'énergie électrique. Il s'intéresse ensuite aux divers types de centrales électriques existantes, avec un focus particulier sur celles en service en Algérie.

I.2. Les différentes ressources d'énergie :

Le mot « énergie » vient du grec « energeia », qui signifie « travail ou force en action ». L'énergie, c'est la capacité d'un système à produire des actions : générer un mouvement, de la lumière ou de la chaleur ; changer la température ou transformer la matière.

L'énergie est la grandeur qui permet de caractériser un changement d'état dans un système :

- Modification de la température (énergie thermique) ;
- Modification de la vitesse (énergie cinétique) ;
- Modification de la composition chimique (énergie chimique, combustion) ;
- Modification de la composition atomique (énergie nucléaire). Dans un système clos, l'énergie se conserve en quantité. On ne peut donc pas « produire » de l'énergie, mais juste la transformer. (L'énergie après transformation est égale à celle avant transformation).

De cela, on distingue différentes énergies existant sous de multiples formes (figure 1.1) : l'énergie mécanique, l'énergie chimique, l'énergie électrique, l'énergie rayonnante, l'énergie éolienne, l'énergie nucléaire, 1 l'énergie thermique, l'énergie des hydrocarbures et l'énergie électromagnétique.

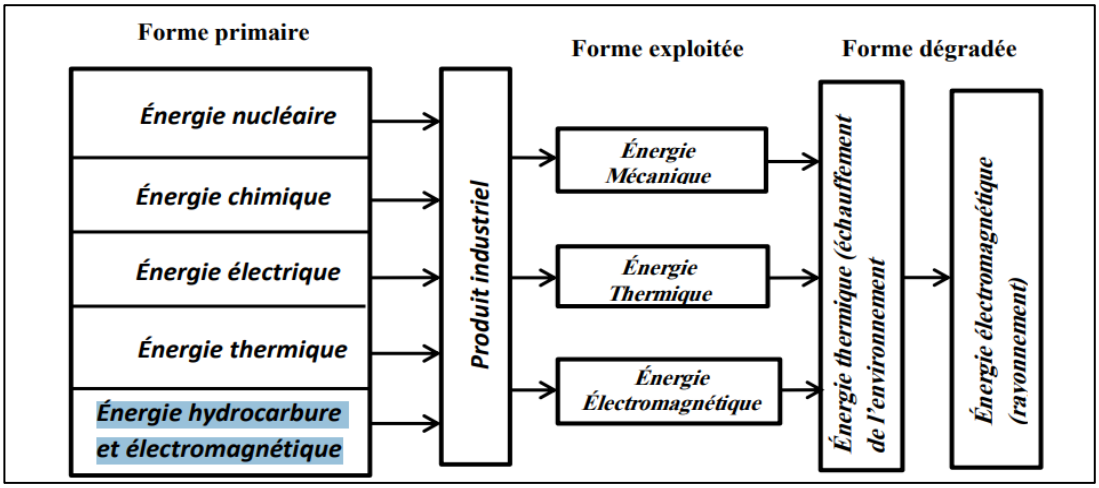
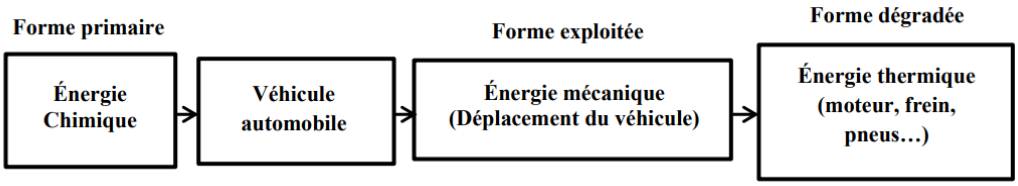


Figure 1.1 : L'énergie dans tous ses états

Exemple :



I.2.1 Les sources d'énergie :

Soit des matières premières.

- Soit des phénomènes naturels employés pour produire de l'énergie.

On distingue :

- Les énergies fossiles.
- Les énergies renouvelables.

I.2.1.1 Les énergies fossiles (non renouvelables) :

L'homme dans sa vie quotidienne à besoin : pour se chauffer, pour stocker la nourriture, pour s'éclairer et pour manger. Cependant, même si la nature à stocker les combustibles fossiles pendant des centaines de millions d'années, ces derniers ne sont pas renouvelables et pollues notre monde. Depuis la révolution industrielle, nous avons utilisé une grande quantité d'énergies fossiles pour assurer notre développement économique. Au rythme où nous les consommons actuellement, il est pertinent de se demander combien de temps dureront ces réserves.

a. Principe des énergies fossiles :

Les énergies fossiles, qui comprennent le charbon, le pétrole et le gaz sont issus de la matière vivante, végétale ou animale. Ces énergies contiennent du carbone dont la combustion fournit de l'énergie et génère du gaz carbonique. Elles sont présentes en quantité limitée et non renouvelable. Il existe de nombreuses énergies fossiles, voici quelques exemples (figure 1 .2) :



Figure 1.2 : quelque énergie fossile

b. Le pétrole :

Le pétrole (L. petroleum, du mot grec petra, roche, et du latin oleum, huile) est une roche liquide carbonée, une huile minérale composée d'hydrocarbures plus ou moins légers et de divers composés organiques piégés dans des formations géologiques particulières. L'exploitation de cette énergie fossile est l'un des piliers de l'économie industrielle contemporaine, car le pétrole fournit la quasi-totalité des carburants liquides — fioul, gazole, kérosène, essence, GPL — tandis que le naphta produit par le raffinage est à la base de la pétrochimie, dont sont issus un très grand nombre de matériaux usuels — plastiques, textiles synthétiques, caoutchoucs synthétiques (élastomères), détergents, adhésifs, engrais, cosmétiques, etc. — et que les fractions les plus lourdes conduisent aux bitumes, paraffines et lubrifiants. Sa formation est un processus complexe et au rendement très faible. Il est formé du plancton qui s'est déposé au fond des mers. [1]

c. Le gaz :

Tout comme le pétrole, est issu d'un processus complexe. L'utilisation de celui-ci est assez récente et est actuellement en plein développement ; La consommation mondiale du gaz en 2000 a été 24,7% de la consommation mondiale d'énergie. Le gaz naturel est l'une des énergies fossiles qui rejette le moins de CO_2 dans l'atmosphère. De plus, on remarque même, que si sa combustion était parfaite et totale, il n'y aurait que des rejets d'eau et de dioxyde de carbone.

d. Le charbon :

Comme le pétrole et le gaz naturel, le charbon est une énergie fossile. Sa formation a débuté il y a plus de 350 millions d'années, par la transformation profonde de matière organique végétale.

I.2.1.2. Les Énergies Renouvelables :

C'est une source d'énergie primaire inépuisable à très long terme, car c'est une source d'énergie issue directement, ou non, de l'énergie du Soleil, de la Terre ou de la gravitation. Différentes énergies renouvelables sont : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, énergie hydroélectrique, la géothermie, la biomasse.

a. Énergie solaire :

C'est une énergie renouvelable apportée par le rayonnement solaire, et exploitée pour produire de l'électricité ou de la chaleur.

L'énergie solaire, est une énergie propre et inépuisable qui est exploitée de plusieurs façons : éclairage et chauffage "passif" des logements par le soleil.

• **Conversion thermodynamique de l'énergie solaire en électricité** : En concentrant les rayons du soleil par un disque parabolique, un capteur cylindre-parabolique ou un système de miroirs, il est possible d'atteindre une température suffisamment élevée pour générer de l'électricité via une turbine et un alternateur. Le prix de revient du kWh électrique devient intéressant (environ deux fois moindre que celui du photovoltaïque) pour de grandes installations, ce système est difficilement applicable pour de petites installations et son intégration dans le bâti n'est pas évidente.

• **Conversion photovoltaïque de l'énergie solaire** : L'effet photovoltaïque permet de convertir directement l'énergie lumineuse du soleil en électricité grâce à des semiconducteurs (figure 1.3). Bien que cette filière énergétique soit largement minoritaire dans les bilans énergétiques mondial, européen et français, son taux de croissance (30 à 60% par an) et la chute des coûts de production qui accompagne son développement depuis quelques années présage un potentiel de développement très élevé pour l'avenir.



Figure 1.3 : Panneaux solaires

b. Énergie éolienne :

C'est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent. L'énergie éolienne peut être utilisée de deux manières :

• **Conservation de l'énergie mécanique** : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule, pour pomper de l'eau ou pour faire tourner la meule d'un moulin.

• **Transformation en énergie électrique** : l'éolienne est couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie. L'énergie éolienne joue un rôle essentiel pour éviter les émissions de gaz à effet de serre et combattre le changement climatique. La capacité installée totale dans le monde atteint aujourd'hui 94 000 MW et permet d'éviter le rejet d'environ 122 millions de tonnes de CO2 dans l'atmosphère, équivalent au fonctionnement de 20 centrales à charbon [1] , voici un exemple d'éolienne dans la figure (1.4).



Figure 1.4 : Éoliennes

c. Énergie hydroélectrique :

Les barrages hydroélectriques créent et fournissent l'énergie électrique. Ils sont faits de ciment et d'acier. La plupart ont plus de 30 mètres de haut, et certains atteignent même jusqu'à 150 mètres de haut. Une centrale hydraulique utilise l'énergie fournie par une masse d'eau en mouvement pour produire de l'énergie électrique. Un barrage retient une grande quantité d'eau sous la forme d'un lac de retenue. Pour produire de l'électricité, les vannes du barrage sont ouvertes, de l'eau s'y engouffre dans une conduite forée dans le barrage, sa vitesse augmente. À la sortie de cette conduite, l'eau fait tourner une turbine qui entraîne elle-même un alternateur qui produit une tension alternative sinusoïdale. L'eau est ensuite libérée au pied du barrage et reprend le cours normal de la rivière. Plusieurs variantes des centrales hydrauliques existent. Certaines fonctionnent en exploitant l'énergie fournie par les marées ou par les vagues. Leur nombre reste toutefois très limité. Les centrales hydrauliques ont une puissance qui peut aller de quelques milliers de watts pour une centrale individuelle (destinée à alimenter une seule habitation) à 500 MW (mégawatts) pour un barrage d'importance [1].

L'eau accumulée derrière un barrage est dirigée vers les turbines par des tuyaux appelés conduites forcées.

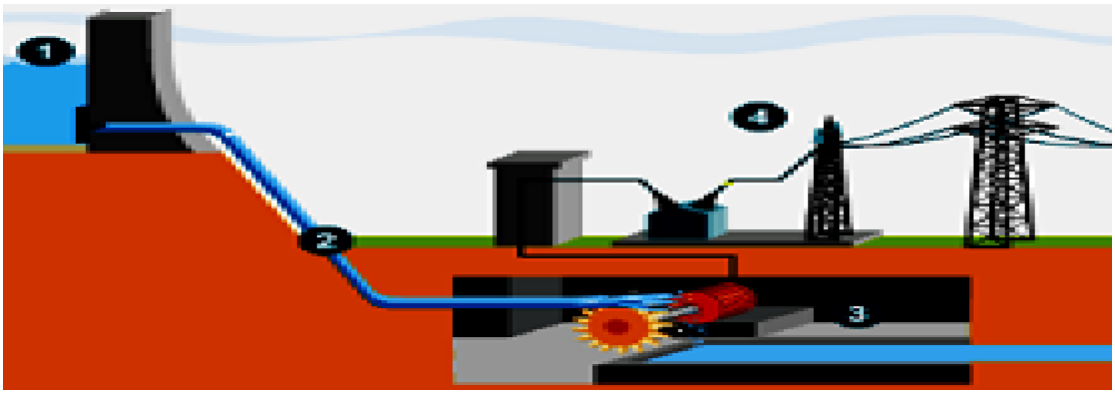


Figure 1.5 : Schéma de fonctionnement d'une centrale hydraulique

d. Énergie Biomasse :

Ce terme désigne tous les matériaux organiques créés directement ou indirectement par photosynthèse, soit l'ensemble du monde vivant : végétaux, animaux et micro-organismes. C'est une forme d'énergie solaire.

Une centrale biomasse produit de l'électricité grâce à la vapeur d'eau dégagée par la combustion de matières végétales ou animales, qui met en mouvement une turbine reliée à un alternateur. La biomasse est brûlée dans une chambre de combustion. En brûlant, la biomasse dégage de la chaleur qui va chauffer de l'eau dans une chaudière. L'eau se transforme en vapeur, envoyée sous pression vers des turbines. Une partie de la vapeur est aussi récupérée pour être utilisée pour le chauffage. C'est ce que l'on appelle la cogénération. La vapeur fait tourner une turbine qui fait à son tour fonctionné un alternateur. Grâce à l'énergie fournie par la turbine, l'alternateur produit un courant électrique alternatif. Un transformateur élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à moyenne et haute tension. À la sortie de la turbine, la vapeur est à nouveau transformée en eau grâce à un condenseur dans lequel circule de l'eau froide en provenance de la mer ou d'un fleuve. L'eau ainsi obtenue est récupérée et ré-circule dans la chaudière pour recommencer un autre cycle. Les fumées de combustion sont dépoussiérées grâce à des filtres et sont évacuées par des cheminées. [1]

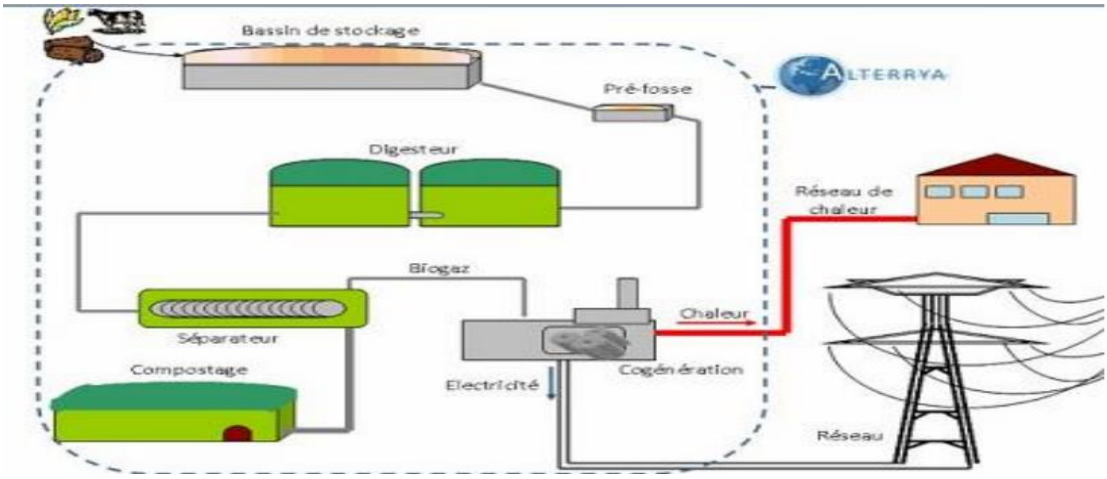


Figure 1.6 : Schéma de principe d'une usine biomasse

e. Énergie Géothermie :

La Terre est un réservoir à fort potentiel énergétique. On observe sur la totalité du globe une élévation de la température au fur et à mesure que l'on fore vers le noyau terrestre, c'est le gradient géothermique. En moyenne il est de l'ordre de 30° par kilomètres de profondeur et le flux géothermique associé (quantité de chaleur transmise par conduction puis dissipée par unité de surface) est de 60 mW/m². Ces valeurs moyennes varient en fonction de la nature du sol et de la proximité d'une zone instable telle qu'une faille géologique, zone volcanique etc.… L'extraction de l'énergie géothermique peut être divisée en quatre catégories organisées en niveaux de température : la haute température, la moyenne température, la basse température et la très basse température. Seuls les sites à hautes et moyennes températures sont susceptibles de permettre la production d'électricité tandis que les sites aux basses températures qui utilisent des nappes d'eau chaude du sous-sol profond et aux très basses températures qui utilisent des pompes à chaleur permettent la production de chaleur [1].

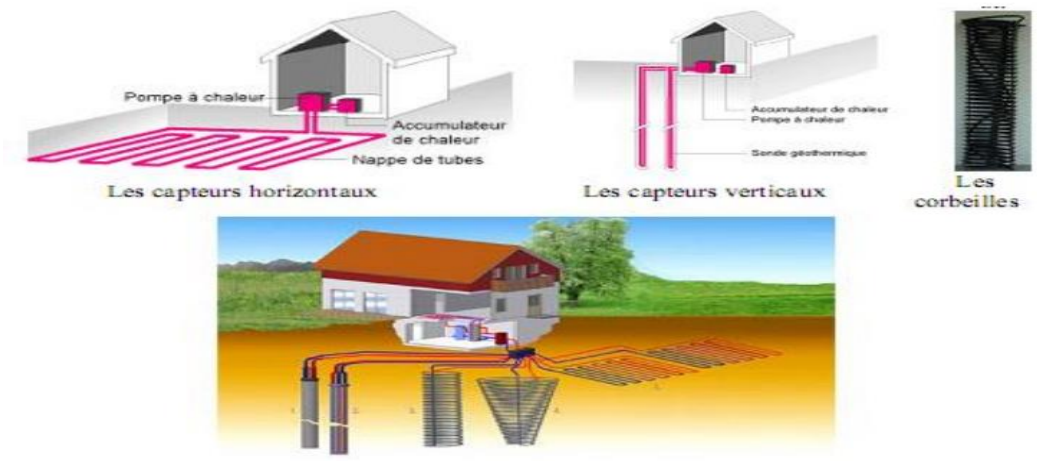


Figure 1.7 : Quelques échangeurs thermiques utilisés pour la géothermie

I.3. Généralités sur la production de l'énergie électrique :

L'énergie électrique est un facteur essentiel de développement et de l'évolution des sociétés humaines, que cela soit sur le plan de l'amélioration des conditions de vie ou sur le plan du développement des activités industrielles. Sur cette base nous allons commencer ce chapitre par la description des modes de production de l'énergie électrique. Puis nous expliquerons comment générer de l'électricité de centrale électrique.

I.3.1. Le réseau électrique :

L'énergie électrique est la forme d'énergie la plus largement répandue car elle est facilement transportable à un rendement élevé et un coût raisonnable. Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétiques plus ou moins disponibles permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité.

Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques. Les postes électriques permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs, la structure des réseaux électriques est présentée dans la figure. Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble production - transport - consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble. [6]

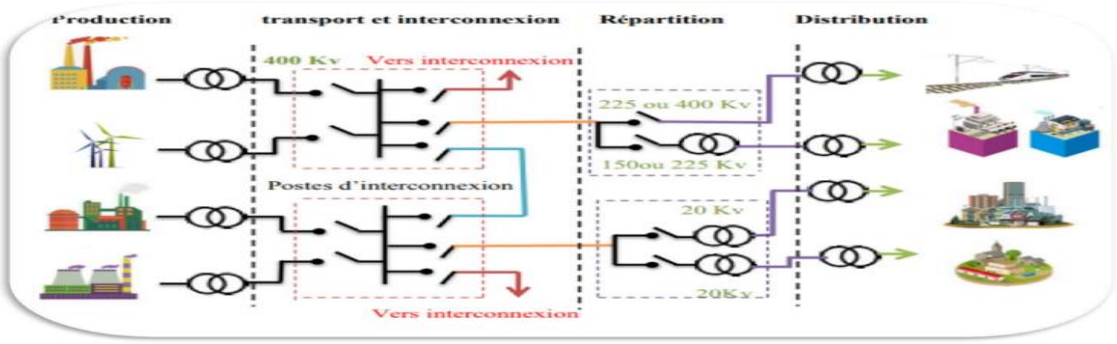


Figure 1.8 : Structure des réseaux électriques

I.3.2. Principe général de la production d'énergie électrique :

L'énergie électrique est produite dans des centrales électrique qui est un site destiné à la production d'électricité, les centrales éclectiques transforment différentes sources d'énergie naturelles en énergie électrique afin d'alimenter en électricité les consommateurs. Le processus de production d'électricité dépend du champ magnétique, car il emprunte des lignes, des chemins et des directions du pôle Nord au pôle Sud. Le flux de courant électrique se poursuit en raison de la coupure répétée des

lignes de champ et, par conséquent, le processus de production d'énergie est classé en fonction de la force de travail pour couper les lignes de champ magnétique, et l'un des plus grands exemples de ceci est lors de l'utilisation de l'énergie éolienne, l'énergie cinétique est convertie et les lignes de champ magnétique se déplacent, ce qui passe à travers un fichier qui coupe les lignes de champ Le courant magnétique circule alors, et ainsi l'électricité est générée par l'énergie éolienne et sur elle l'électricité est produite dans la vapeur, l'eau et autres [2].

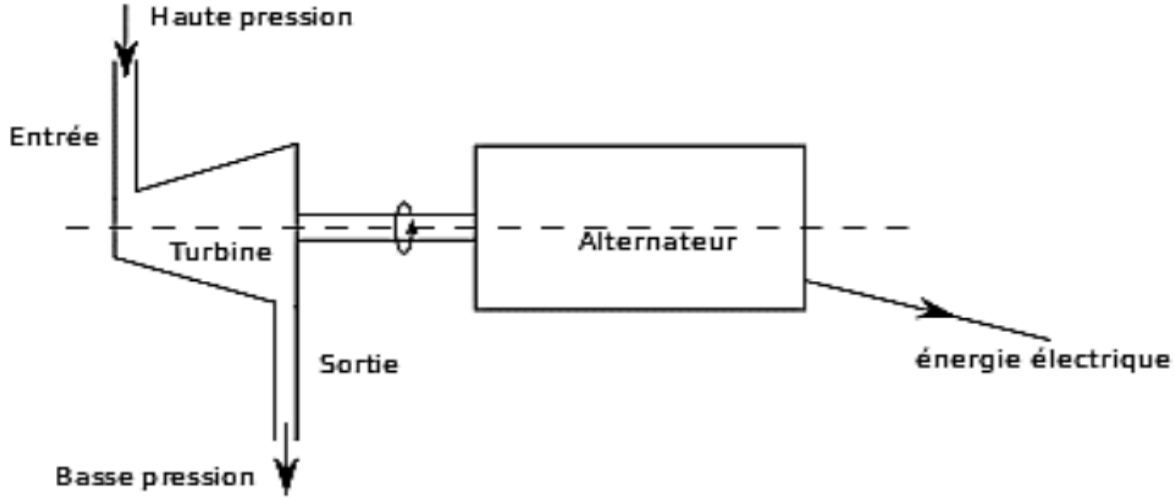


Figure 1.9 : Principe de Production de l'énergie électrique

I.3.3. Généralité sur les alternateurs :

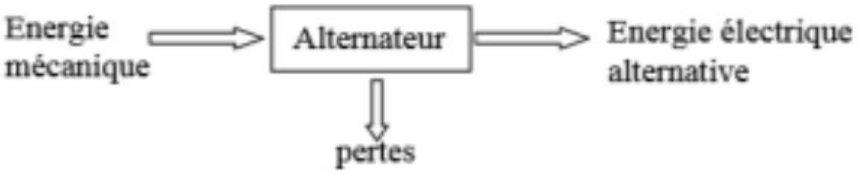
L'alternateur est une machine synchrone à courant alternatif qui utilisé dans l'industrie tel que dans la production d'énergie électrique dans les centrales. Cette machine constitue les plus gros convertisseurs d'énergie au monde. Plus de 95 % de l'énergie électrique est produite par des alternateurs. L'alternateur converti l'énergie mécanique fournie au rotor en énergie électrique à courant alternatif, Le rotor de l'alternateur est entrainé en rotation par la turbine qui assuré l'énergie mécanique, ce dernier fourni des tensions alternatives de fréquence proportionnelle à leur vitesse de rotation [3].

Les alternateurs de centrales hydrauliques entraînés par des turbines hydrauliques, se caractérisent par l'appellation « d'alternateurs à pôles saillants » Les alternateurs des centrales thermiques entraînés par des turbines à vapeur ou à gaz, se caractérisent par l'appellation : « d'alternateurs à pôles lisses ». (Turboalternateurs). [3]

On peut aussi distinguer :

- Des alternateurs à axe horizontal,
- Des alternateurs à axe vertical,

Des alternateurs couplés à des turbines à vapeur, à gaz, diesel sont toujours à axe horizontal. La vitesse de rotation de ces alternateurs n'est pas choisie arbitrairement, elle est imposée par la turbine qui entraîne l'alternateur. Pour les turbines à vapeur et à gaz il faut les faire tourner le plus possible. La vitesse de rotation est également fonction de la fréquence : $N\ (tr/mn) = 60 \times (Hz)\ P$. [3]



I.4. Différents types des centrales électriques :

I.4.1. Centrale thermique à vapeur :

a. Principe de fonctionnement :

Une centrale thermique est une centrale électrique qui produit de l'électricité à partir d'une source de chaleur selon le principe des machines thermiques. La chaleur est utilisée pour produire de la vapeur d'eau sous haute pression qui fait tourner une turbine, entraînant elle-même un alternateur, (Par détente de la vapeur dans les différents corps HP.MP.BP).

