



# THÈSE

Pour l'obtention du grade de : DOCTEUR EN SCIENCES

Formation Doctorale : Physique & Ingénierie

Spécialité : Génie Industriel

Présentée et soutenue par:

**Ali EL KIHHEL**

## Contribution à l'optimisation de l'efficacité énergétique industrielle basée sur la maintenance dans l'ère de l'industrie 4.0

Le 20 /01/2022 devant le jury :

M. El Alami SEMMA : Professeur à FST, Settat

**Président du jury**

M. Ahmed MOUSRIJ : Professeur à FST, Settat

**Rapporteur**

M. Mohammed RADOUANI : Professeur à ENSAM, Meknès

**Rapporteur**

M. Mohamed MAZOUZI : Professeur à ENSEM, Casablanca

**Rapporteur**

M. Abdelkabir CHARKAOUI : Professeur à FST, Settat

**Examineur**

M. Hassan GZIRI : Professeur à FST, Settat

**Directeur de thèse**

# Résumé

---

## Résumé

La contribution de cette thèse consiste à montrer comment la maintenance préventive et prédictive pourra réduire la consommation de l'énergie. A cet effet nous avons mené des enquêtes auprès des entreprises industrielles pour identifier les sources de défaillances qui impactent la consommation d'énergie. Parmi ces défaillances on peut citer : désalignement, balourd, roulement, engrenage, électrique,... Pour concrétiser ce travail une réalisation d'une plateforme sous forme de banc d'essai a été mise au point avec un choix adéquat des appareils de mesure. Les techniques de maintenance conditionnelle telle que l'analyse vibratoire, la thermographie infrarouge, la détection des fuites, contrôle non destructif CND,... ont permis de diagnostiquer la chaîne de production et mettre en évidence ces défauts.

Pour notre étude de cas, une entreprise agroalimentaire énergivore a été choisie pour réduire sa consommation énergétique. A cet effet nous avons appliqué la méthodologie du système de management énergétique ISO50001 en réalisant le diagnostic préliminaire et approfondi de tout le process. Pour cette entreprise nous avons modélisé les systèmes énergétiques en identifiant la partie production d'énergie, le transport d'énergie et partie utilisation de l'énergie qui est le process. Les pertes énergétiques sont déterminées, et qui sont d'ordre technique : fuite, surface rayonnante, combustion incomplète, mécanique (balourd, désalignement,...).

Un plan d'action sous forme des solutions de maintenance pour réduire ou éliminer ces pertes énergétiques a été mis au point dont les résultats de réduction de l'énergie sont satisfaisants. Ce plan d'action s'est traduit par une amélioration très nette des indicateurs de performance énergétique et un gain financier pour l'entreprise. Avec un nombre de données issu des mesures très élevées en maintenance conditionnelle préventive, nous étions confrontés à un traitement très compliqué. Pour remédier à ce problème, nous avons développé une maintenance prévisionnelle basée sur l'intelligence artificielle pour diagnostiquer les pannes. Cette technique a mis en évidence les défaillances des organes en temps réel, et intervention en temps opportun avant l'arrêt de la production.

# Abstract

---

## Abstract

The contribution of this thesis consists in showing how preventive and predictive maintenance can reduce energy consumption. And for this we have conducted surveys with industrial companies to identify the sources of failures that impact energy consumption.

To make this work a reality, a platform in the form of a test bench was developed with an adequate choice of measuring devices. Condition-based maintenance techniques such as vibration analysis, infrared thermography, leak detection, NDT, etc. have made it possible to diagnose the production chain and highlight its faults.

For our case study, an energy-intensive food company was chosen to reduce its energy consumption. To this end, we have applied the methodology of the ISO 50001 energy management system by carrying out the preliminary and in-depth diagnosis of the entire process. For this company we modeled the energy systems by identifying the energy production part, the energy transport and the energy use part, which is the process. The energy losses are determined, and which are of a technical nature: leak, radiating surface, incomplete combustion, mechanical (unbalance, misalignment, etc.).

An action plan in the form of maintenance solutions to reduce or eliminate these losses has been developed with satisfactory energy reduction results, which has resulted in a very marked improvement in energy performance indicators and a financial gain for the company. With a number of data resulting from the very high measurements in conditional maintenance, we were confronted with a very complicated treatment, to remedy this problem; we developed a predictive maintenance to predict breakdowns. This technique revealed the failures of the organs in real time, and intervened in good time before the shutdown of production.

# Remerciement

---

## Remerciements

Cette thèse est le résultat d'un travail de recherche de près de trois ans. En préambule, je veux adresser tous mes remerciements aux personnes avec lesquelles j'ai pu échanger et qui m'ont aidé :

En commençant par remercier tout d'abord mon directeur de thèse Monsieur le Professeur Hassan GZIRI. Je tiens à lui exprimer mes sincères remerciements pour ses conseils et critiques constructives au cours de ces années. Avec enthousiasme et patience, il m'a permis de réaliser ce travail dans les meilleures conditions techniques et scientifiques, mais surtout dans un environnement humain très motivant.

Je remercie très vivement Monsieur le Professeur EL Alami SEMMA, de la Faculté des Sciences et Techniques de Settat, pour l'honneur qu'il me fait en présidant le Jury de cette thèse.

Je souhaite ensuite exprimer toute ma gratitude à Monsieur Ahmed MOUSRIJ, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques (FST) de Settat, à Monsieur Mohammed RADOUANI, Professeur à l'Ecole Nationale des Arts et Métiers (ENSAM) de Meknès, ainsi qu'à Monsieur Mohamed MAZOUZI, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique (ENSEM) de Casablanca, et Monsieur Abdelkadir CHARKAOUI, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques (FST) , d'avoir accepté de juger ce travail.

J'exprime une reconnaissance particulière aux membres de l'équipe du laboratoire Ingénierie, Management Industriel et Innovation (IMII) pour leur collaboration et leur aide précieuse durant toute la période de ma thèse.

Un grand merci à toute l'équipe du laboratoire de recherche Génie industriel et Génie sismique de l'ENSAO pour leur implication et leur participation active.

Je remercie évidemment mes collègues doctorants et docteurs.

Le travail a suscité l'intérêt des membres du jury à qui je voudrais exprimer toute ma gratitude.

# Table des matières

---

## Table des Matières

Résumé.....	i
Abstract.....	ii
Remerciements.....	iii
Table des Matières.....	iv
Liste des Tables.....	x
Liste des Figures.....	xi
Liste des Abréviations et Acronymes:.....	xiii
Introduction Générale.....	1
Chapitre I : L'état de l'art .....	4
Introduction.....	4
I.1 Contexte énergétique au Maroc.....	4
I.2 Enjeux énergétiques :.....	5
I.3 Croissance de la consommation énergétique [8]. .....	7
I.3.1 L'industrie, un des grands consommateurs énergétiques :.....	9
I.3.2 Rejet de Gaz carbonique.....	11
I.3.3 L'importance de l'efficacité énergétique dans l'industrie : .....	11
I.4 En jeux législatifs:.....	12
I.4.1. La loi marocaine de l'efficacité énergétique :.....	13
I.4.2. Décret N° 2-17-746 du 10 Avril 2019 définit les seuils spécifiques de l'audit énergétique obligatoire :.....	13
I.5 L'efficacité énergétique du moyen de production .....	14
I.6 L'efficacité énergétique :.....	15
I.7 L'efficacité énergétique et la compétitivité industrielle de l'entreprise :.....	15
I.7.1 La compétitivité d'une entreprise .....	16
I.7.2 Impact du coût énergétique élevé sur la compétitivité des entreprises :.....	16
I.8 La consommation énergétique d'un moyen de production :.....	18
I.8.1 Niveau d'analyse de la consommation énergétique :.....	18
I.8.2 Le périmètre d'analyse du système de production.....	18
I.8.3 L'état de fonctionnement du système de production :.....	18
I.8.4 Décomposition de la consommation énergétique :.....	19
I.8.4.1 Energie primaire.....	19
I.8.4.2 Energie secondaire .....	19
I.8.4.3 Energie finale .....	19

# Table des matières

---

I.8.5 La consommation énergétique d'un moyen de production : .....	19
I.8.5.1 La consommation énergétique des machines : .....	19
I.8.5.2 Consommation cachée : .....	20
I.8.5.3 Consommation en fonctionnement : .....	20
I.9 Enquête et analyse des coûts de l'énergie dans les entreprises .....	20
I.10 Conclusion du chapitre : .....	22
Référence : .....	24
Chapitre 2: Contribution à l'optimisation de l'efficacité énergétique par la maintenance préventive...	26
Introduction.....	26
II.1 Les machines tournantes dans l'industrie .....	27
II.1.1 Les machines tournantes dans l'industrie .....	27
II.1.2 Particularités des machines tournantes .....	27
II.1.3 Cas de balourd d'un système industriel .....	28
II.1.3.1. Balourd statique .....	31
II.1.3.2. Balourd de couple .....	31
II.1.3.3. Balourd dynamique .....	32
II.1.4 Cas de désalignement d'un système industriel.....	32
II.1.4.1 Définition désalignement.....	32
II.1.4.2. Désalignement angulaire .....	33
II.1.4.3 Désalignement parallèle .....	33
II.1.4.4 Désalignement des paliers.....	33
II.2. Maintenance de la surveillance au diagnostic des machines tournantes .....	33
II.2.1 Types de maintenance et indicateurs adaptés .....	33
II.2.2 Contexte industriel de notre étude et perspectives de diagnostic .....	37
II.2.2.1 Collaboration.....	37
II.2.2.2 Idée principale.....	37
II.2.2.3 Contribution de la thèse à la maintenance prédictive .....	37
II.3 Banc d'essai et outils de la maintenance préventive .....	38
II.3.1 Banc d'essai.....	38
II.3.2 La plateforme de surveillance industrielle (PSI).....	38
II.3.2.1 Principe de fonctionnement de la Plateforme de surveillance industrielle PSI: .....	38
II.3.2.2 Principe de fonctionnement de la PSI: .....	38
II.3.3 Diagnostic approfondi des équipements.....	39
II.3.3.1 Choix des méthodes de mesures .....	39
II.4 Protocole expérimentale de surveillance .....	39
II.4.1 Description de la PSI .....	39

# Table des matières

---

II.4.2 Méthode opératoire mise en évidence du balourd .....	40
II.4.3 Analyse des résultats de défaut de balourd .....	40
II.4.3.1 Variation de l'accélération en fonction du balourd .....	41
II.4.3.2 La puissance consommée par le moteur d'entraînement en fonction du balourd.....	42
II.4.3.3 La température mesurée par une caméra infrarouge sur le moteur .....	42
II.4.4 Méthode opératoire pour le désalignement .....	43
II.4.5 Analyse des résultats défaut de désalignement .....	43
II.4.5.1 Variation de l'accélération en fonction du désalignement.....	44
II.4.5.2 La puissance consommée par le moteur d'entraînement en fonction du désalignement	44
II.4.5.3 La température mesurée par la caméra infrarouge sur le moteur .....	45
II.5. Cas de couplage de désalignement et de balourd d'un système industriel .....	45
II.5.1 Création de désalignement : .....	45
II.5.2 Couplage de désalignement et de balourd:.....	46
II.5.3 Analyse des résultats de couplage .....	46
II.5.3.1 L'impact de couplage sur l'accélération: .....	47
II.5.3.2 La puissance consommée par le moteur d'entraînement en fonction du couplage :.....	47
II.5.3.3 L'impact de désalignement et de balourd sur la température du moteur: .....	48
II.6 Synthèses des résultats .....	49
II.7 Conclusion du chapitre : .....	50
Références:.....	52
Chapitre III : Audit énergétique industriel et plan de comptage.....	55
Introduction.....	55
III.1 objectifs de l'ISO 50001 .....	56
III.2 Les principes généraux d'un SME.....	56
III.3 Le Concept des Systèmes de management de l'énergie (SME).....	57
III.4 Audit énergétique de l'entreprise.....	57
III.4.1 Introduction .....	57
III.4.2 L'audit énergétique : .....	58
III.4.3 Démarche d'audit énergétique .....	59
III.4.3.1 Visite préliminaire d'évaluation .....	59
III.4.3.2 Audit énergétique préliminaire:.....	59
III.5 Audit énergétique approfondi: .....	60
III.5.1 Mise en place du matériel de mesure et campagne de mesure : .....	60
III.5.2 Analyse et exploitation des mesures effectuées: .....	60
III.5.3 Examen des installations industrielles.....	60
III.5.4 Elaboration du rapport d'audit approfondi .....	61

# Table des matières

---

III.5.5 procédure d'audit énergétique .....	61
III.6. Résultats d'audit énergétique préliminaire de la société SOFAB .....	62
III.7 Mise en place d'un plan de comptage .....	64
III.7.1 Introduction .....	64
III.7.2 Démarche.....	64
III.7.3 Périmètre du plan de mesure énergétique .....	66
III.7.4 Identification des instruments de mesure.....	66
III.7.4.1 Mesurages.....	66
III.7.4.2 Relevé et récupération des données.....	66
III.7.4.3 Instruments de mesure identifiés .....	67
III.8 Méthodologie de déploiement d'un plan de comptage.....	74
III.8.1 Introduction .....	74
III.8.2 Le plan de mesurage : une méthodologie au cœur de l'ISO 50001 .....	74
III.8.3.2 Deuxième étape : identifier les facteurs d'influence et les indices de performances énergétiques du site(IPE) .....	76
III.8.3.3 Troisième étape : identifier les points de mesure.....	79
III.8.3.4 Quatrième étape : suivi des IPE, identification et pérennisation des sources d'économies d'énergie.....	82
III.9 Conclusion du chapitre.....	82
Références :.....	83
Chapitre IV : Etude de l'efficacité énergétique des installations industrielles et apport de la maintenance Etude de cas industrie agroalimentaire .....	85
Introduction.....	85
IV.1 Diagnostic approfondie des systèmes énergétiques .....	85
IV.1.1 Mise en place du matériel de mesure et campagne de mesure : .....	85
IV.1.2 Analyse et exploitation des mesures effectuées : .....	85
IV.1.3 Examen des installations industrielles .....	85
IV.2 Les systèmes énergétiques.....	86
IV.2.1 Systèmes de production et distribution de la vapeur et eau chaude .....	86
IV.2.1.1 modélisation de l'installation thermique .....	87
IV.2.1.2 Diagnostic et plan d'action .....	88
IV.2.1.3 Calcul du rendement thermique de la chaudière à vapeur (Etude de cas) .....	91
IV.2.2 systèmes d'air comprimé .....	99
IV.2.2. 1 Modélisation de l'installation de production et distribution de l'air comprimé.....	99
IV.2.2.2 Plans d'action.....	101
IV.2.2.2 .1 Gestion optimisée des compresseurs.....	101



# Table des matières

---

IV.2.2.2 .2 Sur le réseau de l'air comprimé .....	101
IV.2.2.2 .3 Minimiser les pertes de charge .....	101
IV.2.2.3.2 Pertes de charge régulières ou linéiques.....	102
IV.2.2.3.3Calcul de perte de pression .....	103
IV.2.3 Systèmes de production de froid.....	104
IV.2.3.1 Le froid.....	104
IV.2.3.2 Génération de l'eau froide :.....	104
IV.2.3.3 Le circuit frigorifique : .....	105
IV.2.3.4 Mesures réalisées :.....	106
IV.2.3.5 Résultats et interprétation .....	107
IV.2.4 systèmes d'entraînement par moteurs électriques.....	108
IV.2.5 réseau de distribution électrique .....	109
IV.3les indicateurs de performance énergétique .....	112
IV.5 Conclusion du chapitre : .....	114
Références :.....	115
Chapitre V : Maintenance industrielle basée sur l'intelligence artificielle.....	117
Introduction :.....	117
V.1 Industrie 4.0 :.....	117
V.1.1 Définition :.....	117
V.1.2 Les enjeux autour de l'industrie 4.0 :.....	119
V.2 Les travaux de recherche sur les technologiques de l'industrie et la maintenance 4.0 : .....	120
V.3 Les notions de la maintenance dans le domaine industriel : .....	122
V.3.1 Les types de la maintenance industrielle : .....	122
V.3.2 l'intérêt la maintenance prédictive :.....	125
V.4 L'intelligence artificielle .....	127
V.4.1 Définition de l'intelligence artificielle : .....	127
V.4.2 Machine Learning :.....	128
V.5 Plateforme d'usine 4.0 : .....	128
V.6 Méthode d'implantation de la maintenance 4.0 dans l'industrie, études de cas d'un système industriel .....	130
V.6.1 Architecture du projet :.....	132
V.6.2 Etude de cas :.....	132
V.6.2.1 <i>Modélisation.</i> .....	133
V.6.2.2 <i>Audit 4.0 :</i> .....	135
V.6.2.3 <i>Définition du modèle d'analyse.</i> .....	135
V.6.3. Méthode de diagnostic .....	136

## Table des matières

---

V.6.3.1 <i>Algorithme de réseau de neurones pour les défauts des roulements.</i> .....	136
V.6.3.2 Résultat et interprétation. ....	138
V.7 Conclusion du chapitre: .....	139
Références:.....	141
Conclusion générale:.....	143

# Liste des Tables

---

## Liste des Tables

<i>Tableau II. 1: les outils de la maintenance.....</i>	<i>36</i>
<i>Tableau III. 1:consommation d'énergie en fonction du litre de produit selon les années. ....</i>	<i>79</i>
<i>Tableau IV. 1.du rendement d'une chaudière (Méthode indirect).....</i>	<i>97</i>
<i>Tableau IV. 2:Action de maintenance.....</i>	<i>98</i>
<i>Tableau IV. 3:Actions de maintenance préventives. ....</i>	<i>103</i>
<i>Tableau V. 1: grandeurs à surveiller .....</i>	<i>135</i>
<i>Tableau V. 2: Specification de 6205-Z.....</i>	<i>136</i>

# Liste des figures

## Liste des Figures

<i>Figure I. 1: Production et consommation énergétique mondiale.....</i>	<i>5</i>
<i>Figure I. 2: Mix électrique en 2018 au Maroc.....</i>	<i>6</i>
<i>Figure I. 3: Mix électrique en 2018 au Maroc.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure I. 4: Consommation électrique en 2018 au Maroc.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure I. 5 : Croissance de la consommation énergétique. ....</i>	<i>8</i>
<i>Figure I. 6:prévision de la demande énergétique [8].....</i>	<i>8</i>
<i>Figure I. 7:Consommation énergétique mondiale par secteurs en 2018.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure I. 8:Consommation d'énergie au Maroc par secteurs en 2018.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure I. 9:Consommation énergétique par secteurs industriel au Maroc. ....</i>	<i>10</i>
<i>Figure I. 10:Consommation énergétique par secteurs industriel au Maroc. ....</i>	<i>10</i>
<i>Figure I. 11:Emission de GES par le secteur industriel. ....</i>	<i>11</i>
<i>Figure I. 12:Seuils spécifiques de l'audit énergétique obligatoire. ....</i>	<i>14</i>
<i>Figure I. 13:Impact du coût sur la compétitivité.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure I. 14:Consommation électrique.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure I. 15:Consommation Fioul.....</i>	<i>21</i>
<i>Figure I. 16:Consommation Cok pétrole.....</i>	<i>21</i>
<i>Figure I. 17:Cout d'énergie de production.....</i>	<i>21</i>
<i>Figure I. 18:Part de la facture énergétique dans le cout de production.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure II. 1:Composants de base d'une machine tournante. ....</i>	<i>27</i>
<i>Figure II. 2: Position de l'axe d'inertie d'un rotor.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure II. 3:Force centrifuge due au Balourd.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure II. 4:Déséquilibre statique, couple et dynamique [18].....</i>	<i>31</i>
<i>Figure II. 5:Alignement correct, désalignement parallèle et désalignement angulaire [18].....</i>	<i>32</i>
<i>Figure II. 6:Niveau de la maintenance.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure II. 7: Banc d'essai.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure II. 8:Principe de fonctionnement de la PSI.....</i>	<i>39</i>
<i>Figure II. 9:Dispositif expérimental.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure II. 10:Module du spectre de vibration mesuré au niveau du palier.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure II. 11:Variation de l'accélération en fonction du balourd pour les six vitesses.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure II. 12:La puissance consommée (avec défauts de balourd).....</i>	<i>42</i>
<i>Figure II. 13:température à l'extérieur du moteur en fonction du balourd.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure II. 14:Module du spectre de vibration mesuré au niveau du palier.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure II. 15:Variation de l'accélération en fonction du désalignement pour les six vitesses.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure II. 16:La puissance consommée (avec défauts de désalignement).....</i>	<i>44</i>
<i>Figure II. 17:température à l'extérieur du moteur en fonction du désalignement.....</i>	<i>45</i>
<i>Figure II. 18:Module du spectre de vibration mesuré au niveau du palier.....</i>	<i>47</i>
<i>Figure II. 19:Evolution de l'accélération.....</i>	<i>47</i>
<i>Figure II. 20:Evolution de la puissance consommé.....</i>	<i>48</i>
<i>Figure II. 21:Température à l'extérieur du moteur en fonction du balourd.....</i>	<i>49</i>
<i>Figure II. 22:Images thermiques du moteur électrique à 500tr/mn.....</i>	<i>49</i>
<i>Figure III. 1 : Diagramme du système, y compris les éléments de la norme ISO 50001.....</i>	<i>57</i>
<i>Figure III. 2:Les différentes étapes de la méthode et résultats de l'audit.....</i>	<i>62</i>
<i>Figure III. 3:Pourcentage de la facture énergétique pour chaque usage.....</i>	<i>63</i>
<i>Figure III. 5:la démarche d'amélioration continue selon la norme NF EN ISO 50 001.....</i>	<i>65</i>
<i>Figure III. 6:Instruments de mesure identifiés.....</i>	<i>73</i>

## Liste des figures

<i>Figure III. 7:les 4 étapes de la méthodologie de déploiement d'un plan de comptage.</i>	74
<i>Figure III. 8:méthodologie au cœur de l'ISO 50001.</i>	75
<i>Figure III. 9:Histogramme de l'évolution de ratio pour l'année 2017.</i>	78
<i>Figure III. 10:Histogramme de l'évolution de ratio pour l'année 2018.</i>	78
<i>Figure III. 11:Histogramme de l'évolution de ratio pour l'année 2019.</i>	79
<i>Figure III. 12:Cartographie énergétique.</i>	80
<i>Figure III. 13:Principe général d'un plan de comptage.</i>	81
<i>Figure IV. 1:Installation thermique.</i>	87
<i>Figure IV. 2:Les différentes pertes au niveau de la chaudière.</i>	88
<i>Figure IV. 3 : Diagnostic de l'installation thermique par thermographie infrarouge.</i>	90
<i>Figure IV. 4 : installation de l'air comprimé.</i>	100
<i>Figure IV. 5 : Origines des pertes de charge.</i>	102
<i>Figure IV. 6:circuit de refroidissement.</i>	106
<i>Figure IV. 7:images des pompes d'alimentation des installations prises par la caméra thermique.</i>	106
<i>Figure IV. 8:images des Pompes de distribution vers la production prises avec la caméra thermique.</i>	107
<i>Figure IV. 9:image de l'échangeur prise avec la caméra thermique.</i>	107
<i>Figure IV. 10:image de l'échangeur prise avec la caméra thermique.</i>	108
<i>Figure IV. 11:Puissance consommée.</i>	111
<i>Figure IV. 12 : pertes thermiques Transformateur et armoire électrique.</i>	111
<i>Figure IV. 13:Litre de boisson produit par litre de fioul.</i>	113
<i>Figure IV. 14: Litre de d'eau par litre de boisson produit.</i>	113
<i>Figure IV. 15:Litre de boisson produit par KWH.</i>	113
<i>Figure V. 1:Les innovations et la technologie ont toujours été le moteur des révolutions industrielles.</i>	118
<i>Figure V. 2:Les innovations et la technologie ont toujours été le moteur des révolutions industrielles.</i>	120
<i>Figure V. 3:Nombre de publication dans la maintenance 4.0 (2015-2021).</i>	121
<i>Figure V. 4:Les différents politiques de la maintenance industrielle.</i>	124
<i>Figure V. 5:Différence entre le diagnostic et le pronostic.</i>	126
<i>Figure V. 6 : Architecture globale de notre usine 4.0.</i>	129
<i>Figure V. 7: Guide d'implantation de maintenance prédictive.</i>	130
<i>Figure V. 8: Notre architecture du diagnostic et pronostic intégré dans la fabrication.</i>	134
<i>Figure V. 9:Architecture d'un neurone.</i>	136
<i>Figure V. 10 : Architecture de ANN.</i>	137
<i>Figure V. 11 : Représentation de la fonction de perte lors du test.</i>	138
<i>Figure V. 12 : Représentation de la précision du modèle lors des essais.</i>	138
<i>Figure V. 13: Modes de fonctionnement des roulements.</i>	139

## Liste des Abréviations et Acronymes

---

### Liste des Abréviations et Acronymes:

**AAS** : Air actuellement fourni  
**AIE** : Agence internationale de l'énergie atomique  
**AIE** : Agence internationale de l'énergie  
**AMEE** : Agence Marocaine pour l'efficacité énergétique  
**ASME** : American Society of Mechanical Engineers  
**ATR** : Air théorique requis  
**CIP** : Cleaning In Place  
**CND** : Contrôle non destructif  
**E** : énergie  
**EA** : Excès d'air  
**ERP** : Enterprise Resource Planning  
**GES** : Gaz à effet de serre  
**GTC** : Gestion Technique Centralisée  
**ICP** : Industries Chimiques et Para-chimiques  
**IGCE** : Industrie Grande Consommatrice d'Énergie  
**ILCE** : Industrie Légère Consommatrice d'Énergie  
**IMII** : Ingénierie Management Industriel et Innovation  
**IMM** : Industries Mécaniques et Métallurgiques  
**IPE** : indices de performances énergétiques  
**ITC** : Industries du Textile et du Cuir ;  
**kWh** : kilowattheures  
**MES** : Manufacturing execution system  
**MTD** : Meilleures Techniques Disponibles  
**Mtep** : Mégatonne équivalent pétrole  
**MW** : Mégawatt  
**P** : Puissance  
**PCS** : Pouvoir calorifique supérieur  
**PIB** : **Produit intérieur brut**  
**PRM** : Point référence mesure  
**PSI** : plateforme de surveillance industrielle  
**RSE** : Responsabilité sociétale des entreprises  
**SMé** : Système de Management de l'Énergie  
**SME** : Système de Management de l'Énergie  
**SOFAB** : **société de fabrication de boisson**  
**t** : temps  
**TGBT** : Tableau général basse tension  
**VEV** : Variateur électronique de vitesse  
**Wh** : Wattheures  
**YTD** : year to date.