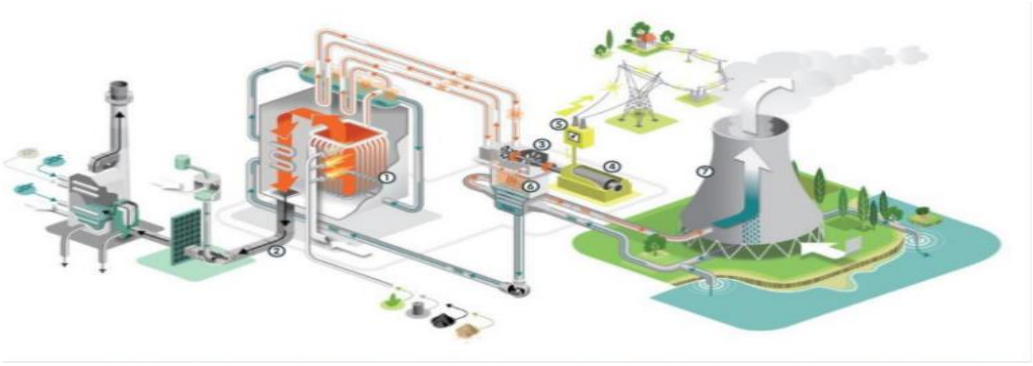


Figure 1.10 : Centrale thermique à vapeur

a. Immense chaudière construite en hauteur dans laquelle on brûle le combustible. La chaleur est absorbée par l'eau circulant dans une série de tubes SR 1 qui entourent les flammes. La circulation est forcée par la pompe PR 1R.

b. Réservoir, contenant de l'eau et de la vapeur à haute pression. Il constitue à la fois le point de départ de la vapeur vers les turbines et le récepteur de l'eau d'alimentation de retour. La vapeur se dirige vers la turbine haute pression (HP) en passant par un surchauffeur SR 2R. Ce dernier formé d'une série

de tubes entourant le feu, provoque une forte augmentation de la température de la vapeur (200 °C environ). Cela assure une vapeur qui est absolument sèche et donne un meilleur rendement thermique.

c. Turbine haute pression (HP) qui permet une première expansion de la vapeur durant laquelle une partie de l'énergie mécanique. La pression et la température à la sortie de la turbine HP sont donc plus basses qu'à l'entrée. Afin d'augmenter le rendement thermique et pour éviter une condensation prématurée de la vapeur, on la fait passer par un réchauffeur SR 3R composé d'une troisième série de tubes.

d. Turbine moyenne pression (MP) semblable à la turbine HP sauf qu'elle est plus grosse pour permettre à la vapeur de se détendre davantage.

e. Turbine basse pression (BP) à double carter qui enlève le reste de l'énergie thermique disponible dans la vapeur, permettant à cette dernière de se détendre dans un vide presque complet à l'intérieur du condensateur.

f. Condensateur qui provoque la condensation de la vapeur, grâce à la circulation d'eau froide venant de l'extérieur et circulant dans des tubes SR 4R. Une pompe d'extraction PR 2R enlève l'eau tiède condensée et la pousse à travers le réchauffeur (7) vers la pompe PR 3 Réalimentant la chaudière.

g. Réchauffeur. Dans cet échangeur de chaleur, une partie de la vapeur qui est passée par la turbine HP réchauffe l'eau d'alimentation, après quoi, la vapeur se condense aussi dans le condensateur. Les analyses thermodynamiques prouvent que le rendement ainsi obtenu est meilleur que si la vapeur dérivée dans le réchauffeur allait aux turbines MP et BP en passant par le réchauffeur SR 3R.

h. Pompe d'alimentation PR 3 qui refoule l'eau d'alimentation contre la forte pression régnant à l'intérieur du ballon (2) et complète ainsi le cycle thermique.

i. Brûleurs provoquant la combustion du gaz, du mazout ou du charbon pulvérisé projeté à l'intérieur de la chaudière. Avant d'être projeté dans la chaudière, le charbon est réduit en poudre. De la même façon, l'huile lourde est préchauffée et soufflée en jet vaporisé afin d'augmenter sa surface de contact avec l'air environnant.

j. Ventilateur soufflant l'air requis pour la combustion.

k. Ventilateur aspirant les gaz brûlés qui s'échappent par la cheminée. En pratique, une centrale contient bien d'autres appareils et accessoires essentiels pour assurer un bon rendement et des conditions sécuritaires. Ainsi, des vannes de réglage permettent de contrôler l'admission de la vapeur dans les turbines, un système d'épuration maintient la propreté de l'eau d'alimentation, des pompes gardent les paliers en bon état de lubrification, etc. Cependant, les composants que nous venons de décrire suffisent à expliquer le fonctionnement et les problèmes de base d'une centrale thermique.[4]

b. Avantages et inconvénient :

Tableau 1.1 : Avantages et inconvénients des centrales thermiques à vapeur

Avantages	Inconvénients
– Centrales d'appoint qui peut être facilement mise en fonctionnement ou arrêtées, – Moyen de production d'électricité « dispatchable » pour répondre aux variations de la demande Autonomie (dépendant de l'approvisionnement et du stock de combustible), – Flexibilité dans le choix du combustible (pour certaines technologies) – Longue durée de vie (30 à 40 ans)	– Réactivité faible au démarrage (plus d"1h pour atteindre la puissance max), – Usage de combustibles fossiles (raréfaction et coût de la ressource, dépendance énergétique), – Emissions de gaz à effet de serre et d'éléments polluants, en particulier sur charbon et fioul (SOx, NOx, poussières), – Coût et usure liés aux arrêts / démarrages besoin d'un débouché (ouverture) chaleur pour la cogénération.

I.4.2. Centrale thermique à gaz :



Figure 1.11 : Centrale à gaz

a. Principe de fonctionnement :

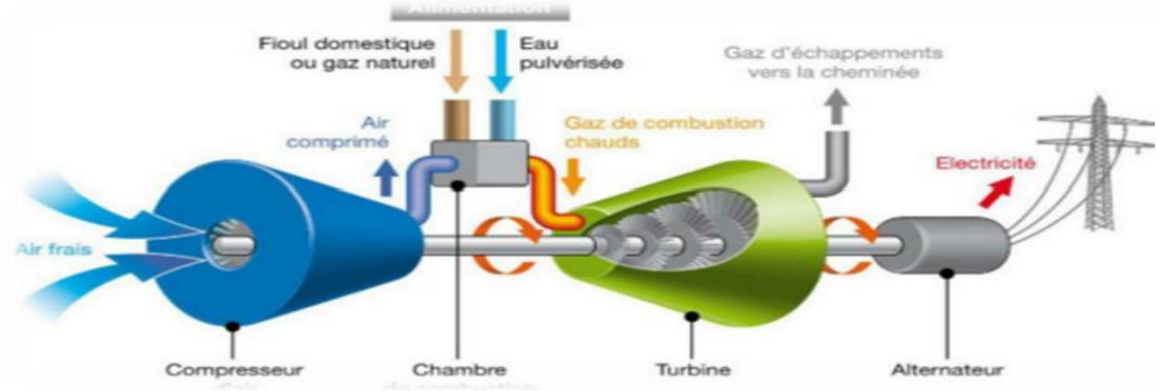


Figure 1.12 : Schéma de principe de fonctionnement d'une turbine à gaz

Une chambre de combustion, dans laquelle un combustible gazeux ou liquide est injecté sous pression, puis brûlé avec l'air comprimé, avec un fort excès d'air afin de limiter la température des gaz d'échappement ; Une turbine, généralement axiale, dans laquelle sont détendus les gaz qui sortent de la chambre de combustion. Dans une turbine à combustion (TAC), l'électricité est générée grâce à la circulation de gaz d'échappement issus d'une chambre de combustion et traversant directement la turbine. La chambre de combustion est le plus souvent interne à la turbine, elle génère de la chaleur à partir d'un combustible (gaz ou fioul) et d'air initialement comprimé. Sous cette forme, la turbine à gaz constitue un moteur à combustion interne à flux continu. On notera que le terme de turbine à gaz provient de l'état du fluide de travail, qui reste toujours gazeux, et non du combustible utilisé, qui peut être aussi bien gazeux que liquide. Sur le réseau électrique, la forte réactivité des TAC (moins de 30 min pour atteindre la puissance max) est souvent mise à profit pour fournir la pointe électrique. Les TAC sont également répandues pour la production décentralisée dans l'industrie ou le tertiaire, notamment pour un fonctionnement en cogénération. L'intérêt de la cogénération sur les TAC réside dans la haute température des fumées de combustion, dont la chaleur peut être récupérée et valorisée sans affecter la production électrique [4].

b. Avantages et inconvénients :

Tableau 1.2 : Avantages et inconvénients des turbines à gaz

Avantages	Inconvénients
- Moyen de production d'électricité « dispatchable » pour répondre aux variations de la demande, - Forte réactivité (moins de 30 min pour atteindre la puissance max), - Autonomie et sécurité de fourniture des TAC fioul, grâce au stock de combustible sur site Longue durée de vie (25 à 30 ans), - Qualité de la chaleur pour cogénération (haute température)	– Usage de combustibles fossiles (raréfaction et coût de la ressource, dépendance énergétique) – Emissions de gaz à effet de serre et d'éléments polluants, notamment pour le fioul (SOx, Nx) – Coût et usure liés aux arrêts / démarrages (croissants avec le besoin de flexibilité sur les réseaux)

I.4.3. Centrale thermique à cycle combiné :



Figure 1.13 : Centrale à gaz à cycle combiné

a. Principe de fonctionnement :

Une centrale à cycle combiné associe plusieurs cycles thermodynamiques dans un effort d'amélioration de l'efficience énergétique de la centrale considérée. Les centrales à cycle combiné gaz turbine associent ainsi une turbine à gaz et une turbine à vapeur pour produire de l'électricité. La turbine à gaz et la turbine à vapeur peuvent être reliées à une seule génératrice (qui produit l'électricité) ou peuvent être reliées à deux génératrices différentes. Le combustible, mélangé à de l'air sous pression est brûlé dans la chambre de combustion, provoquant ainsi une brusque augmentation de la température et de la pression des gaz brûlés. Ces gaz se détendent ensuite dans les aubes d'une turbine, en rotation autour du même arbre que l'alternateur, qui va générer de l'électricité. En sortie de turbine, les gaz encore chauds sont évacués dans l'atmosphère. Les centrales à cycle combiné permettent de mettre à profit l'énergie résiduelle de ces gaz chauds qui vont céder leur chaleur dans un échangeur pour faire bouillir le fluide d'un second cycle thermodynamique. La vapeur ainsi obtenue entrainera à son tour une deuxième turbine génératrice d'électricité [5].

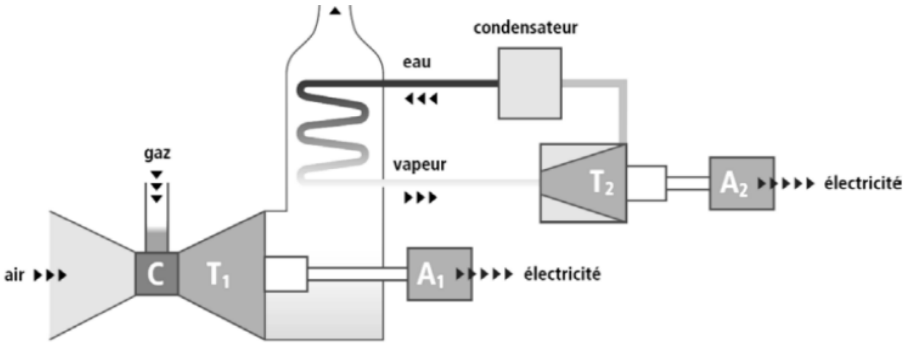


Figure 1 .14 : Principe d'une centrale à gaz à cycle combiné

b. **Avantages et inconvénients** :

Tableau 1.2 : Avantages et inconvénients des centrales à gaz à cycle combiné

Avantages	Inconvénients
- Moyen de production d'électricité « dispatchable » pour répondre aux variations de la demande, - Rendement élevé par rapport à un cycle simple, Réactivité (30 min à 1h pour atteindre la puissance max), - Impact environnemental réduit par rapport aux	– Usage de combustibles fossiles (raréfaction et coût de la ressource, dépendance énergétique) – Emissions de gaz à effet de serre, Coût et usure liés aux arrêts / démarrages (croissants avec le besoin de flexibilité sur les réseaux). – Besoin d'un débouché chaleur pour la cogénération

I.4.4. Centrale hydraulique :



Figure 1.15 : Centrale hydraulique

a. Principe de fonctionnement :

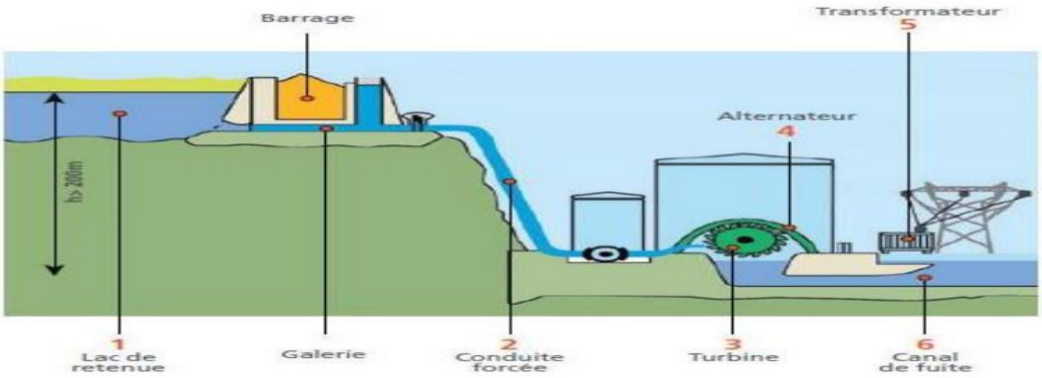


Figure 1.16 : Fonctionnement D'une Centrale Hydroélectrique

Les centrales hydroélectriques convertissent l'énergie de l'eau en mouvement en énergie électrique. L'énergie provenant de la chute d'une masse d'eau est tout d'abord transformée dans une turbine hydraulique en énergie mécanique. Cette turbine entraine un alternateur dans lequel l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique [4].

c. Avantages et inconvénients :

Tableau 1.3 : Avantages et inconvénients des Centrale hydraulique

Avantages	Inconvénients
- Usage de ressources renouvelables, sans émission de gaz à effet de serre pour la production d'électricité Forte réactivité (Démarrage en quelques secondes - Longue durée de vie (plus de 50 ans) Coût de production d'électricité faible	– Raréfaction des sites exploitables (contraintes géographiques) – Acceptabilité sociétale potentiellement complexe (impact sur la continuité écologique des cours d'eau) Production d'électricité fatale pour les centrales sans stock.

I.4.5. Central photovoltaïque :



Figure 1.17 : Central photovoltaïque

a. Principe de fonctionnement :

Le principe de l'obtention du courant par les cellules photovoltaïques se nomme effet photoélectrique, qui consiste à l'émission d'électrons par un matériau soumis à Traction de la lumière.

Cette production d'énergie électrique peut alors être stockée dans des batteries ou converties à l'aide d'un onduleur pour être distribue dans le réseau électrique [6].

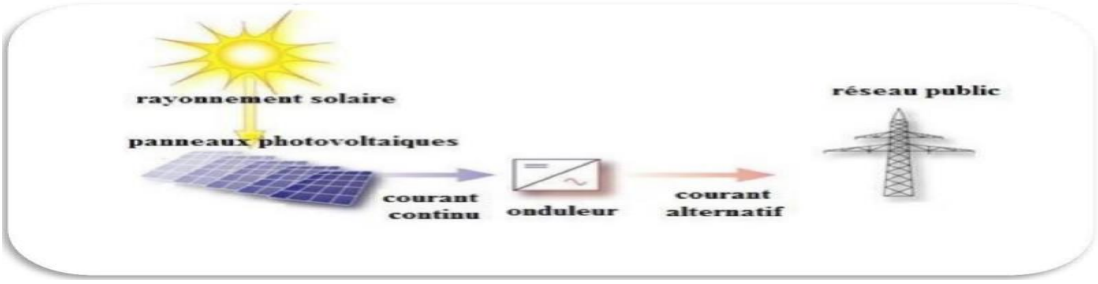


Figure 1.18 : Schéma de principe d'un générateur photovoltaïque

b. Avantages et inconvénients :

Tableau 1.4 : Avantages et inconvénients des Central photovoltaïque

Avantages	Inconvénients
- Energie indépendante, le combustible (le rayonnement solaire) est renouvelable et gratuit. - Génère l'énergie requise. - Réduit la vulnérabilité aux pannes d'électricité - L'extension des systèmes est facile, la taille d'une installation peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de la charge - Entretien minimal. - Aucun brui	– La fabrication des panneaux photovoltaïques relève de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux – Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles – Nécessite un système d'appoint (batteries) pour les installations domestiques – Le coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est cher. ⎫ Incertitude dans la prévision de la ressource – Création de perturbations sur le réseau (variations brutales d'ensoleillement)

I.4.6. Central à énergie éolienne :



Figure 1.19 : Central éolienne

a. Principe de fonctionnement :

L'éolienne, appelée aussi aérogénérateur, permet une transformation de l'énergie cinétique produite par le vent en énergie mécanique de rotation dans le but de produire de l'électricité. Il existe deux types d'éoliennes : certaines ont un axe horizontal, parallèle au sol, et d'autres avec un axe vertical, perpendiculaire au sol. L'éolienne à axe horizontal est munie de pales (généralement deux ou trois) qui tournent dans un plan vertical. Ainsi l'éolienne doit s'orienter face au vent pour une bonne efficacité. Les pales des éoliennes à axe vertical tournent quant à elles dans un plan horizontal et prennent alors le vent plus facilement [7]**.**

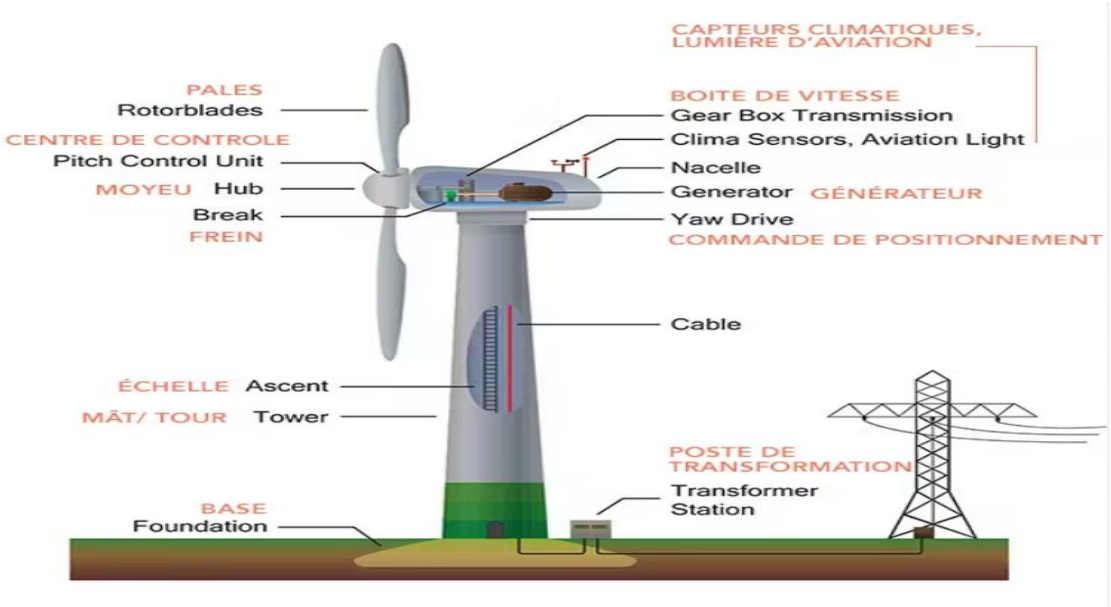


Figure 1.20 : Schéma d'ensemble d'une éolienne

b. Avantages et inconvénients :

Tableau 1.5 : Avantages et inconvénients des Central à énergie éolienne

Avantages	Inconvénients
- Usage de ressources renouvelables, sans émissions de gaz à effet de serre pour la production d'électricité - Intermittence de production pouvant être compensée en partie par le foisonnement des régimes de vent sur le réseau. - Conception, installation et maintenance aisée - Coût marginal de production d'électricité très faible ("gratuité de la ressource")	– Intermittence et caractère fatal de la production d'électricité (variabilité dans le temps et dans l'espace de la ressource) – Incertitude dans la prévision de la ressource – Contraintes géographiques sur les sites éligibles (topographie, obstacles, etc.) – Acceptabilité sociétale potentiellement complexe (impact paysager, biodiversité, etc.)

A -Avantages :

- Usage de ressources renouvelables, sans émissions de gaz à effet de serre pour la production d'électricité
- Intermittence de production pouvant être compensée en partie par le foisonnement des régimes de vent sur le réseau.
- Conception, installation et maintenance aisée
- Coût marginal de production d'électricité très faible ("gratuité de la ressource")

B -Inconvénients :

- Intermittence et caractère fatal de la production d'électricité (variabilité dans le temps et dans l'espace de la ressource)
- Incertitude dans la prévision de la ressource
- Contraintes géographiques sur les sites éligibles (topographie, obstacles, etc.)
- Acceptabilité sociétale potentiellement complexe (impact paysager, biodiversité, etc.)

I.5. Production d'électricité en Algérie : Focus sur les centrales à cycle combiné :

En Algérie, l'électricité est majoritairement produite à partir du gaz naturel, représentant plus de 96 % de la puissance installée. Les autres sources, comme le gasoil (centrales diesel) et l'hydroélectricité, jouent un rôle marginal. Le gaz alimente des centrales thermiques à vapeur, à gaz et à cycle combiné, ces dernières combinant turbines à gaz et à vapeur pour une efficacité accrue. Les cycles combinés se divisent en deux types : mono-arbre, avec une turbine à gaz, une turbine à vapeur et un alternateur aligné, et multi-arbres, avec plusieurs turbines et alternateurs. Le mono-arbre, économique et adapté à la charge de base, manque de flexibilité, mais des améliorations comme les embrayages et cheminées de by-pass permettent un fonctionnement en cycle simple. Les multi-arbres offrent une meilleure souplesse, modulant la puissance en arrêtant des turbines, idéal pour les creux de demande, tout en maintenant le rendement thermique grâce à une mise en service progressive.

Deux centrales à cycle combiné sont opérationnelles, réduisant la consommation de gaz de 2,98 th/kWh en 2005 à 2,70 th/kWh en 2009, économisant 1,4 milliard de m^3. La centrale multi-arbres de Skikda (825 MW), exploitée par SKS, a démarré ses turbines à gaz en 2005 et sa production complète en 2006, ajoutant 500 MW. La centrale mono-arbre de Cherchell (Tipasa, 1225 MW), gérée par SKH, est active depuis 2008-2009. D'autres centrales mono-arbres incluent Terga (Ain-Temouchent, 1200 MW, 2011) et Koudiet-Eddraouch (El-Taref, 1200 MW, 2012). Des centrales à cycle combiné sont également situées à Jijel (750 MW), Sétif (1200 MW), Djelfa (1200 MW) et Biskra (1400 MW). Une centrale hybride solaire-gaz à Hassi R'mel (134 MW, multi-arbres) est en essai depuis 2010.

Des projets prévoient la conversion de centrales à turbines à gaz (2000 MW) en cycles combinés, notamment dans les zones arides. Les centrales à gaz en service incluent M'sila (425 MW), Khenchela (420 MW), Batna (254 MW), Blida (560 MW), Annaba (71 MW), Oran (75 MW), Relizane (465 MW) et Alger port (71 MW). Ces initiatives renforcent l'efficacité énergétique et soutiennent une transition vers une production plus durable (figure 1 .20).

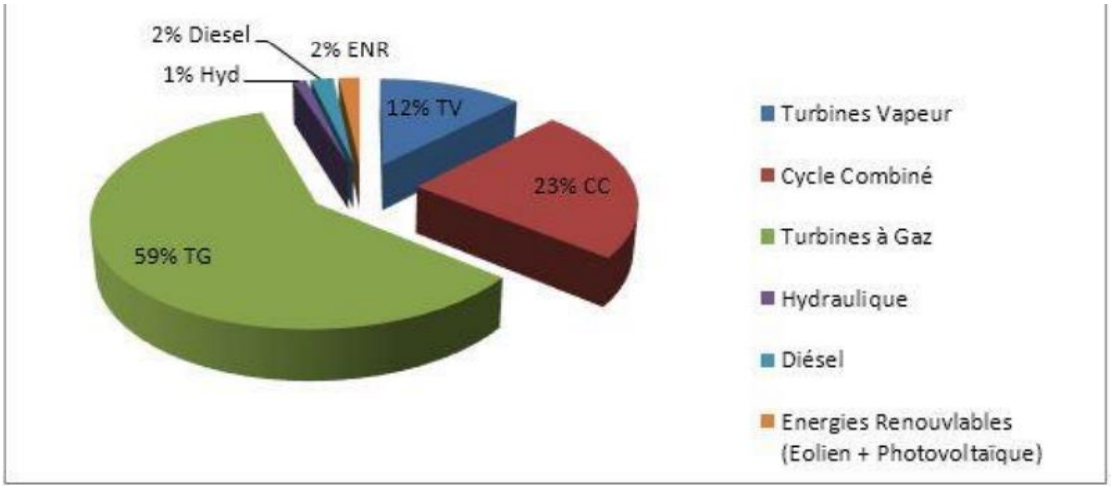


Figure 1.20 : Un cercle relatif indiquant le pourcentage de chaque type de production nationale

I.6. Conclusion

La production d'électricité repose sur l'exploitation de diverses formes d'énergie, issues aussi bien de ressources fossiles que renouvelables. Chaque type de centrale présente des avantages et des contraintes techniques, économiques et environnementales spécifiques. En Algérie, le parc de production électrique est en pleine évolution, combinant des centrales classiques à cycle combiné et à turbine à gaz, avec une ouverture progressive vers les énergies renouvelables. La connaissance de ces systèmes est primordiale pour orienter les choix technologiques de demain, en lien avec la durabilité énergétique et les objectifs de transition vers une énergie plus propre.

Chapitre II

La maintenance : contexte et entreprise d'accueil

II.1 Introduction :

Dans un contexte industriel en constante évolution, la maintenance occupe une place stratégique pour garantir la fiabilité, la disponibilité et la performance des équipements. Afin d'assurer une production continue, sécurisée et optimale, il est indispensable de comprendre en profondeur les concepts liés à la maintenance, ses objectifs et ses différentes formes d'application.

Ce chapitre présente dans un premier temps la définition, le rôle et les objectifs de la maintenance, avant d'aborder les méthodologies employées et les niveaux d'intervention. Il s'attarde ensuite sur les types de maintenance, notamment la maintenance préventive conditionnelle et les techniques associées. Enfin, une présentation de la société de stage ainsi qu'une description détaillée de la centrale thermique de Jijel viendront illustrer de manière concrète l'application des concepts étudiés, en mettant en lumière l'importance de la maintenance dans un environnement industriel réel.

II.2 Description de la maintenance :

Selon la norme européenne, "La maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à la maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise » (EN 13306/2001).

Selon (DIN), L'institut allemand de normalisation DIN définit la maintenance comme "l'ensemble des mesures visant à maintenir ou à rétablir l'état prévu d'un bien ainsi qu'à constater et à juger l'état actuel" (norme DIN 31051).

Selon AFNOR (Association Française de normalisation) de la maintenance industrielle est la suivante : "Ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié, ou dans un état où il est en mesure d'assurer un service déterminé" (NF X60-010). Tel que :

- L'action de MAINTENIR induit la notion de prévention sur un système en fonctionnement.
- L'action de RETABLIR induit la notion de correction consécutive à une perte de fonction

• Selon la norme NF EN 13306 la maintenance est « Ensemble de toutes les 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 dans lequel il peut accomplir la fonction requise » [8]

II.2.1 Le rôle de la maintenance :

Est la maîtrise de la disponibilité opérationnelle de équipements à fin qui ils soient unis à la disposition de la production par ces actions, la maintenance ammeistre le profit cumule durant la vie des équipements par :

- La réduction des coûts de maintenance
- L'accroissement de la durée rentable de vie des équipements.

Réduction des accidents et des risques concernant la sécurité des hommes et de l'environnement.[9]

II.2.2 Les objectifs de la maintenance :

Le tableau ci-dessous représente les objectifs de couts et les objectifs opérationnels.[9]

Tableau 2.1. Les objectifs de la maintenance

Les objectifs de coût :	**Les objectifs opérationnels :**
- Minimiser les dépenses de maintenance, - Assurer la maintenance dans les limites d'un budget. Avoir des dépenses de maintenance portant sur le service exigé par l'installation en fonction de leur âge et de leur taux d'utilisation. - Tolérer à la discrétion du responsable de la maintenance une certaine quantité de dépense imprévue	- Maintenir le bien durable (*dans un état acceptable et dans des meilleures conditions*), - Assure la disponibilité maximale à un coût raisonnable. - Eliminer les pannes à tout moment et au meilleur coût. Maximiser la durée de vie de bien. Remplacer le bien à des périodes prédéterminées. - Assurer au bien des performances de haute qualité.

II.2.3 Méthodologie de la maintenance :

Nous allons aborder certains aspects méthodologiques propres à l'exercice des métiers de la maintenance, et qui méritent une réflexion « isolée », car leurs mises en œuvre se retrouvent parmi les chapitres suivants (figure 2.1).

a. L'observation :

Eliminons les sens « action de se conformer à ce qui est prescrit » pour ne retenir que le sens « étude attentive d'un phénomène ». En maintenance, l'observation est le point de départ.

L'observation se rapporte aux symptômes. Elle se fait évidemment in situ, compliquée parfois par les mesures prises en urgence pour préserver un équipement :

- N'observer qu'une seule chose à la fois : isoler successivement les paramètres d'influence pour étudier séparément leurs effets ; - - -
- Observer sans juger : être objectif et impartial, éliminer les priori favorables à une thèse,

- Tout observer : ne rien éliminer a priori, même des faits qui semblent indépendants du phénomène recherché. Une anomalie sur une facture d'énergie peut permettre d'identifier un problème technique ;
- Tout noter (par croquis, schémas, notes, photos, image vidéo, etc.)

b. L'analyse :

L'analyse est la « décomposition d'un ensemble en élément aussi simple que possible ». Elle permet d'identifier les éléments d'un ensemble et de comprendre la nature de liaisons entre les éléments isolés d'une part, entre un élément et l'ensemble, d'autre part. La méthode de cet ouvrage est de découvrir dans une première partie, des aspects de maintenance par analyses de situations. Nous découvrirons ainsi l'organigramme d'un service (analyse fiabiliste des comportements pathologiques). [10]

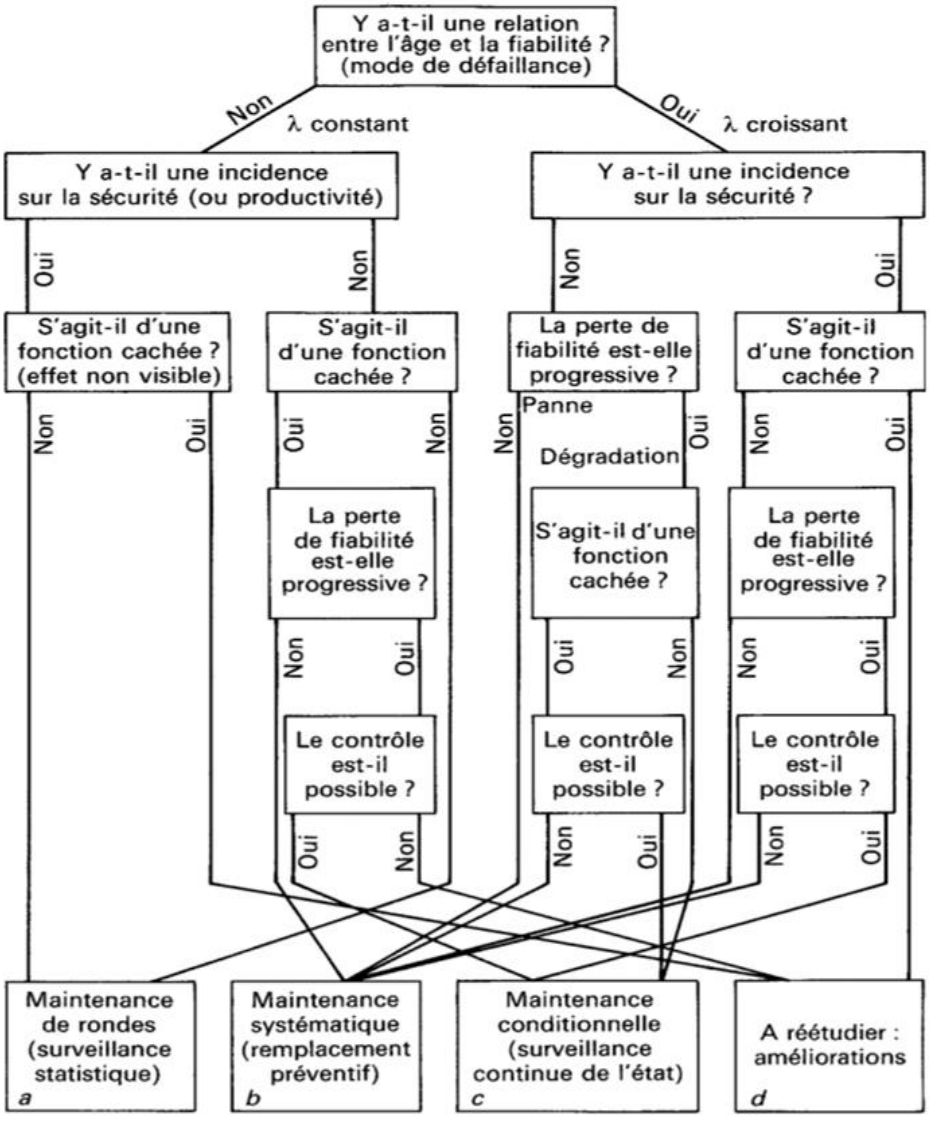


Figure 2.1 : Exemple d'arbre de décision appliqué au choix des méthodes de maintenance

c. La communication

La communication est la transmission d'informations, par des supports variés, entre un émetteur et un récepteur. Dans un service elle est le lien indispensable, entre l'action et la gestion (réflexion + décision). En maintenance le flux majeur concerne la liaison entre le site à maintenir (l'action) et le bureau de méthodes (la gestion).

La communication au sein du service de maintenance :

Nous allons décrire un système de communication assez traditionnel dans les services maintenance, relatif à une intervention corrective « lourde » prise entre la demande d'intervention et sa clôture. Nous utilisons les abréviations suivantes :

- DT, demande de travail, ou DI, demande d'intervention, ouvrant un N° de référence, provenant du client interne ;
- OT, ordre de travail, géré par l'ordonnancement ;
- BT, bon de travail, accompagnant la préparation et retourné complété après intervention
- DA, demande d'intervention d'approvisionnement ;
- BSM, bon de sortie magasin

II.2.4 Les niveaux de maintenance :

Le dégréé du développement de la maintenance est classifié en 5 nivaux. Ces niveaux sont donnés par la norme à titre indicatif pour servir de guide et leur utilisation pratique n'est concevable qu'entre des parties qui sont convenues de leur définition précise selon le type de bien maintenir (figure 2.2).

- **Niveau 1** : Réglages simples au moyen d'éléments accessibles sans aucun démontage ou ouverture de l'équipement, ou échanges d'éléments consommables accessibles en toute sécurité (voyants, fusibles...etc.).
- **Niveau 2** : Dépannages par échange standard des éléments prévus à cet effet et opérations mineures de maintenance préventive telles que les graissages ou contrôles de bon fonctionnement (rondes).
- **Niveau 3** : Identification et diagnostic des pannes réparations par échange de composants ou d'éléments fonctionnels, réparations mécaniques mineures et toutes opérations courantes de maintenance préventive telles que réglage général ou réalignement des appareils de mesure.
- **Niveau 4** : Tous les travaux de maintenance corrective ou préventive sauf rénovation et reconstruction. Avec réglages des appareils de mesure utilisés. Au besoin vérification des étalons de mesure par des organismes spécialisés.

– **Niveau 5** : Rénovation, reconstruction, et toutes les opérations importantes confiées à un atelier central ou à des unités extérieures. [11]

Tableau 2.2. Les niveaux de maintenance

NIVEAU	ACTIVITES
NIVEAU 1	RONDE PETIT ENTREIEN, GRAISSAGE
NIVEAU 2	ECHANGE STANDARD, CONTROLES DU BON FONTIONNEMENTE
NIVEAU 3	DIAGNOSTIC, PETITES REPARATION,OPERATIONS MINEURES PREVENTIVES
NIVEAU 4	TRAVAUX DE MAINTENANCE PREVENTIVE ET CORRECTIVE, REGLAGE DES MOYENS DE MESURE
NIVEAU 5	RENOVATION, RECONTRUCTION ET REPARATIONS IMPORTES



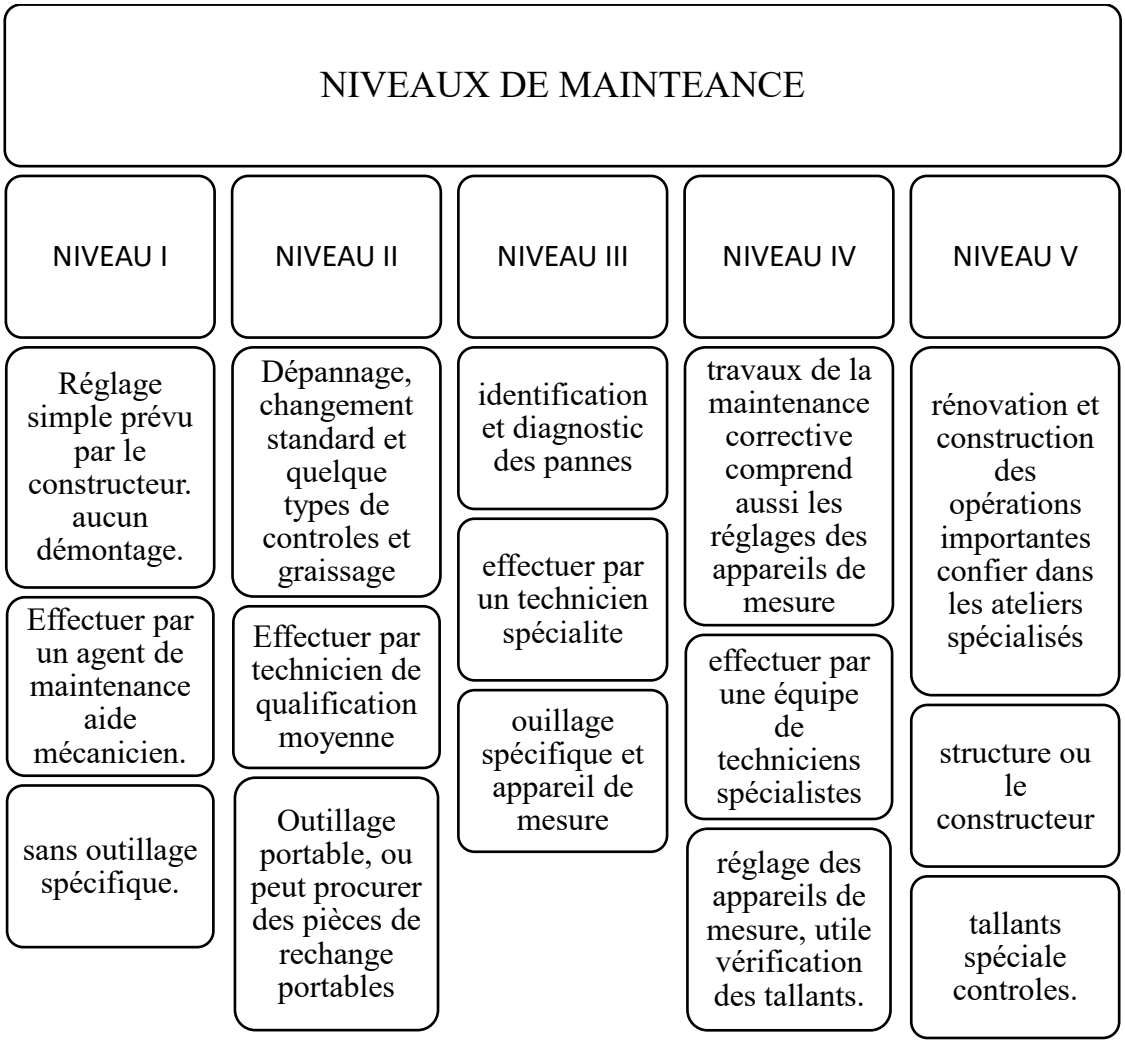


Figure 2.2: Les niveaux de maintenance

II.2.5 Les différents types de maintenances :

Il existe plusieurs façons d'organiser les actions de maintenance pour obtenir la disponibilité maximale du matériel au coût minimum. Il en ressort les types de maintenance suivants :

- La maintenance corrective.
- La maintenance préventive.

a) Maintenance corrective :

La norme (NF EN 13306) définit ainsi la maintenance corrective : « Exécutée après détection d'une panne est destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise ». Ou bien c'est l'ensemble des activités réalisées après la panne du système pouvant être liée à sa défaillance ou à la dégradation de sa fonction, elle a alors pour but de le remettre en état de marche. Il faut distinguer là, deux aspects : la maintenance curative et la maintenance palliative.

- **Maintenance curative** : (AFNOR) X 60-000 « Action de maintenance corrective destinée à permettre à un bien d'accomplir provisoirement tout ou partie d'une fonction requise. Appelée couramment « dépannage », la maintenance palliative est principalement constituée d'actions à caractère provisoire qui doivent être suivies d'actions curatives.
- **Maintenance palliative** : Le dépannage est une opération de maintenance palliative qui est destinée à remettre le système en état provisoire de fonctionnement de manière à ce qu'il puisse assurer une partie des fonctions requises.

La maintenance corrective débouche sur 2 types d'interventions :

a.1 Le dépannage :

Remise en état de fonctionnement effectué « in situ », parfois sans interruption du fonctionnement de l'ensemble concerné. Le dépannage a un caractère provisoire. Les dépannages caractérisent la maintenance palliative. Le palliatif est caractéristique du 2èmeniveau de maintenance.

a.2 La réparation :

Faite « in situ » ou en atelier de maintenance, parfois après dépannage. Elle a un caractère définitif. La réparation caractérise la maintenance curative. Le curatif est caractéristique des 2èmeset 3èmeniveaux de maintenance.

II.2.6 Maintenance préventive :

(Extrait de la norme NF EN 13306 X 60-319). Maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien.

Une opération de maintenance préventive est donc une intervention prévue, préparée et programmée en fonction de différents paramètres en vue d'éviter l'apparition probable d'une défaillance identifiée.

A partir de cette définition générale, on distingue trois variantes qui peuvent être utilisées conjointement en complément l'une de l'autre : maintenance préventive systématique ; maintenance préventive conditionnelle et maintenance préventive prévisionnelle.

II.2.7 Maintenance préventive systématique :

Maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien (EN 13306 : avril 2001). Même si le temps est l'unité la plus répandue, d'autres unités peuvent être retenues telles que : la quantité de produits fabriqués, la longueur de produits fabriqués, la distance parcourue, la masse de produits fabriqués, le nombre de cycles effectués, etc. Cette périodicité d'intervention est déterminée à partir de la mise en service ou après une révision complète ou partielle.

II.2.8 Les travaux de maintenance préventive systématique :

Ce sont des opérations dont les modalités d'exécution est fixé à l'avance et qui sont exécutées à des moments prévus :

-à périodicité calendaire prévue

-à un nombre prédéterminé d'heures de fonctionnement

-l'établissement d'un plan de maintenance préventive systématique, ce qui permet une programmation facile des travaux (essentiellement lorsqu'il s'agit de périodicités calendaires). Les actions préventives systématiques comprennent :

- Le nettoyage
- La lubrification
- Les inspections ou activités de surveillance du fonctionnement
- L'examen détaillé et prédéterminé de tout (visite générale) ou partie (visite limitée) d'un équipement, et pouvant impliquer des réglages ou des échanges d'éléments consommables
- Les remplacements de pièces ou échanges standard. [8]

II.2.9 Plan de maintenance préventive systématique :

- Créer un dossier ordonné des équipements à entretenir comportant :

- Le numéro d'identification et la désignation du matériel
  - L'importance du matériel : A : machine clé, B : machine courante, C : machine de secours
  - L'état général : machine neuve ; bon état, état moyen ; à rénover, à réformer
  - L'investissement et le coût de défaillance (coût de l'heure d'arrêt) :
    - Les notices du constructeur.
    - Les plans d'ensembles et sous.
    - Ensembles -les schémas.
    - La documentation technique sur les organes constitutifs.
  - Analyser les actions préventives à mener systématiquement et noter :
    - La liste des opérations à faire -les points à surveiller.
    - Les questions auxquelles le visiteur doit répondre.
    - Les conditions d'exécution de l'opération (en marche ou à l'arrêt).
    - La périodicité des interventions -le temps moyen de l'opération. [8]

II.2.10 Maintenance conditionnelle :

Est une maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé (auto diagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure, etc.) révélateur de l'état de dégradation du bien. Elle s'applique aux organes dont la dégradation peut être mise en évidence par des indicateurs. Cette forme moderne de maintenance permet d'assurer le suivi continu du matériel en service, dans le but de prévenir des défaillances attendues. Elle n'implique pas la connaissance de la loi de dégradation, la décision d'intervention préventive est prise lorsqu'il y a évidence expérimentale de défaut imminent en approche d'un seuil de dégradation prédéterminé.

II.2.11 Les travaux de maintenance préventive conditionnelle :

Ce sont des travaux qui sont déclenchés suite à des constats de dégradation du matériel, elles constituent un système d'alerte permettant d'agir avant la panne. Le système d'alerte est constitué par des données issues d'indications données par des capteurs installés sur le matériel. Le traitement et l'interprétation continue de ces données permettront de déclencher, en urgence ou de manière programmée, des travaux prédéterminés :

- Remplacement standard d'ensembles ou de pièces
- Révision partielle ou générale
- Réparations

• Modifications. [8]

II.2.12 Mise en œuvre de la maintenance préventive conditionnelle :

Partant du principe qu'une panne est le résultat d'une lente dégradation du matériel, l'idée retenue est de :

- Suivre la condition du matériel au travers des mesures
- Assurer un diagnostic permanent de son fonctionnement
- Disposer d'un appareillage et d'une instrumentation de contrôle :
  - Appareils robustes acceptant l'environnement industriel
  - Appareils à étalonnage facile
  - Appareils devant définir le degré de la dégradation
  - Appareils couvrant si possible toute la gamme des défaillances possibles
- posséder un personnel qualifié :
  - Avoir des bases sur les méthodes de maintenance conditionnelle
  - Connaître le fonctionnement des appareils de contrôle
  - Connaître profondément la machine à vérifier
  - Avoir une bonne expérience de la maintenance et du dépannage. [8]

II.2.13 Techniques de la maintenance conditionnelle (prédictive) :

Il existe une multitude de techniques pour la maintenance prédictive, qui sont :

a) **Surveillance des vibrations** : C'est la technique la plus efficace pour détecter les défauts mécaniques dans les machines tournantes.
b) **Emission acoustiques** : Cette technique peut être utilisé pour la détection, la localisation ainsi que la surveillance continue de la fissuration des structures et des pipelines.
c) **Analyse des huiles** : Cette technique consiste à analyser les huiles d'une machine, pour suivre l'apparition les particules métalliques microscopiques, dont la présence donne des indications sur les conditions des éléments mobiles.
d) **Analyse des particules** : A cause des phénomènes de frottement, la plupart des composants et organes de machines libèrent des débris métalliques. L'analyse de ces particules fournis des informations vitales sur la détérioration et l'usure de ces composants.
e) **Surveillance de la corrosion** : Les mesures de l'épaisseur du métal par ultrason sont menées pour traquer l'usure par corrosion
f) **Thermographie** : Cette technique permet de détecter les défauts thermiques et mécaniques pour analyser les équipement électriques et mécaniques.

g) **Suivi des performances** : C'est une technique efficace pour déterminer les problèmes opérationnels dans les équipements. L'efficience des machines fournit un regard sur leurs conditions internes.

II.2.14 Opération de maintenance préventive :

Les opérations suivantes sont effectuées de manière continue ou à des intervalles prédéterminés calculés sur le temps ou le nombre d'unités d'usage.

- **Inspection :**

➢ C'est une activité de surveillance s'exerçant dans le cadre d'une mission définie.

➢ Elle n'est pas obligatoirement limitée à la comparaison avec des données préétablies.

➢ Elle peut être effectuée sous forme de "rondes" et à pour but la détection de défaillances mineures :

- Défauts de lubrification (contrôles des niveaux)
- Défauts de pression, de températures, de vibrations.
- Détection visuelle de fuites, détection d'odeurs, de bruits anormaux.

- **Contrôle :**

Défauts de lubrification (contrôles des niveaux) défauts de pression, de températures, de vibrations. Détection visuelle de fuites, détection d'odeurs, de bruits anormaux. Dépannages simples : réglage de tension de courroie, échanges de lampes… C'est une activité qui consiste à la vérification de la conformité du bien par rapport à des données préétablies, suivie d'un jugement. L'activité de contrôle peut :

➢ Comporter une activité d'information,

➢ Inclure une décision (décision de non-conformité, d'acceptation, d'ajournement).

➢ Déboucher sur des actions correctives.

- **Visite :**

C'est une activité consiste à faire un examen détaillé et prédéterminé de tout (visite générale) ou partie (visite partielle ou limitée) des différents éléments d'un bien. Elle peut :

- Entraîner certains démontages ;
- Déclencher des opérations correctives des anomalies constatées ;
- Impliquer des opérations de maintenance de 1er niveau. [8]

II.3 Aperçu sur la société de stage :

La wilaya de Jijel était alimentée en énergie électrique à partir de la centrale hydraulique de DERGUINAH (Wilaya de Sétif) qui date des années 1940.

Suite à l'expansion de la Wilaya de Jijel (électrification rurale) et en prévision du renforcement du réseau national l'Etat a programmé la construction de la centrale thermique à Jijel qui est un investissement très lourd. Cette centrale thermique a été programmée à Jijel par rapport aux projets qui étaient planifiés dans le programme de développement de cette région (complexe sidérurgique) de Bellara – Zone branche port de Djen-Djen cale sèche DjenDjen etc...) au site idéal de l'implantation (au bord de la mer , déroulement de l'eau , à proximité du port) le projet a été confié à l'entreprise , mère SONELGAZ , le projet était de construire une centrale thermique équipée de trois turboalternateurs de puissance de 210 MW chacun , ainsi que (03) trois générateurs de vapeur d'une capacité de 670 t/h chacun , destiné à la combustion de gaz ou du fuel . La centrale thermique est d'un grand apport pour réseau national, elle participa à hauteur de 12%.

II.3.1 Le déroulement des travaux :

Les déroulements des travaux de construction de cette centrale a été lancé en 1984 après signature de contrat principal, les études de la fourniture des équipements, des travaux de mise en service et des essais de garantie des équipements de garantie font partie de volume des travaux de réalisation par la compagnie russe technopromexport (URSS avant la dissolution de l'union).

llùm en rigueur du contrat principal.

• Le - /04/1986 : commencement des travaux de génie civil.

• Le - /12/1987 : début de montage de la charpente métallique.

• Le -/ 01/1988 : début de l'arrivée des équipements.

• Le 06/06/1992 : mise en service de 1er groupe.

• Le 01/06/1993 : mise en service de 2eme groupe.

• Le 27/03/1994 : mise en service de 3eme groupe. [12]

II.3.2 La situation géométrique :

La centrale thermique de Jijel est située à 270 Km à l'est d'Alger et à 10 Km à l'est de Jijel à une bande de 450 m de largeur entre la méditerranée et la route nationale n ° 27 et une largeur De 540 m entre l'oued et le port de Djen-Djen, sa surface s'étend sur 60 ha.(figure2.3).



Figure 2.3: La situation géométrique de centrale

II.3.3 Fiche technique :

- Nombre de groupes : 3
- Combustible principal : gaz naturel (156 000 Nm3 /h)
- Fluide de refroidissement : eau de mer (80 000 m3 /h)
- Tension d'évacuation : 220 KV
- Superficie du terrain : 60 Ha
- Puissance d'extension prévue : 3 x 300 MW
- Puissance nominale unitaire (bornes alternateur): 210 MW
- Puissance nominale unitaire (bornes usine) : 196 MW
- Puissance max unitaire continue (bornes alternateur) :215 MW
- Cos φ nominal : 0.85
- Puissance nominale installée (bornes usine) : 588 MW
- Combustible de secours : fuel
- Capacité de stockage du fuel : 40 000 m3
- Capacité de stockage d'eau déminée : 10 000 m3
- Capacité de stockage d'eau dessalée : 10 000 m3

II.3.4 Le rôle de la centrale de JIJEL :

Pour satisfaire la demande en énergie électrique à l'Est du pays surtout en prévention de l'alimentation du complexe sidérurgique prévu dans la région de l'Est de Jijel et qui constitue un important client vu sa consommation de 320 MW, SONELGAZ a entreprit de réaliser un projet de construction d'une centrale thermique pour couvrir ce manque qui est de trois tranches chacune ayant une puissance nominale de (210 MW) soit au total (630 MW).

Le lieu idéal a été évidemment choisi à la wilaya de Jijel (proche du complexe sidérurgique prévu à Belara : vue de l'aspect de la pollution harmonique du complexe), en bordure de la mer méditerranéenne à proximité de l'embouchure de l'oued de Djendjen. Cependant et malgré la non réalisation du projet du complexe et la réalisation de deux centrales à l'Est du pays l'une à FKirina et l'autre à Skikda (la puissance installée plus de 1000 MW) et une nouvelle centrale à Belara en cours de construction prévue pour 2017 de 1200 MW, la gestion du réseau national demeure difficile puisque la réserve tournante reste beaucoup inférieure au niveau voulu pour la bonne conduite du réseau. [12]

II.3.5 Constitution de la centrale :

A. Les auxiliaires :

a) Station de pompage :

La centrale de JIJEL se provisionne de l'eau de mer sous forme brute ou transformée. En effet, l'eau de mer traitée et filtrée au niveau de la station de pompage. Traitée par l'hypochlorite de sodium (produit par la station d'ELECTROCHLORATION) et filtrée par des tambours rotatifs. Le circuit d'eau de circulation comprend respectivement suivant la circulation d'eau un dégrilleur, et un tambour filtrant rotatif à deux vitesses dont le rôle est de retenir les particules en suspension de l'eau de mer qui peuvent obstruer les tubes du condenseur et les filtres amont de chaque demi-condenseur. Au niveau de la station de pompage on a deux pompes de circulation de 6KV chacune, Elles refoulent l'eau de mer avec un débit de 27000 m3 /H sous 2.2 bars de pression.