## Introduction Générale

Le contexte énergétique mondial devient de plus en plus complexe au cours des dernières décennies, l'énergie est un poste de dépense important pour le secteur industriel. Face à la hausse des prix de l'énergie et aux exigences de l'environnement économique et industriel, l'énergie est devenue une matière première de base qu'il faut gérer et bien maîtriser.

Il s'agit d'ailleurs de l'un des éléments clés de la compétitivité des entreprises. C'est pourquoi la maîtrise de l'efficacité énergétique de l'industrie est désormais indispensable. Elle permet notamment de réduire efficacement le coût relatif aux usages énergétiques.

Au niveau mondial, le secteur industriel représente plus d'un tiers de la consommation d'énergie et presque 40 % des émissions de CO<sub>2</sub>. D'un point de vue national, l'industrie marocaine représente plus de 22% de la consommation énergétique totale. Elle est le deuxième secteur consommateur d'énergie finale. Ce secteur est fortement dépendant des énergies fossiles (gaz naturel, fioul, GPL et autres), dont l'utilisation génère directement et inévitablement des émissions de gaz à effet de serre (GES). L'efficacité énergétique dans ce secteur est donc l'un des principaux leviers pour la maîtrise des coûts, la compétitivité des sociétés et la satisfaction des objectifs économiques et environnementaux. L'énergie représente une part importante des coûts de production, notamment dans certains secteurs industriels comme la cimenterie, les mines et l'agro-alimentaire. Souvent, les industries sont consommatrices de beaucoup d'énergie de manière inefficace, et elles sont l'une des principales responsables des émissions de gaz carbonique, et dans plusieurs cas, peut nuire à la santé des citoyens. D'autre part, l'industrie est l'un des secteurs indispensables pour la croissance économique au Maroc. Il est donc important d'apporter des réponses concrètes pour éviter une incohérence ou un paradoxe entre l'efficacité énergétique et la croissance économique

L'efficacité énergétique industrielle est donc un des leviers clés pour la maîtrise des coûts, la conservation des marges et la compétitivité des sociétés tant pour répondre à des objectifs économiques et environnementaux. L'audit énergétique et la mise en œuvre au sein de l'entreprise d'un système de management de l'énergie (norme ISO50001) sont les principaux outils nécessaires pour atteindre les objectifs de réduction des coûts. Pour encourager les industriels, le Maroc a mis des dispositifs d'incitation financière avec un accompagnement technique et une contribution financière aux investissements sont disponibles aujourd'hui au niveau de plusieurs banques nationales. Les industriels ont donc tout intérêt à investir dans ces actions. Notre contribution dans ce cadre est l'optimisation de la consommation d'énergie dans l'entreprise par les techniques les plus avancées de la maintenance industrielle et en particulier les nouvelles technologies 4.0 tel que l'intelligence artificielle.

Notre travail de recherche est structuré sous forme de 5 chapitres.

Dans le premier chapitre nous présentons l'état de l'art basé sur une étude sur la consommation internationale et nationale et l'impact de l'efficacité énergétique sur la compétitivité de l'entreprise.

# Introduction générale

---

Nous avons réalisé des études de cas sur deux secteurs industriels importants de l'économie marocaine : le secteur des matériaux et de l'agroalimentaire. Cette étude montre la part du coût de l'énergie dans le prix de revient.

Le résultat obtenu pour ces études de cas nous a amené à proposer une méthodologie d'optimisation de la consommation d'énergie dans l'industrie, basée sur les techniques avancées de la maintenance industrielle.

Dans le deuxième chapitre nous développons la maintenance prédictive, en analysant et évaluant les paramètres significatifs de la dégradation de l'élément considéré (vibration, énergie, température ...), nous allons montrer la force de ce type maintenance pour anticiper les pannes dans les équipements industriels.

A cet effet, nous allons démontrer que la maintenance préventive est un outil puissant pour optimiser la disponibilité des machines de fabrication et de production, la rentabilité des travaux de maintenance, et peut également être utilisée dans la diminution de la consommation d'énergie qui est notre apport original pour ce travail de recherche.

La maintenance préventive fournit des données factuelles sur l'état mécanique réel de chaque machine et l'efficacité de fonctionnement de chaque process. Généralement, les techniques utilisées pour la maintenance préventive sont : L'analyse vibratoire, la thermographie infrarouge, les tests par ultrason et l'analyse d'huile,... Chaque technique a une donnée unique et sa sensibilité dépend de la gravité du défaut.

Notre contribution est de développer une méthode de surveillance en continu, des principaux composants d'une installation industrielle. L'évolution des données, permet la prédiction de disfonctionnement avant l'arrêt de la production. De nombreux chercheurs ont abordé le domaine de la surveillance industrielle mettant ainsi en évidence l'intérêt croissant manifesté par les industriels par rapport à cette problématique.

Cette maintenance préventive qu'on a développée sous forme d'une plateforme de surveillance industrielle en utilisant des instruments précis permet d'anticiper les défaillances de l'installation et donc d'accroître considérablement la disponibilité et la fiabilité intervenant avant l'arrivée d'une panne et augmenter la productivité. D'autre part on peut mettre en évidence la consommation d'énergie selon l'état de santé du matériel industriel. En effet, il est désormais courant d'adjoindre aux machines de production, les capteurs mesurant en permanence l'état de leur fonctionnement. Il s'agit donc de surveiller et d'analyser l'évolution d'un élément afin de trouver le moment convenable pour l'intervention. Ce chapitre traite le balourd, le désalignement et le couplage de ces deux défaillances.

Dans ce chapitre, on montre comment ces défaillances impactent le système industriel (vibration et élévation de température des composants) en augmentant sa consommation d'énergie.

Dans le 3ème chapitre notre travail expérimental s'inscrit dans le cadre d'un système de management de l'énergie ISO 50001. Ce Système de Management de l'Energie (SMEn) a pour finalité d'encourager les organismes à s'inscrire dans une démarche volontaire d'amélioration des performances énergétiques de leurs activités. Il donne un fil conducteur pour développer une gestion méthodique et pérenne de l'énergie. Il va permettre d'orienter les décisions



## Introduction générale

---

stratégiques, de mettre en œuvre des actions transverses (achat, communication, formation) et des moyens, de vérifier leur efficacité, de faire participer l'ensemble des acteurs de l'entreprise. En outre, les entreprises impliquées dans un SMEn améliorent sensiblement leur efficacité énergétique. L'industrie est donc clairement concernée par la mise en place d'une telle démarche.

Pour aborder la partie expérimentale, nous avons mentionné dans le chapitre précédent toutes les conditions nécessaires pour la réussir : périmètre d'audit, procédure d'audit, instrumentations de mesurage, cartographie des énergies, indicateurs de performance énergétique, points de mesure...

Dans ce chapitre d'expérimentations, nous allons présenter les 5 systèmes de production d'énergie, que nous avons développés en milieu industriel au sein de l'entreprise SOFAB. Pour chaque système, les enjeux énergétiques sont exposés, ainsi que les principales pistes d'amélioration énergétique à envisager autour d'un schéma représentatif d'une installation industrielle. Enfin, sont listées, pour chacune des pistes, les actions concrètes de maintenance industrielle permettant des gains énergétiques importants, à court ou moyen terme. Elles s'organisent autour des 5 éléments suivants : la production, le réseau, l'utilisation, le contrôle et la maintenance. Ces actions ne sont pas limitatives et les gains possibles seront en fonction des installations existantes.

Pour ce chapitre 4, le volume de données générées par les capteurs était considérable et produit des quantités infinies des données sur terrain (énorme données). Ces capteurs génèrent des informations et des données qui s'incrémentent en temps-réel.

Finalement, le chapitre 5 est dédié à l'exploitation efficace et durable des données, en passant d'une maintenance classique vers une maintenance 4.0 plus évaluée basée sur l'intelligence artificielle. Plus concrètement, cette maintenance pourra être implantée dans un système interconnecté qui relie les machines par des capteurs à des systèmes de traitement.

L'objectif de ce chapitre est d'exploiter ces données importantes pour prédire les défaillances qui contribuent à l'augmentation de la consommation de l'énergie.

## Chapitre I : L'état de l'art

---

### Introduction

L'industrie marocaine est un secteur particulièrement lié aux problématiques de réduction des consommations énergétiques et qui est l'objet d'une attention particulière car il représente plus de 22% de la consommation énergétique totale. L'amélioration de l'efficacité énergétique dans l'industrie est donc un enjeu majeur pour répondre aux objectifs environnementaux et économiques en particulier le coût de production dans l'industrie. La stratégie du Maroc table sur la réduction de la consommation énergétique nationale de 20% dans l'industrie à l'horizon 2020 et 30% pour l'année 2030[1].

Face aux problématiques énergétiques actuellement posées, l'augmentation de la demande, les fluctuations des prix des ressources, l'incertitude pesant sur les approvisionnements énergétique et aux enjeux législatifs, il est important de prendre en compte l'efficacité énergétique dans les moyens de production sous différents aspects maintenance, reconception des installations, introduction des nouvelles formes d'énergie renouvelables, .... Dans le cadre de notre étude, nous nous concentrons particulièrement sur la méthodologie basée sur le diagnostic énergétique des installations industrielles et les moyens d'améliorer l'efficacité énergétique de l'outil de production.

L'état de l'art présenté dans ce chapitre est basé sur la présence de trois éléments principaux :

- Définition de l'efficacité énergétique, aussi les actions permettant d'améliorer l'efficacité énergétique d'un moyen de production ;
- L'efficacité énergétique et la compétitivité de l'entreprise ;
- Des études de cas de deux secteurs industriels implorants pour l'économie du Maroc seront présentées qui sont les secteurs des matériaux et agroalimentaires. Cette étude montre la part du cout de l'énergie dans la facture.

Cet état d'art nous permet de positionner notre travail et de mettre en évidence la nécessité de proposer une méthodologie d'optimisation de la consommation d'énergie dans l'industrie basée sur les techniques avancées de la maintenance industrielle.

### I.1 Contexte énergétique au Maroc

Aujourd'hui, la consommation énergétique de l'industrie représente une part importante de l'énergie consommée au Maroc qui est de 8% du PIB[2]. En conséquence, la problématique de l'énergie dans l'industrie suscite actuellement notre attention. Dans ce chapitre, nous introduisons le contexte général de notre travail. Il s'agit de fournir une vision globale des enjeux énergétiques, enjeux législatifs et enjeux industriels sur les problématiques liées à la réduction de la consommation énergétique d'un moyen de production.

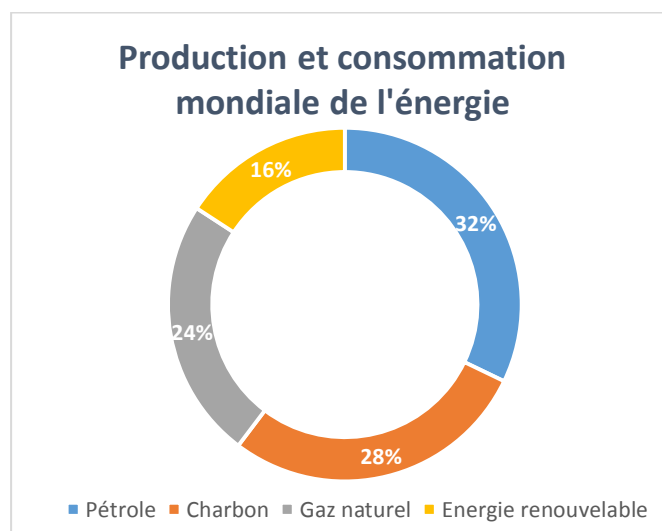
Ce chapitre vise à présenter une étude bibliographique sur la consommation d'énergie et l'efficacité énergétique d'un outil de production. Dans un premier temps, l'aspect de l'efficacité énergétique proposée dans la littérature est ensuite présenté avec les approches et

les actions existantes permettant de réduire la consommation énergétique d'un outil de production [3]. Puis, la consommation énergétique d'un moyen de production : le périmètre d'analyse du système de production, la décomposition de la consommation énergétique et les modèles de consommation énergétique existants, et le choix du contour d'étude sont présentés. Enfin, nous présentons une conclusion de cet état de l'art.

### **I.2 Enjeux énergétiques :**

L'énergie est fondamentale pour la qualité de nos vies et à l'économie du pays. Aujourd'hui, nous dépendons totalement d'un approvisionnement énergétique fiable et interrompu pour la vie quotidienne et professionnelle. Face à la hausse des prix de l'énergie, le manque des ressources énergétiques, et aux exigences de l'environnement économique et industriel, l'énergie est devenue une matière première supplémentaire qu'il faut gérer et bien maîtriser au niveau mondial [4].

Les sources d'énergie peuvent être classées en deux catégories principales : non renouvelables et renouvelables. Selon l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) [5], environ 89% de l'énergie produite et consommée actuellement est dérivée de la source non renouvelable (32,3 % de pétrole, 28,3 % de charbon, 24,0 % de gaz naturel), le reste provenant de sources renouvelables avec 11.5% et de nucléaires avec 4,4%. La transformation de l'énergie primaire à partir de ressources non renouvelables à un grand impact sur l'environnement. Elle est liée intrinsèquement aux émissions de CO<sub>2</sub> qui représente la source la plus abondante de gaz à effet de serre affectant le changement climatique. Au niveau mondial, les émissions de dioxyde de carbone dues à l'énergie sont estimées par l'AIE à 32840 Mt en 2018 dont 44,2 % produites par le charbon, 34,6 % par le pétrole et 20,5 % par le gaz naturel [6].



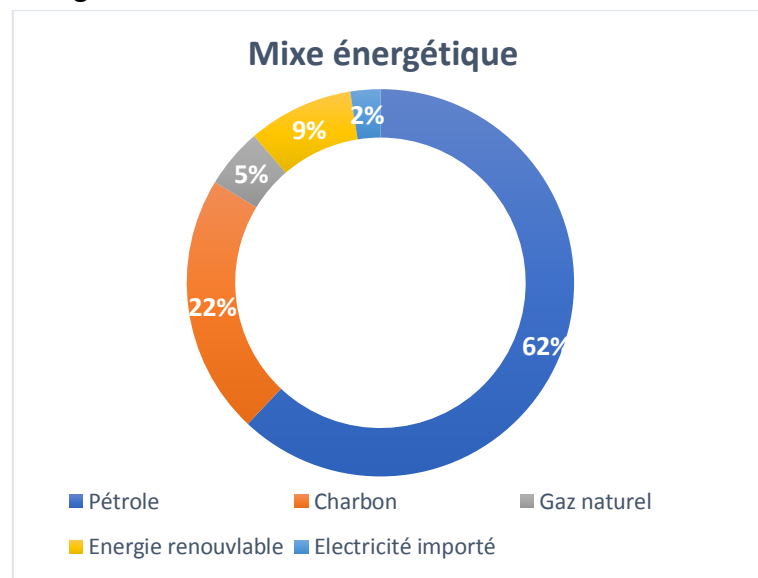
**Figure I. 1: Production et consommation énergétique mondiale.**

Le Maroc est un pas en cours de développement, et a connu depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle une croissance continue de la demande d'énergie, liée à l'industrialisation, au développement global de l'économie et à l'augmentation du niveau de vie. Mais il demeure confronté à une

## Chapitre I : l'état de l'art

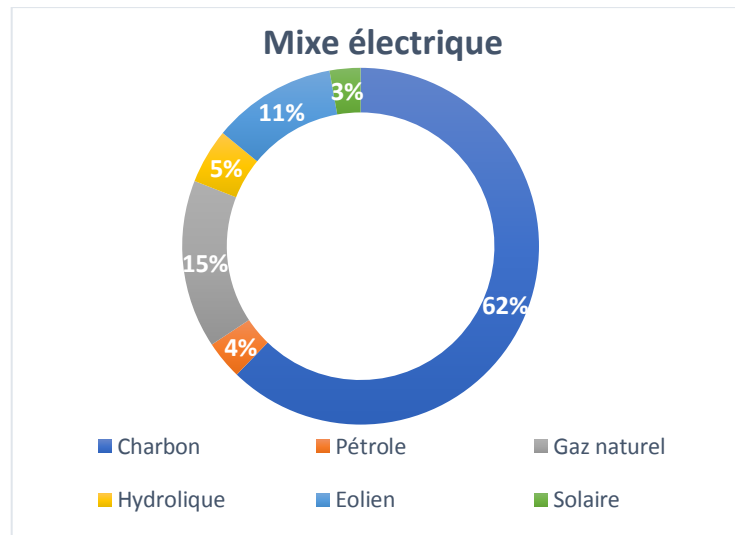
forte dépendance de l'étranger pour couvrir ses besoins énergétiques. Les importations (pétrole brut, produits pétroliers, charbon, gaz algérien, électricité en provenance d'Espagne via un double câble d'interconnexion) assurent 95 % des besoins nationaux [7]. Ainsi que la quasi-absence de ressources énergétiques fossiles identifiées (hydrocarbures, charbon) Malgré une politique active d'exploration terrestre et maritime, les quantités d'hydrocarbures découvertes ont été faibles jusqu'ici. L'objectif du Maroc est d'assurer un approvisionnement en énergie qui soit à la fois fiable, durable et le meilleur marché possible.

Le mix énergétique du Maroc est dominé par les énergies fossiles, presque entièrement importées, qui couvrent 88,7 % de la consommation d'énergie primaire du pays en 2018 dont le pétrole représente les deux tiers de la consommation (62%), les énergies renouvelables ne contribuent que pour 8,8 % (surtout biomasse : 6,5 %) et les importations d'électricité pour 2,5 %. A cause de sa dépendance sur les énergies fossile le Maroc affiche des émissions s'élèvent à 1,63 t CO<sub>2</sub> par habitant en 2018, correspondant à 29 % de la moyenne mondiale mais supérieures de 61 % à la moyenne africaine, d'où l'importance de la diversification et du développement des énergies renouvelables.



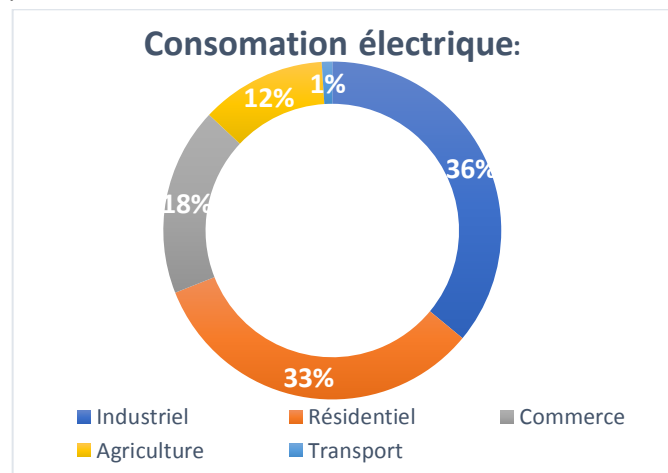
**Figure I. 2: Mix électrique en 2018 au Maroc.**

L'électricité couvrait 17,3 % de la consommation finale en 2018 [7]; sa production est aussi dominée par les énergies fossiles : 81,2 % en 2018 dont le charbon présente 62,4 %, et les énergies renouvelables assurent 19 % de la production (hydraulique 5%, éolien 11,3 %, solaire 2,8 %). En conséquence, le Maroc souffre d'une faiblesse au niveau des énergies renouvelables malgré la percée de l'énergie éolienne.



**Figure I. 3: Mix électrique en 2018 au Maroc.**

En ce qui concerne la consommation de l'énergie électrique, le secteur industriel consomme jusqu'à 36% (en 2018) de la consommation nationale totale.



**Figure I. 4: Consommation électrique en 2018 au Maroc.**

L'objectif du Maroc est d'assurer un approvisionnement en énergie qui soit à la fois fiable, durable et le meilleur marché possible. L'orientation vers la diversification des ressources d'énergie, d'une part la volatilité des prix sur les marchés pétroliers et gaziers d'autre part.

### **I.3 Croissance de la consommation énergétique [8].**

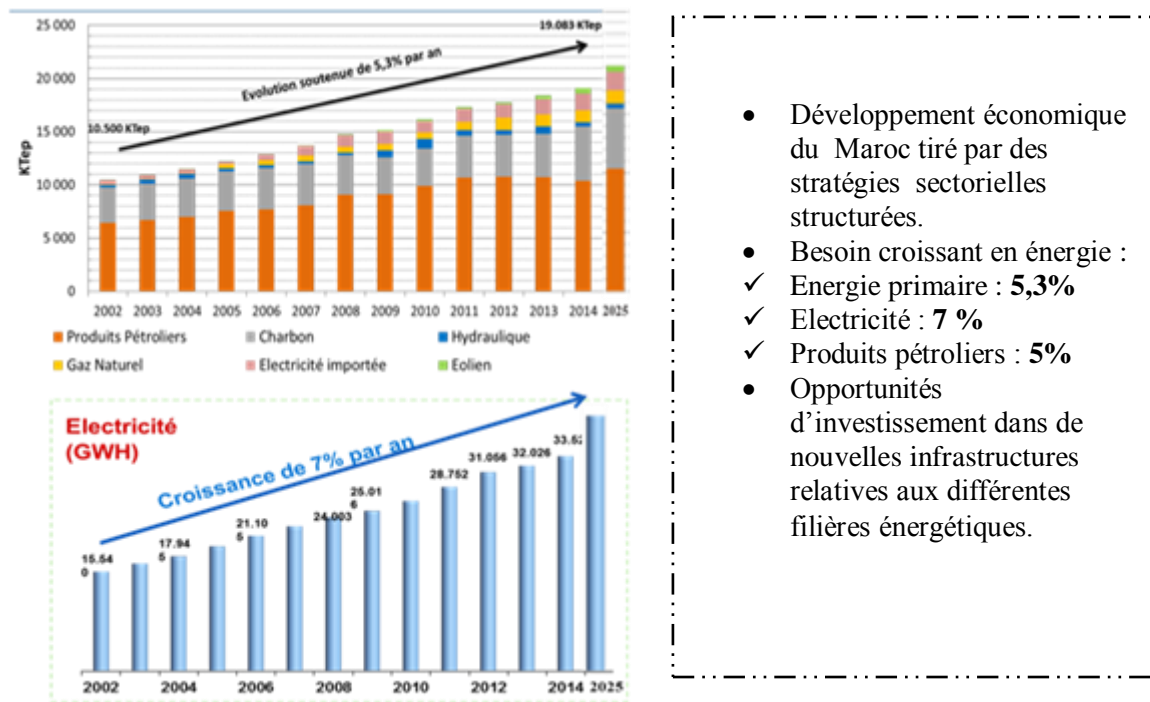


Figure I. 5 : Croissance de la consommation énergétique.