Figure 2.4 : Station de pompage

b) Station de dessalement d'eau de mer (MSF) :



Figure 2.5 : Station de dessalement d'eau de mer

L'eau dessalée est produite par les quatre unités de dessalement multiflasch (M.S.F). Par mesure de sécurité, il faut isoler les bâches séparément, en réservant l'une pour le stockage et l'autre pour la consommation L'eau dessalée produite par les unités de dessalement présente une conductivité de l'ordre de 1 à 2 µs/Cm et une production nominale de 20 m3/h par unité soit 80 m3/h par les quatre unités. Cette station contient quatre pompes qui aspirent l'eau de mer après les tambours filtrants de la station de pompage de l'eau de mer, ces quatre unités de dessalements s'appellent Multi Stage Flash. Cette eau de mer est utilisée pour Le refroidissement du condenseur de 13ème et 14ème étage de chaque unité, cette eau produite est dirigée vers les deux bâches de 5000m3 chacune à travers un collecteur commun. La centrale de JIJEL, dispose d'une autre installation de production d'eau dessalée à partir d'eau de mer : L'OSMOSE INVERSE qui est un procédé nouveau dans la centrale. L'installation

dispose de deux unités de production dont chacune produit 10 m3/h soit 20 m3/h au total. Le seul inconvénient de ce procédé est la qualité d'eau produite pour cela on tolère une conductivité jusqu'à 18 µs/cm.

La production des M.S.F. et de L'OSMOSE INVERSE est évacuée sur le même collecteur d'où elle sera dirigée vers les bâches de stockage. [12]

c) Station de déminéralisation :

A partir de l'eau dessalée stockée dans les bâches de 5000 m3, l'eau est pompée aux deux lignes de déminéralisation où elle passe le lit mixte à résine, la production nominale est de 60 m3 par unité. L'eau produite présente une conductivité de l'ordre de 0.054 à 0.2 µs/Cm. Elle est stockée en suite dans deux bâches de stockage de 5000 m3 chacune. Les deux unités sont alimentées par trois pompes (deux en service et une en réserve) directement des bâches d'eau dessalée. L'eau déminéralisée alimente différents circuits de la centrale.

d) Déminée autonome :

Une autre source de production de l'eau déminéralisée est la déminée autonome qui traite les condensations encrassées du circuit eau- vapeur de la centrale. Cette installation minimise la consommation réelle de la centrale, si on tient compte du recyclage des eaux encrassée (ORU) qui sont traitées à partir de la bâche de 1000m3 ou on stocke en premier avant de le pomper vers la déminée autonome pour traitement et stockage dans les bâches d'eau déminéralisé.

e) Station d'Electrochloration d'injection hypochlorite :

La station d'électrochloration est conçue pour la production d'une quantité prédéterminée de chlore actif qui doit être nécessaire pour l'élimination de la faune et la flore marine qui se développent dans le système de refroidissement par l'eau de mer de la centrale, l'injection de chlore s'effectue en deux endroits différents :

-A la prise d'eau de mer de refroidissement (dit : dosage en continue).

-A l'amont des demi-condenseurs (dit : dosage à choc).

f) Station d'électrolyseur :

L'électrolyse peut être utilisée pour décomposer l'eau (H2O) en hydrogène et oxygène, selon la réaction suivante 2 H2O (liquide) ⟶ 2H2 (gaz) + O2 (gaz)

La station d'électrochloration est composée par deux unités d'électrolyseurs identiques montées en parallèle. Chaque unité est composée par trois (03) électrolyseurs montés hydrauliquement et électriquement en série. Chaque unité d'électrolyse est dotée de son alimentation propre en courant continu produit par un ensemble transformateur/redresseur. [12]



Figure 2.6 : Station d'électrolyseur

g) La chaudière auxiliaire :

La chaudière auxiliaire est une installation importante de la centrale thermique de JIJEL qui s'intègre dans le fonctionnement correct, particulièrement lorsque les trois groupes se trouvent en même temps à l'arrêt. La mise en service d'un premier groupe nécessite un vide préalable dans le condenseur pour pouvoir ouvrir le by-pass et faire débiter la chaudière de la tranche. Le vide dans le condenseur est réalisé par l'apport de vapeur aux circuits d'étanchéité vers les éjecteurs à partir du collecteur de 8 bars qui est alimenté de la chaudière auxiliaire

h) Station d'air comprimé :

Elle est nécessaire pour le nettoyage du circuit de refroidissement et de commande.

i) Station de stockage de FUEL :

Il est considéré comme le combustible de réserve.



Figure 2.7 : Station de stockage de FUEL

B. Equipements technologiques de la tranche :

a) La Chaudière En-670-13,8-545RM :(générateur de vapeur) C'est un appareil qui est destiné à extraire l'énergie calorifique du combustible et à la céder à la vapeur, sa capacité est de 670 tonnes/heure, elle est constituée de :

- **Le Foyer** :(chambre de combustion) c'est dans cette enceinte que l'on brûle le mélange air/combustible en produisant de la chaleur et des gaz (au voisinage de1200 c°). C'est la zone la plus chaude de la chaudière. C'est dans cette chambre que se dégage toute l'énergie calorifique du combustible. Elle est généralement formée de tubes- écrans appelés aussi écran vaporisateur.
- **Les Brûleurs** : (10NM21-26W01 et 10NM31-36W01) Leurs but est d'engendrer et d'entretenir la combustion du combustible dont ils assurent le mélange intime et homogène avec le comburant (air). Ils sont positionnés sur deux plages (6 supérieurs et 6 inférieurs).
- **Ventilateurs de soufflage :** (NG10 ET 20D01) Ils ont pour but la fourniture de l'air nécessaire 475.10 p3 m3/h à la combustion, les débits d'air (brassés par ces ventilateurs sont très importants. Les ventilateurs de soufflage aspirent de l'air atmosphérique et le refoule vers le foyer à travers un réchauffeur d'air.
- **Le Réchauffeur d'air 10NH10 et 20W01** : C'est un échangeur thermique dont le but est de :
  – Récupérer une partie de la chaleur encore contenue dans les gaz de combustion
  – Elever la température de l'air comburant pour améliorer la combustion.
- **Le Ballon 10NA10B01**:(réservoir) Il constitue une enceinte de mélange dans laquelle se trouve réunies la phase liquide /vapeur de l'eau de la chaudière. L'eau du ballon alimentant les écrans

vaporisateurs à travers des tuyauteries non exposées à l'action des flammes, revient au ballon sous forme d'émulsion eau- vapeur.

- **Faisceaux vaporisateur** : Ils sont constitués presque uniquement de tube d'écrans d'eau tapissant les parois du foyer sous l'action de la chaleur dégager par la flamme, l'eau contenue dans les tubes se vaporise sous forme de bulles. Les écrans sont alimentés à partir du ballon par l'intermédiaire de colonne d'alimentation extérieur au foyer et de collecteurs inférieurs. La vapeur produite se dégage dans les collecteurs supérieurs et des tubes de dégagement aboutissent au ballon chaudière.
- **L'Economiseur :** C'est un échangeur thermique qui a pour but de récupérer une partie de la chaleur restante dans les gaz de combustion pour élever la température (venant du réservoir à pression constante) d'alimentation avant d'être produite dans le réservoir (la vapeur surchauffée est dirigée vers la CHP).
- **Le Surchauffeur** : C'est un échangeur thermique dont le but est de récupérer une partie de la chaleur contenue dans les gaz de combustion et d'élever la température de la vapeur venant du réservoir à pression constante. La vapeur surchauffée est dirigée vers la CHP.
- **Le Resurchauffeur** : C'est un échangeur thermique parcouru par la vapeur ayant subi une 1ère détente dans le CHP. Pendant son trajet dans le resurchauffeur, la température de la vapeur s'élève une 2ème fois à pression constante, puis elle est envoyée vers les CMP et CBP où elle achène de se détendre.
- **La Cheminée :** Les trois cheminées sont élevées afin d'éviter le rabattement des gaz de combustion et obtenir leur plus grande dispersion dans l'atmosphère. Ils sont construits de la tôle (béton armé). Le sommet des cheminées est protégé contre l'action des gaz et les agents atmosphériques par un couronnement en fonte (cuivre rouge).
- **Ventilateurs de tirage NR10 ET 20D01 :** Le tirage naturel de la cheminée n'étant pas suffisant pour assurer la circulation des gaz depuis le foyer .Des ventilateurs de tirage (au voisinage de 680 m3/h) sont installés à la base de la cheminée, ils aspirent les gaz de combustion à leur sortie du foyer pour les refouler vers la cheminée.
- **Ventilateur de recyclage :** Il aspire une partie des fumées pour les refouler en face des bruleurs pour améliorer la combustion, cela permet de :
  - Augmenter le rendement de la chaudière.
  - Protéger les tubes écrans frontaux des flammes des brûleurs.

Il joue un rôle important dans le cycle eau-vapeur, il apporte à l'eau distillé la chaleur nécessaire pour la transformation en vapeur, cette vaporisation est caractérisée en fonction de la pression de

l'eau, la vapeur produite dans le ballon chaudière après être conditionnée en température dans la chaudière avant d'être véhiculé pour entrainer le Rotor de la turbine dans le sens de l'aubage des ailettes.

b) la turbine à vapeur : Les trois turbines utilisées dans la centrale sont de marque Russe (LMZ) et de type K215-130-2 sa réalisation nécessite le recours à des aciers fortement alliés (Cr- Mb -Va) pour résister aux contraintes thermiques, mécaniques (force centrifuge) et chimique (corrosion par la vapeur).



Figure 2.8 : la turbine

c) Le condenseur : Est un élément principal du cycle thermodynamique, car il fixe la température de la source froide qui intervient dans le rendement de l'installation, il reçoit et condense la vapeur provenant de l'échappement de la turbine, il joue le rôle de réserve d'eau pour la tranche. La circulation d'eau froide venant de la station de pompages, se circule dans des tubes provoque la condensation de la vapeur, cette vapeur condensée devient de l'eau tiède, ce dernier enlevé par une pompe d'extraction.

e) Pompes d'extractions :

Elle aspire l'eau du condenseur et la refoule au dégazeur.



Figure 2.9 : Pompes d'extractions

Ces pompes sont de type centrifuge, verticale. Pour assurer un fonctionnement fiable des pompes et des éjecteurs principaux aux faibles charges de la turbine, sont prévue des lignes de recirculation du condensat vers le condenseur.

f) Le réchauffeur : Le réchauffeur a un rôle très important dans le poste d'eau, ce rôle est énergétique car il rentre dans l'amélioration de rendement du cycle. On distingue deux types de réchauffeurs :

- Réchauffeur basse pression.

- Réchauffeur haute pression.

g) Le dégazeur : Il intervient dans le poste d'eau comme un réchauffeur par mélange, c'est un échangeur qui réchauffe l'eau d'extraction jusqu'à la température de saturation de la vapeur de chauffe, il assure le dégazage physique afin d'extraire les gaz dissous qui peuvent provoquer des corrosions dans la chaudière. L'eau à dégazer et la vapeur de soutirage Parcourent la tourelle dans le même sens du haut vers le bas.

h) Bâche alimentaire : C'est une bâche de stockage d'eau dégazée ; cette réserve d'eau est contenue dans une bâche cylindrique en acier, cette importante réserve d'eau utilisée lors des perturbations qui affectent les circuits en amant de cette bâche en maintenant dans ces conditions l'alimentation du générateur de vapeur.

i) Pompe alimentaire : Aspire l'eau de la bâche alimentaire et la refoule à travers les réchauffeurs haute pression vers la chaudière, elle alimente le générateur de vapeur en quantité nécessaire d'eau pour maintenir le niveau normal du ballon de la chaudière. [12]

C. L'alternateur :

C'est une machine rotative qui convertie l'énergie mécanique fournie par un moteur en énergie électrique, il nécessite une excitation en courant continue pour le bobinage rotorique. Plus de 95% de l'énergie électrique est produite par des alternateurs synchrones qui sont des machines électromécaniques triphasée à refroidissement par hydrogène et par eau distillée d'une puissance de 210 MW et à vitesse de rotation de 3000tr/min. Il est destiné à la production de l'énergie électrique conjointement avec une turbine à vapeur d'une puissance de 210 MW, fournissant des tensions de fréquences proportionnelles à leur vitesse de rotation. Ces machines sont moins couteuses et ont un

meilleur rendement que les machines à courants continu qui délivrent des tensions continues (95 % au lieu de 85%). L'alternateur est donc l'un des équipements les plus importants de la centrale thermique.

D. Les Transformateurs :

a) Transformateur principal :

Il est couplé à l'alternateur, il a pour rôle de porter la tension aux bornes de l'alternateur 15.75 kV à la tension de la ligne de transport 220 kV et d'évacuer l'énergie électrique produite par l'alternateur dans le réseau Pour son refroidissement, il est équipé des dispositifs suivants :

- Ventilation forcée assurée par des ventilateurs
- Circulation forcée d'huile assurée par des motos pompes

Le système de refroidissement est compose de 9 groupes des refrènements chaque groupe est équipée de deux ventilateurs et d'une pompe d'huile. L'huile chaude contenue dans la partie supérieure de la cuve est aspirée par une moto pompe et refoulée vers des refrènements d'huile qui la refroidit et la renvoie par la suite dans la partie inférieure.



Figure 2.10 : Transformateur principal

b) Transformateur de soutirage :

Utilisé pour l'alimentation des auxiliaires

Le système de refroidissement du transformateur est à circulation libre d'huile et a circulation forcée de l'air.

Il est équipe de 8 groupes de radiateur, chaque groupe est muni de 2 ventilateurs La mise en service du système de refroidissement se fait de façon automatique lorsque la température des couches supérieures d'huile atteint 55°C.

c) Transformateur d'excitation : Destiné pour l'alimentation des redresseurs d'excitation de l'alternateur. Il est alimenté par la barre conductrice blindé 15.75 kV. Il alimente les blocs redresseurs du système d'excitation sous la tension 222/363 V.

L'excitation de l 'alternateur est assurée par un circuit redresseur à base de thyristors. Ce circuit est alimenté à partir du transformateur d'excitation (15.75KV/0.4KV).

La tension redressée est évacuée vers le rotor à travers les charbons connectés au rotor. Le refroidissement des thyristors est assuré par l'eau.

d) Transformateur de secours : Il est destiné à l'alimentation sous une tension de 6 kV des auxiliaires des 3 tranches de la centrale en cas de pertes de la tension de service de ces auxiliaires. Il est alimenté par le réseau national sous une tension de 63 kV. Pour son refroidissement il est composé de : - circulation forcée d'air. - Circulation naturelle d'huile. -07 groupes de radiateur, chaque groupe est équipé de deux ventilateurs.

II.3.6 Fonctionnement technologique de la centrale :

La centrale thermique à vapeur utilise la vapeur d'eau comme élément moteur de la turbine, ainsi on aura besoin de très grandes quantités d'eau, d'où la nécessité de construire ce type de centrales au bord de la mer.

Le fonctionnement technologique consiste en la procuration de la vapeur vive, sous certaines conditions (température, pression et débit) à la turbine pour la maintenir en fonctionnement stable et continu selon des consignes préalablement définies.

Le condenseur contient de l'eau déminée, jusqu'à un certain niveau, à l'aide des pompes d'extraction, l'eau est refoulée vers les réchauffeurs basse pression (RBP) qui ne sont autres que des échangeurs thermiques chauffés par la vapeur de soutirage, l'eau parvient ensuite dans le dégazeur pour éliminer les gaz qui peuvent y être dissous, avant d'aller dans la bâche alimentaire , d'où elle est extraite grâce aux pompes alimentaires et est refoulée à travers les RHP (réchauffeurs haute pression) pour être chauffer d'avantage. [12]

Les RBP et RHP servent à économiser du combustible dans la chaudière, et à gagner du temps pour vaporiser l'eau.

Après quoi l'eau circule à travers l'économiseur, qui lui joue un double rôle, et qui n'est autre qu'un échangeur de chaleur, il chauffe l'eau d'avantage et refroidie les fumées, issues de la combustion, à envoyer dans l'atmosphère.

A ce stade l'eau est à environs 330° C, elle entre dans le ballon pour le remplir à un certain niveau, sous une pression de 125 bar, et à partir duquel sortent plusieurs colonnes (grosse tuyauterie) qui amènent l'eau dans les tubes écrans dans le foyer chaudière, où la température est à 1200°C, c'est ici que se passe la vaporisation de l'eau, la vapeur ainsi produite passera par les surchauffeurs pour être séchée et chauffée avant d'aller dans le ballon chaudière.

Il est clair que pour qu'il y ait combustion, il faut la présence de trois facteurs (triangle de feu), à savoir :

- Le combustible : c'est le gaz naturel, qui parvient au poste gaz sous 24 bar de pression, où il subira une première détente (24 / 6 bar), puis dans le deuxième poste pour une seconde détente (6 / 1 bar), avant d'arriver dans les douze brûleurs, où la pression au niveau de chaque brûleur est de 0.4 bar, en passant par les différentes vannes de réglage et de coupure (manuelle, motorisée et à action rapide ou de sectionnement).
- Le comburant : il est évident que sans la présence de l'air il ne peut y avoir de flamme, alors il faut bien aérer la chambre de combustion de la chaudière, et c'est pour assurer cette tâche que le ventilateur de soufflage VS est là, sauf que, surtout en hiver, l'air ambiant peut atteindre des températures très basses qui peuvent baisser le rendement de la combustion, et c'est pour cette raison qu'il est avantageux de chauffer l'air avant de l'envoyer vers les brûleurs, cela est réalisé grâce au RAR (réchauffeur d'air rotatif), il fait trois à quatre tours par minute et joue le rôle d'un échangeur thermique, puisqu'il récupère la chaleurs des fumées à dégager dans l'espace pour la céder à l'air comburant. Pour assurer une bonne circulation et évacuation des fumées depuis le foyer chaudière, un troisième ventilateur est mis en place, c'est le VT (ventilateur de tirage). Les fumées passent d'abord par les surchauffeurs et resurchauffeurs dans le foyer chaudière, puis en dernier lieu par l'économiseur et la cheminée.
- Le troisième élément intervenant à la combustion est la source de feu ou d'étincelle d'allumage, elle est produite au niveau de chaque brûleur grâce au gaz d'allumage.

  A ce stade la vapeur vive est présente dans le ballon chaudière, qui va alimenter la turbine via les vannes d'arrêt et les soupapes régulatrices ensuite le CHP où la vapeur va se détendre et perdre de sa température, alors elle est renvoyée aux les resurchauffeurs, dans la chaudière, pour

atteindre 545°C de nouveau, et ensuite vers le CMP, toujours en passant par les vannes d'arrêt et les soupapes régulatrices, la vapeur passera directement du CMP au CBP sans être réchauffée, pour enfin arriver dans le condenseur, et ainsi le circuit vapeur est fermé.

Il est à noter que pour un premier démarrage ou après un arrêt, la turbine est lancée grâce au CMP jusqu'à 30% de charge avant que les vannes d'arrêt du CHP ne s'ouvrent pour qu'il soit alimenté en vapeur et entre en fonctionnement.

Si, au cours du fonctionnement normal, un quelconque problème se présente, et qui nécessite le déclenchement de la tranche, la turbine est by passée et la vapeur va directement du ballon vers le condenseur.

De même si la température de la vapeur excède le seuil, les éjecteurs entrent en service, en injectant de l'eau dans la tuyauterie de vapeur.

Au niveau des CHP et CMP sont prévus des soutirages de vapeur pour assurer le réchauffement des RBP et RHP.

II.4 Conclusion :

La maintenance industrielle s'impose aujourd'hui comme une fonction incontournable pour garantir la fiabilité, la performance et la durabilité des équipements de production. Ce chapitre a permis de présenter les fondements de la maintenance, en insistant sur ses rôles, ses objectifs et les différentes méthodes qui permettent de prévenir les défaillances et d'optimiser les performances des installations industrielles. Nous avons abordé les niveaux et types de maintenance, en mettant en valeur l'importance de la maintenance préventive conditionnelle, qui repose sur la surveillance continue de l'état des machines grâce à des techniques modernes et efficaces.

La méthodologie de maintenance, avec ses outils spécifiques et ses stratégies adaptées, constitue un levier majeur pour l'amélioration de la compétitivité des entreprises industrielles. Elle nécessite une organisation rigoureuse, une planification précise et une réactivité constante face aux dégradations inévitables des équipements au fil du temps.

Par ailleurs, une attention particulière a été portée à l'étude de la Centrale Thermique de Jijel, unité de production d'électricité d'une capacité de 600 MW répartie sur trois tranches. La présentation de cette centrale a permis d'illustrer concrètement l'importance d'une organisation rigoureuse des opérations industrielles, notamment dans le contexte de l'exploitation énergétique. L'historique, la situation géographique, ainsi que la constitution et le fonctionnement technologique de la centrale témoignent de

l'ampleur et de la complexité des installations qui nécessitent une maintenance continue et minutieuse pour garantir un fonctionnement optimal et sécurisé.

Ainsi, à travers l'approche théorique de la maintenance et l'étude pratique d'une infrastructure industrielle d'envergure comme la centrale de Jijel, il apparaît clairement que la pérennité et l'efficacité des systèmes de production modernes dépendent largement de la qualité de leur maintenance et de la maîtrise technologique des exploitants. [12]

Chapitre III

Description et étude de la méthode de maintenance utilisée dans la société

III.1 Introduction :

L'évolution et la complexité des systèmes de production, ainsi que le besoin de produire davantage, mieux, plus rapidement et de manière plus propre, ont contraint les industriels à structurer et à réorganiser les « ateliers d'entretien ».

Pour ce faire, de nouveaux concepts d'organisation et de nouvelles méthodes d'intervention sur les structures de production, tous secteurs confondus, ont été développés. Aujourd'hui, l'entretien a laissé place à la maintenance. Ce changement ne réside pas uniquement dans une simple modification de terminologie, mais reflète une transformation profonde dans la manière de concevoir et de mettre en œuvre les actions liées à ce que l'on appelle désormais la maintenance.

III.2 Logistique de maintenance :

La structure de maintenance dispose des moyens matériels et des moyens humains :

III.2.1. Les moyens matériels *:*

a. Documentation :

En générale, il y a une autosuffisance de la documentation au sein de la centrale. Elle est constituée essentiellement de :

- Schéma de vue éclatée.
- Schéma de guide.
- Schéma de dépannage.
- Schéma d'exploitation.
- Fichiers historiques des différents équipements.

b. Manutention :

La centrale possède deux ponts roulants situés dans la salle des machines destinés pour les travaux de réparation à usage interne, utilisé surtout pour les grosses réparations sur le groupe turbo-alternateur et les auxiliaires, d'une grue pour les réparations à usage extérieure et des petits portiques pour les travaux locaux.

c. Appareils et outillage :

Chaque agent est équipé de son propre outillage (caisse à outils) selon le domaine de sa spécialité d'exécution. On trouve aussi un atelier d'une grande envergure permettant l'usinage et

la confection des pièces défectueuses. On trouve aussi un magasin possédant l'outillage nécessaire et les dispositifs pour les travaux spécifiques.

III.2.2. Les moyens humains :

La composition de l'effectif affilié à la structure de maintenance se compose de :

- Chef de service maintenance.
- Bureau de méthodes.
- Chef de subdivision.
- Chef de section.
- Bureau des techniciens.
- Les ouvriers spécialisés.

III.3 Forme de maintenance :

La maintenance préventive (conditionnelle ou systématique), a un rôle prépondérant et une action spécifique se basant sur des actes planifiés dans le temps. Elle est la plus appliqué au niveau du service.

Elle peut être appliquée comme :

- Des entretiens avec arrêts systématiques.
- Des contrôles et essais systématiques.
- Graissage…

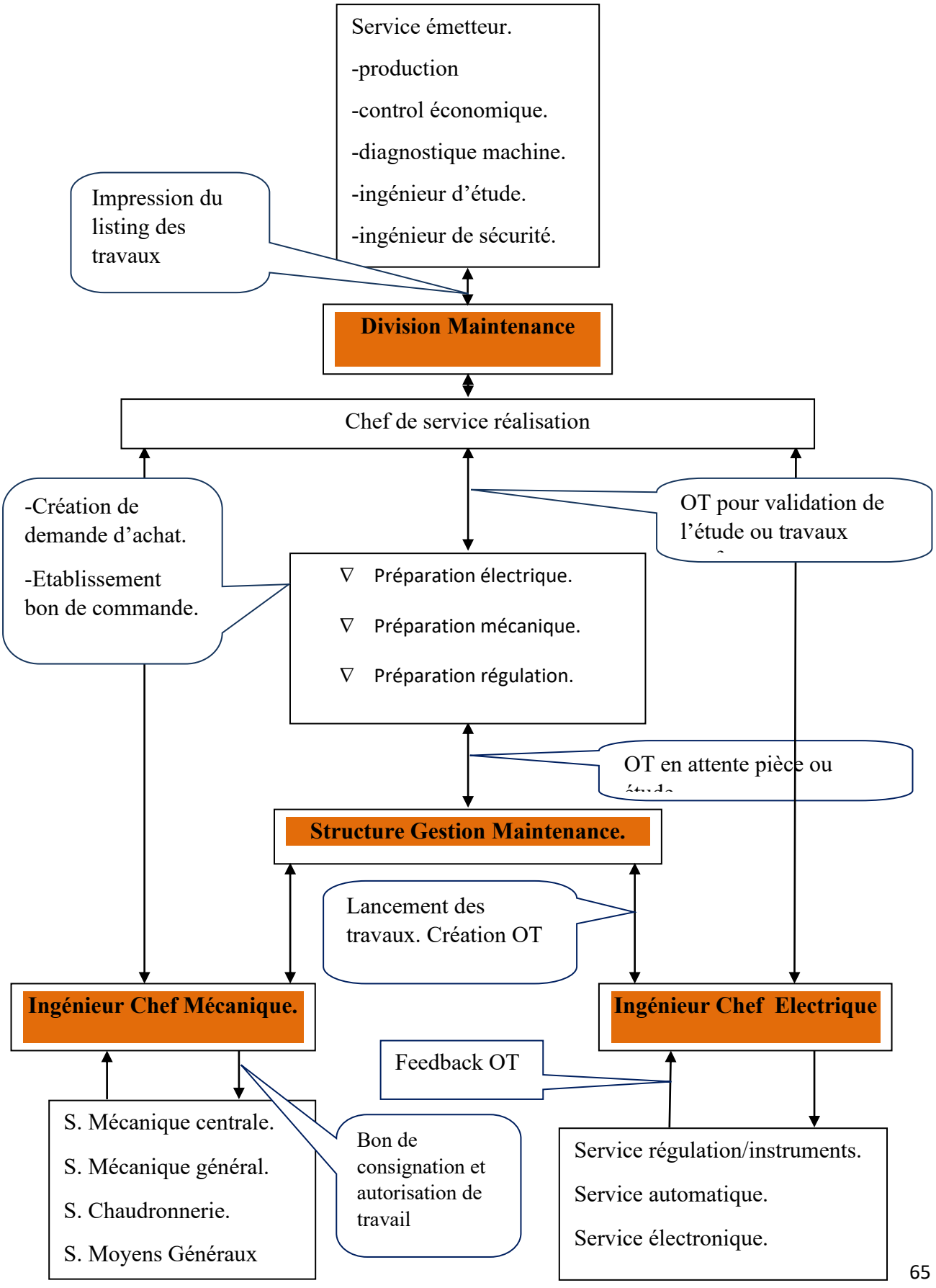
La maintenance préventive systématique actuellement pratiqué coute chère pour raisons :

- Intervention relativement long.
- Remplacement des composants n'ayant pas atteint la limite de leur durée de vie.
- Des avaries peuvent intervenir à tout moment, causant quelquefois des dégâts importants.

La maintenance préventive conditionnelle est appliquée principalement sur :

- Mesure des vibrations.
- Contrôle des huiles (graissage et diélectrique).
- Thermographie.
- Contrôle des isolations des enroulements.

III.4 Description d'une intervention de la maintenance :



Cet organigramme représente les différentes étapes et acteurs impliqués dans le processus d'intervention de maintenance au sein de la centrale, depuis la demande initiale jusqu'à la réalisation des travaux.

a) Émetteur de la demande :

L'intervention débute avec un service émetteur, qui peut être :

- Le service production,
- Le service de contrôle économique,
- Le diagnostic machine,
- L'ingénieur d'étude,
- Ou l'ingénieur de sécurité.

Ce service transmet une demande à la **Division Maintenance**.

b) Division Maintenance :

La division maintenance reçoit la demande, imprime le listing des travaux, et transmet l'information au Chef de service réalisation, qui va diriger la suite des opérations.

c) Étapes de préparation :

Le chef de service réalisation gère trois aspects de la préparation :

- Préparation électrique,
- Préparation mécanique,
- Préparation régulation.

En parallèle, deux scénarios sont possibles :

- Création d'une demande d'achat + établissement du bon de commande (si besoin de pièces),
- Ou validation d'un Ordre de Travail (OT) pour une étude ou des travaux neufs.
- Si certaines pièces ou études sont manquantes, l'OT est mis en attente.

d) Structure Gestion Maintenance :

Lorsque les conditions sont réunies, la Structure Gestion Maintenance prend le relais :

- Elle lance les travaux.
- Et crée l'Ordre de Travail (OT) officiel.

e) Répartition des travaux :

Les travaux sont ensuite dirigés vers :

L'Ingénieur Chef Mécanique, qui supervise :

- La mécanique centrale,

- La mécanique générale,
- La chaudronnerie,
- Les moyens généraux.
- Ou l'Ingénieur Chef Électrique, qui gère :
- Les instruments de régulation,
- L'automatisme,
- Et l'électronique.

f) Exécution et retour :

Avant toute intervention, un bon de consignation et une autorisation de travail sont établis. Une fois les travaux terminés, un feedback OT est transmis pour finaliser le processus.

III.5 La Gestion de maintenance assistée par ordinateur (GMAO) :

G.M.A.O signifie Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur. Il s'agit d'un logiciel spécialisé pour effectuer la gestion d'un service technique. La GMAO peut être définie comme un progiciel qui permet une aide à la décision dans une entreprise pour maîtriser les coûts des installations à maintenir, Optimiser les moyens techniques et humains de la maintenance ainsi qu'obtenir des mesures précises sur les temps des pannes, leurs causes premières et les temps nécessaires à leur réparation. La Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur est constituée d'une base de données (historique) qui est alimentée par le personnel de maintenance via un formulaire. La base de l'historique est l'inventaire des équipements.

III.5.1 Fonctionnalités d'une GMAO :

Une GMAO vise en premier lieu à assister les services maintenance des entreprises dans leurs missions. Un service de maintenance, selon la définition de l'AFNOR, cherche à maintenir ou à rétablir un bien (équipement) dans un état spécifié afin que celui-ci soit en mesure d'assurer un service déterminé. Une GMAO peut également être utile dans d'autres services de l'entreprise, comme la production ou l'exploitation (afin de fournir des informations sur l'état des équipements), ainsi que la direction financière ou générale de l'entreprise, en fournissant des indicateurs facilitant les prises de décisions en matière de renouvellement de parc, par exemple.

Ainsi, les fonctions les plus courantes de ces progiciels sont :

- La gestion des équipements : inventaire des équipements, localisation, gestion d'information dédiée par type d'équipement (production, bâtiments, véhicules, réseaux, ordinateurs) ;

- La gestion de la maintenance : corrective (avec OT : ordre de travaux, ou BT : bon de travaux, ou ODM : ordre de maintenance), préventive (systématique, conditionnelle, prévisionnelle) ; ce module comporte souvent des fonctionnalités ouvertes à des utilisateurs au-delà du service de maintenance, comme une gestion des demandes d'intervention (DI), permettant à toute personne autorisée de l'entreprise de signaler une anomalie devant être prise en considération par la maintenance ;
- La gestion de la mise en sécurité des installations pour les travaux de maintenance : consignation, centralisation, autorisation de sécurité, déconsignation pour permettre le verrouillage optimal d'une installation pendant des opérations de maintenance ;
- La gestion des stocks : magasins, quantités minimum ou maximum de réapprovisionnement, analyse ABC, listes de sélection (*pick-lists*), référencement et recherche, articles de rechange, catalogue fournisseurs ;
- La gestion des achats : de pièces détachées ou de services (sous-traitance, forfait ou régie), cycle devis, demande d'achat, commande, réception et retour fournisseur, facturation ;
- La gestion du personnel et le planning : activités, métiers, planning de charge, prévisionnel, pointage des heures ;
- La gestion des coûts et budget : de main-d'œuvre, de stocks, d'achat, de location de matériel, préparation des budgets, suivi périodique, rapports d'écart ;
- Indicateurs clés de performance (*key performance indicators* : KPI) : cockpit de pilotage ou tableau de bord pour le manager (requêtes de base de données concernant des statistiques, des alertes) ;

D'autres fonctionnalités existent : gestion de l'inspection, métrologie, normes (transport, VRM), code-barres, lien avec un SIG, matériel mobile (PDA, pocket PC), télésurveillance (analyse vibratoire, infra-rouge).

De plus, la GMAO est généralement la seule application de l'entreprise ayant une description complète et technique de l'ensemble des équipements de celle-ci. Ce constat a amené progressivement certaines GMAO à proposer des fonctionnalités s'appuyant sur cette connaissance des équipements, mais sortant du cadre de la maintenance au sens strict. On peut citer par exemple le suivi de certaines réglementations (ATEX dans l'industrie, contrôle technique de véhicule, matériovigilance dans les hôpitaux…), ou la gestion de certains processus métier liés aux équipements (suivi des consommations dans les transports, gestion des plans dans le bâtiment…). L'ajout de ces fonctionnalités a amené les éditeurs à parler de plus en plus de logiciels de gestion des biens d'équipement (*asset management*) pour souligner que leurs applications avaient vocation à être utilisées bien au-delà du service de maintenance.

III.5.2 Bénéfices attendus :

Les bénéfices attendus de la mise en place d'une GMAO sont potentiellement importants, bien que difficiles à chiffrer car souvent indirects. On peut citer :

- Meilleure gestion et réduction des coûts (main-d'œuvre, pièces détachées, traitement administratif, etc.),
- Amélioration de la fiabilité et de la disponibilité des équipements,
- Optimisation des achats (aide aux appels d'offres, gestion des contrats de prestataires externes, etc.),
- Amélioration du retour d'expérience (REX) grâce notamment à l'historique des travaux de maintenance,
- Amélioration de la planification des interventions,
- Recherche du ratio préventif/correctif optimal en fonction des équipements gérés et des objectifs de disponibilité,
- Meilleur contrôle de l'activité des sous-traitants et prestataires externes,
- Amélioration de la gestion des stocks (meilleur contrôle des sorties, aide aux inventaires, optimisation du taux de rotation, etc.),
- Traçabilité des équipements, parfois pour répondre à des contraintes réglementaires (ATEX, 21CFR11, etc.),
- Participation à une démarche de maintenance productive totale (TPM),
- Aide à la décision grâce à la fourniture d'indicateurs plus objectifs, notamment les décisions de renouvellement de matériel.

III.5.3 Intégration de la GMAO dans le système d'information de l'entreprise :

Une GMAO peut avoir intérêt à s'interfacer avec d'autres logiciels existants de l'entreprise, et notamment :

- Une gestion des stocks : afin de gérer les stocks de pièces de rechange. En pratique, les spécificités de gestion d'un stock de pièces de rechange par rapport à un stock de production amènent souvent à utiliser les modules de gestion de stock proposés par les GMAO elles-mêmes.
- Une gestion d'achat : afin de gérer les achats de pièces de rechange ou de service. Des modules de gestion d'achat sont souvent proposés au sein des GMAO, mais il est souvent préférable d'utiliser le logiciel d'achat déjà en place dans l'entreprise.
- Une gestion budgétaire ou financière : la GMAO dispose de données de coûts qu'il peut être intéressant de consolider dans la gestion financière globale de l'entreprise.

- Une gestion électronique de document (GED) : notamment afin d'accéder à des archives de plans ou de documents techniques.
- Une gestion de patrimoine (dans le domaine immobilier).
- Un système temps réel de GTC/GTB : afin de générer automatiquement dans la GMAO des interventions en cas de survenance de certains évènements détectés par capteurs, ou afin de mettre à jour les valeurs de compteurs d'utilisation concernant certains équipements.

La GMAO est dans la plupart des cas intégrée à une solution de gestion intégrée de l'environnement de travail (Integrated Workplace Management System - IWMS). Ces solutions contiennent des processus de gestion des équipements qui s'orientent sur des actifs importants du facilité management et de la gestion immobilière comme les bâtiments, les postes de travail, les appareils techniques et les installations.

III.6. Circuit de demande d'intervention et l'ordre de travail (DI/OT) :

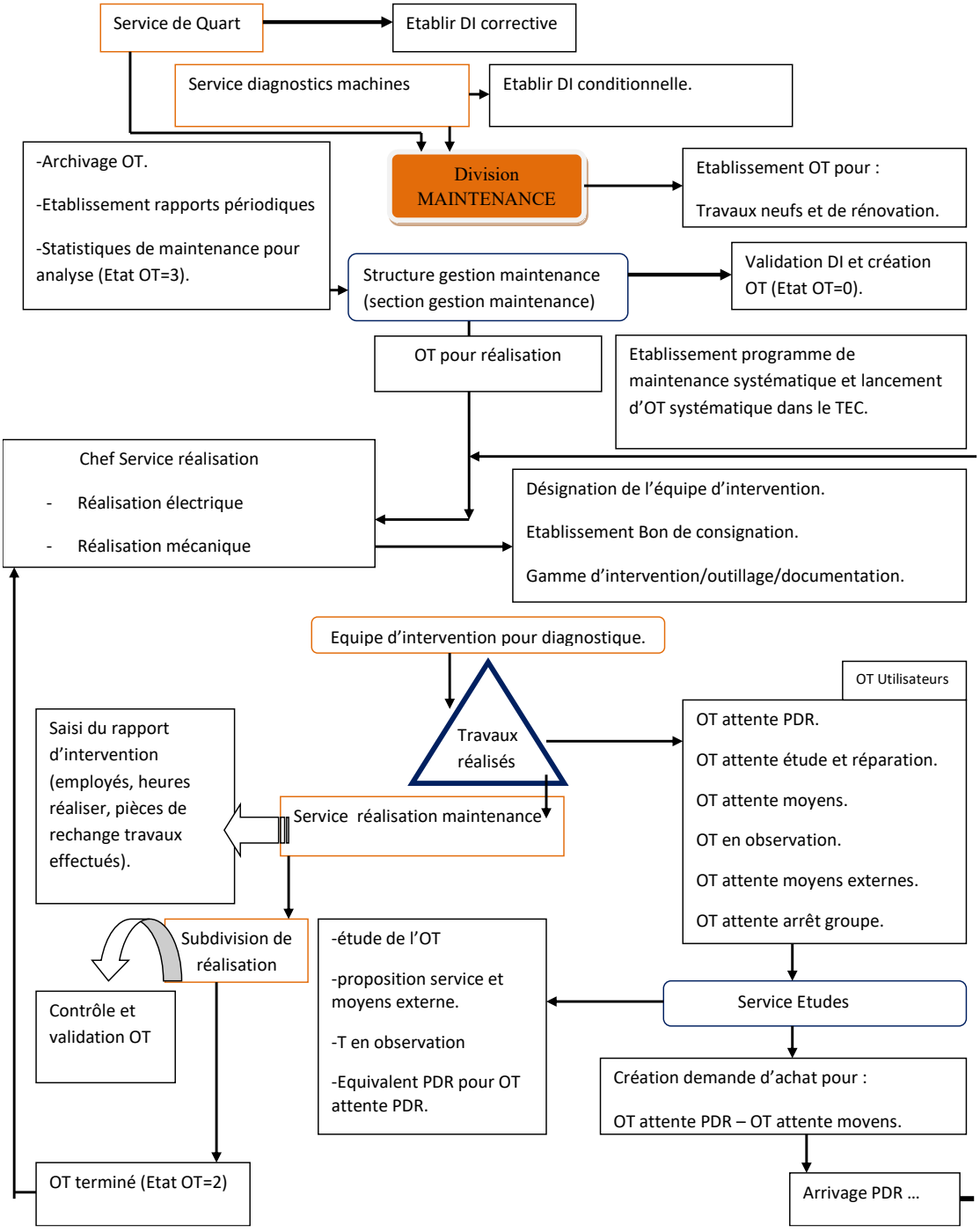


Figure 3.1 : Organigramme de Circuit de demande d'intervention et l'ordre de travail (DI/OT) [12]

La société étudiée s'appuie sur un logiciel GMAO pour structurer, planifier et tracer l'ensemble des interventions de maintenance. Ce système permet une gestion centralisée et informatisée des demandes

d'intervention (DI) et des ordres de travail (OT), assurant ainsi une circulation fluide de l'information entre les différents acteurs de la maintenance.

a) Origine des Demandes d'Intervention (DI) :

Le processus débute par la détection d'une anomalie ou d'un besoin d'intervention :

- Le Service de Quart intervient généralement pour signaler des dysfonctionnements observés pendant l'exploitation quotidienne. Il saisit alors une DI corrective dans le GMAO.
- Le Service de Diagnostic Machines, lui, effectue des analyses conditionnelles (vibrations, températures, bruit, etc.) sur les équipements critiques comme les pompes d'extraction. En cas d'écart par rapport aux valeurs nominales, une DI conditionnelle est générée.

Toutes les DI sont directement saisies dans le GMAO, assurant ainsi :

- Une traçabilité complète.
- Une hiérarchisation des priorités.
- Une mise en file d'attente pour évaluation.

b) **Évaluation et validation des DI par la Division Maintenance :**

Une fois la DI introduite dans le GMAO, elle est automatiquement dirigée vers la Division Maintenance, et plus précisément vers la Structure de Gestion de la Maintenance.

Cette entité joue un rôle clé :

- Elle analyse le contenu de la DI.
- Valide la demande si elle est jugée fondée.
- Génère un OT (Ordre de Travail) dans le GMAO, avec le statut initial OT=0, indiquant qu'il est en attente de traitement.

L'OT peut concerner :

- Des travaux correctifs (issues d'une DI urgente).
- Des opérations de maintenance préventive planifiée (systématiquement lancées selon le plan de maintenance intégré dans le GMAO).
- Des travaux de rénovation ou d'amélioration.

c) Préparation de l'intervention :

Une fois l'OT généré, le GMAO alimente les différents intervenants avec toutes les informations nécessaires à la réalisation :

- Affectation de l'équipe d'intervention (électrique, mécanique ou diagnostic).
- Élaboration du bon de consignation pour assurer la sécurité des opérations.
- Mise à disposition des documents techniques, gammes d'intervention, outillages et pièces de rechange.

Le Chef du Service Réalisation, qui dirige les activités sur le terrain, reçoit l'OT via le GMAO et procède à l'organisation des tâches.

d) Exécution des travaux :

L'équipe d'intervention, désignée depuis le système, réalise les opérations conformément à l'OT.

Une fois l'intervention achevée :

- Un rapport d'intervention est saisi dans le GMAO.
- Ce rapport contient : noms des intervenants, durée d'intervention, pièces utilisées, travaux effectués, observations éventuelles.

Cela permet :

- Une mise à jour en temps réel de l'état de l'OT.
- Une traçabilité totale pour les audits ou bilans qualité.

e) État de l'OT et gestion des contraintes :

Selon les contraintes rencontrées, l'OT peut évoluer vers différents états, gérés directement dans le GMAO :

- OT en attente de pièces de rechange (PDR).
- OT en attente de moyens humains ou techniques.
- OT en observation ou en attente d'études complémentaires.
- OT en arrêt programme (si la machine ne peut pas être arrêtée immédiatement).

Le Service Études peut alors, via le GMAO :

- Lancer des demandes d'achat pour les pièces ou équipements nécessaires.

- Planifier l'intervention à une date ultérieure.

f) Clôture, archivage et retour d'expérience :

Une fois l'intervention validée par la Subdivision Réalisation, l'OT passe à l'état OT=2 (Travaux terminés).

- Le système effectue alors :
- L'archivage des OT.
- L'intégration dans les rapports périodiques.
- L'alimentation des statistiques de maintenance, classant l'OT en OT=3 (Utilisé pour l'analyse historique).

Ces données alimentent les rapports de performance, les KPI de maintenance (MTBF, MTTR, taux de disponibilité), et permettent d'ajuster les plans de maintenance préventive pour améliorer la fiabilité globale de l'installation.

III.7. Application de la maintenance préventive sur les pompes d'extraction :

Après avoir présenté l'organisation générale de la maintenance au sein de la centrale gaz-vapeur, ainsi que les processus d'intervention et la circulation de l'information, nous allons à présent illustrer l'application concrète des méthodes abordées à travers une étude de cas pratique.
Dans ce cadre, notre attention s'est portée sur un équipement stratégique : les pompes d'extraction. Le choix de cet équipement n'est pas anodin, puisqu'il joue un rôle essentiel dans le bon fonctionnement de la centrale et fait l'objet de nombreuses opérations de maintenance. L'objectif de cette étude est d'analyser en détail les différentes interventions réalisées sur ces pompes, en appliquant les principes de maintenance préventive évoqués dans les chapitres précédents.
Pour ce faire, nous nous appuierons sur les éléments suivants :

- La liste des ordres de travail (OT) exécutés sur l'équipement,
- Les différentes demandes de travaux (DT) émises,
- Ainsi que les interventions systématiques planifiées dans le cadre de la maintenance préventive.

Cette analyse nous permettra d'évaluer l'efficacité des actions entreprises, d'identifier les éventuelles faiblesses du système en place, et de proposer des axes d'amélioration afin d'optimiser davantage la stratégie de maintenance appliquée aux pompes d'extraction.

III.7.1 Diagnostic Vibratoire Conditionnel et Historique des Interventions : Cas des Pompes d'Extraction :

Dans le cadre de la maintenance préventive conditionnelle appliquée aux pompes d'extraction, les techniciens de maintenance réalisent régulièrement des relevés vibratoires afin de surveiller l'état de fonctionnement de ces équipements critiques. Ces mesures vibratoires sont essentielles pour détecter toute anomalie naissante pouvant entraîner une panne ou une dégradation de performance. Une fois les calculs vibratoires effectués, ils sont transmis à l'ingénieur de diagnostic, qui les intègre dans un logiciel spécialisé. Ce logiciel permet d'analyser les signaux enregistrés et d'identifier les éventuelles dérives par rapport aux conditions nominales. Si l'analyse révèle un dysfonctionnement ou un comportement anormal, l'ingénieur rédige une Demande de Travaux (DT). Cette DT est ensuite examinée, et si l'intervention est jugée nécessaire, elle est convertie en Ordre de Travaux (OT), ce qui déclenche officiellement la planification et l'exécution des actions correctives sur la pompe concernée. [12]

Tableau 3.1 : Calcule vibratoire des pompes d'extraction. [12]

Point	Slot	#	Mesures des vibrations								Unité
				16/01 2025	18/02 2025	19/02 2025	24/02 2025	26/02 2025	02/03 2025	12/03 2025	30/03 2025	
PM1H	1	[1]		1,62								mm/s rms
	1				2,77	2,35	2,47	2,53	2,48	2,43	1,06	mm/s rms
	2	[1]		1,46								mm/s rms
	2				0,33	0,33	0,32	0,35	0,36	0,29	0,12	g rms
PM1V	1	[1]		1,73								mm/s rms
	1				3,07	3,31	2,60	2,75	2,97	3,17	0,94	mm/s rms
	2	[1]		2,04								mm/s rms
	2				0,25	0,27	0,24	0,24	0,22	0,21	0,10	g rms
PM2A	1	[1]		2,61								mm/s rms
	1				2,12	1,78	2,71	1,63	2,10	2,52	1,54	mm/s rms
	2	[1]		2,32								mm/s rms
	2				0,53	0,62	0,39	0,56	0,39	0,71	0,67	g rms
PM2H	1	[1]		1,91								mm/s rms
	1				2,50	2,76	2,69	2,47	2,47	2,79	1,62	mm/s rms
	2	[1]		2,99								mm/s rms
	2				0,96	1,02	0,92	0,69	0,53	0,87	0,84	g rms
PM2V	1	[1]		1,47								mm/s rms
	1				2,75	2,42	2,20	1,95	2,00	2,54	1,66	mm/s rms
	2	[1]		1,45								mm/s rms
	2				0,33	0,65	0,55	0,49	0,28	0,93	0,44	g rms
PP1H	1	[1]		4,20								mm/s rms
	1				5,08	4,72	5,08	5,99	5,81	4,63	0,87	mm/s rms
	2	[1]		4,29								mm/s rms
	2				1,16	1,06	1,02	1,30	1,14	1,04	0,14	g rms
PP1V	1	[1]		4,48								mm/s rms
	1				6,53	6,38	5,97	6,06	5,51	4,99	0,85	mm/s rms
	2	[1]		4,26								mm/s rms
	2				1,28	1,09	0,94	1,10	1,08	1,06	0,17	g rms

III.7.2 Description générale du tableau :

Ce tableau présente les mesures de vibrations (en unités mm/s rms ou g rms) pour différents points de contrôle vibratoire sur des pompes d'extraction (PM1H, PM1V, etc.) :

- Colonnes : dates de mesures (de janvier à mars 2025).
- Lignes : chaque ligne correspond à un point de mesure, avec une distinction selon l'axe (H = horizontal, V = vertical, A = axial) et selon la position de mesure (slot 1 ou 2).
- Unité : soit des vitesses (mm/s rms) soit des accélérations (g rms).

a) Intervalles de fonctionnement des vibrations :

Pour analyser ces mesures, on se base sur les **normes ISO 10816/20816** pour les équipements rotatifs (comme les pompes) :

a).1. Pour les valeurs en mm/s rms (vitesse vibratoire) :

Tableau 3.2 : Intervalles de fonctionnement des vibrations en mm/s rms

État de fonctionnement	**Intervalle (mm/s rms)**
Bon fonctionnement	0 – 2,8
Tolérable / Acceptable	2,8 – 4,5

a).2. Pour les valeurs en g rms (accélération vibratoire) :

Tableau 3.3: Intervalles de fonctionnement des vibrations en g rms

État approximatif	**Intervalle (g rms)**
Bon fonctionnement	< 0,5 g
Acceptable / surveiller	0,5 – 1 g

État approximatif	**Intervalle (g rms)**
Anormal / à inspecter	> 1 g

b) Exemple d'analyse par point :

PP1H (Pompe principale 1 - Horizontal)

- 16/01/2025 : 4,20 mm/s rms → Tolérable élevé
- 18/02/2025 → 5,08 mm/s rms → Anormal (au-dessus de 4,5)
- 12/03/2025 : 4,63 mm/s rms → Toujours élevé

Interprétation : Cette pompe dépasse régulièrement le seuil critique, elle est en état de dysfonctionnement probable, nécessitant inspection et équilibrage.

III.7.3 Programmation d'une intervention :

Ce titre présente une analyse détaillée des mesures vibratoires enregistrées sur les pompes d'extraction (PM1H, PM1V, PM2A, PM2H, PM2V, PP1H, PP1V) entre le 16 janvier et le 30 mars 2025. Ce suivi s'inscrit dans le cadre du programme de maintenance préventive, qui permet une détection anticipée des dysfonctionnements mécaniques susceptibles d'affecter la fiabilité des équipements.

Lorsqu'un dépassement du seuil critique est constaté, l'ingénieur de diagnostic déclenche immédiatement un Ordre de Travail (OT). Celui-ci permet de programmer une intervention adaptée incluant inspection, réparation ou remplacement des pièces défectueuses.

III.7.4 Analyse vibratoire :

a) Pompe PP1H (Horizontal)

- Mesure critique (18/02/2025) **:** 5,08 mm/s rms
- Confirmation (12/03/2025) : 4,63 mm/s rms → état toujours hors tolérance

- Actions engagées :
  - Lancement d'un OT
  - Réalignement de l'arbre moteur
  - Remplacement des roulements
  - Équilibrage dynamique
- Résultat (30/03/2025) **:** 0,87 mm/s rms → retour à la normale

b) Pompe PP1V (Vertical) :

- Mesure critique (18/02/2025) : 6,53 mm/s rms
- Actions correctives **:**
  - OT lancé pour déséquilibre
  - Contrôle des fondations et remplacement des garnitures
  - Nettoyage complet de la pompe
- Résultat (30/03/2025) **:** 0,85 mm/s rms

c) Pompe PM2A (Axial) :

- Mesures (février à mars) : entre 2,12 et 2,71 mm/s rms → fonctionnement proche du seuil critique
- Décision : pas d'OT mais surveillance renforcée recommandée

d) Pompe PM2H (Horizontal) :

- Mesure critique (16/01/2025) : 4,20 mm/s rms
- Détérioration (18/02/2025) : 5,08 mm/s rms
- OT engagé : Révision complète, changement de roulements, équilibrage
- Résultat (30/03/2025) : 0,87 mm/s rms

On peut résumer les étapes de traitement d'un dysfonctionnement par :

- **Détection :**
  - Identification des dépassements de seuil (> 4,5 mm/s rms)

- Analyse des courbes d'évolution vibratoire

➢ **Diagnostic :**

- Inspection visuelle, contrôle d'alignement, roulements, fixations

➢ **Décision :**

- L'ingénieur de diagnostic émet un **OT** via le système GMAO

➢ **Intervention :**

Réparations programmées (roulements, équilibrage, alignement...)