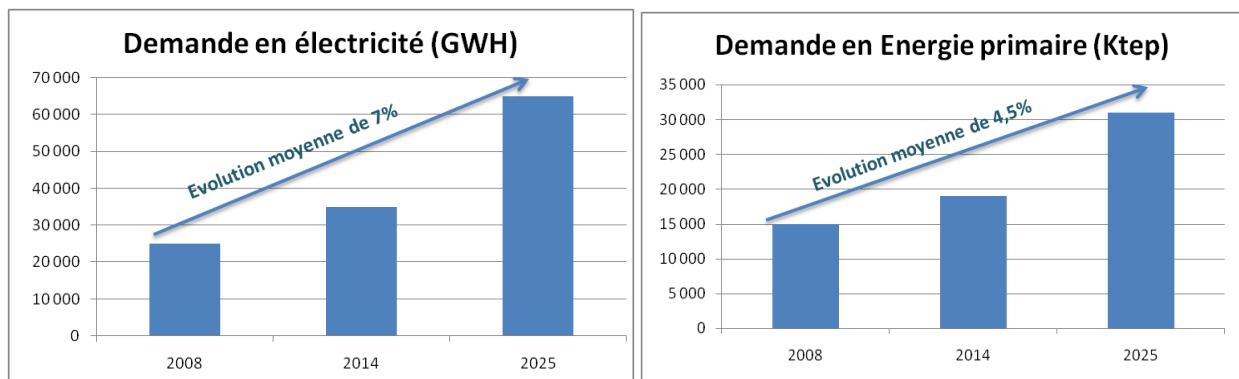


Figure I. 6:prévision de la demande énergétique [8].

Nous remarquons une augmentation de consommation de plus en plus avec une flambée de la facture énergétique. Les études montrent que cette facture énergétique est l'équivalent de 46% des recettes des exportations et dépasse 8% du PIB d'où des grands défis à relever à l'horizon 2025[9] :

- Satisfaction de la demande électrique qui suit un rythme de croissance soutenu (la demande électrique sera augmentée de 70% entre 2008 et 2025);
- garantir l'adéquation offre demande énergétique (la demande énergie va doubler entre 2008 et 2025);
- Interaction rationnelle du Maroc avec les mutations profondes que connaît le secteur énergétique à l'échelle régionale et internationale.

### I.3.1 L'industrie, un des grands consommateurs énergétiques :

Historiquement énergivore, l'industrie extractive et manufacturière représente presque le tiers de la consommation totale d'énergie au niveau mondial en 2018 avec 29% [10], qui le rend le plus grand consommateur de l'énergie devant les autres secteurs. L'industrie requière principalement de l'énergie pour fonctionner des machines de même que pour les processus thermodynamiques. On utilise à cet effet en particulier des combustibles fossiles et de l'énergie électrique.

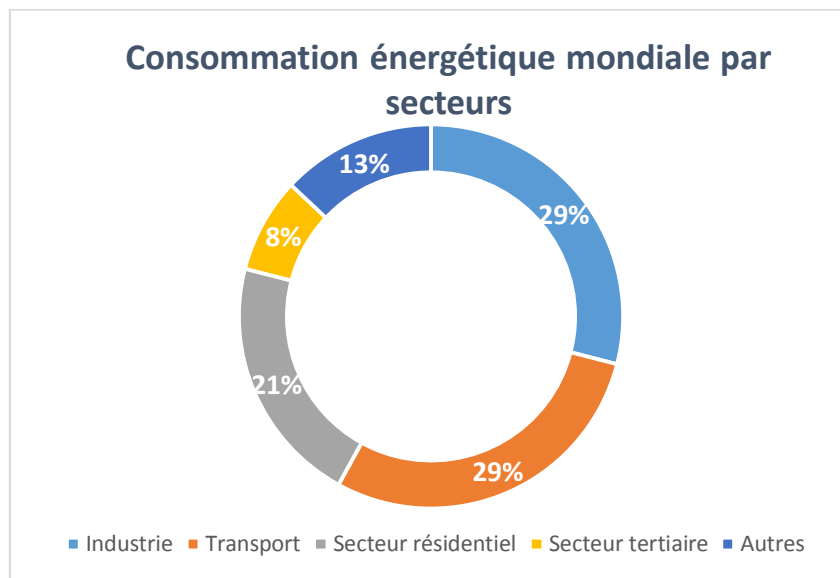


Figure I. 7: Consommation énergétique mondiale par secteurs en 2018.

Au Maroc l'industrie est classée comme le troisième secteur le plus consommateur d'énergie, derrière le secteur résidentiel avec 24,9% et le secteur de transport le plus grand consommateur avec 35,9%. Les combustibles produits pétroliers représentent près de 70% de la consommation finale du secteur industriel [11].

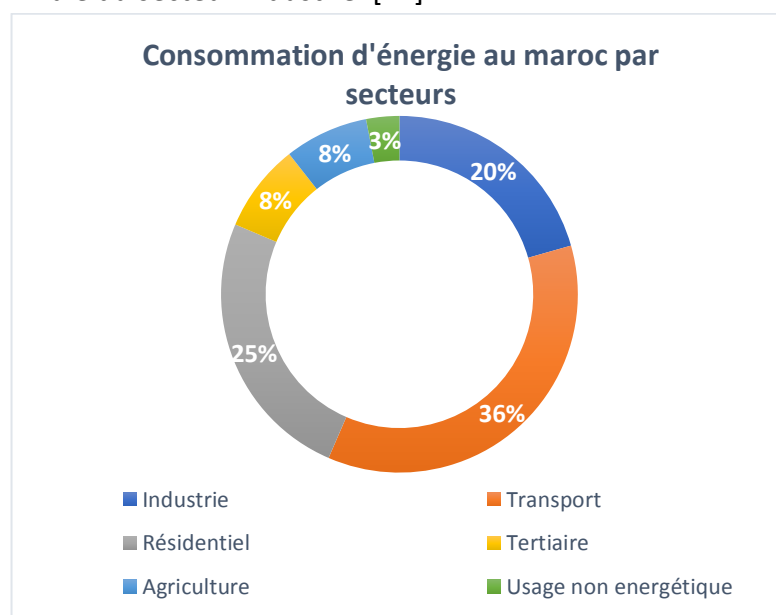


Figure I. 8: Consommation d'énergie au Maroc par secteurs en 2018.

## Chapitre I : l'état de l'art

L'industrie au Maroc est répartie entre deux grandes catégories d'industries :

Industrie Grande Consommatrice d'Énergie (IGCE) : dans cette catégorie sont classées l'industrie sucrière, le ciment, le papier, la pâte à papier, les matériaux de construction, les sidérurgies le phosphate, les acides et les engrais. Pour ces industries, le paramètre énergie est déterminant dans le coût de production.

Industrie Légère Consommatrice d'Énergie (ILCE) : cette catégorie regroupe les industries agro-alimentaires, textile et cuir, autres & bâtiment et travaux publics, chimie parachimie, industrie mécanique, métallurgique et électrique, et divers. Pour ce type d'industries légères ou diffuses le paramètre énergie est souvent moins déterminant dans la fonction de coût de production.

L'Agro-alimentaire vient en deuxième position en tant que secteur consommateur d'énergie après le secteur des matériaux de construction. Les autres principaux secteurs consommateurs d'énergie et dont le potentiel d'économie d'énergie reste important pour la compétitivité industrielle nationale sont principalement le secteur Textile (principalement de l'électricité), le secteur minier et la transformation des métaux.

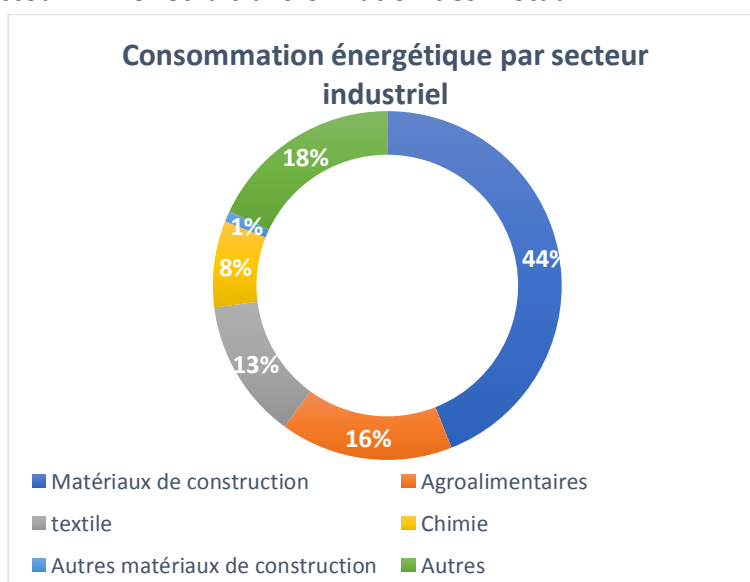


Figure I. 9: Consommation énergétique par secteurs industriel au Maroc.

### • Tous les secteurs

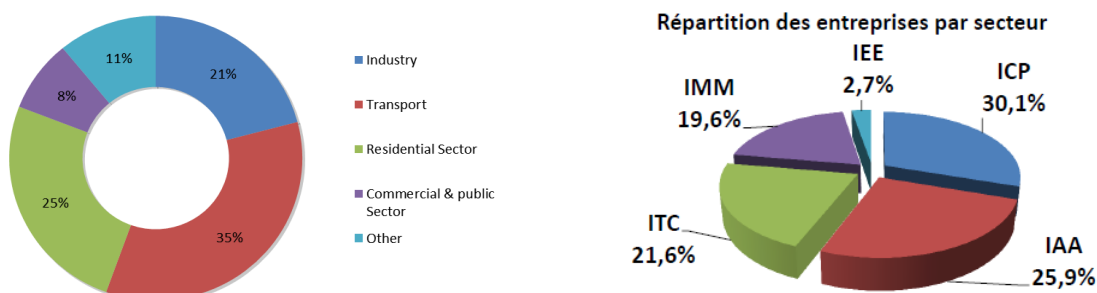


Figure I. 10: Consommation énergétique par secteurs industriels au Maroc.



**IAA:** Industries Agroalimentaires ;

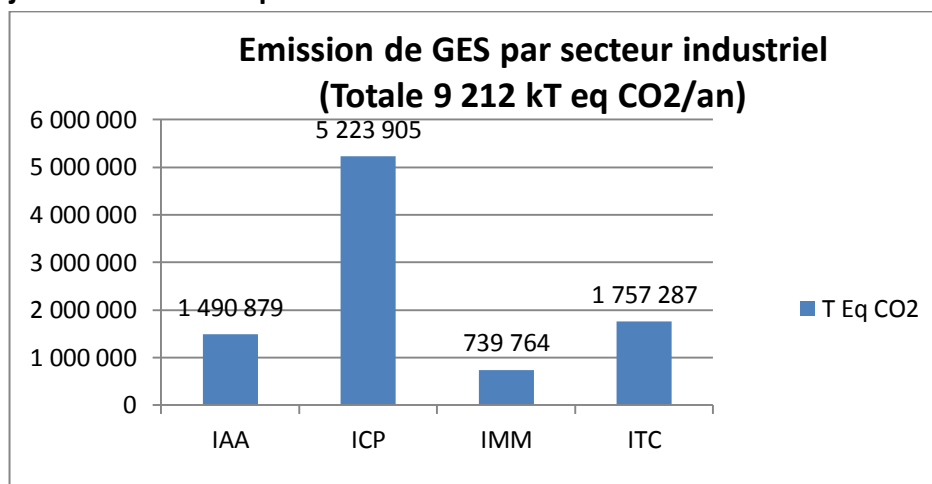
**ITC:** Industries du Textile et du Cuir ;

**ICP:** Industries Chimiques et Para-chimiques ;

**IMM:** Industries Mécaniques et Métallurgiques.

Cette consommation d'énergie est accompagnée par un rejet de GES dans l'atmosphère qui a un impact négatif sur l'environnement.

### I.3.2 Rejet de Gaz carbonique



**Figure I. 11: Emission de GES par le secteur industriel.**

En conclusion nous remarquons une demande d'énergie croissante au fil des années due à une relance économique, nouvelles infrastructures, la construction de logements, L'amélioration du cadre de vie du citoyen, une croissance démographique;...D'où le rôle important de l'efficacité énergétique qui va constituer des réponses appropriées à:

- La préservation des ressources fossiles,
- la satisfaction des besoins énergétique nationaux,
- La réduction des émissions de GES.
- la compétitivité des entreprises
- Des activités créatrices de richesse et d'emploi

### I.3.3 L'importance de l'efficacité énergétique dans l'industrie :

Les industriels sont de plus en plus conscients de l'importance de l'économie d'énergie pour la compétitivité, la performance et réduire leur coût de production. L'énergie est le deuxième poste de coût chez les industriels qui s'accaparent à eux seuls le tiers de la consommation nationale. Les 7640 entreprises industrielles de transformations existantes sont tenues de réduire leurs besoins en énergie fossile, adopter de nouveaux process plus économiques et faire appel aux énergies renouvelables (éolien et solaire).

Actuellement, le secteur industriel réalise des efforts significatifs de réduction de la consommation d'énergie grâce aux progrès techniques et aux innovations technologiques avec l'aide et le support de l'état. L'AMEE (agence Marocaine pour l'efficacité

énergétique[12]) a lancé au début de l'année 2013 les Etats Généraux de l'Efficacité Energétique, un débat national qui a conduit à l'élaboration d'une vision nationale d'efficacité énergétique à l'horizon 2030, et les plans d'actions associés à court, moyen et long terme. Il est estimé que la mise en œuvre des mesures de l'efficacité énergétique permet de faire des économies d'énergie au niveau de l'industrie.

La consommation d'énergie dans l'industrie est un enjeu écologique majeur, mais également un enjeu économique car elle représente une part significative des coûts de production. L'amélioration de l'efficacité énergétique permet aux industries de :

### **A. Répondre aux enjeux de compétitivité :**

La compétitivité d'une industrie repose sur la maîtrise de la facture énergétique. Dans un contexte de crise industrielle et de concurrence de plus en plus acerbée, la maîtrise de la consommation d'énergie et l'amélioration de l'efficacité énergétique représente donc des enjeux majeurs de compétitivité pour l'industrie. L'amélioration de l'efficacité énergétique permet à l'industrie de réduire ses coûts de production et donc d'augmenter sa marge de profits.

### **B. Répondre aux enjeux environnementaux :**

L'amélioration de l'efficacité énergétique dans l'industrie permet aussi de diminuer les émissions du CO<sub>2</sub>. Elle contribue donc à la lutte contre le réchauffement climatique.

## **I.4 En jeux législatifs:**

A cause de manque des ressources énergétique, le Maroc dépend largement des importations afin de satisfaire ses besoins. Pour cette raison, le nouvel ordre énergétique mondial l'oblige à chercher plus d'interdépendance énergétique. Pour cela, il multiplie les opportunités de partenariats avec le reste de l'Afrique. Et il a adopté une politique volontariste de l'économie verte à travers les plans solaire, Eolien et Hydraulique de 2000MW [13].

Parallèlement au développement des énergies renouvelables et la recherche de nouvelles ressources d'énergie fossiles, le Maroc a considéré l'efficacité énergétique comme une priorité nationale dont l'objectif est de permettre d'économiser la consommation énergétique totale de 17% en 2030. Cette volonté a été consacrée par la loi n°47.09, dont la mise en œuvre a reposé particulièrement sur les principes de la performance énergétique, des exigences d'efficacité énergétique, des études d'impact énergétique, de l'audit énergétique obligatoire et du contrôle technique. Pour atteindre ce but, des plans d'action ont été mis en place dans les trois secteurs les plus consommateurs de l'énergie au Maroc ; construction, industrie et transport[14].

Afin de renforcer l'efficacité énergétique dans le secteur industriel l'AMEE a initié plusieurs actions à travers la réalisation des audits énergétiques volontaires au profit de plusieurs entreprises industrielles dans le cadre de la coopération internationale. Aussi des actions de renforcement des capacités et des accréditations, la communication et la sensibilisation ont été réalisées pour instaurer la culture d'efficacité énergétique au niveau des entreprises industrielles. Et plus récemment l'obligation d'un audit énergétique périodique pour

rationaliser l'utilisation d'énergie dans les entreprises et établissements grands consommateurs d'énergie, le décret relatif à l'audit énergétique obligatoire et aux organismes d'audit, en application des dispositions de la loi n°47-09, a été publiée dans le bulletin officiel le 02 mai 2019[15].

Dans ces audits obligatoires, l'AMEE jouera un rôle important. D'abord en constituant une base de données sur les établissements soumis à l'audit et leur niveau de consommation. Ensuite, la loi oblige les entreprises qui dépassent les seuils de tolérance de saisir l'Agence et d'entamer rapidement la réalisation de l'audit. Ce seuil est fixé à 1.500 tonnes équivalent pétrole (tep) par an pour l'industrie y compris les entreprises de production d'énergie. Il est de 500 tep par an pour le tourisme, la santé, l'éducation, l'enseignement, le commerce, le transport et les entreprises de distribution d'énergie ainsi que pour les personnes physiques. Celui-ci doit porter sur l'ensemble des activités, procédés industriels, bâtiments et parc de véhicules exploités.

Le Maroc s'est véritablement donné les moyens de réussir ses ambitions et commence à engranger les premiers fruits de cette stratégie.

**Remarque :** les entreprises industrielles dont la consommation énergétique finale totale dépasse les 1500 tep sont tenues de déclarer leur consommation à l'Agence Marocaine pour l'Efficacité Énergétique et d'établir donc un audit énergétique.

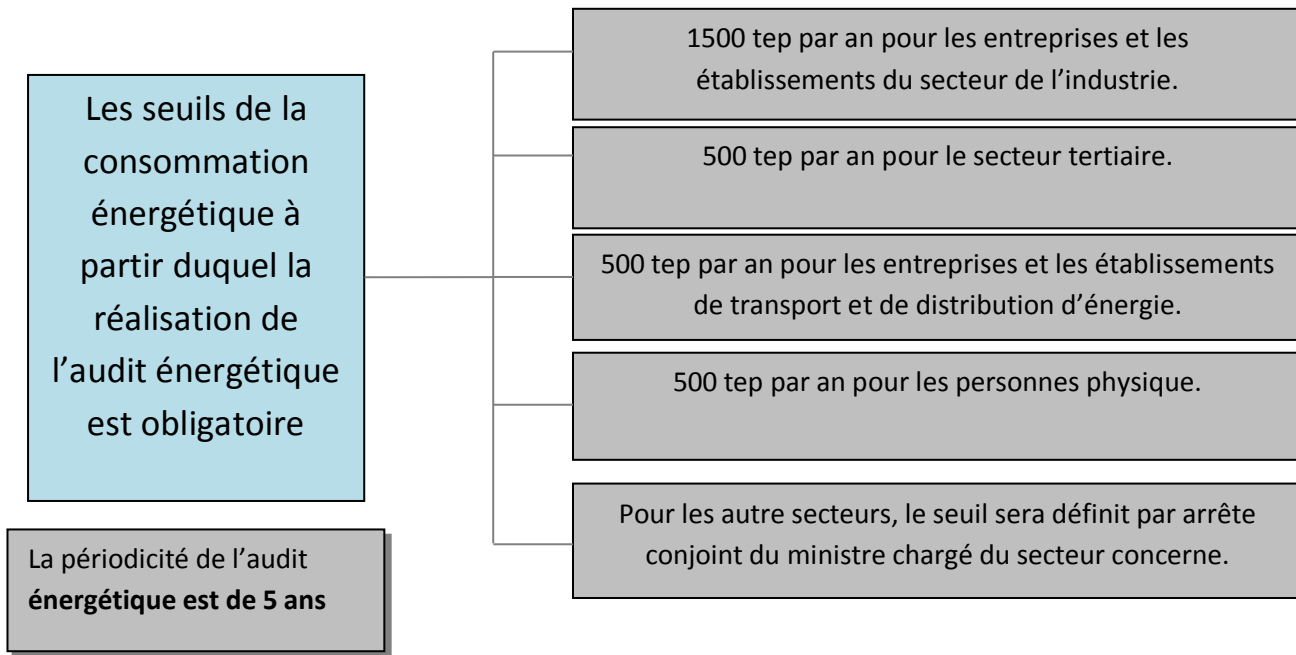
### **I.4.1. La loi marocaine de l'efficacité énergétique :**

Loi régissant de l'efficacité énergétique. Le texte de la loi 47-09 prévoit que toute action agissant positivement sur la consommation de l'énergie, quelle que soit l'activité du secteur considéré, tendant à :

- ✓ La gestion optimale des ressources énergétiques ;
- ✓ La maîtrise de la demande d'énergie ;
- ✓ L'augmentation de la compétitivité de l'activité économique ;
- ✓ La maîtrise des choix technologiques d'avenir économiquement viable ;
- ✓ L'utilisation rationnelle de l'énergie ;

Et ce, en maintenant à un niveau équivalent les résultats, le service, le produit ou la qualité d'énergie obtenue.

### **I.4.2. Décret N° 2-17-746 du 10 Avril 2019 définit les seuils spécifiques de l'audit énergétique obligatoire :**



**Figure I. 12:Seuils spécifiques de l'audit énergétique obligatoire.**

La figure ci-dessus représente les Seuils spécifiques des audits énergétiques obligatoires pour chaque entreprise industrielle.

### **I.5 L'efficacité énergétique du moyen de production**

Aujourd'hui, environ un tiers de la demande d'énergie mondiale et des émissions de CO<sub>2</sub> sont imputables au secteur de la fabrication. Et sous la pression croissante écologique, économique et réglementaire, les industriels vont de plus en plus intégrer l'optimisation de l'utilisation de l'énergie (consommation, production) dans leur processus de production mais également dans la gestion des « utilities » (air comprimé, gestion de l'eau de processus...).

La réussite d'un projet d'optimisation de l'efficacité énergétique doit s'intégrer dans une vision globale de transformation de l'entreprise. Sur la base d'un diagnostic préalable, l'objectif est de mettre en place une organisation et des moyens techniques qui permettent de maîtriser durablement et dynamiquement la consommation énergétique, voire d'étudier la possibilité de produire de l'énergie.

#### **Au niveau technologique :**

- Mettre en place une veille technologique sur les différents composants d'une installation de production (moteurs, variateurs de vitesse, systèmes d'air comprimé, organes cinématiques à haut rendement, capteurs autonomes, etc...).
- S'inspirer des Meilleures Techniques Disponibles (MTD).
- Optimiser les paramètres du process pour répondre aux différentes contraintes comme la productivité ou la qualité de produits. Plus la productivité d'un system de production est élevée, plus l'efficacité énergétique est meilleure.
- L'étude de process alternatifs innovants

- Un axe d'amélioration de l'efficacité énergétique qui est peu développé actuellement est la reconception d'un moyen de production tout en améliorant son efficacité énergétique.

### **Au niveau numérique :**

- S'appuyer sur des logiciels spécialisés (mesure de l'énergie consommée, optimisation des consommations, gestion des alertes...).