- Mesures de sécurité appliquées

➢ **Contrôle post-intervention :**

- Nouvelle campagne de mesures pour valider le retour à un état nominal

III.7.5 Liste des travaux sur la pompe d'extraction RM (de 29/09 /2024 à 26/02/2025) :

Tableau 3.4: Liste des travaux sur la pompe d'extraction RM (de 29/09 /2024 à 26/02/2025) :

JIL1/2024/03894	Moto-pompe de condensat 1er étage	Contrôler l'accouplement et reprendre l'alignement	OT créé	MPC	Superviseur Mécanique (UML)	18/11/2024 13:22
JIL1/2024/03893	Vanne motorisée	Débloquer la vanne (bloquer fermé)	OT créé	MCO	Réalisation Mécanique	18/11/2024 13:18
JIL1/2024/03883	Vanne motorisée	Eliminer le court circuit	OT créé	MCO	Réalisation Instrumentation & Contrôle	17/11/2024 08:41
JIL1/2024/03882	Pompe de condensat 1er étage	débrancher le moteur	OT créé	MCO	Réalisation Electrique	17/11/2024 08:37
JIL1/2024/03881	Pompe de condensat 1er étage	Faire une inspection.	Terminé	MCO	Superviseur Mécanique (UML)	17/11/2024 08:11
JIL1/2024/03831	Vanne régulatrice motorisée	Réparer ou changer le moto-réducteur	OT créé	MCO	Réalisation Mécanique	12/11/2024 07:18
JIL1/2024/03830	Vanne motorisée	Changer le dispositif de l'accouplemnt au niveau de la vanne	OT créé	MCO	Réalisation Mécanique	12/11/2024 07:16
JIL1/2024/03558	Pompe de condensat 1er étage	Faire une inspection de roulement et un contrôle de jeux de roulement pp1	OT créé	MPC	Superviseur Mécanique (UML)	20/10/2024 07:53
JIL1/2024/03280	Pompe de condensat 1er étage	Faire un appoint d'huile	OT créé	MPC	Réalisation Mécanique	29/09/2024 12:49
JIL1/2024/	Moteur de pompe de	Graissage moteur pompe d'extraction	OT	MP	Réalisation Mécanique	22/09/2024

03161	condensat 1er étage		créé	S		07:25
JIL1/2024/ 03160	Moteur de pompe de condensat 2° étage	Graissage moteur pompe d'extraction	OT créé	MP S	Réalisation Mécanique	22/09/2024 07:25
JIL1/2024/ 03159	Moteur de pompe de condensat 1er étage.	Graissage moteur pompe d'extraction	OT créé	MP S	Réalisation Mécanique	22/09/2024 07:25
JIL1/2024/ 03158	Moteur de pompe de condensat 2° étage	Graissage moteur pompe d'extraction	OT créé	MP S	Réalisation Mécanique	22/09/2024 07:25
JIL1/2024/ 03157	Moteur de pompe de condensat 2° étage	Graissage moteur pompe d'extraction	OT créé	MP S	Réalisation Mécanique	22/09/2024 07:25
JIL1/2024/ 03014	Moto-pompe de condensat 2° étage	Eliminer la fuite par les tresses	OT Cloturé	MC O	Superviseur Mécanique (UML)	08/09/2024 13:33
JIL1/2024/ 03013	Moto-pompe de condensat 2° étage	Eliminer la fuite par les tresses	OT Cloturé	MC O	Superviseur Mécanique (UML)	08/09/2024 13:33
JIL1/2024/ 02998	Vanne régulatrice motorisée	Gamme annuelle soupape régulatrice typ	OT créé	MP S	Réalisation Instrumentation Contrôle	08/09/2024 07:40
JIL1/2024/ 02997	Vanne régulatrice motorisée	Gamme annuelle soupape régulatrice typ	OT créé	MP S	Réalisation Instrumentation Contrôle	08/09/2024 07:40
JIL1/2024/ 02995	Vanne régulatrice motorisée	Gamme annuelle soupape régulatrice typ	OT créé	MP S	Réalisation Instrumentation Contrôle	08/09/2024 07:40
JIL1/2024/ 02915	Moto-pompe de condensat 1er étage	Contrôler les roulements et le jeu de roulement des paliers de la pompe.	OT créé	MP C	Superviseur Mécanique (UML)	29/08/2024 09:36
JIL1/2024/ 02889	Moto-pompe de condensat 2° étage	Lubrification à huile pompe	OT créé	MP S	Réalisation Mécanique	28/08/2024 07:23
JIL1/2024/ 02888	Moto-pompe de condensat 2° étage	Lubrification à huile pompe	OT créé	MP S	Réalisation Mécanique	28/08/2024 07:23
JIL1/2024/ 02887	Moto-pompe de condensat 2° étage	Lubrification à huile pompe	OT créé	MP S	Réalisation Mécanique	28/08/2024 07:23
JIL1/2024/ 02878	Moto-pompe de condensat 1er étage	Lubrification à huile pompe	OT créé	MP S	Réalisation Mécanique	27/08/2024 08:23
JIL1/2024/ 02877	Moto-pompe de condensat 1er étage	Lubrification à huile pompe	OT créé	MP S	Réalisation Mécanique	27/08/2024 08:23
JIL1/2024/ 02496	enregistreur 0 à 10 mccm/cm	Contrôler le conductimètre RM63 en défaut.	OT créé	MC O	Réalisation Instrumentation Contrôle	24/07/2024 08:59
JIL1/2024/ 02368	Vanne	Faire un graissage	OT créé	MP C	Réalisation Mécanique	10/07/2024 07:50
JIL1/2024/ 02367	Vanne	Faire un graissage	OT créé	MP C	Réalisation Mécanique	10/07/2024 07:50
JIL1/2024/ 02354	Vanne motorisée	Débloquer la vanne	OT créé	MC O	Réalisation Mécanique	09/07/2024 07:35
JIL1/2024/ 02304	Vanne motorisée	Rétablir la commande	OT créé	MC O	Réalisation Instrumentation Contrôle	03/07/2024 07:31
JIL1/2024/ 02303	Vanne motorisée	Rétablir la commande	OT créé	MC O	Réalisation Instrumentation Contrôle	03/07/2024 07:31
JIL1/2024/ 02174	Vanne manuelle	Eliminer la fuite par la tige	OT créé	MC O	Réalisation Mécanique	23/06/2024 08:16
JIL1/2024/ 02166	Vanne motorisée	Rétablir la commande	OT créé	MC O	Réalisation Instrumentation Contrôle	23/06/2024 07:52
JIL1/2024/ 01920	Moto-pompe de condensat 1er étage	Lubrification à huile pompe	OT créé	MP S	Réalisation Mécanique	29/05/2024 09:07

JIL1/2024/ 01919	Moto-pompe de condensat 1er étage	Lubrification à huile pompe	OT créé	MP S	Réalisation Mécanique	29/05/2024 09:07
JIL1/2024/ 01917	Moto-pompe de condensat 2° étage	Lubrification à huile pompe	OT créé	MP S	Réalisation Mécanique	29/05/2024 09:06
JIL1/2024/ 01916	Moto-pompe de condensat 2° étage	Lubrification à huile pompe	OT créé	MP S	Réalisation Mécanique	29/05/2024 09:06
JIL1/2024/ 01915	Moto-pompe de condensat 2° étage	Lubrification à huile pompe	OT créé	MP S	Réalisation Mécanique	29/05/2024 09:06

III.7.6 Liste des interventions systématiques sur la pompe d'extraction :

Tableau 3.4: Liste des interventions systématiques sur la pompe d'extraction

Equipement	Désignation	Désignation	Fréquence	Unité de temps
JIL113RM01D01	Moto-pompe de condensat 1er étage	Lubrification à huile pompe	91	JR
JIL113RM01D011	Pompe de condensat 1er étage	Révision générale des pompes de condensat 1er étage	365	JR
JIL113RM01D012	Moteur de pompe de condensat 1er étage	Révision moteur de la pompe de condensat 1° étage	1825	JR
JIL113RM01D012	Moteur de pompe de condensat 1er étage	Visites préventives	182	JR
JIL113RM01D012	Moteur de pompe de condensat 1er étage	Graissage moteur pompe d'extraction	121	JR

III.7.7 Guide d'Entretien Périodique des Moteurs de Pompes RM :

- **Visite préventive :**

Les visites préventives du moteur sont à effectuer une fois par 6 mois. Pour cela :

- Dépoussiérer et dégraisser le moteur, vérifier la bonne mise à la terre, la connexion du mécanisme entraîné (pompe), mesurer la résistance d'isolement des enroulements (état + poussière) ne doit pas être inférieure à 50 MΩ.
- Vérifier l'état des bornes (isolateurs) en prêtant une attention particulière à l'état des raccords (câble, embout) et à l'isolation des bornes.
- Vérifier l'état de la graisse, dévisser les boulons fixant les chapeaux extérieurs des roulements et déplacer la graisse dans les chambres de roulements à l'aide d'un tournevis. En cas de graisse en mauvaise état, enlever la graisse usée des chapeaux et des chambres de roulements et remplacer par de la graisse fraîche. Tourner le rotor à la main pour que la graisse se répartisse bien.
- Appliquer la graisse sur les bandes de roulement en faisant tourner lentement le rotor puis distribuer la graisse locale entre l'axe et le chapeau.

- La quantité de graisse bonne à mettre est de 40 g par roulement.
- Nettoyer les anneaux collecteurs, veiller à resserrer les boulons fixant les flasques, les chapeaux de roulement ainsi que les boulons fixant le moteur à la fondation.
- Le remplacement complet de la graisse (lorsqu'évidemment partiel du moteur) est à effectuer après 3000 h de service, mais pas moins d'une fois par an.
- Avant de remplacer la graisse, laver les roulements dans de l'essence. La quantité de graisse par roulement est égale à 0.4 g.
- Remplacer la graisse totalement après 10 000 h de service, mais au moins une fois tous les deux ans.

N.B.

- Consigner le moteur ainsi que son chauffage
- Prendre toutes les mesures de sécurité nécessaires.[12]

III.8. Conclusion :

Ce chapitre a permis de mettre en lumière les fondements et les outils essentiels à une gestion efficace de la maintenance industrielle. À travers la logistique de maintenance, les différentes formes d'intervention (corrective, préventive, conditionnelle), ainsi que la structuration du circuit DI/OT, nous avons pu comprendre comment l'organisation de la maintenance s'inscrit dans un processus global de performance industrielle.

L'intégration de la GMAO dans le système d'information de l'entreprise représente un levier stratégique, facilitant la planification, le suivi et la traçabilité des opérations. L'exemple concret des pompes d'extraction a illustré l'impact direct d'une démarche de maintenance préventive et conditionnelle basée sur le diagnostic vibratoire. Ce cas d'étude a également permis de détailler les étapes précises de programmation d'une intervention, depuis la détection d'un dysfonctionnement jusqu'au retour à un fonctionnement nominal, en s'appuyant sur des données objectives et historiques.

La maintenance moderne ne se limite plus à une simple réaction aux pannes, mais devient un véritable outil de pilotage industriel, au service de la disponibilité, de la fiabilité des équipements et de l'optimisation des ressources.

Chapitre IV

Conceptions de système de maintenance proposé

IV.1. Introduction :

Dans le cadre de l'optimisation des processus industriels, la gestion de la maintenance joue un rôle crucial pour garantir la continuité de la production et minimiser les temps d'arrêt. Les entreprises modernes, comme celle étudiée dans ce projet, s'appuient souvent sur des systèmes de Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO) pour planifier et suivre leurs activités de maintenance. Cependant, les approches traditionnelles, souvent manuelles, présentent des limites en termes de réactivité et d'efficacité, ce qui peut entraîner des retards dans les interventions et une augmentation des coûts opérationnels.

Ce chapitre se consacre à la conception et à la mise en œuvre d'un système automatisé de surveillance et de maintenance, visant à pallier ces insuffisances et à optimiser l'utilisation du GMAO. En s'appuyant sur des technologies telles que l'Arduino, des capteurs de vibrations et une interface utilisateur intuitive, ce système permet de détecter les anomalies en temps réel et de programmer des interventions de maintenance périodiques de manière automatique. Ainsi, l'objectif principal est de réduire les interventions humaines, d'améliorer la réactivité face aux pannes potentielles et de renforcer l'intégration avec les outils GMAO existants.

À travers ce chapitre, nous aborderons d'abord le contexte et les besoins qui ont motivé ce projet, suivis d'une analyse détaillée de la conception du système. Ensuite, nous présenterons les étapes de mise en œuvre technique, les tests réalisés via la plateforme de simulation Wokwi, ainsi que les résultats obtenus et leur impact sur la gestion de la maintenance. Enfin, nous conclurons par une discussion sur les limites du système et les perspectives d'amélioration pour une adoption à plus grande échelle.

IV.2. Analyse des Besoins et Justification de l'Automatisation :

IV.2.1. Analyse des Besoins de l'Entreprise :

L'entreprise étudiée dans ce projet utilise un système GMAO pour organiser et suivre les opérations de maintenance de ses équipements industriels. Cependant, une analyse approfondie des processus existants a révélé plusieurs lacunes. Tout d'abord, la détection des anomalies repose principalement sur des inspections manuelles, ce qui entraîne des retards dans l'identification des problèmes potentiels. Par exemple, un dysfonctionnement dans une machine peut passer inaperçu pendant plusieurs heures, voire plusieurs jours, augmentant ainsi le risque de pannes majeures. Ensuite, la planification des maintenances périodiques, bien que gérée par le GMAO, nécessite une intervention humaine pour déclencher les alertes et organiser les interventions, ce qui engendre des inefficacités, notamment lorsque plusieurs tâches de maintenance coïncident. Enfin, l'absence d'un système de surveillance en

temps réel limite la capacité de l'entreprise à réagir rapidement aux situations critiques, ce qui se traduit par des temps d'arrêt prolongés et des pertes financières importantes.

Ces observations ont mis en évidence le besoin d'un système capable de surveiller les machines en temps réel, de détecter automatiquement les anomalies et de programmer les maintenances périodiques sans intervention humaine. Un tel système permettrait non seulement de réduire les temps d'arrêt, mais aussi d'améliorer l'intégration avec le GMAO en fournissant des données précises et en temps réel pour une meilleure planification des interventions.

IV.2.2. Justification de l'Automatisation :

L'automatisation de la gestion de la maintenance offre une solution pertinente pour répondre aux besoins identifiés. En premier lieu, un système automatisé est nettement plus précis qu'une approche manuelle. En effet, grâce à une surveillance continue, il est possible de détecter des variations subtiles dans le fonctionnement des machines, qui pourraient indiquer un défaut imminent. Contrairement à un opérateur humain, qui peut manquer ces signes précoces en raison de la fatigue ou de la subjectivité, un système automatisé garantit une détection objective et cohérente, réduisant ainsi les risques d'erreurs.

En second lieu, l'automatisation permet un gain de temps significatif. Dans le système manuel actuel, le processus de détection, d'alerte et de planification peut prendre plusieurs heures, voire plusieurs jours, en fonction de la disponibilité des techniciens et de la charge de travail. Avec une approche automatisée, les anomalies sont détectées immédiatement, et les alertes sont déclenchées sans délai pour informer les opérateurs. De plus, les maintenances périodiques sont programmées automatiquement, ce qui réduit le temps nécessaire pour initier une intervention, permettant ainsi une réactivité accrue.

IV.3. Bénéfices de l'Automatisation :

Les avantages de cette approche automatisée sont multiples. Tout d'abord, la précision accrue dans la détection des anomalies permet de prévenir les pannes majeures, ce qui prolonge la durée de vie des équipements et réduit les coûts de réparation. Ensuite, le gain de temps dans la détection et la gestion des maintenances se traduit par une réduction des temps d'arrêt, un facteur crucial pour une entreprise industrielle où chaque minute d'arrêt peut entraîner des pertes financières significatives. Enfin, l'automatisation améliore l'intégration avec le GMAO, car les données collectées peuvent être transmises directement au système pour une meilleure traçabilité et une planification optimisée des interventions futures.

En somme, l'automatisation de la gestion de la maintenance représente une avancée significative pour l'entreprise, en offrant une solution plus précise, plus rapide et plus efficace, tout en s'alignant sur les exigences d'un environnement industriel moderne.

IV.4. Conception du Système de Surveillance et de Maintenance Automatisé :

IV.4.1. Identification des Variables Critiques des Machines :

Dans un environnement industriel, les machines sont soumises à de nombreuses variables physiques qui influencent leur fonctionnement et peuvent entraîner des défaillances si elles ne sont pas surveillées de manière rigoureuse. Parmi ces variables, on peut citer la température, qui peut indiquer une surchauffe, les vibrations, qui peuvent révéler un déséquilibre ou une usure mécanique, et la pression, qui peut signaler des anomalies dans les systèmes hydrauliques ou pneumatiques. D'autres paramètres, tels que l'humidité ou les niveaux de lubrification, peuvent également jouer un rôle critique selon le type d'équipement. La surveillance de ces variables est essentielle pour anticiper les pannes et garantir la continuité de la production.

Dans le cadre de ce projet, nous avons choisi de nous concentrer sur les vibrations comme variable principale à surveiller. Les vibrations sont un indicateur clé de la santé des machines, car elles peuvent révéler des problèmes mécaniques tels que des roulements défectueux ou des désalignements. Cependant, le principe de conception que nous proposons est suffisamment flexible pour être appliqué à d'autres variables critiques, telles que la température ou la pression, en suivant le même cadre méthodologique. Cette modularité permet d'envisager une extension future du système pour une surveillance plus complète des équipements industriels.

IV.4.2. Principe Général du Système Proposé :

Le système que nous proposons repose sur un mécanisme automatisé de surveillance et de maintenance, conçu pour fournir des alertes en temps réel et faciliter les interventions. Voici une description détaillée de son fonctionnement :

IV.4.2.1. Indicateurs Visuels pour la Surveillance en Temps Réel :

Le système utilise des indicateurs visuels pour refléter l'état de la machine. Des LEDS de différentes couleurs signalent les niveaux de vibrations :

- Une LED verte pour un fonctionnement normal,
- Une LED orange pour un état d'alerte,

- Une LED rouge pour un état de danger critique. En cas de vibrations excessives, un mécanisme d'arrêt automatique est déclenché, accompagné d'un buzzer pour alerter les opérateurs.
- Une LED violette est intégrée pour indiquer l'état d'alimentation de la machine : allumée lorsque la machine fonctionne, et éteinte lorsqu'elle est arrêtée automatiquement pour des raisons de sécurité.
- Une LED bleue est également utilisée pour signaler les besoins de maintenance périodique.



Figure 4.1: les leds industriel

IV.4.2.2. Détection des Données par des Capteurs :

Un écran LCD est intégré pour afficher en temps réel les informations pertinentes (figure 4.2), telles que les valeurs des vibrations et les messages d'état (par exemple, « Vibration élevée » ou « Arrêt d'urgence »). Cet affichage permet aux opérateurs de suivre l'évolution des paramètres de la machine et de réagir rapidement en cas de problème. De plus, les données des vibrations sont archivées via une communication série avec un times-tamp, offrant la possibilité de les enregistrer pour une analyse ultérieure.



Figure 4.2 : Ecran d'affichage LCD

Le système repose sur un capteur de vibrations pour mesurer les niveaux de vibration de la machine en temps réel (figure 4.3). Ces données sont analysées pour déterminer l'état de fonctionnement et déclencher des actions appropriées, telles que l'activation d'alarmes ou l'arrêt automatique en cas de dépassement des seuils critiques. Les valeurs mesurées sont également utilisées pour générer des courbes graphiques, permettant une visualisation claire des variations des vibrations et facilitant l'identification des anomalies.



Figure 4.3 : capteur de vibration

IV.4.2.3. Gestion Automatisée des Maintenances Périodiques :

Le système inclut un module de gestion automatisée des maintenances périodiques, qui surveille les intervalles de maintenance pour des tâches spécifiques (comme la lubrification ou la révision générale). Lorsqu'une maintenance est requise, une LED bleue s'allume et un message s'affiche sur l'écran LCD pour informer l'opérateur. Un bouton dédié permet de confirmer la réalisation de la maintenance, réinitialisant ainsi les compteurs correspondants et assurant que la machine reste dans des conditions optimales de fonctionnement.

En conclusion, ce système combine des indicateurs visuels, un affichage informatif, une détection précise des données, et une gestion automatisée des maintenances pour offrir une solution complète de surveillance et de contrôle. Il garantit une intervention rapide en cas de danger grâce à l'arrêt automatique, tout en fournissant des outils d'analyse et de maintenance pour optimiser la performance et prolonger la durée de vie des machines industrielles.

IV.4.3. Avantages de la Conception Proposée :

Cette conception offre une approche intégrée qui combine la surveillance en temps réel et la gestion des maintenances périodiques. L'utilisation de voyants lumineux et d'un écran d'affichage garantit une communication claire et immédiate avec les opérateurs, tandis que l'automatisation des alertes et des cycles de maintenance réduit la dépendance aux interventions humaines. En outre, la modularité du système, qui permet d'adapter le même principe à différentes variables, offre une flexibilité pour répondre aux besoins évolutifs de l'entreprise.

IV.5. Mise en œuvre du Système Proposé :

IV.5.1. Choix des Composants Techniques :

Pour la mise en œuvre du système automatisé de surveillance et de maintenance, nous avons opté pour une solution basée sur la plateforme Arduino, une carte de microcontrôleur reconnue pour sa simplicité, sa polyvalence et son coût abordable. L'Arduino a été choisi pour sa capacité à interfacer facilement avec une variété de capteurs et de modules, ce qui en fait une solution idéale pour les applications industrielles. Cette carte constitue le cœur du système, assurant la réception des données issues des capteurs, leur traitement, et le contrôle des différents composants de sortie, tels que les voyants lumineux, l'écran d'affichage, et les mécanismes d'alerte.

Un capteur de vibrations est utilisé pour mesurer en temps réel les niveaux de vibration des machines, fournissant des données essentielles pour la surveillance et l'analyse. Cinq voyants LED sont intégrés pour indiquer les différents états du système :

Une LED verte pour un fonctionnement normal, une LED orange pour un état d'alerte, une LED rouge pour un état de danger, une LED bleue pour signaler les besoins de maintenance périodique, et une LED violette pour indiquer l'état d'alimentation de la machine (allumée lorsque la machine est en marche, éteinte lors d'un arrêt automatique). Un buzzer est incorporé pour émettre des alertes sonores en cas de situation critique, renforçant la sécurité du système. Un écran LCD est utilisé pour afficher des messages informatifs aux opérateurs, tels que les valeurs des vibrations et les notifications d'état. Un bouton est intégré pour permettre la confirmation des interventions de maintenance périodique.

En complément, le système permet une visualisation graphique des données de vibration grâce à une transmission des valeurs via une communication série, compatible avec des outils d'analyse externes pour générer des courbes en temps réel. Les données sont également archivées avec un timestamp via cette même communication série, offrant une solution pratique pour l'enregistrement et l'analyse ultérieure des performances de la machine. Enfin, un mécanisme de contrôle de puissance,

basé sur un pin dédié connecté à un relais, est intégré pour assurer un arrêt automatique de la machine en cas de dépassement des seuils critiques, garantissant ainsi une protection optimale contre les risques opérationnels.

IV.5.2. Connexion des Composants au Système :

La mise en œuvre technique débute par l'assemblage et la connexion des différents composants à la carte Arduino. Le capteur de vibrations est connecté à une broche analogique de l'Arduino, permettant la conversion des signaux mesurés en données numériques exploitables pour l'analyse des niveaux de vibration. Cinq voyants LED sont branchés sur des broches numériques de sortie, chacune étant contrôlée indépendamment : une LED verte pour indiquer un fonctionnement normal, une LED orange pour un état d'alerte, une LED rouge pour un état de danger, une LED bleue pour signaler les besoins de maintenance périodique, et une LED violette pour refléter l'état d'alimentation de la machine (allumée lorsque la machine est en marche, éteinte lors d'un arrêt automatique). Le buzzer est connecté à une broche numérique pour émettre un signal sonore en cas de détection d'une situation critique, renforçant ainsi la sécurité du système.

L'écran LCD, essentiel pour communiquer avec les opérateurs, est connecté via une interface I2C, réduisant le nombre de broches nécessaires sur l'Arduino et facilitant la transmission des messages texte, tels que les valeurs des vibrations ou les notifications d'état. Le bouton est connecté à une broche numérique avec une résistance interne (pull-up) pour détecter les pressions de l'opérateur, permettant de confirmer la réalisation des interventions de maintenance périodique. Un pin de contrôle de puissance est également connecté à une broche numérique de sortie, interfacé avec un relais pour gérer l'arrêt automatique de la machine en cas de dépassement des seuils critiques, garantissant une protection optimale. Enfin, les données des vibrations sont transmises via une communication série avec un timestamp, permettant leur archivage et leur analyse ultérieure, ainsi que la génération de courbes graphiques pour visualiser les variations des vibrations en temps réel.

IV.5.3. Logique de Programmation :

La programmation du système est conçue pour garantir une gestion automatisée, efficace et sécurisée des tâches de surveillance et de maintenance. Le programme principal, écrit dans le langage de programmation de l'Arduino (basé sur C/C++), suit une logique claire et structurée, articulée autour des étapes suivantes :

a) **Acquisition et Analyse des Données** :

Le programme lit en continu les données provenant du capteur de vibrations à intervalles réguliers. Ces données sont analysées en les comparant à des seuils prédéfinis pour déterminer l'état de la machine. Si les vibrations se situent dans une plage normale, le voyant vert est activé. Si elles atteignent un niveau intermédiaire, le voyant orange s'allume pour signaler un besoin de vigilance. En cas de vibrations critiques, le voyant rouge et le buzzer sont activés pour alerter les opérateurs, et un mécanisme d'arrêt automatique est déclenché : un signal est envoyé via un pin de contrôle de puissance, connecté à un relais, pour couper l'alimentation de la machine. Cet arrêt est indiqué par l'extinction d'une LED violette, qui reflète l'état d'alimentation de la machine. Parallèlement, les données de vibration sont transmises via une communication série avec un timestamp pour leur archivage et leur visualisation sous forme de courbes graphiques en temps réel.

b) **Affichage des Informations** :

Simultanément, les données mesurées sont affichées sur l'écran LCD, accompagnées d'un message indiquant la nature du problème (par exemple, « Vibration élevée » ou « Arrêt d'urgence »). En cas de situation critique, un message explicite est affiché pour guider les opérateurs, les informant de l'état de la machine et des actions nécessaires. Cet affichage en temps réel permet une interaction immédiate et informée avec le système.

c) **Gestion des Maintenances Périodiques** :

Le programme gère également les interventions de maintenance périodique de manière automatisée. À des intervalles prédéterminés, le voyant bleu s'allume, et un message correspondant est affiché sur l'écran LCD pour indiquer le type d'intervention requis (par exemple, lubrification ou révision générale). Lorsqu'un opérateur appuie sur le bouton dédié, le système enregistre que l'intervention a été effectuée, éteint le voyant bleu, affiche un message de confirmation sur l'écran LCD, et réinitialise le cycle de maintenance concerné, assurant ainsi un suivi rigoureux des opérations de maintenance.

IV.5.4. Avantages de la Mise en œuvre :

Cette mise en œuvre offre une solution robuste et autonome pour la surveillance et la maintenance des machines. L'utilisation de l'Arduino permet une implémentation économique et accessible, tandis que la programmation structurée garantit une gestion précise des alertes et des cycles de maintenance. L'archivage local via la carte SD assure une traçabilité complète des interventions, ce qui est particulièrement utile dans un contexte où une intégration avec des systèmes externes n'est pas

envisageable. En somme, le système proposé est une solution pratique et efficace pour améliorer la gestion de la maintenance tout en restant indépendant.

IV.6. Simulation et Tests sur Wokwi :

IV.6.1. Objectif de la Simulation :

Dans cette étape, nous avons procédé à la simulation de notre système automatisé de surveillance et de maintenance en nous concentrant sur **les pompes d'extraction**, un type d'équipement industriel que nous avons étudié précédemment. L'objectif était de tester le fonctionnement du système dans un environnement contrôlé, d'analyser les résultats obtenus, et de valider la capacité du système à détecter les anomalies et à gérer les interventions périodiques de manière efficace.