### **Au niveau des compétences à mobiliser, des connaissances et de la formation :**

- Sensibilisation et responsabilisation des collaborateurs aux économies d'énergie.

Et finalement avant de lancer un projet d'optimisation dans son site de production l'industriel doit poser les questions suivantes :

- Est-ce que ma structure de coûts dépend de mes consommations énergétiques
- Ai-je un dispositif de suivi de la consommation d'énergie de mon site
- Quelles priorités me donner (Pareto sur les consommations d'énergie)

## **I.6 L'efficacité énergétique :**

### **I.6.1 Définition :**

L'efficacité énergétique est définie comme « un ratio, ou autre relation quantitative, entre une performance, un service, un bien ou une énergie produite et un apport en énergie » (Source : EN ISO 50001 : 2011)[16]. La performance énergétique est un concept plus large est définie comme des « résultats mesurables liés à l'efficacité énergétique, à l'usage énergétique et à la consommation énergétique ».

$$\text{Efficacité énergétique générale} = \frac{\text{Résultat, service ou énergie}}{\text{Energie entrédusystème fournie}}$$

Une amélioration de l'efficacité énergétique correspond à une diminution de l'apport d'énergie pour un même service rendu ou un même bien produit.

Les actions permettant une meilleure performance énergétique incluent les actions d'amélioration de l'efficacité énergétique, comme par exemple l'utilisation d'équipements avec des meilleurs rendements, mais également les actions portant sur l'usage énergétique, par exemple l'adaptation du besoin énergétique au service rendu.

La consommation spécifique d'une activité correspond au ratio de la quantité d'énergie consommée par unité de production ou d'activité.

L'efficacité énergétique est un des indicateurs de la performance énergétique avec une diversité d'interprétations en fonction de la structure et du contexte d'application.

## **I.7 L'efficacité énergétique et la compétitivité industrielle de l'entreprise :**

L'amélioration de l'efficacité énergétique ainsi que la maîtrise de la consommation de l'énergie au sein des entreprises sont des enjeux de plus en plus importants, notamment pour des questions d'ordre environnemental et liées à la transition énergétique. Également, avec la forte consommation d'énergie des entreprises industrielles, l'amélioration de l'efficacité énergétique représente un enjeu de taille pour leur compétitivité.

- Qu'est que compétitivité d'une entreprise

- Quel est l'impact de l'efficacité énergétique sur la compétitivité de l'entreprise
- Comment une entreprise peut-elle améliorer son efficacité énergétique

### **I.7.1 La compétitivité d'une entreprise**

La compétitivité d'une entreprise représente ses performances à long terme, sa croissance, selon trois critères : prix, qualité, coût. Une entreprise dite compétitive obtient des résultats supérieurs à la moyenne. Au-delà des critères traditionnels, les déterminants de la compétitivité s'étendent aux domaines du management, énergie, du design...etc. L'examen des forces et des faiblesses de l'entreprise comparée aux meilleures du secteur permet de prendre comme références les pratiques les plus performantes (benchmarking).

Étudier la compétitivité d'une entreprise revient par conséquent à analyser la performance de l'entreprise par rapport à la concurrence, tant dans ses coûts que dans l'obtention de ses avantages concurrentiels. Toutes les études menées actuellement par les laboratoires de recherches montrent que le facteur énergie joue un rôle très important dans la compétitivité des industries

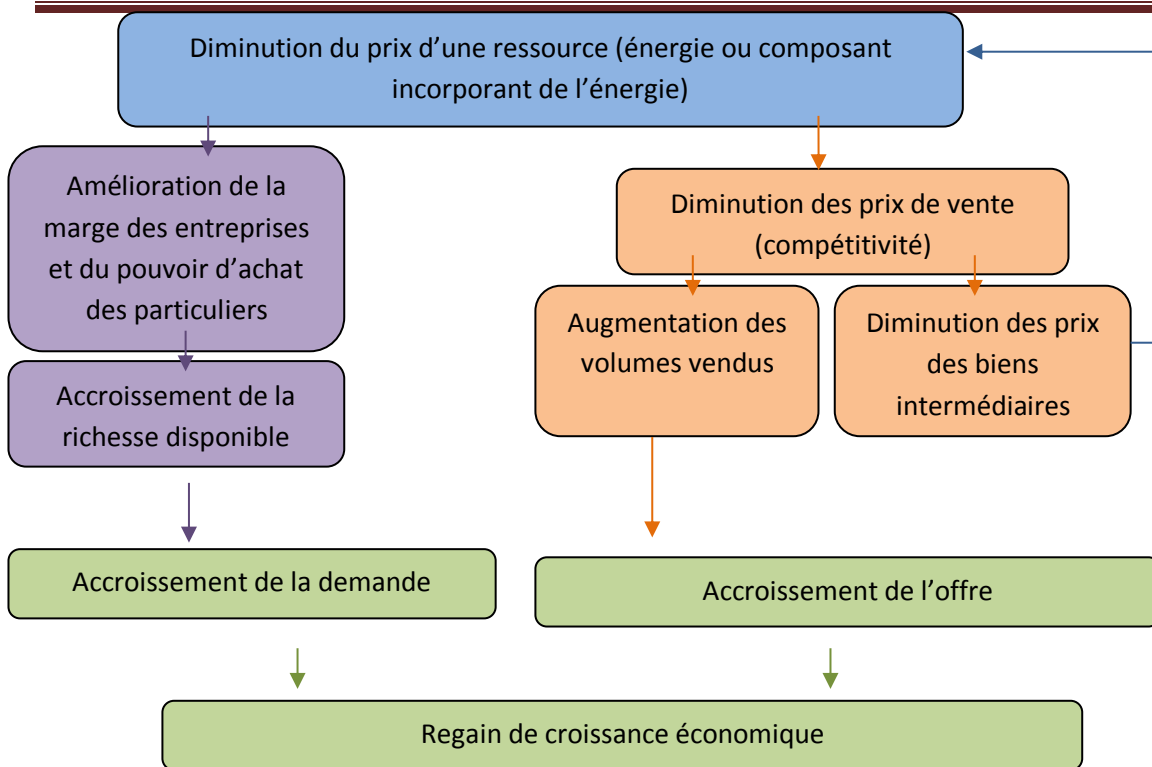
### **I.7.2 Impact du coût énergétique élevé sur la compétitivité des entreprises :**

Le coût élevé des utilités d'énergie a un impact direct sur la compétitivité des entreprises. Toute augmentation des prix de l'énergie conduira à une baisse des performances des entreprises, de plus il n'y a pas un prix de l'énergie mais des prix des différents vecteurs énergétiques, qui varient selon la situation géographique, le moment et les modalités de consommation de l'utilisateur, cette variation des prix de l'énergie affecte donc la compétitivité des entreprises, à travers leur consommation et via les prix de leurs biens intermédiaires.

Face au coût élevé des prix de l'énergie, les entreprises ne modifient pas immédiatement leurs technologies, ce qui conduit à utiliser plus de ressources et d'énergie que ce qui est requis à cause de : l'utilisation de technologies et de pratiques obsolètes.

Et par conséquent l'industrie est responsable d'environ un tiers des émissions de CO<sub>2</sub>, l'utilisation de 20% des ressources en eau, ainsi que la génération d'importantes quantités de pollution à cause d'une gestion efficace des ressources énergétiques, malgré les exigences législatives et réglementations gouvernementales actuelles et futures sur l'obligation de l'amélioration continue de l'efficacité énergétique dans l'industrie.

## Chapitre I : l'état de l'art



**Figure I. 13: Impact du coût sur la compétitivité.**

En effet, comme le montre la figure I.13, une entreprise qui bénéficie d'une ressource meilleure marché que ses concurrents peut soit s'approprier cette rente (auquel cas son revenu augmente et nourrit la demande globale), soit réduire son prix de vente. Dans ce deuxième cas, il améliore sa compétitivité et accroît éventuellement son volume de production et ses revenus, en évinçant ses concurrents ou en élargissant son marché.

L'amélioration des marges des entreprises leur permet d'investir dans la formation de leur personnel et la modernisation de leur outil de production, ce qui augmentera, à terme, la compétitivité de l'entreprise.

Plusieurs actions peuvent contribuer dans l'amélioration de consommation énergétique :

- Intégrer de manière durable les techniques d'efficacité énergétique au niveau de tous les programmes de développement sectoriels,
- Encourager les entreprises industrielles à rationaliser leur consommation énergétique
- Élaborer un système de management de l'énergie (ISO 50001),
- Mettre en place des Audit et des diagnostics énergétiques
- Maîtriser son approvisionnement énergétique en ayant recours à des ressources renouvelables ou de récupération permet de préserver l'entreprise de l'instabilité du prix des énergies fossiles et de la hausse de la tarification carbone.

Ces actions vont attribuer sans doute dans la rationalisation de consommation énergétique de l'entreprise et ils vont garantir une image de marque valorisée, de sorte que l'entreprise envoie un signal fort à ses fournisseurs, partenaires ainsi qu'à ses clients.

Les gains obtenus par la démarche efficacité énergétique peuvent être exploités pour booster la performance de l'entreprise en investissant dans la qualité du produit, innovation des produits, de rapidité aux demandes du marché, renouvellement du matériel de production ...

### **I.8 La consommation énergétique d'un moyen de production :**

#### **I.8.1 Niveau d'analyse de la consommation énergétique :**

L'analyse des flux d'énergie d'un moyen de production est une étape essentielle pour identifier l'origine de la demande énergétique du moyen de production et de ses différents composants. La consommation énergétique peut être abordée avec différents niveaux d'analyse.

- **Niveau du process de fabrication** : il s'agit de l'étude d'énergie liée aux mécanismes physiques du process de fabrication lui-même.
- **Niveau de la machine** : l'énergie analysée est celle consommée par le process de fabrication et celle consommée par les composants du moyen de production afin d'assurer un bon fonctionnement de la machine.
- **Niveau de la ligne de production** : il s'agit de l'étude de l'énergie liée à un ensemble de moyens de production et aux équipements périphériques afin d'assurer un bon fonctionnement d'une ligne de production.
- **Niveau de l'usine** : il s'agit de l'étude d'énergie consommée liée à un ensemble de lignes de production. A ce niveau d'analyse, l'étude de l'énergie se concentre sur l'énergie consommée par les infrastructures et les services permettant de maintenir les conditions de production demandées, par exemple : ventilation, éclairage...

#### **I.8.2 Le périmètre d'analyse du système de production**

Le périmètre d'analyse du système de production correspond à la délimitation précise du système de production à analyser. Cela permet de définir les flux d'énergie, de matériaux et de substances traversant le système de production. Le périmètre d'analyse du système de production peut être réduit ou élargi selon le besoin de recherche.

La définition du périmètre d'analyse du système joue un rôle important vis à vis des résultats d'analyse obtenus. En effet, si le périmètre d'analyse n'est pas suffisamment spécifié, la comparaison des différents systèmes de production peut s'avérer difficile. Il est donc important de déterminer le contour du système de production dans la phase d'analyse du système. Revoir la norme [18].

#### **I.8.3 L'état de fonctionnement du système de production :**

Dans l'industrie on peut avoir différents états de fonctionnement du système de production.

La consommation énergétique d'un système de production est la somme de l'énergie consommée par ses différents organes. L'état de fonctionnement du système de production nous donne des connaissances sur le fonctionnement de chaque organe du système au cours du processus de fabrication. Dans l'ISO/DIS 14955-1 [ISO/DIS 14955-1][19], l'état de fonctionnement est la combinaison des différents états « ON », « OFF » des organes du système.



## **I.8.4 Décomposition de la consommation énergétique :**

### **I.8.4.1 Energie primaire**

La consommation d'énergie destinée à satisfaire les divers besoins de l'homme est issue de formes d'énergies dites primaires qui sont soit épuisables (énergies fossiles comme le charbon, le pétrole, le gaz naturel, mais aussi l'uranium), soit renouvelables (énergies hydraulique, éolienne, marines, géothermique et solaire, y compris la biomasse qui est une concentration d'énergie solaire en carbone dans un végétal).

### **I.8.4.2 Energie secondaire**

Ces énergies primaires sont transformées en énergies secondaires : produits pétroliers raffinés dont les carburants automobiles, électricité... Cette transformation d'une énergie en une autre se fait toujours « c'est une loi fondamentale de la physique » avec une perte d'énergie, si bien que la transformation d'une énergie primaire en énergie secondaire « consomme de l'énergie primaire ».

Le ratio entre l'énergie secondaire produite et l'énergie primaire utilisée s'appelle le « rendement » de l'unité de transformation d'énergie. Par exemple, le rendement d'une centrale électrique qui fabrique de l'électricité en brûlant du gaz et du charbon est de 30 à 50%.

### **I.8.4.3 Energie finale**

L'énergie dite « finale » est celle qui est utilisée à la satisfaction des besoins de l'homme. La satisfaction des besoins peut être directe, si l'énergie est consommée par un être humain au cours d'un usage domestique (se chauffer, travailler sur son ordinateur, se déplacer en voiture), ou indirecte si elle est utilisée dans la production de biens ou de services destinés à la consommation humaine.

***« La consommation d'énergie finale est égale à la consommation d'énergie primaire moins toutes les pertes d'énergie au long de la chaîne industrielle. »***[20].

La consommation d'énergie finale est soit une consommation directe d'énergie primaire non transformée, comme le charbon brûlé sous les chaudières industrielles dans la chimie ou injecté dans les fours des cimenteries, soit une consommation d'énergie secondaire comme l'essence ou l'électricité.

En résumé, la consommation d'énergie finale est égale à la consommation d'énergie primaire moins toutes les pertes d'énergie au long de la chaîne industrielle qui transforme les ressources énergétiques en énergies utilisées dans la consommation finale.

## **I.8.5 La consommation énergétique d'un moyen de production :**

### **I.8.5.1 La consommation énergétique des machines :**

Une entreprise qui veut augmenter son efficacité énergétique doit identifier tous les postes qui consomment de l'énergie. Pour cela, elle doit, bien évidemment, connaître la consommation des appareils et des machines quand ils tournent. Elle doit tenir, aussi, en compte de l'énergie que ces appareils et machines utilisent quand ils sont à l'arrêt. Il faut, donc, faire la distinction entre « consommation en fonctionnement » et « consommation cachée ».

### I.8.5.2 Consommation cachée :

De nombreux appareils consomment de l'énergie même lorsqu'on ne les utilise pas. En effet, tant qu'un appareil reste branché à la prise électrique, il continue à consommer de l'énergie. C'est ce qu'on appelle la consommation cachée. En général cette consommation est très faible, il ne s'agit que de quelques Watts. Mais quand on additionne la consommation cachée de tous les appareils et sur une durée d'un an, cela fait une quantité d'énergie considérable. C'est le même principe pour la consommation en mode de veille. De nombreux appareils sont équipés de témoins lumineux. Tant que ces témoins sont allumés, l'appareil consomme de l'énergie.

### I.8.5.3 Consommation en fonctionnement :

Lorsqu'une machine ou un appareil fonctionne, on peut définir ce type de puissance par sa puissance par la durée pendant laquelle il fonctionne. Elle se mesure en Wattheures (Wh) ou en kilowattheures (kWh).

L'énergie consommée par un moyen de production est fonction de deux facteurs : la puissance énergétique nécessaire (P) et le temps de production (t) [21]:

$$E = P.t \quad (I.1)$$

L'énergie consommée par la machine-outil se compose de 2 parties : une partie d'énergie consommée par le process (Wp) qui dépend des propriétés de matériaux, du choix de l'outil de coupe et des paramètres de procédé de fabrication ; une autre partie fixe consommée par les composants de la machine (Wf) qui fournit les conditions nécessaires à l'accomplissement du bon fonctionnement de la machine.

## I.9 Enquête et analyse des coûts de l'énergie dans les entreprises

Nous avons réalisé des diagnostics énergétiques pour deux secteurs industriels annexe 1, le premier du secteur des matériaux en particulier les briquèteries qualifiées comme secteur énergivore, le deuxième diagnostic réalisé pour l'industrie agroalimentaire.

Sur les figures I.(14.15.16) nous représentons la consommation d'énergie pour une année en électricité, fuel et cock Pétrole (résidus de pétrole) nous constatons que le coût d'énergie est de 45% du prix de revient du produit (briques).

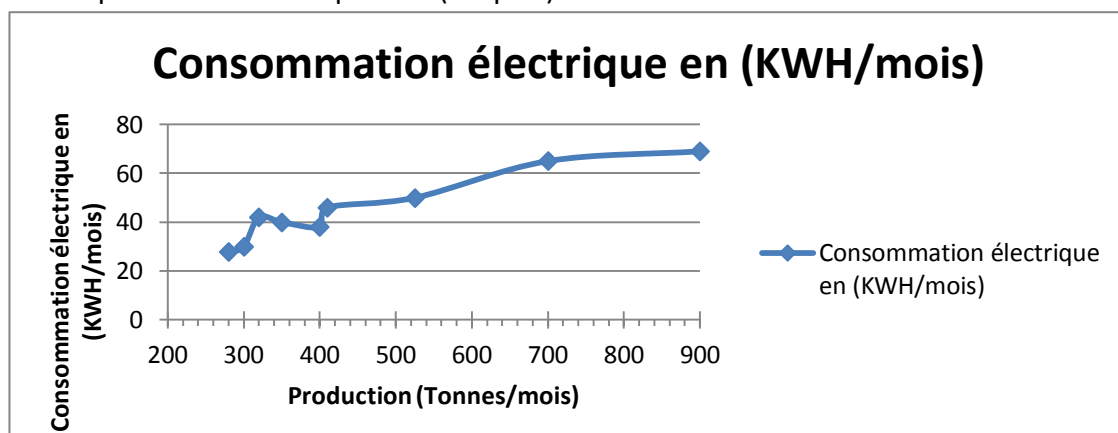


Figure I. 14: Consommation électrique.

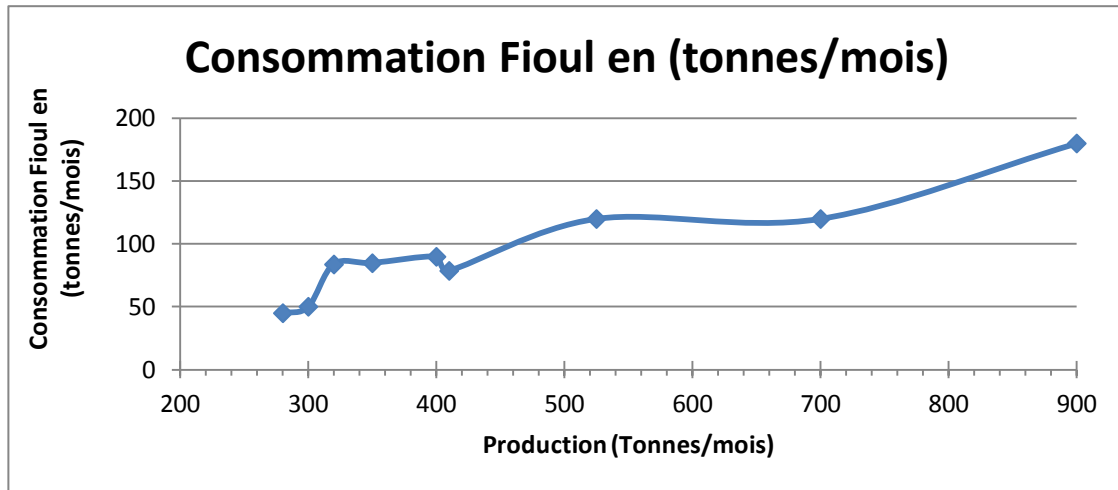


Figure I. 15: Consommation Fioul.

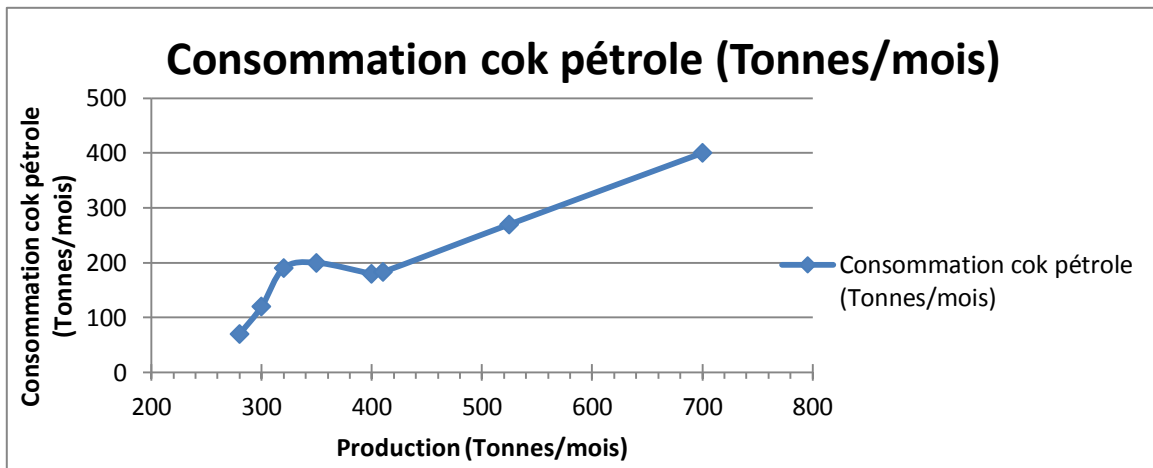


Figure I. 16: Consommation Cok pétrole.

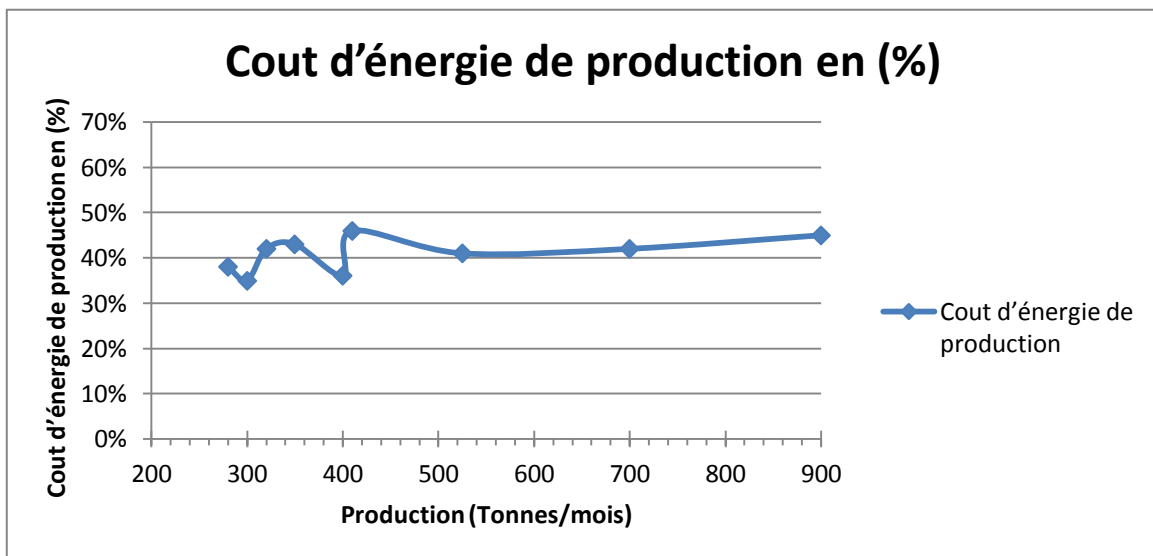


Figure I. 17: Cout d'énergie de production.

Le coût moyen d'énergie du prix de revient de la brique est de 43% (min 40-max 48).

## Chapitre I : l'état de l'art

Pour les briqueteries artisanales et semi industrielle le coût est encore plus élevé et ne sont pas compétitives

Une deuxième enquête avait été réalisée auprès de 15 entreprises agroalimentaires de fabrication de conserve : conserve de : poisson, légume, fruits, jus,.... Cette étude a montré que la part de l'énergie est de 19,6% du coût de revient. Ce coût reste relativement élevé par rapport aux concurrents européens d'après les donneurs d'ordre de ces entreprises.

Sur la figure I.18 nous représentons la part de la facture énergétique à l'échelle nationale dans le coût de la production [22].

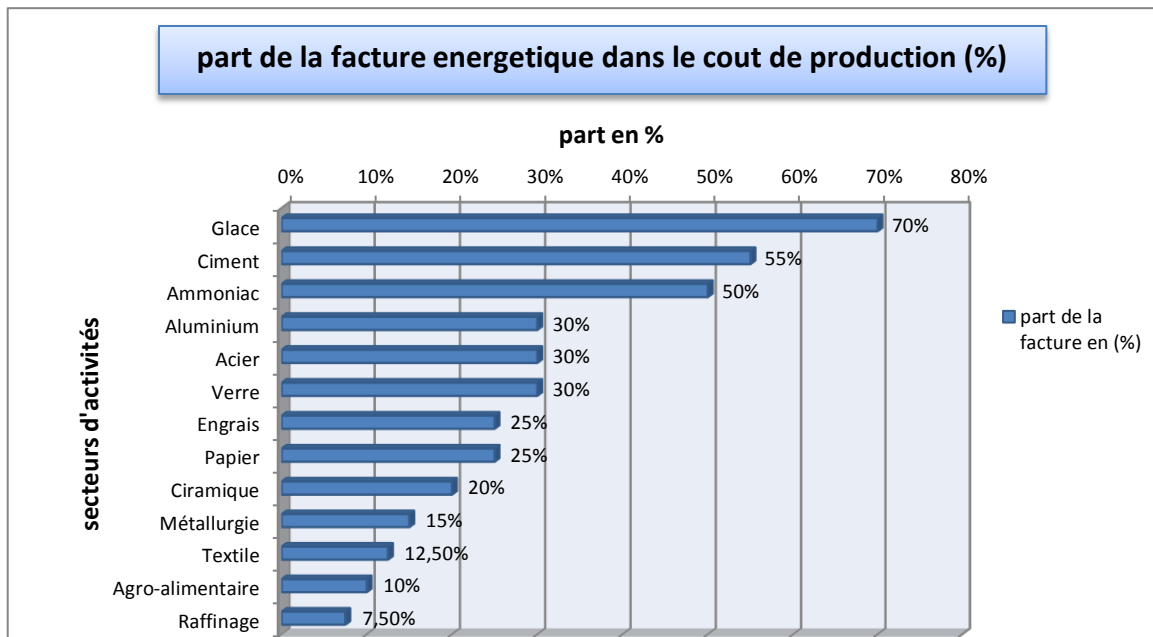


Figure I. 18:Part de la facture énergétique dans le coût de production.

### I.10 Conclusion du chapitre :

Nous avons placé notre travail de recherche dans un contexte global lié à la consommation énergétique dans le secteur industriel et en particulier la consommation énergétique du moyen de production. Les enjeux énergétiques et enjeux législatifs actuellement posés soulèvent la nécessité de prendre en compte l'efficacité énergétique du moyen de production lors de sa conception. L'amélioration de l'efficacité énergétique est un des leviers possibles permettant de répondre aux problématiques de réduction de la consommation énergétique et également de répondre à des objectifs économiques.

Un état de l'art portant sur la consommation énergétique, avec différents niveaux d'analyse et les actions et approches d'amélioration de l'efficacité énergétique du moyen de production existantes dans la littérature a été présenté dans ce chapitre.

Nous avons constaté une croissance économique accompagnée d'une consommation d'énergie élevée qui a un impact sur le prix de revient des produits et la compétitivité de l'entreprise d'après les enquêtes réalisées. Cette étude nous permet de positionner notre travail et de mettre en évidence la nécessité de proposer dans le chapitre suivant une

## Chapitre I : l'état de l'art

---

méthode expérimentale basée sur la maintenance industrielle qui met en évidence la consommation d'énergie en cas de défaillance des équipements.

### Référence :

- [1] La Maitrise De L'énergie Dans Le Froid Industriel « Guide » Aff –Association Française Du Froid-Technique Du Froid Cours De Base Cfmnlog Edition : Juillet07
- [2] Usage Et Production De Froid Article : 074 Marvillet Christophe Déc.-15
- [3] Prospective Maroc 2030 : Enjeux Et Défis
- [4] Agence Internationale De L'énergie, World EnergyStatistics 2019. 26Septembre 2019.
- [5] Data And Statistics : World : Balance 2017.
- [6] Iso 9000: 2005 Energy Management Systems — Fundamentals And Vocabulary , 2005.
- [7] Iso/Dis 14955-1, Machine Tools E Environmental Evaluation Of Machine Tools. Part 1: Design Methodology For Energy-Efficient Machine Tools. Standard Under Development, Geneva, Switzerland, (2014).
- [8] Wolfram, F. Aspects De L'évaluation Energétique Des Produits Et Processus Dans La Technologie De Séparation Basée Sur Le Principe De L'énergie Objectivée. ThèseDoctorat, (1986) .
- [9] Apostolos, F., Alexios, P. Georgios, P., Panagiotis, S. Et George, C. « Energy Efficiency Of Manufacturing Processes: A Critical Review ». ProcediaCirr 7, (2013).
- [10] « Guide D'optimisation En Matière D'air Comprimé : Mesures Et Conseils D'investissement », Suisse D'énergie.
- [11] « Le Guide De L'air Comprimé : Les Principes De L'air Comprimé », Air Worthington Creyssensac.
- [12] Guide De Référence Sur L'efficacité Energétique De L'air Comprimé, Ressources Naturelles Canada.
- [13] Olivier Barrault Et Pascal Dumoulin, « Guide Pratique De L'air Comprimé Performance Energétique Et Optimisation Technique ».
- [14] La Maitrise De L'énergie Dans Le Froid Industriel « Guide » Aff –Association Française Du Froid-Technique Du Froid Cours De Base Cfmnlog Edition : Juillet07
- [15] Usage Et Production De Froid Article : 074 Marvillet Christophe Déc.-15
- [16] DonathHarerimana, « Optimisation Du Reseau Electrique Pour Reduire Les Pertes Techniques Du Reseau Electrique Rwandais », Mémoire Pour L'obtention Du Mastère Spécialisé En Génie Electrique, Energétique Et Energies Renouvelables. Option : Production Et Distribution.

## Chapitre I : l'état de l'art

---

- [17] Guide Technique : « Efficacité Energétique Et Intégration Des Energies Renouvelable Dans L'industrie ». Novembre 2015
- [18] « Les Moteurs Electriques : Economies D'énergie Dans L'industrie ». Service Public De Wallonie
- [19] Consommation Finale Totale Du Maroc. Rapports Statistiques De L'agence Internationale De L'énergie, 2017 (Données Sera Portant A 2015).
- [20] Agence International De L'énergie, 24 Septembre 2019.
- [21] R.D. Gupta, S. Ghai, A. Jain, Energy efficiency improvement strategies for industrial boilers: a case study, J. Eng. Technol. 1 (2011) 52–56.
- [22] J.P. Yadav, B.R. Singh, Study on comparison of boiler efficiency using husk and coal as a fuel in rice mill, S-JPSET 2 (2011) 1–15.

## **Chapitre 2: Contribution à l'optimisation de l'efficacité énergétique par la maintenance préventive**

### **Introduction**

L'environnement industriel actuel présente de nombreux défis dont la compétitivité croissante pèse lourdement sur la productivité. Maîtriser les coûts tout en garantissant le niveau de qualité désiré constitue le défi clé de la production industrielle.

La nouvelle organisation de l'industrie exige une nouvelle façon de gestion des processus industriels dans un objectif de mettre en place des outils de maintenance plus intelligents et plus capables de s'adapter à la production. Cette nouvelle organisation doit permettre de répondre aux défis d'une production pour faire face aux attentes du client mais avec des délais courts de mise sur le marché et au prix d'une production optimisée sur le plan énergie consommée, pannes réduites,...

La maintenance préventive est exécutée suivant l'analyse et l'évaluation des paramètres significatifs de la dégradation de l'élément considéré (vibration, énergie, température ...)[1]. La force de cette maintenance est l'anticipation des pannes.

A cet effet, la maintenance préventive est un outil puissant pour optimiser la disponibilité des usines de fabrication et de production, la rentabilité des travaux de maintenance, et peut également être utilisée dans la diminution de la consommation d'énergie [2,3].

La maintenance préventive fournit des données factuelles sur l'état mécanique réel de chaque machine et l'efficacité de fonctionnement de chaque processus [4]. Généralement, les techniques utilisées pour la maintenance prédictive sont la surveillance :

Analyse vibratoire, la thermographie infrarouge, les tests par ultrasons d'une manière générale les contrôles non destructifs et l'analyse d'huile,... Chaque technique à une donnée unique et sa sensibilité dépend de la gravité du défaut [5].

Notre contribution est de développer une méthode de surveillance, des principaux composants d'une installation industrielle, en continu de l'évolution à travers des données quantifiables et qualifiables permet la prédiction de disfonctionnement avant l'arrêt de la production. De nombreux auteurs ont abordé le domaine de la surveillance industrielle mettant ainsi en évidence l'intérêt croissant manifesté par les industriels par rapport à cette problématique [6].

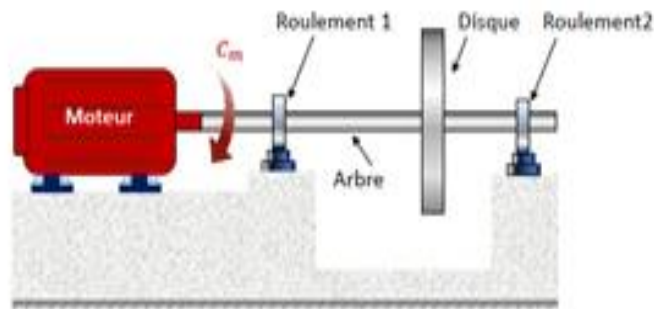
Cette maintenance prédictive qu'on a développé sous forme d'une plateforme de surveillance industrielle **PSI** [7,8] utilise des instruments précis permettent d'anticiper les défaillances de l'installation et donc d'accroître considérablement la disponibilité et la fiabilité intervenant avant l'arrivée d'une panne et augmenter la productivité. D'autre part on peut mettre en évidence la consommation d'énergie selon l'état de santé du matériel industriel. En effet, il est désormais courant d'adjoindre aux machines de production, les capteurs mesurant en permanence l'état de leur fonctionnement. Il s'agit donc de surveiller et d'analyser l'évolution d'un élément afin de trouver le meilleur moment pour le remplacer. Ce chapitre traite le balourd, le désalignement et le couplage de ces deux défaillances.



Dans ce chapitre, on montre comment ces défaillances impactent le système industriel en vibration, en consommation d'énergie et en température.

### II.1 Les machines tournantes dans l'industrie

Puisque on s'intéresse dans la suite aux machines tournantes qui ont un comportement dynamique des rotors, il convient de commencer par introduire cette classe des machines dont le mouvement rotatif qui les caractérise fait émerger certains phénomènes particuliers. Comme son nom l'indique, une machine tournante est, d'une façon très générale, composée des parties tournantes autour d'un axe fixe par le biais des paliers. L'ensemble des corps tournant autour d'un même axe constituant un rotor. La fonction de ce dernier nécessite un apport extérieur d'énergie assurée par le moteur. Les parties de la machine sont désignées par la définition générale du stator. La figure suivante (Fig.II.1) illustre les composants de base d'une machine tournante, à savoir : l'arbre, le disque et les roulements.



*Figure II. 1: Composants de base d'une machine tournante.*

#### II.1.1 Les machines tournantes dans l'industrie

Les machines tournantes sont présentes dans différents secteurs de l'industrie [9]. Elles varient en taille et en complexité. Les machines tournantes basiques peuvent être rencontrées dans des produits et systèmes variés allant des moteurs électriques des pompes à vides, les turbines à vapeur de toutes tailles, les pompes et compresseurs des groupes motopropulseurs automobiles,...

L'augmentation rapide des vitesses de fonctionnement des machines tournantes au cours des dernières décennies a posé de nouveaux problèmes aux concepteurs. Les arbres tournants sont soumis à des vibrations de plus en plus importantes avec l'augmentation de la vitesse de rotation. Ces vibrations peuvent être dangereuses si elles ne sont pas bien estimées (surtout si elles sont sous-estimées), conduisant à un mauvais dimensionnement des pièces dont les conséquences peuvent être catastrophiques à la fois sur la machine ainsi que sur ses utilisateurs.

#### II.1.2 Particularités des machines tournantes

Les machines tournantes présentent certains phénomènes propres et qui sont directement liés à son mouvement rotatif. Dans la suite, une liste non-exhaustive des principaux phénomènes ou notions spécifiques aux rotors est présentée.

## Chapitre II : Contribution à l'optimisation de l'efficacité énergétique par la maintenance préventive

---

Les machines tournantes se composent généralement de trois composants principaux, notamment le rotor, les roulements et leur structure de support, dans le but d'effectuer une tâche précise : transformer une énergie, transmettre un mouvement . . . etc. Les machines tournantes produisent des vibrations, images des efforts dynamiques engendrés par les pièces en mouvement. Ces vibrations occupent une place privilégiée parmi les paramètres à prendre en considération pour effectuer un dépistage ou un diagnostic approprié des défauts. En effet, la modification de la vibration d'une machine constitue souvent la première manifestation physique d'une anomalie, cause potentielle des dégradations, voire des pannes [10].

Les vibrations mécaniques sont liées à l'existence d'efforts dynamiques internes ou externes au mécanisme. Les efforts externes sont associés à des excitations naturelles comme le vent, le déplacement de charges ou encore liés à l'environnement vibratoire des mécanismes (séismes, ...). Dans le cas des efforts internes, ils relèvent d'un mauvais fonctionnement lié à un déséquilibre de rotor, à un désalignement d'arbre, à une usure mécanique, à un défaut électrique, à la cavitation, etc....

### II.1.3 Cas de balourd d'un système industriel

On assume que toutes les machines tournantes présentent généralement un balourd [11]. Le balourd est toute masse excentrée  $m_b$  d'un rotor. Il est localisé en une distance  $d$  du centre de géométrie de l'arbre. Ce dernier exerce une force d'excitation à une fréquence directement proportionnelle à la vitesse de rotation et à une amplitude proportionnelle au carré de la vitesse de rotation. Les balourds ont différentes origines on parle souvent des inhomogénéités du matériau, mais il existe d'autres causes d'après un diagnostic de différentes entreprises et une étude bibliographique.

Son apparition peut être liée:

- une répartition non symétrique de la masse du rotor autour de son axe de révolution. Ce qui induit un décalage entre le centre géométrique et le centre de masse ;
- la déflexion de l'arbre à cause du poids propre du rotor, favorisant ainsi le décalage entre le centre géométrique et le centre de rotation de la machine.

Il peut être aussi lié à la géométrie des pièces tournantes :

-La distribution de balourd d'un rotor dépend de la position du centre de masse de chaque tronçons par rapport à l'axe de rotation, qui est différent de l'axe géométrique qui passe par les centres des paliers. Pour des rotors monoblocs constitués des roues usinées dans la masse, on observe également une modification de la position des centres de gravité due aux écarts d'usinages

Une cause de balourd est due à un écart d'usinage (excentricité et parallélisme) par exemple, la distribution naturelle des ailettes de turbine donne un balourd qui dépend de leurs positions relatives de montage et assemblage des pièces. Il se peut aussi des paliers non alignés par rapport à l'axe géométrique du rotor.

La force d'excitation générée par la présence du balourd est une force centrifuge qui agit sur le comportement vibratoire en flexion du rotor. Comme les efforts centrifuges sont proportionnels au carré de la vitesse de rotation, ils deviennent très importants à très hautes

## Chapitre II : Contribution à l'optimisation de l'efficacité énergétique par la maintenance préventive

vitesse. D'où l'importance de l'équilibrage des machines tournantes, surtout celles opérant à très haut régime, afin de limiter l'effet de l'excitation générée par le balourd sur les vibrations latérales.

-Les pièces assemblées sur un arbre en rotation déplacent naturellement leurs centres de masse. C'est le cas des turbines, moteurs électriques, ... il est crucial de veiller sur le procédé d'assemblage pouvant faire de deux pièces assemblées un bloc balourdé conditions de service.

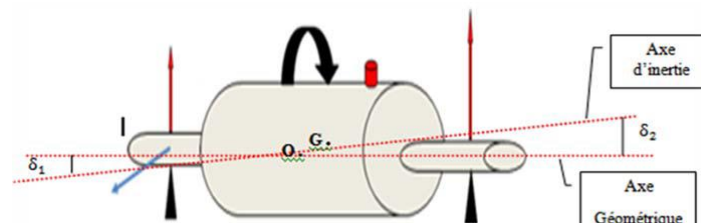
On peut citer les causes dues à la variation de la température au voisinage de la machine en service.

-On peut aussi parler de la relaxation des contraintes, l'usure non axisymétrique dû à la fatigue par des vibrations, aux conditions de travail en présence de poussière, produits chimiques etc. Susceptible d'apporter des balourds qui peuvent évoluer avec le temps.

**La vitesse critique** quand une fréquence propre du rotor, à une vitesse de rotation donnée, coïncide avec la fréquence d'excitation due au balourd, on parle de vitesse critique. Comme son nom l'indique, ces vitesses particulières correspondent à un régime de fonctionnement pour lequel la machine entre en résonance ce qui peut représenter un risque de défaillance directement lié à l'amplification des vibrations latérales. Ce risque est d'autant plus important qu'un faible amortissement est présent dans la structure.

En l'absence d'amortissement, les machines tournantes sont conçues pour opérer à des régimes situés au-dessous de la première vitesse critique. C'est assez souvent le cas pour les machines tournantes de petite taille, de faible masse et qui sont supportées par des paliers ayant des raideurs élevées. Ce sont généralement les machines tournantes de grandes tailles telles que les compresseurs centrifuges, les turbines à gaz ou à vapeur ou bien les générateurs d'électricité de grande taille qui posent plus de risques liés à leur mode de fonctionnement vu que, assez souvent, elles fonctionnent à des régimes qui dépassent, au moins, la première vitesse critique.

Le balourd est la principale cause des problèmes de vibrations, comme il est montré sur la Figure II.2, qui illustre un cas simple de balourd dans un rotor. En réalité, l'axe des centres de gravité a plutôt la forme d'un serpent enroulé autour de l'axe de rotation.



**Figure II. 2: Position de l'axe d'inertie d'un rotor.**

Si la position de l'axe d'inertie pouvait être mesurée, la perturbation n'existerait pas. Le balourd peut être modélisé sous la forme simplifiée suivante :

$$p_1 = \delta_1 \Omega^2 \sin(\Omega t + \varphi_1)$$

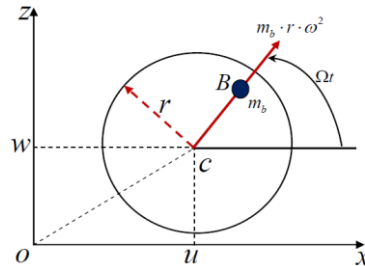
$$p_2 = \delta_2 \Omega^2 \sin(\Omega t + \varphi_2)$$

(II.1)

## Chapitre II : Contribution à l'optimisation de l'efficacité énergétique par la maintenance préventive

---

Le balourd qui est caractérisé par son énergie cinétique est du lorsqu'une masse  $m_b$  se trouve en un point B dans le plan du disque à une certaine distance de son centre géométrique C, comme il est montré sur la figure II.3[12].



**Figure II. 3:Force centrifuge due au Balourd.**

Où  $\Omega$  : la vitesse angulaire de rotation,  $m_b$ : la masse,  $r$ : le rayon de l'arbre (ou de la roue) et  $f$ : la force centrifuge.

La force centrifuge est l'une des forces d'excitation de base dans les machines tournantes. En effet, quel que soit le soin apporté à la construction des machines, il n'est pas possible d'obtenir une coïncidence du centre de gravité avec l'axe de rotation. Les causes de ce phénomène dit balourd proviennent lors de :

- la conception (certaines parties peuvent ne pas être parfaitement symétriques) ;
- la technologie (matériau non homogène) ;
- la fabrication (tout est produit dans certaines tolérances, les pièces tournantes présentent un faux-rond) ;
- le montage (à savoir avec des rotors montés).

Soit la représentation en fonction du temps. Mais en réalité les vibrations sont beaucoup plus complexes et s'effectuent à des fréquences différentes et égales aux multiples éléments de machine en fonctionnement [13-17]. Les coordonnées du balourd dans le repère fixe  $oxyz$  sont données par :

$$\vec{OB} = \begin{cases} u + d \cos \Omega t \\ cte \\ w + d \sin \Omega t \end{cases} \quad (II.2)$$

D'où la vitesse :

$$\vec{v} = \frac{d\vec{OB}}{dt} = \begin{cases} \dot{u} - d\Omega \sin \Omega t \\ 0 \\ \dot{w} + d\Omega \cos \Omega t \end{cases} \quad (II.3)$$

Et l'énergie cinétique est du balourd devient :

$$T_b = \frac{1}{2} m_b (\dot{u}^2 + \dot{w}^2 + \Omega^2 d^2 + 2\Omega d \dot{u} \sin \Omega t - 2\Omega d \dot{w} \cos \Omega t) \quad (II.4)$$

Le terme  $\omega^2 d^2 / 2$  est constant et n'interviendra pas dans les équations. La masse du balourd étant négligeable par rapport à la masse de rotor, l'expression de l'énergie cinétique peut être approximée par :

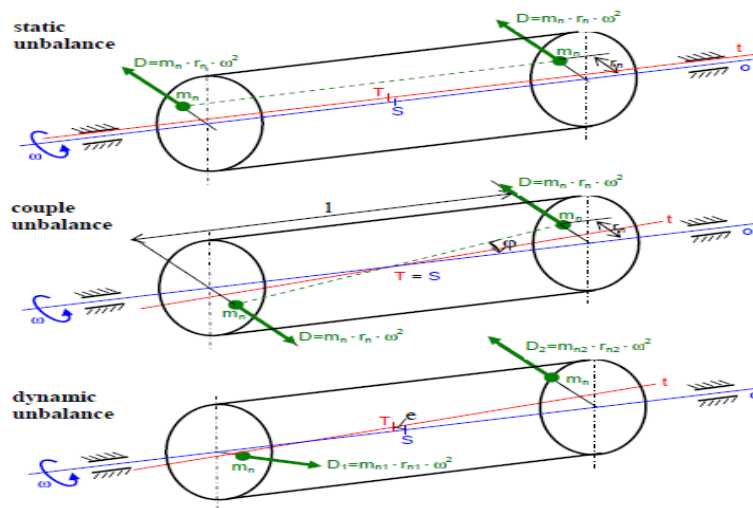
$$T_b \approx m_b d \Omega (\dot{u} \sin \Omega t - \dot{w} \cos \Omega t) \quad (II.5)$$

On peut distinguer trois types de déséquilibre ou balourd selon la répartition de la masse sur le rotor ainsi que son incidence sur la position de l'axe d'inertie principal par rapport à l'axe de rotation : **déséquilibre statique, de couple et dynamique** (Voir figure II.4).

### II.1.3.1. Balourd statique

Un rotor est statiquement déséquilibré lorsque l'axe d'inertie principal est parallèle à l'axe de rotation. Le déséquilibre statique peut être compris comme deux masses égales, placées symétriquement par rapport au plan perpendiculaire à l'axe de rotation et passant par le centre de gravité. Ce balourd est appelé statique car il se manifeste même lorsque le rotor ne tourne pas. Pour éliminer le déséquilibre statique, une masse devrait simplement être ajoutée ou retirée dans un seul plan de coupe, de sorte que le centre de gravité soit ramené à l'axe de rotation.

Il convient de noter que le déséquilibre statique est un cas plutôt théorique. Pour l'enlever en plaçant une seule masse d'équilibrage, cette masse doit être placée dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation et passant par le centre de gravité. En pratique, le déséquilibre est considéré statique lorsque le diamètre de l'arbre est beaucoup plus grand que sa longueur ou lorsqu'un seul disque est placé sur un arbre long.