IV.6.2. Présentation de Wokwi :

Wokwi est une plateforme de simulation en ligne dédiée aux projets électroniques et à la programmation de microcontrôleurs comme l'Arduino. Elle permet de créer des circuits virtuels, de connecter des composants simulés (tels que des capteurs, des LED, ou des écrans LCD), et d'exécuter du code pour observer le comportement du système dans des conditions réalistes. Wokwi est particulièrement utile pour les projets en phase de développement, car elle offre un environnement flexible et accessible, sans nécessiter de matériel physique, tout en permettant de détecter et de corriger les erreurs avant une mise en œuvre réelle.

IV.6.3. Équipements Simulés dans Wokwi :

Pour simuler notre système sur Wokwi, nous avons utilisé les composants suivants :

- **Carte Arduino Uno** : elle représente l'unité de traitement centrale du système, responsable de l'exécution du code et de la gestion des autres composants.
- **Cinq LED** : une LED verte, une LED orange, une LED rouge, une LED bleue, et une LED violette. La LED verte indique un fonctionnement normal, la LED orange signale un état d'alerte, la LED rouge reflète un état de danger, la LED bleue est utilisée pour signaler les interventions périodiques, et la LED violette indique l'état d'alimentation de la machine (allumée lorsque la machine est en marche, éteinte lors d'un arrêt automatique).
- **Buzzer** : un composant simulant une alarme sonore, activé en cas de situation critique pour alerter les opérateurs.

- **Écran LCD (I2C)** : un écran LCD 16x2 connecté via une interface I2C, utilisé pour afficher des messages informatifs aux opérateurs, tels que les valeurs des vibrations ou les notifications d'état.
- **Bouton** : un bouton poussoir permettant à l'opérateur de confirmer les interventions périodiques, simulant l'action de l'utilisateur.
- **Communication Série** : bien que non physique, la communication série est simulée dans Wokwi pour transmettre les données de vibration avec un timestamp, permettant leur archivage et leur visualisation sous forme de courbes graphiques via le Serial Plotter.

IV.6.4 Connexion des Composants dans Wokwi :

La configuration des composants dans Wokwi a été réalisée comme suit :

- **Carte Arduino Uno** : sélectionnée comme base de la simulation, elle sert de plateforme centrale pour connecter tous les composants (figure 4.1).

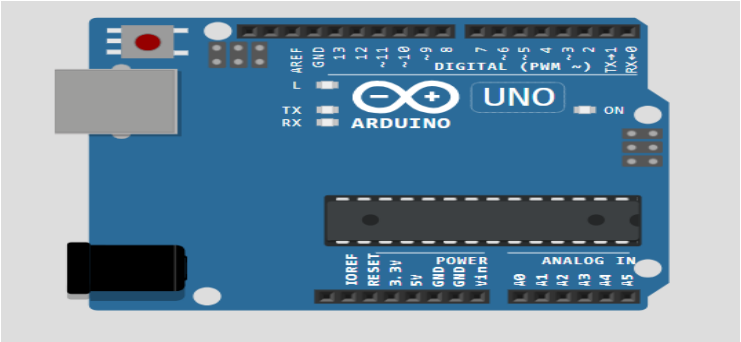


Figure 4.4 : carte Arduino uno.

- **Cinq LED** : les LED sont connectées à des broches numériques de l'Arduino : D2 pour la LED verte, D3 pour la LED orange, D4 pour la LED rouge, D5 pour la LED bleue, et D8 pour la LED violette (indicateur d'alimentation). Chaque LED est associée à une résistance simulée pour limiter le courant et éviter les surcharges (figure 4.2).

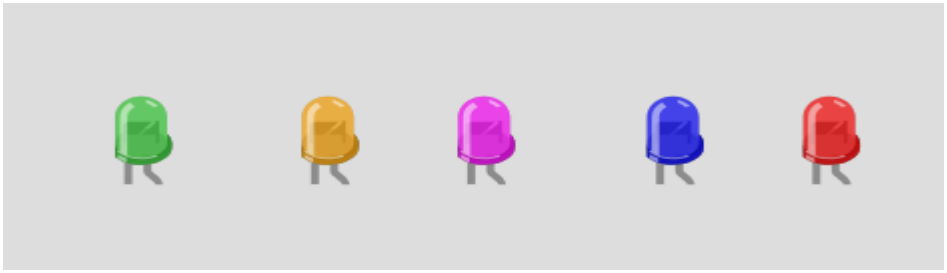


Figure 4.5 : les leds de simulations

- **Buzzer** : connecté à la broche numérique D6, il émet un signal sonore en cas de détection d'un niveau de vibration critique (figure 4.3).

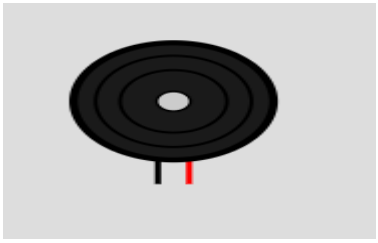


Figure 4.6 : buzzer de simulation

- **Écran LCD (I2C)** : connecté via l'interface I2C, utilisant les broches SDA et SCL de l'Arduino, avec une adresse I2C (généralement 0x27). La bibliothèque **LiquidCrystal_I2C** a été ajoutée au projet Wokwi pour permettre la communication avec l'écran et l'affichage des messages (figure 4.3).

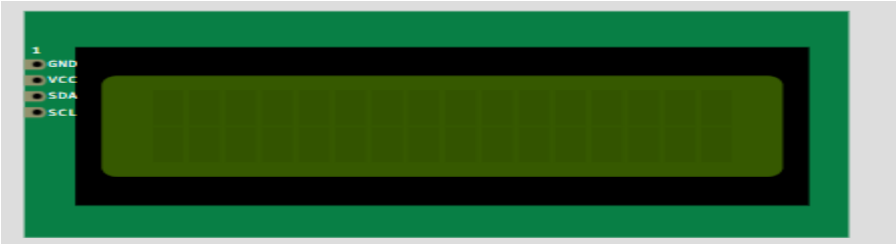


Figure 4.7 : Écran LCD (I2C)

- **Bouton** : connecté à la broche numérique D7 avec une configuration de résistance interne (pull-up) pour détecter les pressions de l'opérateur, simulant la confirmation des interventions de maintenance (figure 4.4).

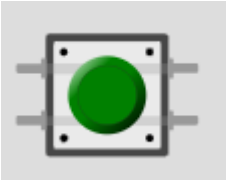


Figure 4.8 : Bouton

- **Pin de Contrôle de Puissance** : la broche D8, en plus d'être connectée à la LED violette, simule un signal de contrôle de puissance. Dans un contexte réel, cette broche serait

connectée à un relais pour gérer l'arrêt automatique de la machine, mais dans Wokwi, la LED violette joue ce rôle visuel.

- **Communication Série** : la transmission des données est simulée via le port série de l'Arduino, permettant l'envoi des valeurs de vibration pour l'archivage et la génération de courbes graphiques dans le Serial Plotter de Wokwi.

IV.6.5. Analyse des Résultats Préalables :

Avant de procéder à la simulation, nous avons analysé les données préalables des pompes d'extraction pour définir des seuils de vibration permettant de catégoriser leur état. Les vibrations ont été mesurées en termes de RMS (Root Mean Square) en mm/s, et une valeur normalisée (vibration) a été calculée pour simplifier l'analyse. Les résultats ont été organisés dans le tableau suivant :

Tableau 4.1. L'état des pompes d'extractions selon les calculs de vibration

État	mm/s RMS approximatif	Valeur de vibration
✅ Bon	0 – 2.8 mm/s	< 0.5
⚠ Alerte	2.8 – 4.5 mm/s	0.5 – 0.8
🚨 Danger	> 4.5 mm/s	≥ 0.8

Ce tableau a servi de base pour programmer les seuils dans notre simulation, en adaptant les valeurs mesurées aux conditions simulées.

IV.6.6. Simulation sans Capteur Réel :

Lors de la simulation sur Wokwi, nous n'avons pas utilisé de capteur de vibrations réel, car cela nécessiterait un matériel physique. À la place, nous avons défini des valeurs de vibration fictives dans le code pour contrôler manuellement l'évolution des vibrations au fil du temps. Cette approche nous a permis de tester le système dans des scénarios prédéfinis, en simulant différents niveaux de vibration pour observer la réponse du système dans chaque cas.

IV.6.7. Explication du Code et Organisation Temporelle :

Le code développé pour la simulation est structuré pour simuler l'évolution des vibrations des pompes d'extraction sur une période donnée. Nous avons divisé le temps de simulation en plusieurs

intervalles pour refléter différents états de la machine, en utilisant une variable temporelle pour suivre l'écoulement du temps depuis le démarrage de la simulation. Les vibrations fictives (exprimées en mm/s RMS) ont été programmées pour évoluer comme suit :

Tableau 4.2. Programme de l'évolution pondant la simulation

Étape	**Intervalle de vibrations (mm/s)**	**État**	**LED active**	**Affichage LCD**	**Actions supplémentaires**
1	≤ 2	Normal	Verte	*(Aucun message – fonctionnement normal)*	Données envoyées via Serial avec timestamp
2	> 2 et ≤ 4.5	Alerte	Orange	Vibration élevée	Données envoyées via Serial avec timestamp
3	> 4.5	Danger	Rouge + Buzzer	Vibration très élevée Arrêter la machine	Activation d'un **arrêt automatique** (relais OFF) LED violette **éteinte**
4	Machine arrêtée	–	Aucune	*(Aucun message)*	Plus de signaux de vibration ni LEDs actives

Dans le code, une variable représentant le temps écoulé (calculée via la fonction `millis()) est utilisée pour déterminer l'intervalle temporel actuel. À chaque intervalle, une valeur de vibration fictive est assignée, et le système agit en conséquence :

- Si le temps écoulé correspond à un état normal (vibrations ≤ 2 mm/s), la LED verte s'allume.
- Pour un état d'alerte (vibrations > 2 à ≤ 4.5 mm/s), la LED orange est activée, accompagnée d'un message d'alerte affiché sur l'écran LCD.
- Lorsque les vibrations dépassent 4.5 mm/s, indiquant un état de danger, la LED rouge et le buzzer sont déclenchés, suivis d'un message d'arrêt affiché sur l'écran. De plus, un mécanisme d'arrêt automatique est initié : un pin de contrôle de puissance, connecté à un relais simulé, coupe l'alimentation, et la LED violette s'éteint pour indiquer l'arrêt de la machine. Les données de vibration sont transmises en temps réel via la communication série avec un

timestamp, permettant leur archivage et leur visualisation sous forme de courbes graphiques via le Serial Plotter de Wokwi.

IV.6.8. Fonctionnement du Système pendant la Simulation :

Au cours de la simulation, le système fonctionne comme suit :

- Phase initiale (état normal) : Lorsque les vibrations restent dans une plage normale (≤ 2 mm/s), **la LED verte s'allume**, et l'écran LCD reste vide, indiquant qu'aucune intervention n'est requise. **La LED violette reste allumée**, signalant que la machine est en marche (Figure 4.5).

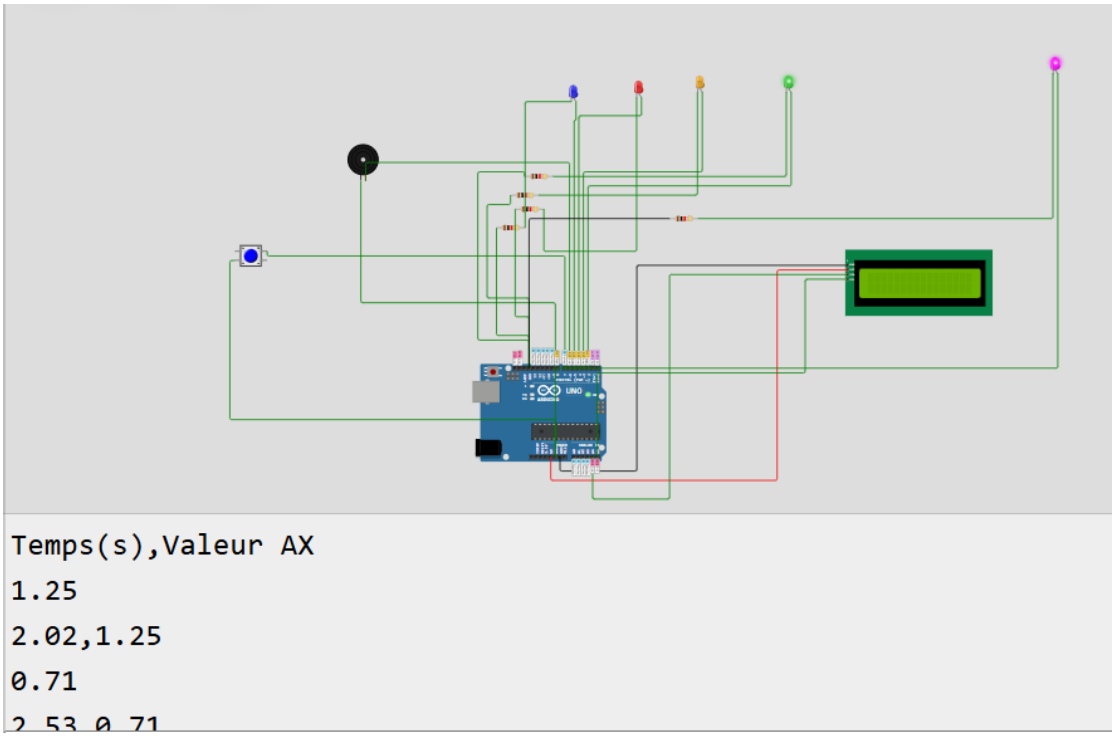


Figure 4.9 : simulation de la phase initiale

- Phase d'alerte : Lorsque les vibrations augmentent à une plage intermédiaire (> 2 à ≤ 4.5 mm/s), **la LED orange s'active, et un message d'alerte est affiché sur l'écran LCD** pour informer les opérateurs d'une situation nécessitant une attention particulière (figure 4.6).

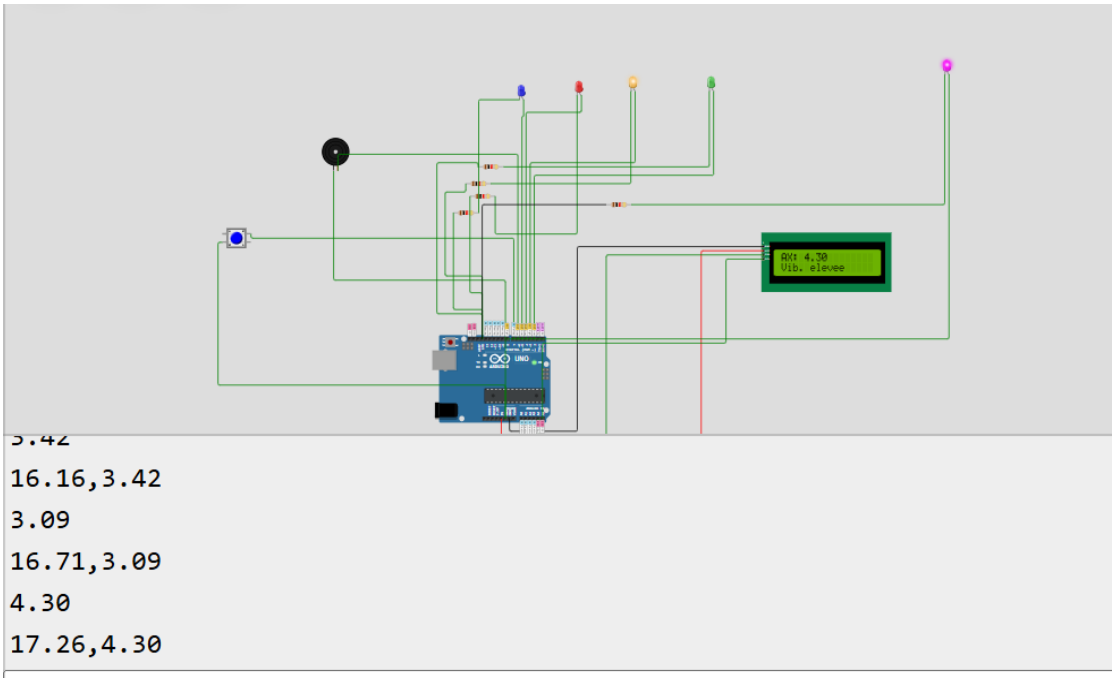


Figure 4.10 : simulation de la 2ém phase

- Phase de danger et arrêt automatique : Lorsque les vibrations dépassent 4.5 mm/s, la **LED rouge et le buzzer sont activés** pour signaler un danger critique, accompagnés d'un message d'arrêt sur l'écran LCD (figure 03). Après un délai prédéfini, le système déclenche un arrêt automatique en passant le pin de contrôle de puissance à l'état bas, simulant la coupure de l'alimentation via un relais. La LED violette s'éteint pour indiquer l'arrêt de la machine, et le buzzer est désactivé (figure 04). Une phase de redémarrage simulée suit après une période d'intervention, réactivant la LED verte et la LED violette une fois les conditions de sécurité rétablies (figure 4.7).

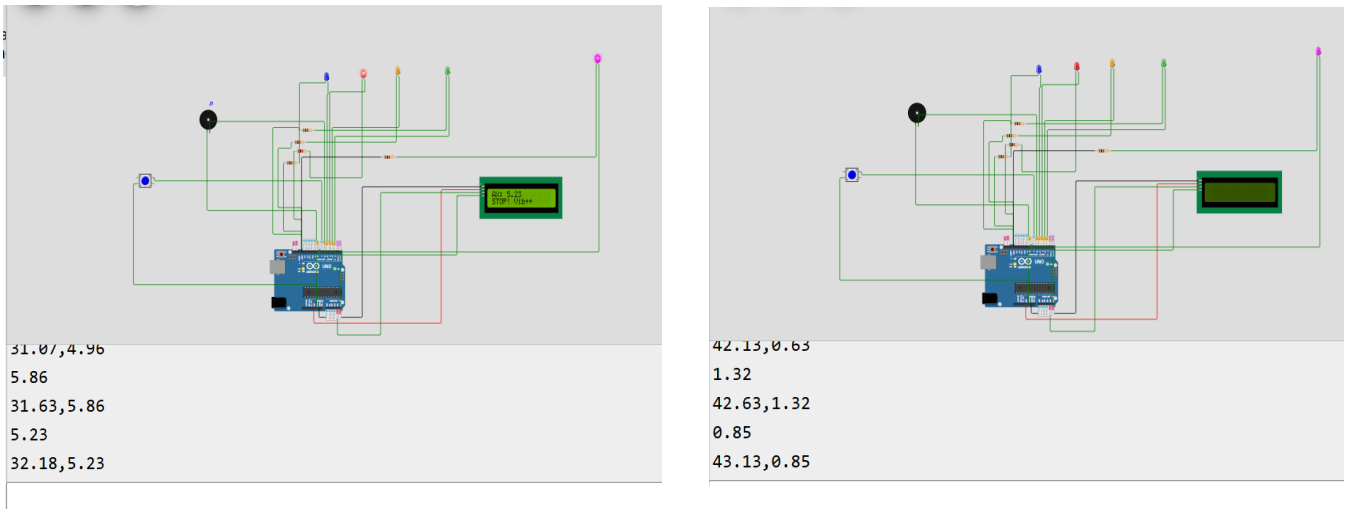


Figure 4.11 : simulation de 3ém phase

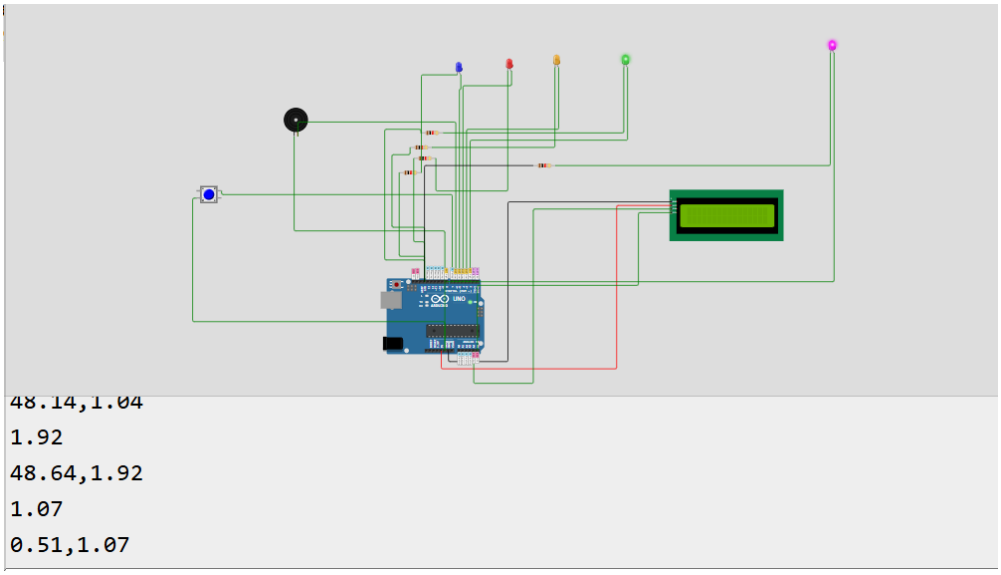


Figure 4.12 : redémarrage du système

En parallèle, le système gère les interventions périodiques de manière indépendante. À des intervalles prédéterminés, la LED bleue s'allume, et un message correspondant s'affiche sur l'écran LCD pour indiquer le type d'intervention requis (par exemple, une maintenance préventive). L'opérateur peut alors appuyer sur le bouton pour confirmer que l'intervention a été effectuée, ce qui entraîne l'extinction de la LED bleue et la réinitialisation du cycle de maintenance. L'écran LCD affiche alors un message temporaire de confirmation avant de revenir à l'état normal.

IV.6.9. Gestion de la LED Bleue :

La LED bleue, dédiée aux interventions périodiques, est contrôlée par une logique temporelle dans le code. Lorsqu'un cycle de maintenance est dû, la LED bleue s'allume, et un message descriptif est affiché sur l'écran LCD pour indiquer la nature de l'intervention. L'opérateur appuie sur le bouton connecté à l'Arduino pour confirmer que l'intervention a été réalisée. Cette action déclenche les étapes suivantes :

- La LED bleue s'éteint immédiatement.
- L'écran LCD affiche un message de confirmation (par exemple, "Maintenance effectuée") pendant quelques secondes.
- Le cycle de maintenance est réinitialisé, et le système reprend son fonctionnement normal, en continuant à surveiller les vibrations (figure 4.9).

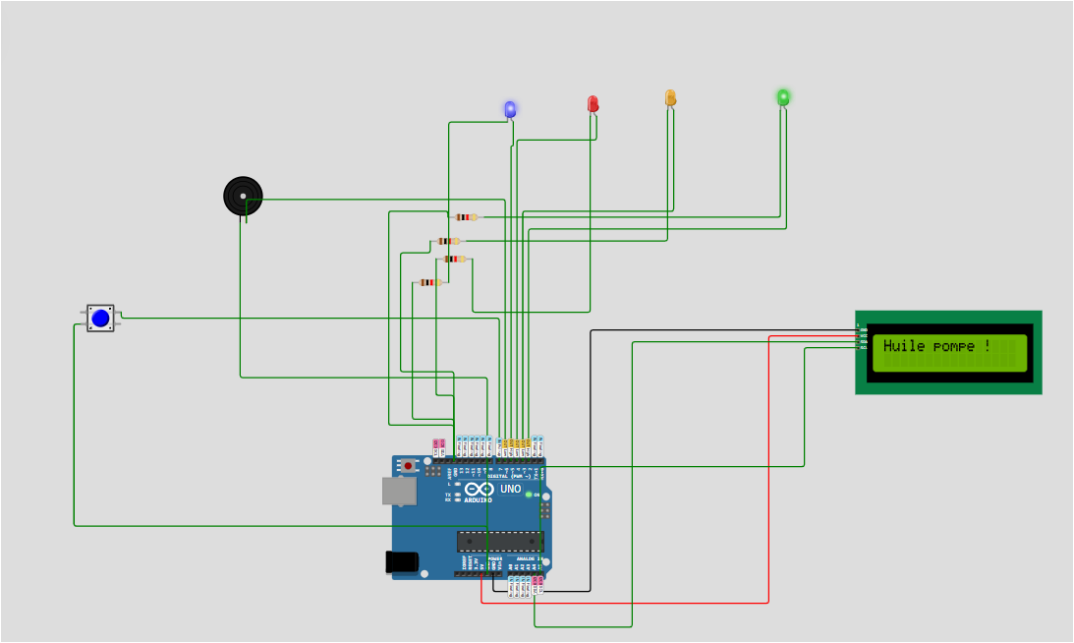


Figure 4.13 : simulation de la maintenance systématique

IV.6.10. Résultats de la Simulation :

La simulation réalisée sur Wokwi a permis de valider le fonctionnement du système dans divers scénarios opérationnels. Les LEDs ont correctement reflété les états de la machine : la LED verte pour un fonctionnement normal, la LED orange pour un état d'alerte, la LED rouge pour un état de danger, la LED bleue pour signaler les interventions périodiques, et la LED violette pour indiquer l'état d'alimentation (allumée en marche, éteinte lors d'un arrêt automatique). L'écran LCD a affiché des messages clairs et précis, informant les opérateurs des niveaux de vibration et des actions requises. Le buzzer a fonctionné comme attendu, émettant une alarme sonore en cas de vibrations critiques, avant que le système ne déclenche un arrêt automatique via le pin de contrôle de puissance, simulant la coupure d'alimentation. La gestion des interventions périodiques, via la LED bleue et le bouton poussoir, s'est déroulée sans problème, confirmant la fiabilité de la conception. De plus, les données de vibration ont été transmises avec succès via la communication série, permettant leur archivage avec un timestamp et leur visualisation sous forme de courbes graphiques dans le Serial Plotter, offrant ainsi une analyse approfondie des performances de la machine.

IV.7. Partie Expérimentale :

L'objectif de cette partie expérimentale est de détailler la conception, le montage et les tests d'un système de surveillance des vibrations industrielles basé sur un microcontrôleur Arduino Nano. Ce système vise à détecter les vibrations d'une machine, à les classifier selon leur intensité (normal, élevé, très élevé) et à signaler les besoins de maintenance périodique. Les expériences ont permis de valider la fiabilité du système, d'ajuster ses paramètres et de confirmer son applicabilité dans un contexte industriel. Les vibrations ont été simulées par des secousses manuelles sur une plaque de test, et les résultats ont été analysés via le Serial Monitor de l'environnement Arduino.

IV.7.1. Matériel Utilisé

Le système repose sur une sélection de composants électroniques adaptés à la surveillance des vibrations. Le tableau suivant présente les équipements utilisés, leurs spécifications et leurs rôles dans l'expérience : Le capteur SW-420 a été choisi pour sa simplicité et sa capacité à détecter des vibrations de faible à forte intensité. Sa sortie numérique (HIGH/LOW) élimine le besoin d'un convertisseur analogique-numérique, simplifiant ainsi le traitement des données par l'Arduino.