**Figure II. 4: Déséquilibre statique, couple et dynamique [18].**

### II.1.3.2. Balourd de couple

Le balourd du couple signifie que le centre de gravité du rotor est sur l'axe de rotation et que l'axe d'inertie principal est en intersection avec l'axe de rotation. Ce déséquilibre peut être compris comme deux masses égales placées sur le rayon, placées symétriquement. Si un rotor avec un déséquilibre de couple est au repos, le déséquilibre n'a aucun effet et le rotor restera au repos dans n'importe quelle position. Le déséquilibre de couple ne se manifeste pas à

moins que le rotor tourne, car les forces centrifuges provenant des masses déséquilibrées créent un couple qui dévie l'axe principal d'inertie.

### II.1.3.3. Balourd dynamique

Le balourd dynamique est le type le plus courant de déséquilibre est essentiellement une combinaison de déséquilibre statique et de déséquilibre de couple [19]. Cela se produit lorsque l'axe d'inertie principal et l'axe de rotation sont des lignes obliques. Ce déséquilibre peut être compris comme deux masses différentes, placées arbitrairement sur le rotor. Deux forces centrifuges sont dues à ces masses pendant la rotation. Leur effet peut être compensé par deux poids qui sont ajoutés ou supprimés dans deux plans de coupe.

### II.1.4 Cas de désalignement d'un système industriel

#### II.1.4.1 Définition désalignement

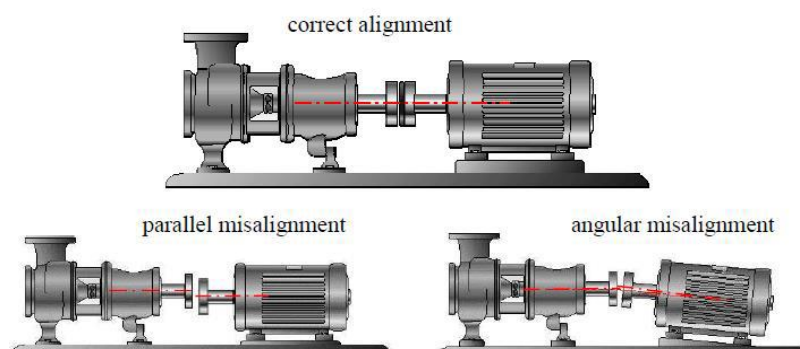
Le désalignement de l'arbre est un problème commun dans les machines tournantes qui cause plus de 70% des problèmes de vibration [20]. Il se produit lorsque les axes de rotation de deux (ou plus) arbres de machines ne sont pas alignés. Cela augmente les forces axiales et radiales sur les roulements, joints et accouplements, en induisant ainsi l'usure de ces composants et une flexion de l'arbre en réduisant la quantité de puissance transmise [21].

Le désalignement est l'une des principales causes de réduction de la durée de vie des équipements. Le défaut d'alignement correspond au défaut de coaxialité de deux axes

Il est le résultat d'un alignement incorrect soit deux arbres liés par un accouplement, soit deux paliers soutenant le même axe. En effet, un mauvais alignement peut entraîner:

- une performance plus mauvaise de la machine,
- augmentation de la puissance nécessaire pour entraîner la machine,
- augmentation de l'usure des paliers, des joints et souvent dans les parties d'un accouplement à la suite de forces étendues transférées,
- augmentation du bruit et des vibrations dus à une charge excessive de la machine.

En revanche, les axes des deux rotors peuvent présenter un désalignement angulaire au niveau de l'accouplement, un désalignement parallèle ou un désalignement des paliers (Voir figure II.5).



**Figure II. 5:Alignement correct, désalignement parallèle et désalignement angulaire [18].**

### **II.1.4.2. Désalignement angulaire**

Un désalignement angulaire est caractérisé par une vibration axiale importante, qui est déphasée, c'est-à-dire avec une différence de 180° par rapport à l'accouplement. Ces symptômes peuvent également indiquer l'existence de problèmes avec le couplage.

### **II.1.4.3 Désalignement parallèle**

Un désalignement, résultant d'un déplacement parallèle, présente des symptômes similaires à un désalignement angulaire, mais une grande vibration est dans la direction radiale. Les axes sont approximativement hors phase, c'est-à-dire décalés de 180° par rapport à l'accouplement.

### **II.1.4.4 Désalignement des paliers**

Les axes des deux paliers d'un même corps de machine ne sont pas concentriques. Cette anomalie peut être la conséquence d'un défaut de montage d'un palier qui se traduit par une flexion de l'arbre du rotor.

## **II.2. Maintenance de la surveillance au diagnostic des machines tournantes**

### **II.2.1 Types de maintenance et indicateurs adaptés**

Les entreprises de production cherchent à maîtriser les coûts et la rentabilité, à veiller à la qualité des produits finis et à entretenir le parc industriel. Ces objectifs économiques permettent de garantir leur pérennité et leur expansion. Dans de nombreuses situations, la croissance est conditionnée par la capacité à limiter les pertes. Comment obtenir un produit fini de valeur, en fin de chaîne de production, lorsque cette même chaîne est minée par divers problèmes fonctionnels récurrents ? En ce qui concerne les problèmes mécaniques, ils peuvent être relatifs à une mésestimation de l'état fonctionnel réel des machines, à la mauvaise programmation des arrêts (machines primordiales, secondaires...) et aux pannes répétées (à cause des réparations « de surface »)[22].

Les conséquences à long terme pour les entreprises vont des pertes financières importantes au manque de compétitivité vis-à-vis de la concurrence.

Le choix d'une maintenance adaptée permet de garantir une certaine qualité de service. Alors que les machines doivent assurer une productivité régulière, la maintenance, quant à elle, a pour but de veiller à leur bon fonctionnement. Il existe deux différentes catégories de maintenance. La maintenance « corrective » intervient après un arrêt, une casse ou un accident. Elle est limitée par la nécessité d'avoir une équipe conséquente, pour une disponibilité non garantie des équipements. Cet événement non prévu de panne conduisait à un arrêt de production pouvant être important et coûteux financièrement, et qui en plus pouvait porter atteinte à la sécurité des personnes en contact avec ces équipements.

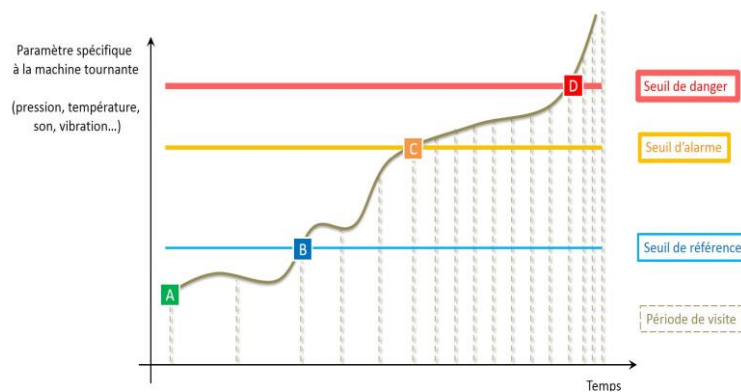
Quant à la maintenance préventive, elle se subdivise en 2 sous catégories : systématique et conditionnelle.

La maintenance préventive « systématique » se fait à intervalles réguliers, d'après un échancier préétabli. La plupart du temps, elle impose de changer précocement les composants des équipements et il n'y a pas de suivi évolutif de leur état de fonctionnement. La maintenance préventive « conditionnelle » sera préférée aux deux précédentes pour les



## Chapitre II : Contribution à l'optimisation de l'efficacité énergétique par la maintenance préventive

raisons suivantes. La détection du problème se fait bien avant la défaillance totale. Ce type de maintenance autorise la planification des réparations ainsi que la localisation plus précise des pannes, rendant les procédures d'entretien efficaces. Le ravitaillement en pièces de rechange se fait selon des besoins effectifs et non superflus (meilleure gestion de stock). La mise en place de la maintenance préventive « conditionnelle » a un coût parfois élevé car les techniciens de maintenance doivent être formés à surveiller, détecter, démonter, réviser et/ou réparer les équipements matériels. Ils veilleront principalement à garantir la bonne disponibilité des machines jugées cruciales (élément central d'une chaîne de production). Pour pouvoir assurer une meilleure application de cette dernière politique de maintenance, et une surveillance accrue des machines, il faudrait en extraire l'information pertinente, représentative de leur état de fonctionnement. Cette information peut être extraite à partir de différentes techniques et analyses se basant sur des grandeurs physiques entourant la machine à surveiller « vibrations, bruits, vitesses . . . » [23].



**Figure II. 6:Niveau de la maintenance.**

Figure II.6 – A : définition de la signature traduisant un état sain, B : seuil de détection d'un changement anormal, C : seuil impliquant la localisation de l'élément défectueux et la programmation d'une intervention, D : seuil limite à partir duquel un arrêt total de la machine tournante est de rigueur, avant une panne très probable. Chaque dépassement de seuil peut nécessiter d'augmenter les périodes de visites de la machine, afin de s'enquérir de son état réel.

Tout arrêt d'une chaîne de production, pour des réparations, doit se faire de manière contrôlée, parce que cela impacte directement la productivité globale. Les opérateurs de production vont alors se baser sur des indicateurs de condition CI qui les préviendront d'un quelconque défaut naissant (figure II.6). Des alarmes, proportionnelles à la progression de celui-ci, seront utilisées comme outil de décision en vue de réaliser les opérations de maintenance sur un ou plusieurs équipements matériels. Très souvent, les indicateurs « globaux » ne sont pas adaptés (historique de fonctionnement, descripteurs statistiques, ...) car ne permettant pas d'identifier quel équipement matériel a généré une alarme et où se situe, avec une certaine précision, l'élément interne endommagé. Ceci nous amène donc à devoir définir des indicateurs assez spécifiques aux types de défauts à identifier.



## Chapitre II : Contribution à l'optimisation de l'efficacité énergétique par la maintenance préventive

---

La sélection d'une source d'information et d'une technique d'analyse adéquate est une étape primordiale quant à la réussite de la campagne de surveillance d'une machine. Ce choix est fait en tenant compte des caractéristiques cinématiques de la machine à surveiller, de son environnement et de la nature des défauts qui peuvent l'atteindre.

Nous pouvons voir dans le tableau II.1, tiré des travaux de [24], et repris dans les travaux de [25], une liste non exhaustive des principales sources d'information et leur utilisation pour le cas spécifique des machines tournantes.

## Chapitre II : Contribution à l'optimisation de l'efficacité énergétique par la maintenance préventive

---

**Tableau II. 1: les outils de la maintenance.**

	Principaux avantages	Principales	Champ
<b>Analyse vibratoire.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Détection de défauts à un stade précoce</li> <li>– Possibilité de réaliser un diagnostic approfondi</li> <li>– Autorise une surveillance continue.</li> <li>– Permet de surveiller l'équipement à distance. (télémaintenance)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Spectres parfois difficiles a interpréter.</li> <li>– Dans le cas de la surveillance continue, installations relativement couteuses.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Détection des défauts de tous les organes cinématiques de la machine (balourd, défauts d'alignement, jeux, etc.) et de sa structure.</li> </ul>
<b>Analyse des huiles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Détection d'une pollution anormale du lubrifiant, avant que celle-ci n'entraîne une usure ou un échauffement.</li> <li>– Possibilité de connaître l'origine de l'anomalie par analyse des particules.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Ne permet pas de localiser précisément le défaut</li> <li>– Nécessite de prendre de nombreuses précautions dans le prélèvement de l'échantillon.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Contrôle des propriétés physico-chimiques du lubrifiant, détection d'un manque de lubrification, analyse des éléments d'usure, analyse de contamination par le process (étanchéité), etc.</li> </ul>
<b>Analyse thermographique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Permet de réaliser un contrôle rapide de l'installation.</li> <li>– Interprétation souvent immédiate des résultats.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Détection de défauts a un stade moins précoce que l'analyse vibratoire</li> <li>– Contrôle limité a ce que " voit" la caméra (échauffements de surface).</li> <li>– Ne permet pas de réaliser un diagnostic. approfondi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Détection de tous les défauts engendrant un échauffement (manque de lubrification)</li> </ul>
<b>Analyse acoustique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Ecouter les ultrasons émis par un équipement avec un collecteur ou radar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Contrôle de défaut électrique et détection de fuite</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Permet de réaliser un contrôle rapide de l'installation.</li> <li>– Interprétation souvent immédiate des résultats.</li> </ul>
<b>Analyse électrique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Permet de mesure des paramètres électriques U,I,P, cosphi....</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Permet de réaliser des mesures rapides de l'installation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Les réseaux électriques</li> </ul>

### **II.2.2 Contexte industriel de notre étude et perspectives de diagnostic**

#### **II.2.2.1 Collaboration**

Le sujet de recherche, initié en 2018, est né de la collaboration entre le Laboratoire de l'université Hassan I de Settat, de la plateforme technologique de l'université Mohammed Premier d'Oujda et un partenaire industriel en industrie agroalimentaire. Le sujet de thèse est donc issu d'une problématique industrielle particulière relative à la société SOFAB qui concerne un besoin général de compréhension et d'interprétation des sources de défaillance des différentes techniques de la maintenance industrielle à mettre au point et la relation avec la consommation d'énergie dans l'industrie. Ces défaillances sont très fréquentes parce que ces machines fonctionnent dans un environnement difficile (humidité, température, vibrations des structures et rendement maximal surtout pour certaines saisons), les organes de transmission subissent de fortes sollicitations.

De ce fait, ils peuvent être sujettes à une usure prématurée voire même accélérée, pouvant aboutir à sa rupture. Cela implique à son tour généralement un arrêt des machines et des pertes de production très conséquentes. L'idée générale était donc de développer une série d'outils de diagnostic qui nous aiderait à prendre des décisions fiables, suivant l'état d'un organe défaillant.

#### **II.2.2.2 Idée principale**

Dans le domaine du diagnostic par analyse vibratoire méthode très utilisée en industrie, le traitement du Signal est utilisé pour surveiller l'évolution des conditions de fonctionnement des machines tournantes et alternatives. En général, les outils traditionnels de traitement sont basés sur l'hypothèse classique de stationnarité : la vitesse de la machine tournante ne varie pas en cours de fonctionnement. Cependant, en pratique, les processus physiques réels sont non-stationnaires. L'analyse de l'évolution temporelle de ces processus peut révéler la présence d'un motif répétitif. Ce motif suppose l'existence d'un cycle de base rencontré couramment dans les machines tournantes. Si les paramètres de fonctionnement sont constants (température, vitesse, etc...), les processus considérés seront dits cyclostationnaires. Dans la plupart des cas, les processus vibratoires provenant des machines tournantes vérifient ces propriétés de cyclostationnarité, propriétés qui apportent de nouvelles issues quant à la résolution de problèmes réputés complexes ou insolubles, dans le cadre stationnaire [26].

#### **II.2.2.3 Contribution de la thèse à la maintenance prédictive**

Le travail de thèse effectué explore de nombreux champs d'applications. Les résultats obtenus peuvent aussi bien intéresser les intervenants en surveillance et diagnostic, les concepteurs des transmissions et les industriels qui ont ce genre de problème.

Sur le plan de la conception de banc d'essai, nous avons développé au cours de ces années de thèse plusieurs prototypes offrant la possibilité de réaliser des simulations des systèmes de transmissions. Le principal banc d'essai a été conçu en vue d'optimiser les scénarios des différents états de fonctionnement : variation de la masse pour le balourd et les cales pour l'alignement tout en changeant la charge grâce à un moteur asynchrone triphasé et

## Chapitre II : Contribution à l'optimisation de l'efficacité énergétique par la maintenance préventive

---

changement de la vitesse rotation du système. D'un point de vue instrumentation, de nouveaux capteurs ont apporté une approche nouvelle dans la caractérisation des divers phénomènes auxquels est assujéti le banc d'essai. Ainsi, l'analyse de vibration à l'aide des capteurs permet de mesurer les différentes vibrations. L'analyse spectrale permet de mettre en évidence le type de défaillance : roulement, engrenage, balourd, désalignement,....

L'analyseur électrique permet de mesure tous les paramètres électriques : courant, tension, puissance active et réactive, cosphi, ....

### II.3 Banc d'essai et outils de la maintenance préventive

#### II.3.1 Banc d'essai

Le dispositif expérimental réalisé pour cette étude consiste en un banc d'essai sur lequel sont positionnés un arbre supporté par deux roulements à rouleaux (TIMKEN 6005-2Z / C3) et relié à un moteur avec un accouplement élastique (Figure II.7).



*Figure II. 7: Banc d'essai.*

La vitesse de l'arbre est contrôlée par un variateur de vitesse VEV.

#### II.3.2 La plateforme de surveillance industrielle (PSI)

##### II.3.2.1 Principe de fonctionnement de la Plateforme de surveillance industrielle PSI:

La Plateforme de surveillance industrielle PSI, mis au point, est une application à deux composantes [6]:

**Une composante hardware** basée sur des réseaux de capteurs communiquant via un protocole propriétaire assurant notamment l'acquisition des mesures et transférées à la plateforme ainsi qu'une composante logicielle.

**La composante logicielle** permet aux utilisateurs de visualiser à distance et en temps réel: l'énergie consommée par le système industriel, le niveau de température et des vibrations. Tenant compte des seuils prédéfinis de chaque paramètre on peut prévoir le temps d'intervention pour éviter des arrêts de production.

##### II.3.2.2 Principe de fonctionnement de la PSI:

Trois fonctions principales de la **PSI**: les instruments sont connectés, des données sont transférées et analysées et une prédiction en fonction des seuils de fonctionnement est résumé sur la figure II.8:

## Chapitre II : Contribution à l'optimisation de l'efficacité énergétique par la maintenance préventive

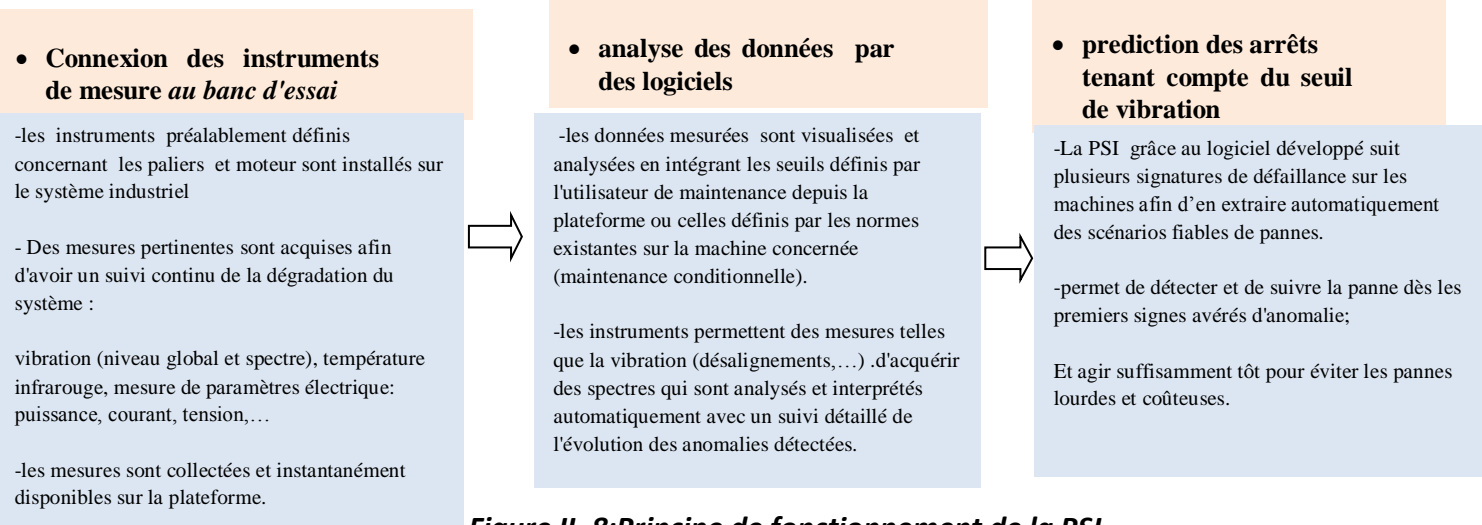


Figure II. 8:Principe de fonctionnement de la PSI.

### II.3.3 Diagnostic approfondi des équipements

Dans cette partie, il s'agit d'identifier l'ensemble des outils de maintenance industriel utilisé pour mener le diagnostic et les campagnes de mesures sur notre système industriel.

#### II.3.3.1 Choix des méthodes de mesures

Avant de se lancer dans les campagnes de mesure, il est nécessaire de choisir les outils de diagnostic convenables pour cette opération. Le choix de ces outils repose sur trois critères :

- La performance et la capacité de détection des défauts de l'énergie en question ;
- La simplicité de mis en œuvre ;
- La disposition et la disponibilité de l'outil de détection ;
- La fiabilité des résultats.

Les outils nécessaires pour ce travail doivent permettre de :

- Visualiser en temps réel la température ;
- Mesurer l'énergie électrique consommée pendant une période donnée par un équipement ainsi que la vibration.

La plateforme technologique assure l'accès au matériel afin de réaliser le diagnostic du système industriel.

- La caméra thermique ;
- L'analyseur de réseaux électriques ;
- Un collecteur analyseur SCI2130 muni d'un accéléromètre AC 207.
- un détecteur du son pour les défauts de tailles très faible de l'ordre des microns

## II.4 Protocole expérimentale de surveillance

### II.4.1 Description de la PSI

Le dispositif expérimental ou la plateforme de surveillance est présenté dans la figure II.9. Il est composé d'un groupe moteur triphasé avec un variateur de vitesse.

Ce banc d'essai est connecté par des capteurs au PC en temps réel.

## Chapitre II : Contribution à l'optimisation de l'efficacité énergétique par la maintenance préventive

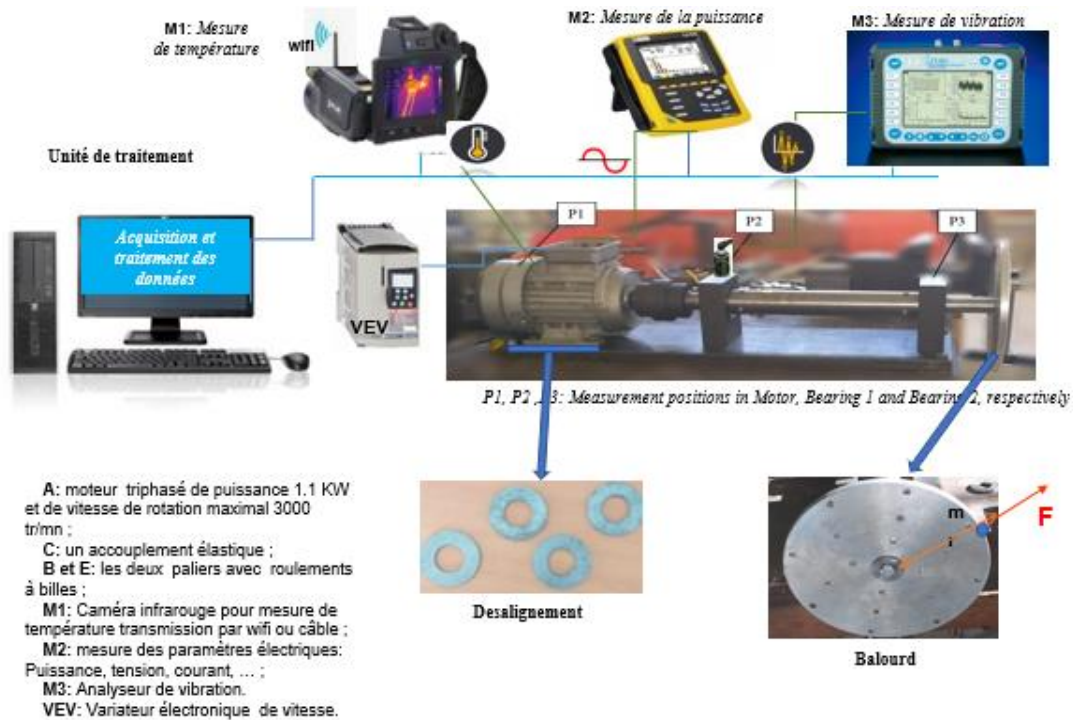


Figure II. 9: Dispositif expérimental.

Le déséquilibre  $U$ , ainsi créé, est défini par :

$$U = m \cdot r = M \cdot e \quad (II.6)$$

La force créée par le déséquilibre dépend de la vitesse de rotation et de l'importance du déséquilibre:

$$F = m \cdot r \cdot \omega^2 = U \cdot \omega^2 \quad (II.7)$$

Où:  $F$  = force (N),  $m$  = masse (kg),  $r$  = rayon (m) et  $\omega$  = vitesse (rad/sec).

Il n'y a pas de relation prouvée entre le déséquilibre et les vibrations de la machine. Cependant, les chercheurs ont pu démontrer expérimentalement que la vibration due au déséquilibre est directionnellement proportionnelle à l'importance du déséquilibre.

### II.4.2 Méthode opératoire mise en évidence du balourd

Dans la première étape nous avons réalisé des mesures avec masse = 0 à vide, absence de balourd, en faisant varier la vitesse de rotation de l'arbre (500 à 3000 tr/min) en enregistrant les signaux correspondant aux accélérations [7, 8,9 ,10].

Dans la deuxième étape nous avons varié les masses pour créer le balourd tout en gardant les mêmes conditions de mesure que précédemment.

Pour les vibrations nous avons pris en considération que la composante verticale suivant l'axe  $y$  vu la symétrie du système. Pour la partie électrique nous avons mesuré la puissance consommée par un instrument de mesure électrique et par caméra infrarouge nous pouvons mesurer la température extérieure du moteur électrique.

### II.4.3 Analyse des résultats de défaut de balourd

Sur la figure II.10 nous présentons le module du spectre de vibration mesuré au niveau du palier. Nous pouvons remarquer le premier PIC important qui apparaît à la fréquence  $F=50\text{HZ}$

qui est la fréquence de rotation du moteur. Ce résultat obtenu met en évidence le défaut du balourd.

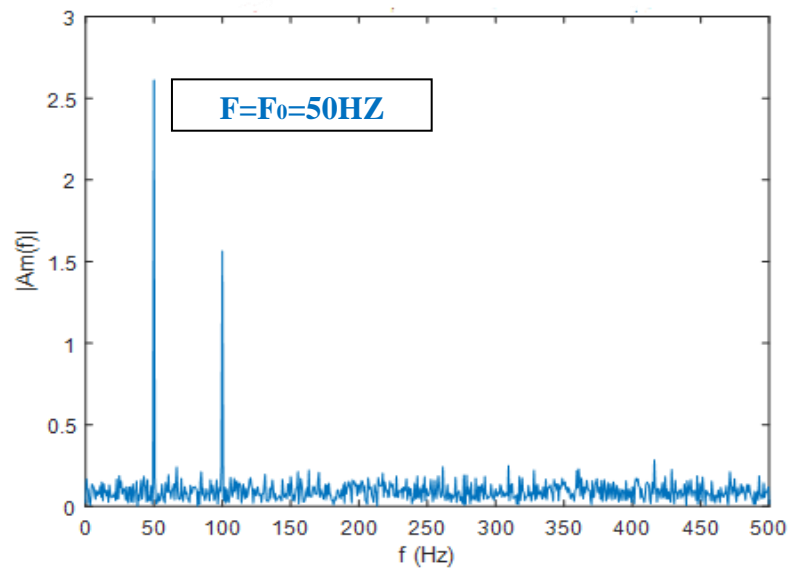


Figure II. 10: Module du spectre de vibration mesuré au niveau du palier.

Nous présentons dans ce paragraphe les résultats obtenus :

### II.4.3.1 Variation de l'accélération en fonction du balourd

La figure II.11 présente les résultats des différentes relevées de l'accélération en fonction des balourds et avec différentes vitesses de rotation (500 à 3000 tr/min).

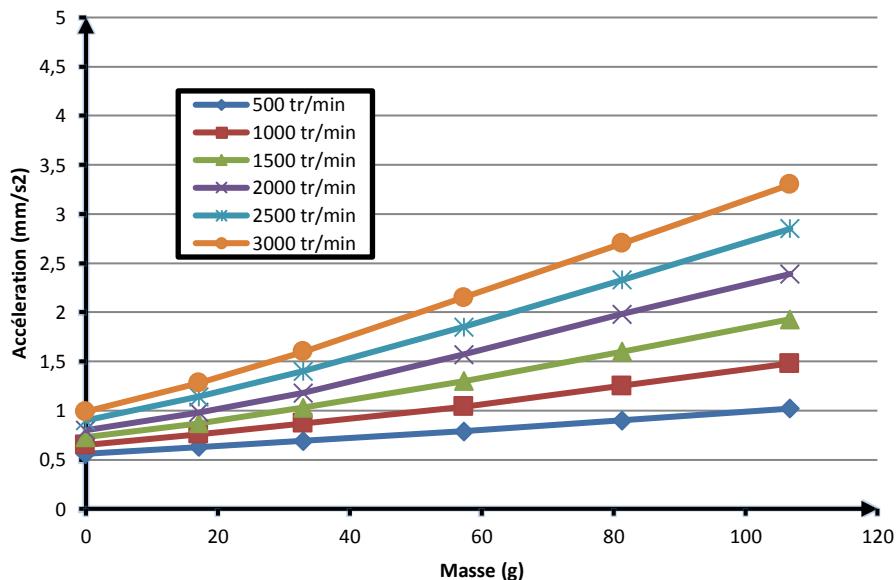


Figure II. 11: Variation de l'accélération en fonction du balourd pour les six vitesses.

D'après la figure II.11 nous constatons que :

L'accélération augmente avec la masse (balourd important) et pour une vitesse de rotation constante. L'accélération augmente d'une manière presque linéaire avec le balourd quelque soit la vitesse d'entraînement.

En augmentant le balourd, la pente augmente d'une manière considérable avec l'augmentation des vitesses.

### II.4.3.2 La puissance consommée par le moteur d'entraînement en fonction du balourd

La figure II.12 présente la puissance consommée par le moteur d'entraînement pour les différents balourds appliqués.

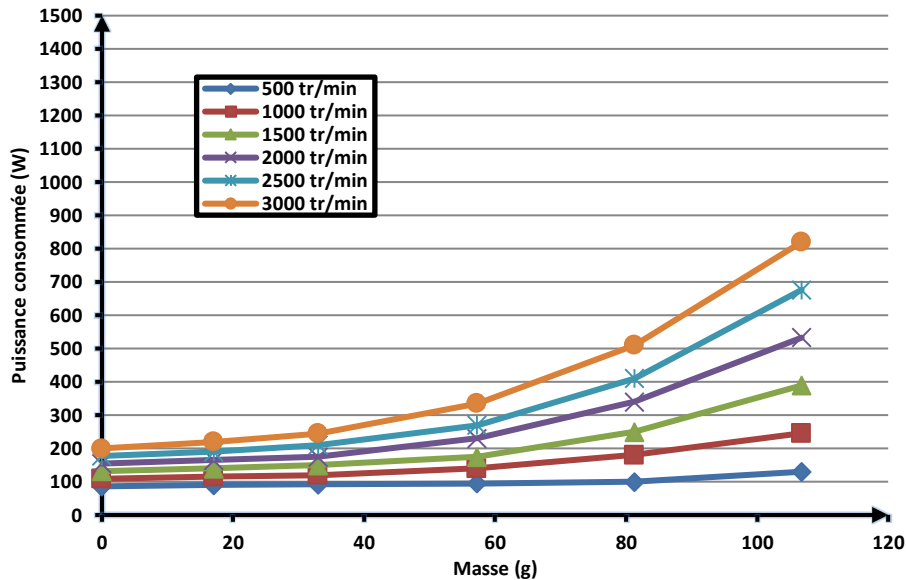


Figure II. 12: La puissance consommée (avec défauts de balourd).

D'après figure II.12 nous remarquons que la puissance mesurée augmente d'une manière parabolique avec le balourd avec la vitesse de rotation constante. La consommation augmente d'une manière considérable pour les trois vitesses 2000, 2500 et 3000 tr/mn cela s'explique par le balourds introduits d'où une consommation électrique importante.

### II.4.3.3 La température mesurée par une caméra infrarouge sur le moteur

La thermographie est une technique de maintenance préventive qui peut être utilisée pour surveiller l'état de la machinerie, des structures et des systèmes de l'usine, et non seulement de l'équipement électrique. Il utilise une instrumentation conçue pour surveiller l'émission d'énergie infrarouge (c'est-à-dire la température de surface) pour déterminer les conditions de fonctionnement. En détectant des anomalies thermiques (c'est-à-dire, des zones qui sont plus chaudes ou plus froides qu'elles ne devraient l'être), un technicien expérimenté peut localiser et définir une multitude de problèmes naissants dans l'installation.

La figure II.13 présente la température mesurée au niveau du moteur d'entraînement pour les différents balourds appliqués.



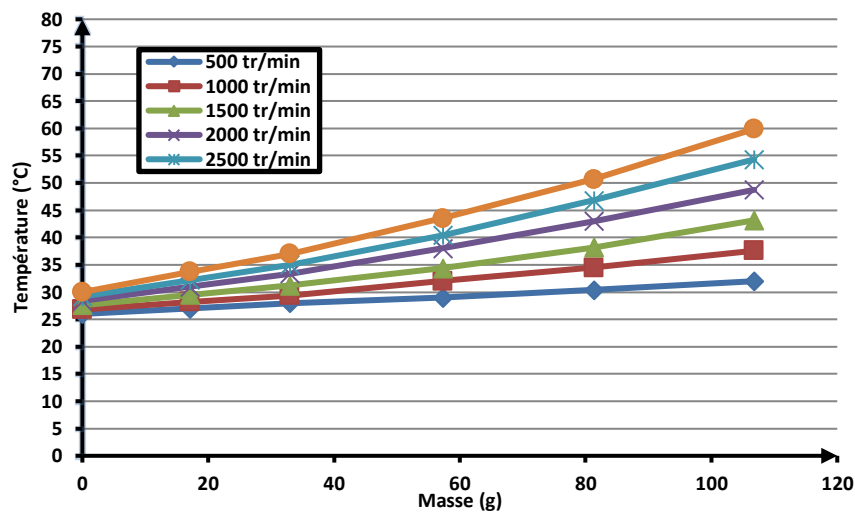


Figure II. 13: température à l'extérieur du moteur en fonction du balourd.

On remarque que la température du moteur augmente avec l'augmentation du balourd à vitesse constante. Elle devient plus importante à des vitesses de rotation plus grandes.

#### II.4.4 Méthode opératoire pour le désalignement

Dans la première étape nous avons réalisé des mesures avec épaisseur = 0 à vide, absence de désalignement, en faisant varier la vitesse de rotation de l'arbre (500 à 3000 tr/min) en enregistrant les signaux correspondant aux accélérations [7-9].

Dans la deuxième étape nous avons varié les épaisseurs pour créer le désalignement tout en gardant les mêmes conditions de mesure que précédemment.

Pour les vibrations nous avons pris en considération que la composante verticale suivant l'axe  $y$  vu la symétrie du système. Pour la partie électrique nous avons mesuré la puissance consommée par un instrument de mesure électrique et par caméra infrarouge nous pouvons mesurer la température extérieure du moteur électrique.

#### II.4.5 Analyse des résultats défaut de désalignement

Nous présentons dans ce paragraphe les résultats obtenus

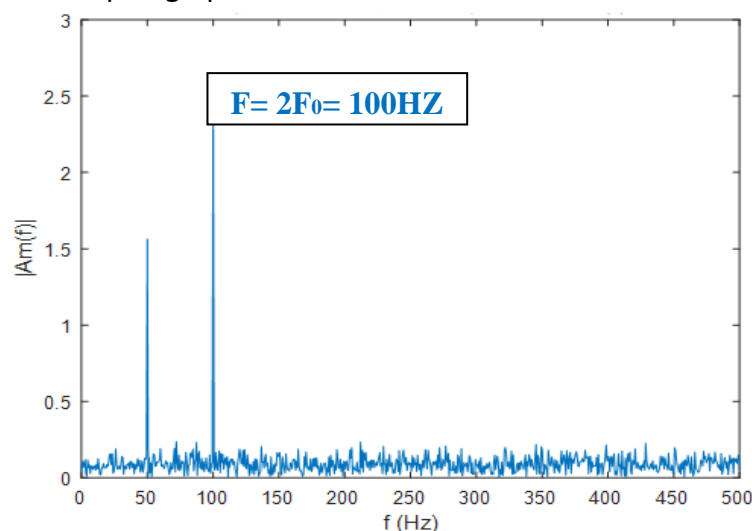


Figure II. 14: Module du spectre de vibration mesuré au niveau du palier.

### II.4.5.1 Variation de l'accélération en fonction du désalignement

La figure II.15 présente les résultats des différentes relevées de l'accélération en fonction des désalignements et avec différentes vitesses de rotation (500 à 3000 tr/min).

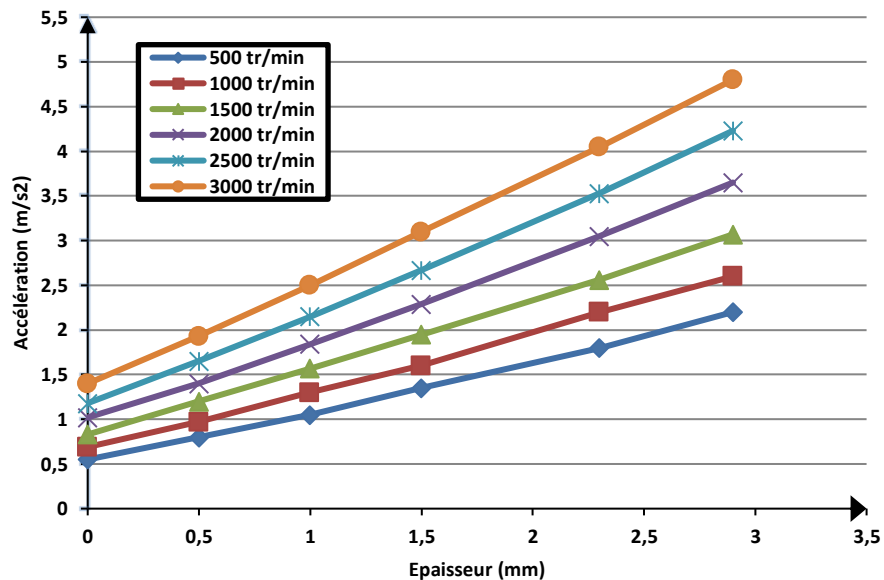


Figure II. 15: Variation de l'accélération en fonction du désalignement pour les six vitesses.

D'après la figure II.15 nous constatons que :

L'accélération augmente en fonction du désalignement tout en augmentant et pour une vitesse de rotation constante. L'accélération augmente d'une manière presque linéaire avec le désalignement quel que soit la vitesse d'entraînement.

En augmentant le désalignement, la pente augmente d'une manière considérable avec l'augmentation des vitesses.

### II.4.5.2 La puissance consommée par le moteur d'entraînement en fonction du désalignement

La figure II.16 présente la puissance consommée par le moteur d'entraînement pour les différents désalignements appliqués.

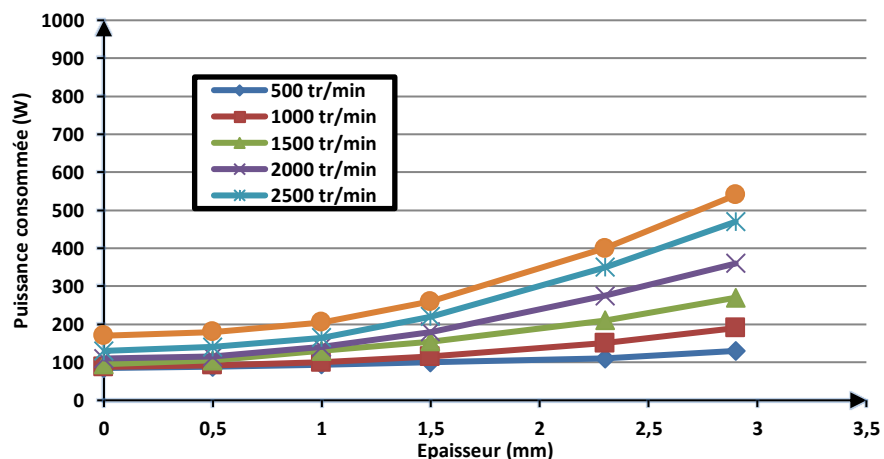


Figure II. 16: La puissance consommée (avec défauts de désalignement).

$$P = C(e) \cdot \omega \quad (II.8)$$

Avec :

**C(e)** : couple développé en fonction du désalignement ; **P** : Puissance consommée ; **C** : Couple de charge ;  **$\omega$**  : vitesse angulaire.

D'après figure II.16 nous remarquons que la puissance mesurée augmente d'une manière parabolique avec le désalignement avec la vitesse de rotation constante. La consommation augmente d'une manière considérable pour les trois vitesses 2000, 2500 et 3000 tr/mn cela s'explique par le couple C(e) résistant dû aux désalignements et qui nécessite une consommation électrique de plus.

#### II.4.5.3 La température mesurée par la caméra infrarouge sur le moteur

La figure II.17 présente la température mesurée au niveau du moteur d'entraînement pour les différents désalignements appliqués.

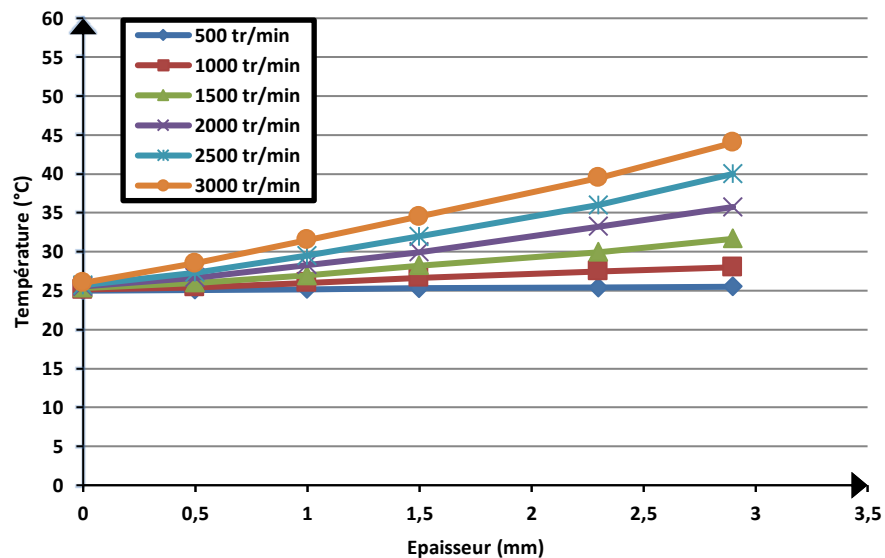


Figure II. 17:température à l'extérieur du moteur en fonction du désalignement.

On remarque que la température du moteur augmente avec l'augmentation du désalignement à vitesse constante. Elle devient plus importante à des vitesses de rotation plus grandes.

## II.5. Cas de couplage de désalignement et de balourd d'un système industriel

### II.5.1 Création de désalignement :

On a déjà fait une étude expérimentale à propos de désalignement et son impact sur les vibrations, la consommation d'énergie et la température[7].

Les figures II(15.16.17)représentent l'évolution de l'accélération, la puissance consommée et la température d'échauffement du moteur en fonction de l'épaisseur avec différentes vitesses de rotation de l'arbre (de 500 à 3000 tr/min)[10].

Par définition, la puissance consommée par le moteur électrique s'écrit :

$$P_0 = C_0 \times \omega \quad (II.9)$$

Avec :

## Chapitre II : Contribution à l'optimisation de l'efficacité énergétique par la maintenance préventive

---

$P_0$  : La puissance consommée sans défauts (ni balourd ni désalignement) ;

$C_0$  : Le couple avant la création des défauts ;

$\omega$  : La vitesse de rotation.

Si l'on souhaite exprimer la puissance consommée en présence de désalignement, il convient d'aménager la relation (II.4), et on obtient alors :

$$P_1 = (C_0 + C_d) \times \omega \quad (\text{II.10})$$

Avec :

$P_1$  : La puissance consommée en présence de désalignement ;

$C_d$  : Le couple résistant qui s'ajoute dû au désalignement ;

On conclut que le désalignement introduit un couple résistant sur le système qui entraîne l'augmentation de puissance consommée par le moteur électrique. Cette consommation augmente avec le désalignement et la vitesse de rotation. Une forte augmentation est observée à partir de 2000 tr/min.

Dans la partie suivante, nous présentons le couplage d'un moteur électrique et un balourd ; l'étude est basée essentiellement sur l'analyse des différentes grandeurs et leurs influences sur l'état de chaque composant du moteur et son efficacité énergétique.

### II.5.2 Couplage de désalignement et de balourd:

Nous présentons dans ce paragraphe les résultats obtenus

D'après les résultats précédents, on constate que l'effet de désalignement est lisible sur le système à partir de l'épaisseur de 3mm. Dans la partie suivante, on fixe l'épaisseur à 3mm.

Ensuite, on crée un balourd, en changeant la masse " $m$ " et en fixant la distance entre la masse et le centre ( $r=100\text{mm} = \text{cte}$ ).

Le balourd crée une force tournante, qui égale à :

$$F = m * r * \omega^2 * \sin \omega t \quad (\text{II.11})$$

Avec :

$F$  : Force de balourd (N) ;  $m$  : Masse (kg) ;  $r$  : Rayon (m) ;  $\omega$  : Vitesse de rotation (rad/s).

Enfin on présente les résultats figures (18, 19,20 et 21) des grandeurs physiques :

Accélération, puissance consommée et température extérieure.

Ces résultats sont mesurés à l'aide d'un analyseur de vibration, analyseur électrique et d'une caméra infrarouge[11].

### II.5.3 Analyse des résultats de couplage

Les figures suivantes représentent les résultats obtenus durant l'étude expérimentale.

Sur la figure II.18 nous présentons le module du spectre de vibration mesurée au niveau du palier. Nous pouvons remarquer le premier pic important qui apparaît à la fréquence  $F = 50\text{Hz}$  correspond au problème du balourd et le deuxième pic apparaît à la fréquence double du moteur est le double de la fréquence du moteur et correspond au défaut du désalignement. Ce résultat obtenu met en évidence le défaut du désalignement.

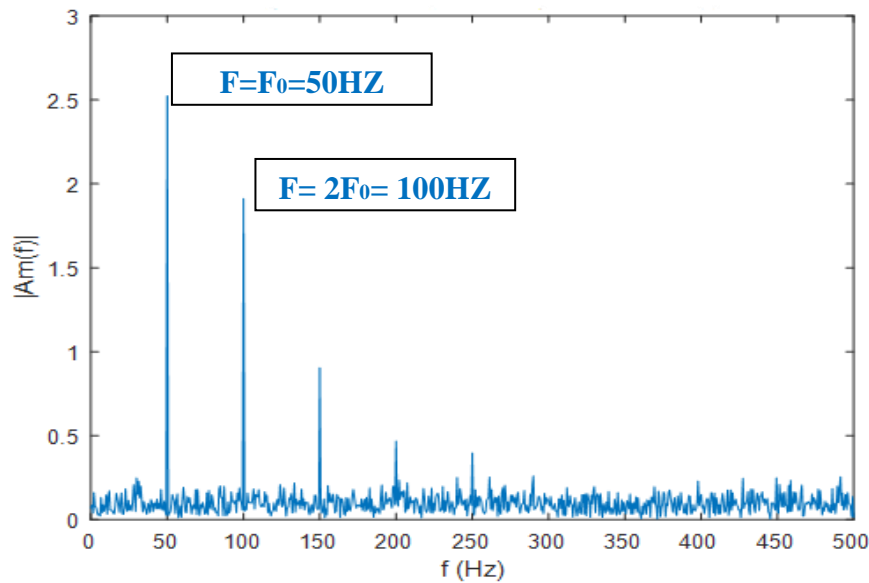


Figure II. 18: Module du spectre de vibration mesuré au niveau du palier.

### II.5.3.1 L'impact de couplage sur l'accélération:

La figure II.19 représente les résultats des différentes relevées de l'accélération en fonction des masses et avec une épaisseur constante égale à 3mm.