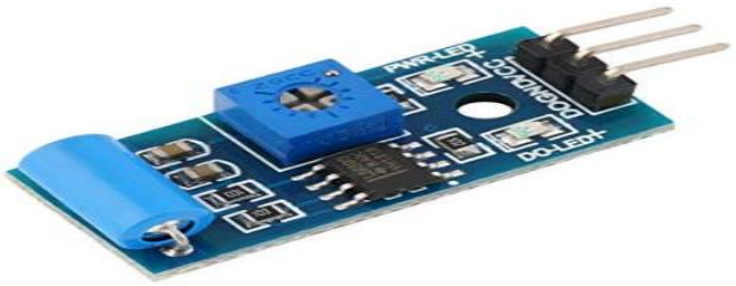


Figure 4.14 : capteur sw 420

Tableau 4.3. Matériel utilisé

Équipement	Description et rôle
Arduino Nano	Microcontrôleur compact avec processeur ATmega328P, utilisé pour lire les signaux du capteur SW-420, contrôler les LEDs et le buzzer, et gérer la logique de maintenance périodique. Alimenté via USB ou 5V.
Capteur SW-420	Capteur de vibration numérique basé sur un interrupteur à ressort. Détecte les vibrations par des transitions d'état (HIGH/LOW) sur la broche de signal. Connecté à la broche D2, avec VCC à 5V et GND à la masse.
LED Verte	Indique l'état normal des vibrations (0 à 10 vibrations/seconde). Connectée à la broche D3 avec une résistance de 220 Ω pour limiter le courant.
LED Jaune	Signale des vibrations élevées (11 à 40 vibrations/seconde). Connectée à la broche D4 avec une résistance de 220 Ω.
LED Rouge	Indique des vibrations très élevées (>40 vibrations/seconde), accompagnée d'une alarme sonore. Connectée à la broche D5 avec une résistance de 220 Ω.
LED Noire	Signale la nécessité d'une maintenance périodique toutes les 30 secondes. Connectée à la broche D6 avec une résistance de 220 Ω.
Buzzer	Émet une alarme sonore en cas de vibrations très élevées. Connecté à la broche D7 avec une résistance de 220 Ω pour protéger le circuit.
Breadboard	Plateforme de prototypage pour faciliter les connexions entre les composants sans soudure.
Résistances	Résistances de 220 Ω utilisées pour limiter le courant traversant les LEDs et le buzzer, évitant ainsi tout dommage.
Câbles de connexion	Câbles mâle-mâle et mâle-femelle pour établir les connexions entre l'Arduino, le capteur, les LEDs et le buzzer.

IV.7.2. Montage du Circuit

Le montage du système a été réalisé sur une breadboard pour permettre des ajustements faciles. Les étapes de connexion sont les suivantes :

1. Capteur SW-420 : La broche de signal a été connectée à la broche D2 de l'Arduino pour lire les transitions d'état. Les broches VCC et GND ont été respectivement connectées à la sortie 5V et à la masse de l'Arduino.

2. LEDs : Les LEDs verte, jaune et rouge ont été connectées aux broches D3, D4 et D5, respectivement. Chaque LED a été équipée d'une résistance de 220 Ω en série, avec l'anode reliée à la broche correspondante et la cathode à la masse via la résistance.

3. LED de maintenance : La LED noire, dédiée à la signalisation de la maintenance périodique, a été connectée à la broche D6 avec une résistance de 220 Ω.

4. Buzzer : Le buzzer a été connecté à la broche D7, avec une résistance de 220 Ω pour limiter le courant. La borne positive a été reliée à D7 et la borne négative à la masse.

5. Alimentation : L'Arduino Nano a été alimenté via un câble USB connecté à un ordinateur, fournissant 5V aux composants.

Pour garantir la stabilité, toutes les connexions ont été vérifiées à l'aide d'un multimètre avant la mise sous tension. Le capteur SW-420 a été fixé sur une plaque rigide (plaque de test) à l'aide d'adhésif pour simuler les vibrations d'une machine industriel (figure 4.15).

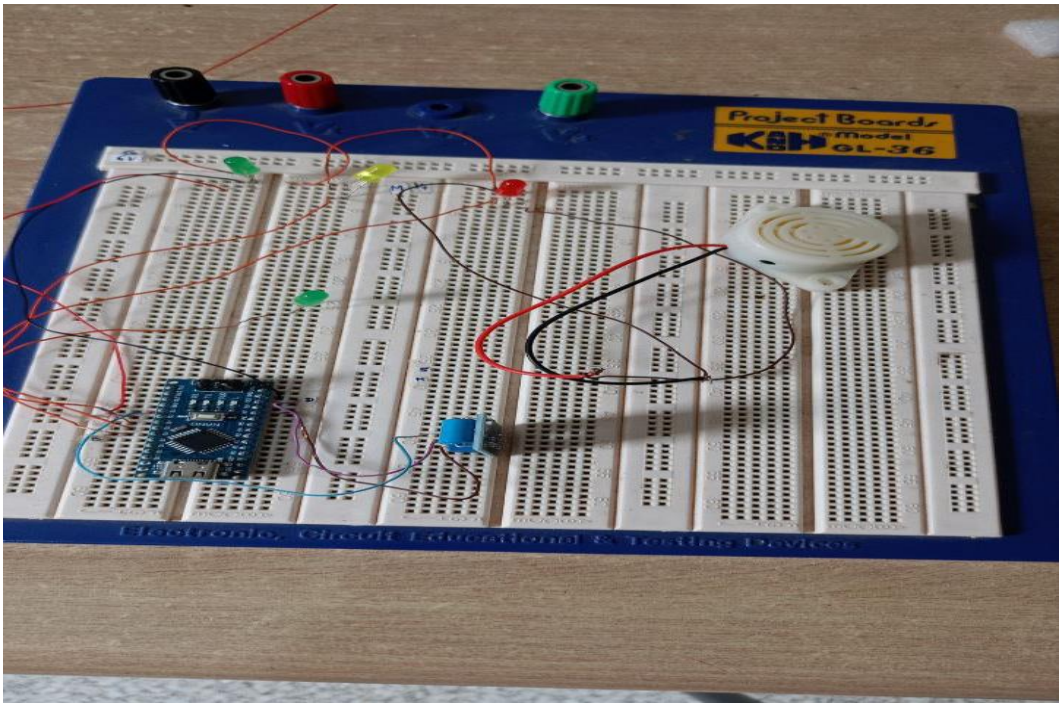


Figure 4.15 : Montage du Circuit

IV.7.3. Méthodologie Expérimentale

Test initial du capteur : La première étape a consisté à valider le fonctionnement du capteur SW-420 avec l'Arduino Nano. Un programme préliminaire a été écrit pour lire les signaux du capteur sur la broche D2 et allumer une LED verte (D3) à chaque détection de vibration. Les vibrations ont été générées en tapotant légèrement la plaque de test. Le Serial Monitor affichait un message ("Vibration détectée") à chaque transition HIGH, confirmant que le capteur répondait correctement aux stimuli mécaniques. Ce test a permis de s'assurer que les connexions étaient correctes et que l'Arduino interprétait les signaux du capteur sans interférences.

Définition des seuils de vibration : Une fois le capteur validé, des tests systématiques ont été effectués pour établir les seuils de classification des vibrations. La plaque de test a été secouée à différentes intensités (faible, modérée, forte), et le nombre de vibrations par seconde a été enregistré via le Serial Monitor. Les résultats typiques étaient les suivants :

— Secousses légères : 2 à 8 vibrations/seconde.

— Secousses modérées : 15 à 35 vibrations/seconde.

— Secousses intenses : 45 à 60 vibrations/seconde.

Après analyse, les seuils suivants ont été définis pour refléter les niveaux de risque dans un contexte industriel :

— 0 à 10 vibrations/seconde : État normal, signalé par la LED verte.

— 11 à 40 vibrations/seconde : Vibrations élevées, signalées par la LED jaune.

— Plus de 40 vibrations/seconde : Vibrations très élevées, signalées par la LED rouge et le buzzer. Ces seuils ont été ajustés après plusieurs itérations pour garantir une distinction claire entre les états.

Simulation des vibrations : Les vibrations ont été simulées en secouant manuellement la plaque de test à différentes intensités. Pour les vibrations faibles, la plaque était tapotée doucement avec les doigts. Pour les vibrations modérées, des secousses rythmées ont été appliquées. Pour les vibrations intenses, la plaque a été secouée vigoureusement. Cette méthode a permis de générer une gamme variée de données pour tester la réponse du système. Le Serial Monitor affichait l'état des vibrations (par exemple, "Vibrations élevées") et le nombre de vibrations uniquement lors d'un changement d'état, évitant ainsi un affichage redondant.

Tests de la maintenance périodique : La fonctionnalité de maintenance périodique a été testée en observant l'allumage de la LED noire toutes les 30 secondes. À chaque cycle, une tâche de maintenance aléatoire (par exemple, "Lubrification à huile pompe") était affichée sur le Serial Monitor. La coupure manuelle de l'alimentation de la LED noire (simulée par un changement d'état sur D6) déclenchait le message "Maintenance périodique effectuée" et réinitialisait le compteur de temps. Ces tests ont confirmé la robustesse de la gestion des rappels de maintenance.

IV.7.4.Description du Programme

Le programme final, écrit en C++ dans l'environnement Arduino, est structuré pour gérer la détection des vibrations, la classification, l'alarme et la maintenance périodique. Les principales composantes du code sont :

- Initialisation : Dans la fonction setup(), les broches sont configurées (D2 en entrée pour le capteur, D3D7 en sortie pour les LEDs et le buzzer). La LED verte est allumée par défaut pour indiquer l'état de repos. Le Serial Monitor est initialisé à 9600 bauds pour afficher les données.
- Détection des vibrations : La fonction loop() lit l'état du capteur SW-420 sur D2. Une transition de LOW à HIGH incrémente un compteur de vibrations (vibrationCount). Ce compteur est réinitialisé toutes les secondes après classification.
- Classification des vibrations : Toutes les secondes, le programme compare vibrationCount aux seuils définis (010, 1140, >40). Selon le résultat, il allume la LED correspondante (verte, jaune ou rouge) et active le buzzer pour les vibrations très élevées. L'état est affiché sur le Serial Monitor uniquement si un changement est détecté, grâce à la variable currentVibrationState.
- Gestion de la maintenance périodique : Un compteur de temps (lastMaintenanceTime) suit les intervalles de 30 secondes. À chaque intervalle, la LED noire s'allume, et une tâche aléatoire est sélectionnée dans une liste prédéfinie via random(). La coupure de la LED noire (détectée via digitalRead(D6)) réinitialise le cycle et affiche "Maintenance périodique effectuée".
- Gestion des affichages : Les messages, tels que "Les vibrations sont en bon état" ou "Nombre de vibrations : 25", sont envoyés au Serial Monitor uniquement lors des changements d'état, optimisant la lisibilité. Le code utilise des variables globales pour suivre l'état du système (par exemple, lastState, lastVibrationCount) et éviter les répétitions inutiles. La structure modulaire facilite les ajustements futurs, comme la modification des seuils ou l'ajout d'un écran LCD.

IV.7.5. Résultats et Analyse

Les tests expérimentaux ont démontré la fiabilité du système dans les conditions suivantes :

- État normal (010 vibrations/seconde) : La LED verte restait allumée en l'absence de vibrations ou lors de secousses légères, indiquant un fonctionnement stable. Le Serial Monitor affichait "Les vibrations sont en bon état" avec des comptes précis (par exemple, 4 vibrations/seconde).
- Vibrations élevées (1140 vibrations/seconde) : La LED jaune s'allumait lors de secousses modérées, avec des messages comme "Vibrations élevées" et des comptes tels que 25 vibrations/seconde. La transition entre les états était fluide, sans retards perceptibles.
- Vibrations très élevées (>40 vibrations/seconde) : La LED rouge et le buzzer s'activaient immédiatement lors de secousses intenses, alertant efficacement d'une situation critique. Le message "Vibrations très élevées" était accompagné de comptes élevés (par exemple, 50 vibrations/seconde).
- Maintenance périodique : La LED noire s'allumait toutes les 30 secondes, avec des tâches telles que "Révision moteur de la pompe de condensat 1ř étage" affichées clairement. La simulation de la maintenance (coupure de la LED) déclenchait le message approprié.

L'analyse des données a révélé une précision élevée dans la détection et la classification des vibrations. Les seuils choisis (010, 1140, >40) correspondaient bien aux niveaux de risque industriel, permettant une détection précoce des anomalies. Le buzzer ajoutait une alerte audible efficace pour les situations critiques. La fonctionnalité de maintenance périodique garantissait des rappels réguliers, essentiels pour la prévention des pannes. Certaines limites ont été observées. La simulation manuelle des vibrations peut ne pas refléter parfaitement les conditions réelles d'une machine industrielle. De plus, l'absence d'un écran LCD limitait l'affichage des informations à un ordinateur connecté. Des améliorations futures pourraient inclure :

- Intégration d'un écran LCD I2C pour afficher les états directement.
- Utilisation d'un accéléromètre pour une mesure plus précise des vibrations.
- Connexion à un système GMAO pour enregistrer les données de maintenance.

IV.8. Les Limites de la Proposition :

a) Limitations Techniques de l'Arduino :

Le système proposé repose sur l'utilisation d'une carte Arduino, qui, bien qu'efficace pour des applications simples, présente certaines limites techniques. Tout d'abord, le nombre de broches d'entrée analogique est limité (par exemple, 6 broches sur une Arduino Uno). Cela peut poser un problème si l'on souhaite surveiller simultanément un grand nombre de variables (comme les vibrations, la température, la pression, et d'autres paramètres). Bien que nous ayons démontré que le système peut

gérer plusieurs variables, l'ajout de capteurs supplémentaires nécessiterait une carte plus avancée, comme une Arduino Mega, ou un système de multiplexage, ce qui augmenterait la complexité.

Ensuite, la capacité de traitement de l'Arduino est relativement modeste. Si les données provenant des capteurs sont volumineuses ou nécessitent des calculs complexes en temps réel (par exemple, une analyse fréquentielle des vibrations), l'Arduino pourrait ne pas être en mesure de répondre rapidement, ce qui pourrait entraîner des retards dans la détection des anomalies. De plus, la mémoire de l'Arduino est limitée, ce qui peut poser problème si le code devient trop volumineux en raison de l'ajout de nouvelles fonctionnalités ou de la gestion de plusieurs capteurs.

b) Précision des Données Simulées :

Lors de la simulation sur Wokwi, nous avons utilisé des valeurs fictives pour représenter les vibrations, ce qui nous a permis de contrôler les scénarios de test. Cependant, cette approche ne reflète pas nécessairement le comportement réel des pompes d'extraction dans un environnement industriel. Les capteurs réels peuvent être influencés par des facteurs externes (comme le bruit électrique, les variations de température, ou les interférences mécaniques), ce qui pourrait affecter la précision des mesures et, par conséquent, la fiabilité des alertes générées par le système. Une validation sur site avec des capteurs réels serait nécessaire pour confirmer les performances du système dans des conditions réelles.

c) Gestion Limitée des Interventions :

Bien que le système permette de signaler les interventions périodiques via la LED bleue et un bouton, sa capacité à gérer des interventions complexes est limitée. Par exemple, si plusieurs interventions périodiques sont dues en même temps, le système affiche uniquement l'intervention la plus urgente, ce qui pourrait entraîner un manque de visibilité pour les autres tâches de maintenance. De plus, le système ne prend pas en charge des scénarios où une intervention nécessite plusieurs étapes ou des instructions détaillées, ce qui pourrait compliquer la tâche des opérateurs dans des situations réelles.

d) Absence de Connectivité Avancée :

Le système fonctionne de manière autonome, ce qui est un avantage dans un contexte où l'intégration avec des systèmes externes n'est pas possible. Cependant, cette autonomie limite sa capacité à communiquer avec d'autres dispositifs ou à fournir des alertes à distance. Par exemple, les opérateurs doivent être physiquement présents près de la machine pour voir les LED ou lire les messages sur l'écran LCD. Dans un environnement industriel moderne, où la surveillance à distance est souvent préférée, cette limitation peut réduire l'efficacité globale du système.

e) Dépendance à l'Interaction Humaine :

Enfin, le système dépend de l'interaction humaine pour confirmer les interventions périodiques via le bouton. Si un opérateur oublie ou tarde à confirmer une intervention, le système continuera d'afficher l'alerte (LED bleue), ce qui pourrait entraîner une confusion ou une surcharge d'alertes inutiles. Une automatisation plus poussée, comme la détection automatique de la réalisation des interventions, serait nécessaire pour surmonter cette limitation, mais cela dépasserait les capacités actuelles de notre conception basée sur l'Arduino.

Conclusion des Limites :

En résumé, bien que le système proposé offre une solution pratique et économique pour la surveillance et la maintenance automatisées, il présente des limites techniques (capacité de l'Arduino, précision des données simulées), opérationnelles (gestion des interventions, dépendance à l'interaction humaine), et fonctionnelles (absence de connectivité avancée). Ces contraintes doivent être prises en compte lors de l'évaluation de l'applicabilité du système dans un contexte industriel réel.

IV.9. Proposition d'un Outil Plus Efficace pour Traiter Plusieurs Variables :

IV.9.1. Contexte et Besoin d'un Outil Plus Puissant :

Notre système actuel, basé sur une carte Arduino Uno, a démontré sa capacité à surveiller des variables telles que les vibrations, avec une possibilité d'extension pour inclure la température et la pression. Cependant, comme mentionné dans les limites de la proposition, l'Arduino Uno présente des contraintes en termes de nombre de broches analogiques (limitées à 6), de capacité de traitement, et de mémoire disponible. Pour un projet nécessitant la surveillance de plusieurs variables en temps réel, une gestion plus complexe des données, et potentiellement une connectivité avancée, il est pertinent de considérer une alternative plus performante.

IV.9.2. Proposition : Utilisation du Raspberry Pi :

Pour répondre à ces besoins, nous proposons de remplacer l'Arduino Uno par un **« Raspberry Pi »,** une plateforme plus puissante et polyvalente. Contrairement à l'Arduino, qui est un microcontrôleur, le Raspberry Pi est un micro-ordinateur monocarte équipé d'un processeur ARM multicœur (par exemple, un Cortex-A72 à 1.8 GHz pour le Raspberry Pi 4), d'une mémoire RAM plus importante (jusqu'à 8 Go sur le Raspberry Pi 4), et d'un système d'exploitation complet (généralement une distribution Linux comme Raspberry Pi OS). Ces caractéristiques le rendent idéal pour traiter plusieurs variables simultanément et gérer des tâches complexes.

IV.9.3. Avantages du Raspberry Pi par Rapport à l'Arduino :

a) Capacité de Traitement et Multitâche :

Le Raspberry Pi offre une puissance de calcul bien supérieure à celle de l'Arduino, avec une fréquence d'horloge beaucoup plus élevée (par exemple, 1.8 GHz contre 16 MHz pour l'Arduino Uno). Cela permet de traiter les données de plusieurs capteurs en temps réel sans risquer de retards, même en cas de calculs complexes (comme l'analyse de tendances ou la comparaison de plusieurs variables). De plus, grâce à son système d'exploitation, le Raspberry Pi supporte le multitâche, permettant d'exécuter plusieurs processus simultanément (par exemple, surveiller les vibrations, la température, et la pression tout en affichant des résultats sur un écran ou en envoyant des données à distance).

b) Nombre d'Entrées/Sorties et Extension :

Bien que le Raspberry Pi 4 dispose de 40 broches GPIO (General Purpose Input/Output), il a moins de broches analogiques natives que l'Arduino. Cependant, cette limitation peut être surmontée en utilisant un convertisseur analogique-numérique (ADC) externe, comme le module ADS1115, qui permet de connecter plusieurs capteurs analogiques (vibrations, température, pression) avec une précision accrue. De plus, le Raspberry Pi supporte des interfaces de communication avancées (I2C, SPI, UART), facilitant l'intégration de multiples capteurs.

c) Connectivité et Communication :

Le Raspberry Pi est équipé de modules Wi-Fi et Bluetooth intégrés, ce qui permet d'envoyer des données à distance (par exemple, vers un serveur ou un appareil mobile) sans matériel supplémentaire. Cela répond à la limitation de l'Arduino, qui nécessite des modules externes pour la connectivité. Par exemple, les opérateurs pourraient recevoir des alertes sur leurs smartphones en cas de vibrations critiques, améliorant ainsi la réactivité dans un environnement industriel.

d) Mémoire et Stockage :

Contrairement à l'Arduino, qui a une mémoire flash limitée (32 Ko pour le programme sur l'Uno) et aucune capacité de stockage externe native, le Raspberry Pi utilise une carte microSD comme stockage (jusqu'à 64 Go ou plus). Cela permet d'enregistrer de grandes quantités de données (comme un historique des vibrations, températures, et pressions) pour une analyse ultérieure, sans dépendre d'un module SD externe.

e) Langage de Programmation et Flexibilité :

Le Raspberry Pi peut être programmé en Python, un langage plus simple et plus flexible que le C++ utilisé sur Arduino. Python offre des bibliothèques puissantes (comme NumPy pour les calculs numériques ou Matplotlib pour la visualisation des données), ce qui facilite le traitement et l'analyse des données provenant de plusieurs capteurs. De plus, le Raspberry Pi peut exécuter des scripts complexes, comme des algorithmes de prédiction ou des interfaces graphiques pour afficher les données en temps réel.

IV.10. Conclusion :

Le chapitre présente un système automatisé de surveillance et de maintenance pour les pompes d'extraction, basé sur une carte Arduino. Ce prototype intègre des capteurs, voyants, un écran, et un mécanisme de confirmation d'interventions, testé via la plateforme Wokwi. Il détecte en temps réel les anomalies (états normal, alerte, danger) et gère les cycles de maintenance. Malgré sa faisabilité démontrée, des limites comme la capacité de traitement de l'Arduino et l'absence de connectivité avancée sont notées. Une alternative avec le Raspberry Pi est proposée pour plus de performance et de flexibilité, ouvrant la voie à des fonctionnalités avancées (visualisation, communication à distance). Ce système offre une base solide pour optimiser la maintenance industrielle, mais nécessite des ajustements et des tests réels pour une application à grande échelle.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire a exploré la maintenance préventive en milieu industriel à travers une étude de cas appliquée à une centrale électrique à gaz vapeur en Algérie. En analysant les fondements théoriques de la maintenance, les pratiques existantes et les opportunités d'amélioration, ce travail a atteint son objectif principal : proposer un système automatisé de surveillance capable d'optimiser la gestion des équipements critiques, tels que les pompes d'extraction. Le système conçu, basé sur une carte Arduino Uno, intègre des capteurs de vibrations, des indicateurs visuels (LED), un écran LCD et un mécanisme d'arrêt automatique, offrant une solution économique et autonome. Les tests réalisés sur la plateforme Wokwi ont validé la faisabilité du système, démontrant sa capacité à détecter les états normaux, d'alerte et de danger, tout en gérant les interventions périodiques de manière efficace.

Cependant, des limitations ont été identifiées, notamment la capacité limitée de l'Arduino à traiter plusieurs variables simultanément et l'absence de connectivité avancée pour la surveillance à distance. Pour pallier ces contraintes, l'utilisation du Raspberry Pi a été proposée comme une alternative plus performante, offrant une meilleure puissance de calcul, une connectivité intégrée et une flexibilité accrue pour des applications industrielles complexes. Cette proposition ouvre la voie à des solutions plus robustes, capables de s'intégrer pleinement aux systèmes GMAO modernes.

Ce travail contribue à la sensibilisation sur l'importance de la maintenance préventive dans l'industrie énergétique algérienne et souligne le potentiel des technologies d'automatisation pour améliorer la fiabilité des équipements. Pour l'avenir, des perspectives incluent la validation du système sur site avec des capteurs réels, l'intégration de plusieurs variables (température, pression), et le développement d'une interface de surveillance à distance. En conclusion, ce mémoire pose les bases d'une approche innovante pour la maintenance industrielle, tout en ouvrant des pistes pour des recherches et des applications pratiques à plus grande échelle.

Bibliographie

[Réf.1] Nassima Bergoug, « Convertion d'énergie », Polycopie Pedagogique , université de Batna 02 Faculté de Technologie ,Département du Socle Commun en Sciences et Technologies 2018/2019.

[Réf.2] https://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Lenz-Faraday. (Consulté juin 2025)

[Réf.3] Djedid Fethi, Elmererbi Mustapha Djawed, « Etude et modelisation d'un turbo alternateur de type 600 mva», Mémoire de Master Professionnelle en électromécanique Université Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent Faculté des Science & Technologie Département de Génie Electrique,Algérie, juin 2021.

[Réf.4 Tebani Hocine, « Production de l'Energie Electrique»,Polycopié de Cours Licence 2 ème Année, Université Hassiba Benbouali Chlef Faculté de Technologie Département d'Electrotechnique, Algérie, 2020.

[Réf.5] Akram Khadraoui, « Etude technique de la centrale électrique de Chegaa-Oumache II», Mémoire de Master Professionnelle en électromécanique, Université Mohamed Khider de Biskra Faculté des Sciences et de la Technologie Département de génie électrique,Algérie , juin,2019.

[Réf.6] E. Hau, "Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics", Springer, Germany ,2006.

[Réf.7] Tebani Hocine, « Production de l'Energie Electrique»,Polycopié de Cours Licence 2 ème Année, Université Hassiba Benbouali Chlef Faculté de Technologie Département d'Electrotechnique, Algérie, 2020.

[Réf.8] BRAHIM Ismail , MESSAOUD Kheireddine, « Optimisation des périodes d'intervention sur les éléments d'une Ligne de production industrielle», Mémoire de Master Professionnelle en Genie Mecanique, Dépt. Génie Mécanique, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, Algérie, Juin 2020.

[Réf.9] MAHFOUD Brahim, « Analyse De La Fonction Maintenance A L'unite Tss – Sider Annaba», Mémoire de Master Professionnelle en Genie Mecanique, Univ. Badji Mokhtar Annaba-University Faculté Sciences de l'ingeniorat, Algérie, juin 2017.

[Réf.10] Ouali ahmed , boulifa ismail, , « Optimisation de la maintenance préventive (Cas des bandes de frein d'un treuil De forage NATIONAL OILWELL 840E) », Mémoire de Master Professionnelle en mécanique des chantiers pétroliers, universite kasdi Merbah Ouargla, Algérie, juin 2018.

[Réf.11] Zemali salah Eddine, «Etude de la fiabilité et maintenance d'une pompe à boue de forage d'un chantier pétrolier », Mémoire de Master Professionnelle en électromécanique, dep génie Mécanique, Université Kasdi Merbah Ouargla,Algérie, juin 2021.

[Réf.12] Document du centrale de production d'électricité (centrale de JIJEL).