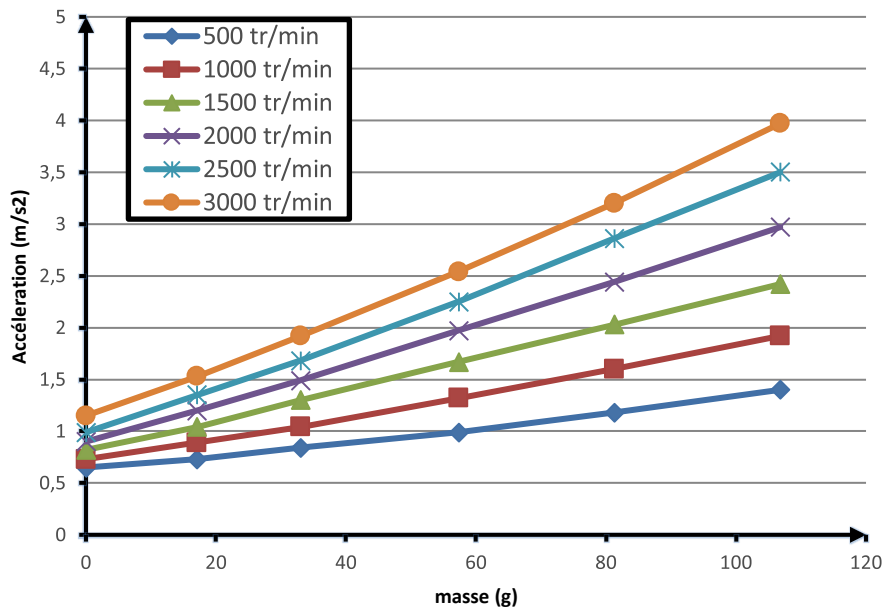


Figure II. 19: Evolution de l'accélération.

D'après la figure ci-dessus, on remarque que l'accélération augmente en fonction de la masse d'une manière quasi linéaire quel que soit la vitesse de rotation.

En augmentant la masse, la pente de l'accélération augmente d'une manière considérable avec l'augmentation des vitesses[12].

### II.5.3.2 La puissance consommée par le moteur d'entraînement en fonction du couplage :

La puissance consommée par le moteur s'obtient en ajoutant le couple de balourd :

$$P_2 = (C_0 + C_d + C_b) \times \omega \quad (II.12)$$

Où

$P_2$  : La puissance consommée en présence des défauts (le désalignement et le balourd)

$C_b$  : Le couple dû au balourd.

La puissance consommée " $P_2$ " est alors composée de couple exercé par le balourd et par le désalignement avec la vitesse angulaire.

La figure II.20 présente la puissance consommée par le moteur électrique pour les différentes masses.

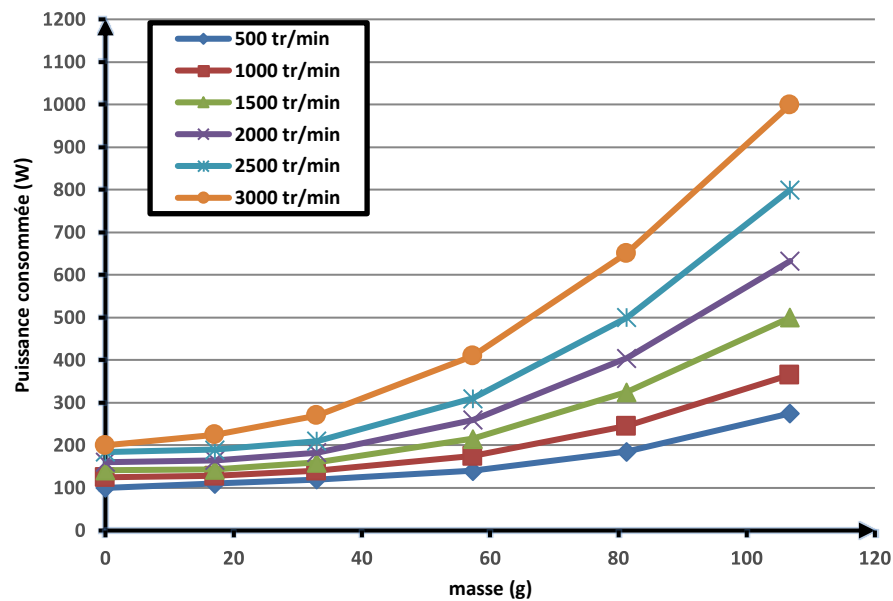


Figure II. 20: Evolution de la puissance consommée.

En analysant les résultats obtenus on constate que la puissance consommée par le moteur augmente d'une manière exponentielle avec l'augmentation de la masse. On éprouve aussi que la puissance augmente d'une manière considérable pour les trois vitesses 2000, 2500 et 3000 tr/mn. Ce phénomène s'explique par le couple  $C(e)$  résistant dû aux balourds et aux désalignements introduits.

### II.5.3.3 L'impact de désalignement et de balourd sur la température du moteur:

La figure II.21 présente la température mesurée par caméra thermique au niveau du moteur d'entraînement pour les différents balourds appliqués pour une durée d'une heure de fonctionnement.

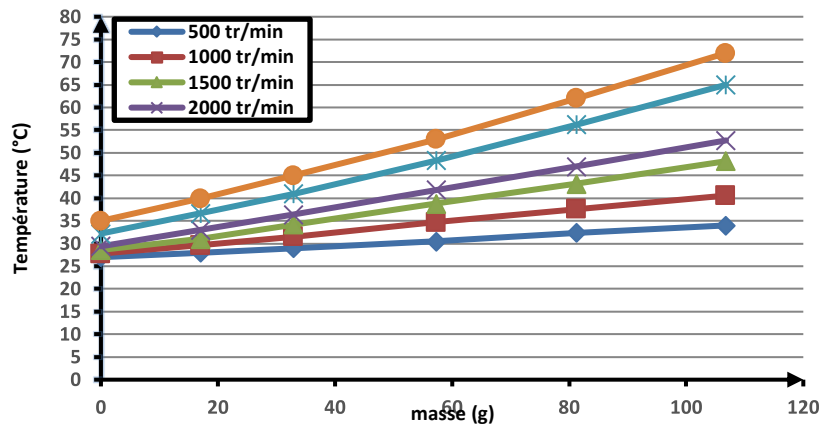


Figure II. 21: Température à l'extérieur du moteur en fonction du balourd.

On constate que la température du moteur s'élève avec l'augmentation de la masse à vitesse constante. Elle devient plus importante à des vitesses de rotation supérieures à 2000tr /min.

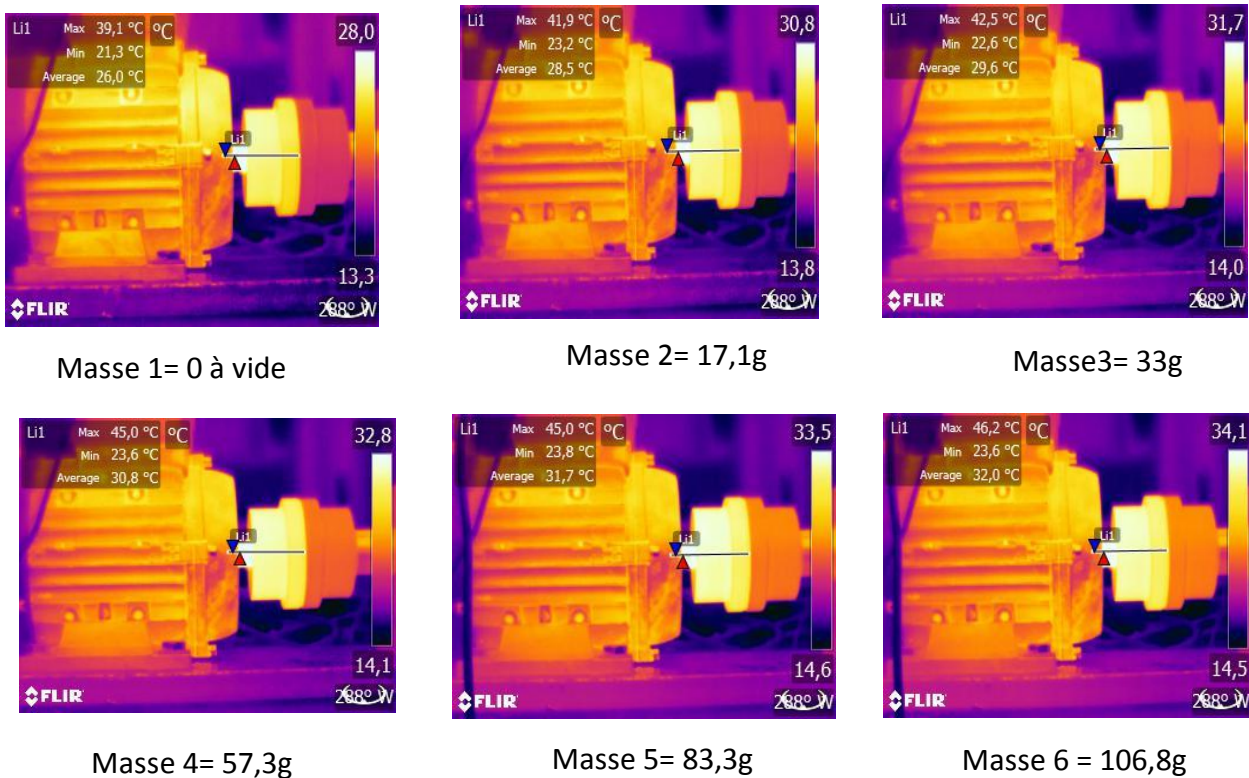


Figure II. 22: Images thermiques du moteur électrique à 500tr/mn.

## II.6 Synthèses des résultats

### Résultats balourd

Nous avons présenté l'étude de l'influence de balourd sur les accélérations dus à la vibration, l'influence sur la puissance consommée et la température d'échauffement du moteur. Une

## Chapitre II : Contribution à l'optimisation de l'efficacité énergétique par la maintenance préventive

---

plateforme de surveillance est établie avec des instruments de mesure et des logiciels de traitement très précis. Nous pouvons conclure que :

- Quand la vitesse de rotation augmente l'accélération augmente aussi en fonction du balourd.
- Quel que soit la vitesse de rotation, l'accélération augmente d'une manière linéaire avec la charge.
- La pente des graphiques (résultats) croît avec la vitesse de rotation.
- La consommation d'énergie du moteur électrique augmente avec le balourd et la vitesse de rotation. On remarque aussi que cette consommation s'accroît pour les trois dernières vitesses.
- La température du moteur augmente linéairement avec la vitesse de rotation et le balourd.
- Nous pouvons aussi prédire la durée de vie de chaque composant en se basant sur les seuils prédéfinis.

### **Résultats désalignement**

La contribution de notre travail est l'étude de l'influence de désalignement sur les accélérations dues à la vibration, l'influence sur la puissance consommée et la température d'échauffement du moteur. Une plateforme de surveillance est établie avec des instruments de mesure et des logiciels de traitement très précis. Nous pouvons conclure que :

- Quand la vitesse de rotation augmente l'accélération augmente aussi en fonction du désalignement.
- Quelque soit la vitesse de rotation, l'accélération augmente d'une manière linéaire avec la charge.
- La pente des courbes croît avec la vitesse de rotation.
- La consommation d'énergie du moteur électrique augmente avec le désalignement et la vitesse de rotation. On remarque aussi que cette consommation s'accroît pour les trois dernières vitesses.
- La température du moteur augmente linéairement avec la vitesse de rotation et le désalignement.
- Nous pouvons aussi prédire la durée de vie de chaque composant en se basant sur les seuils prédéfinis.

### **II.7 Conclusion du chapitre :**

Nous avons mis en place une surveillance intelligente d'un équipement industriel qui mesure en temps réel plusieurs paramètres de vibration, d'énergie et de température. Ce travail permet d'anticiper les pannes dans des chaînes de production, la fiabilité des équipements et réduire la consommation d'énergie en réduisant les défaillances tel que le balourd et le désalignement objet de notre étude. L'élimination du balourd et de désalignement réduit la consommation d'énergie et augmente la fiabilité du système industriel. Cela est possible par l'alignement laser.



## Chapitre II : Contribution à l'optimisation de l'efficacité énergétique par la maintenance préventive

---

Une nouvelle méthode de surveillance d'un système industriel par l'analyse et traitement des grandeurs physiques a été présentée dans ce travail de recherche. La démarche est basée sur l'acquisition des données, aboutit à un traitement en temps-réel, dont les bonnes performances ont été illustrées à l'aide des données expérimentales. Notre objectif est d'étudier l'impact de désalignement et de balourd sur le système.

Les instruments de mesures connectées permettent de suivre l'évolution de chaque grandeur physique (l'accélération due à la vibration, la puissance consommée et la température d'échauffement du moteur). Le traitement des résultats fait en temps réel d'une manière très précise.

Les résultats obtenus montrent que si on augmente l'épaisseur de désalignement et/ou la masse de balourd on a des effets négatifs sur le comportement vibratoire du système industriel. Ces effets réduisent la fiabilité et le rendement du système et l'augmentation de sa consommation d'énergie. Enfin connaissant les seuils de température et les seuils de vibrations au niveau des paliers nous pouvons prédire les pannes et programmer des interventions pour éviter les risques ou des arrêts de production.

D'une manière générale des arbres mal alignés ou des balourds peuvent causer des défaillances de différentes natures :

- Ils provoquent une résistance dans les paliers et dans les arbres tant sur les unités mobiles que sur les unités commandées.
- Ils accentuent l'usure des points qui, par l'écoulement des graisses ou des acides, contaminent la base de la machine.
- Ils produisent des vibrations excessives qui occasionnent le bris des pièces internes ou externes.

Les machines deviennent bruyantes à cause d'une usure prématurée des engrenages ou des roulements qui, en contact avec des particules métalliques, se détériorent. Il en résulte une augmentation de température, ce qui provoque la détérioration des huiles, des joints, des roulements, des arbres et des accouplements l'entraînement devient plus difficile et par conséquent, il exige une surconsommation d'énergie.

Un alignement correct permettra d'éliminer 50% de tous ces problèmes. Il assure une faible résistance dans la machine et dans les machines voisines et il augmente la durée de vie des équipements, diminue le coût d'entretien, les pertes de temps et la consommation d'énergie d'où la nécessité d'un bon alignement et l'élimination des balourds pour remédier à tous ces problèmes

Ce travail était nécessaire de comprendre comment se manifestent les défaillances et comment les diagnostiquer à l'aide des instruments d'analyseur électrique et de vibration. Ces informations précieuses vont nous aider à préparer notre travail expérimental dans le chapitre suivant.

### Références:

- [1] F. Jeffali, A. Ouariach, B. El Kihel, A. Nougauoui, Diagnosis of threephase induction motor and the impact on the kinematic chain using Non-Destructive Technique of Infrared Thermography, *Journal Infrared Physics & Technology*, 102, 102970(2019).
- [2] AHMAT FADIL, ADOUM, « Proposition d'une architecture de surveillance Holonique pour l'aide à la maintenance proactive d'une flotte de systèmes mobiles : application au domaine ferroviaire », Thèse de doctorat, Valenciennes, 2019.
- [3] B. Abouelanouar, M. Elamrani, B. Elkihel, F. Delaunois, "Application of wavelet analysis and its interpretation in rotating machines monitoring and fault diagnosis", *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*, 7, 3465-3471(2018).
- [4] Romain LESOBRE, « Modélisation et optimisation de la maintenance et de la surveillance des systèmes multi-composants Applications à la maintenance et à la conception de véhicules industriels », thèse de doctorat, Laboratoire Grenoble, Images, Parole, Signal, Automatique (GIPSA-lab), Ecole Doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique et Traitement du Signal (EEATS) université de Grenoble, 2015.
- [5] F. Khathyri, B. Elkihel, F. Delaunois, F., « Non-destructive testing by ultrasonic and thermal techniques of an impacted composite material", *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology* 8, 2360-2366(2018).
- [6] Zohra BOUZIDI Pronostic des systèmes industriels basé sur l'intelligence artificielle Maintenance prédictive », thèse de doctorat, Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie Département d'informatique, Université Mohamed Khider – BISKRA, 2018.
- [7] Bakdid et al., "Welding Control using Ultrasonic Multi-elements Method", *JMES*, 8, 3483-3489(2017).
- [8] Khalid EL HAD, « Pratique de la Maintenance Prédictive par les Méthodes Vibratoires et l'étude de l'influence de la puissance consommée (Application d'un roulement à billes sans lubrification en présence d'un défaut d'alignement) », 21ème Congrès Français de Mécanique Bordeaux, 26 au 30 août 2013
- [9] A. Bakdid , B. El Kihel , A. Nougauoui and F. Delaunois, "Three- Dimensional Characterization of Weld Defects in a Steel Material", *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 14, 1928-1932(2019) .
- [10] Ryad Zemouri, « Contribution à la surveillance des systèmes de production à l'aide des réseaux de neurones dynamiques : Application à la e-maintenance », Thèse de doctorat, UNIVERSITE DE FRANCHE-COMTE, 2003.

## Chapitre II : Contribution à l'optimisation de l'efficacité énergétique par la maintenance préventive

---

- [11] Mukesh, P. S., Bulsara, A.: Energy loss due to unbalance in rotor–shaft system. *Journal of Engineering, Design and Technology*, vol. 14, no. 2, pp. 277–62 (2016).
- [12] Saleem, M.A., Diwakar, G., Satyanarayana M. R. S., Detection of Unbalance in Rotating Machines Using Shaft Deflection Measurement during Its Operation. *Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*. vol. 3, no. 3, pp. 8–20, Sep-Oct. (2012).
- [13] Balakrishnan S.R., Santhakumar S., Fuzzy modelling considerations in an aero gas turbine engine start cycle. *Fuzzy Sets and Systems*, Volume 78, Issue 1, 26 February 1996, Pages 1-4
- [14] Lartigue G., Meier U., Bérat C., Experimental and numerical investigation of self-excited combustion oscillations in a scaled gas turbine combustor. *Applied Thermal Engineering*, Volume 24, Issues 11–12, August 2004, Pages 1583-1592
- [15] Bernhard Schweizer, Mario Sievert, Nonlinear oscillations of automotive turbocharger turbines. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 321, no. 3–5, April 2009, pp. 955-975.
- [16] Boaghe O.M, Billings S.A, Li L.M, Fleming P.J, Liu J., Time and frequency domain identification and analysis of a gas turbine engine. *Control Engineering Practice*, vol. 10, no.12, December 2002, pp. 1347-1356.
- [17] Bill Forsthoffer W.E., Gas turbine control and protection. *Forsthoffer's Rotating Equipment Handbooks*, vol. 1, 2005, pp. 439-454.
- [18] A. Bilosova and J. Bilos, *Vibration Diagnostics*. 2012.
- [19] J. P. Patel and S. H. Upadhyay, “Comparison between Artificial Neural Network and Support Vector Method for a Fault Diagnostics in Rolling Element Bearings,” *Procedia Eng.*, vol. 144, pp. 390–397, Jan. 2016.
- [20] M. C. Carnero, “Selection of diagnostic techniques and instrumentation in a predictive maintenance program. A case study,” *Decis. Support Syst.*, vol. 38, no. 4, pp. 539–555, Jan. 2005.
- [21] B. Abouelanouar, “A comparative experimental study of different methods in detection and monitoring bearing defects,” *Int. J. Adv. Sci. Tech. Res.*, vol. 1, no. 7, pp. 409–423, 2017.
- [22] J. Mathew and R. J. Alfredson, “The Condition Monitoring of Rolling Element Bearings Using Vibration Analysis,” *J. Vib. Acoust.*, vol. 106, no. 3, pp. 447–453, 1984.
- [23] H. A. Gaberson, “Rotating machinery energy loss due to misalignment,” in *IECEC 96. Proceedings of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, 1996, vol. 3, pp. 1809–1812.

## Chapitre II : Contribution à l'optimisation de l'efficacité énergétique par la maintenance préventive

---

- [24] I. Khelf, "Diagnostic Des Machines Tournantes Par Les Techniques De L'Intelligence Artificielle," UNIVERSITE BADI MOKHTAR - ANNABA, 2014.
- [25] M. AYAD, "recherche de signatures robustes des défauts dans une machine tournante à travers l'analyse de signaux vibratoires," Université Ferhat Abbas – Sétif – 1 –, 2015.
- [26] Elkhatib, A.: Energy consumption and machinery vibrations. In International Conference on Sound & Vibrations, ICSV14, Cairns 9-12 July, pp. 1–6 (2007).

### Chapitre III : Audit énergétique industriel et plan de comptage

---

#### Introduction

Notre travail expérimental s'inscrit dans le cadre d'un système de management de l'énergie ISO 50001[5]. Un Système de Management de l'Énergie (SMEn) a pour finalité d'encourager les organismes à s'inscrire dans une démarche volontaire d'amélioration des performances énergétiques de leurs activités. Il donne un fil conducteur pour développer une gestion méthodique et pérenne de l'énergie. Il va permettre d'orienter les décisions stratégiques, de mettre en œuvre des actions transverses (achat, communication, formation) et des moyens, de vérifier leur efficacité, de faire participer l'ensemble des acteurs de l'entreprise. En outre, les entreprises impliquées dans un SMEn améliorent sensiblement leur efficacité énergétique. L'industrie est donc clairement concernée par la mise en place d'une telle démarche, étant le troisième secteur d'activité le plus énergivore.

Pour cette étude nous avons utilisé des référentiels et normes énergétiques qui nous ont permis soit réaliser des audits ou améliorer de la consommation d'énergie, nous citons trois types de norme :

#### **-Connaitre ses usages énergétiques / Audits énergétiques**

- BP-X30 - Référentiel français - Diagnostic énergétique dans l'industrie ;
- EN 16247-3 - Norme européenne - Audits énergétiques – Exigences et recommandations de mise en œuvre pour les Procédés ;
- ISO 50002 - Norme internationale - Audits énergétiques – Exigences et recommandations de mise en œuvre ;
- EN 16231 - Normes européennes - Méthodologie de benchmarking de l'efficacité énergétique.

#### **-Améliorer sa performance énergétique / Systèmes de management de l'énergie (SMé)**

- ISO 50001 - Norme internationale - SMé – Exigences et recommandations de mise en œuvre ;
- ISO 50003 - Norme internationale - SMé – Exigences pour les organismes procédant à l'audit et à la certification de systèmes de management de l'énergie ;
- ISO 50004 - Norme internationale - SMé – Lignes directrices pour la mise en œuvre, la maintenance et l'amélioration d'un système de management de l'énergie ;
- ISO 50006 - Norme internationale - SMé – Mesurage de la performance énergétique à l'aide des performances énergétiques de référence (PER) et d'indicateurs de performance énergétique (IPE) – Principes généraux et lignes directrices ;
- ISO 50015 - Norme internationale - SMé – Surveillance et mesurage de la performance énergétique des organismes – principes généraux concernant les directives.

#### **-Calcul des économies d'énergie**

- EN 16212 - Normes européennes - Efficacité énergétique et calcul d'économies - Méthodes top-down (descendante) et bottom-up (ascendante) ;

- ISO 17741 - Norme internationale - Méthode de calcul générale pour les économies d'énergie pour les projets.

### **III.1 objectifs de l'ISO 50001**

Pour accompagner les entreprises dans leur démarche et dans un souci de capitalisation et d'harmonisation des « bonnes pratiques », la norme **ISO 50001 - Système de management de l'énergie : Exigences et recommandations de mise en œuvre - a été publiée en juin 2018**[1]. Elle est une version améliorée de l'EN 16001[2] qui a de fait été annulée en avril 2012. Elle est largement applicable à l'ensemble des secteurs économiques, mais nous avons vu que dans l'industrie il existe un fort potentiel d'amélioration en matière d'efficacité énergétique : de l'ordre de près de 20%.

### **III.2 Les principes généraux d'un SME**

Le principe de la norme ISO 50001 est de permettre à un organisme soucieux de gérer son efficacité énergétique - de toute taille et de tout type, du secteur public comme du privé - de parvenir à instaurer un management de l'énergie qui lui soit propre et amélioré continuellement au rythme qui lui convient le mieux.

## III.3 Le Concept des Systèmes de management de l'énergie (SME)

### Modèle Planifier-Réaliser-Contrôler-Réagir

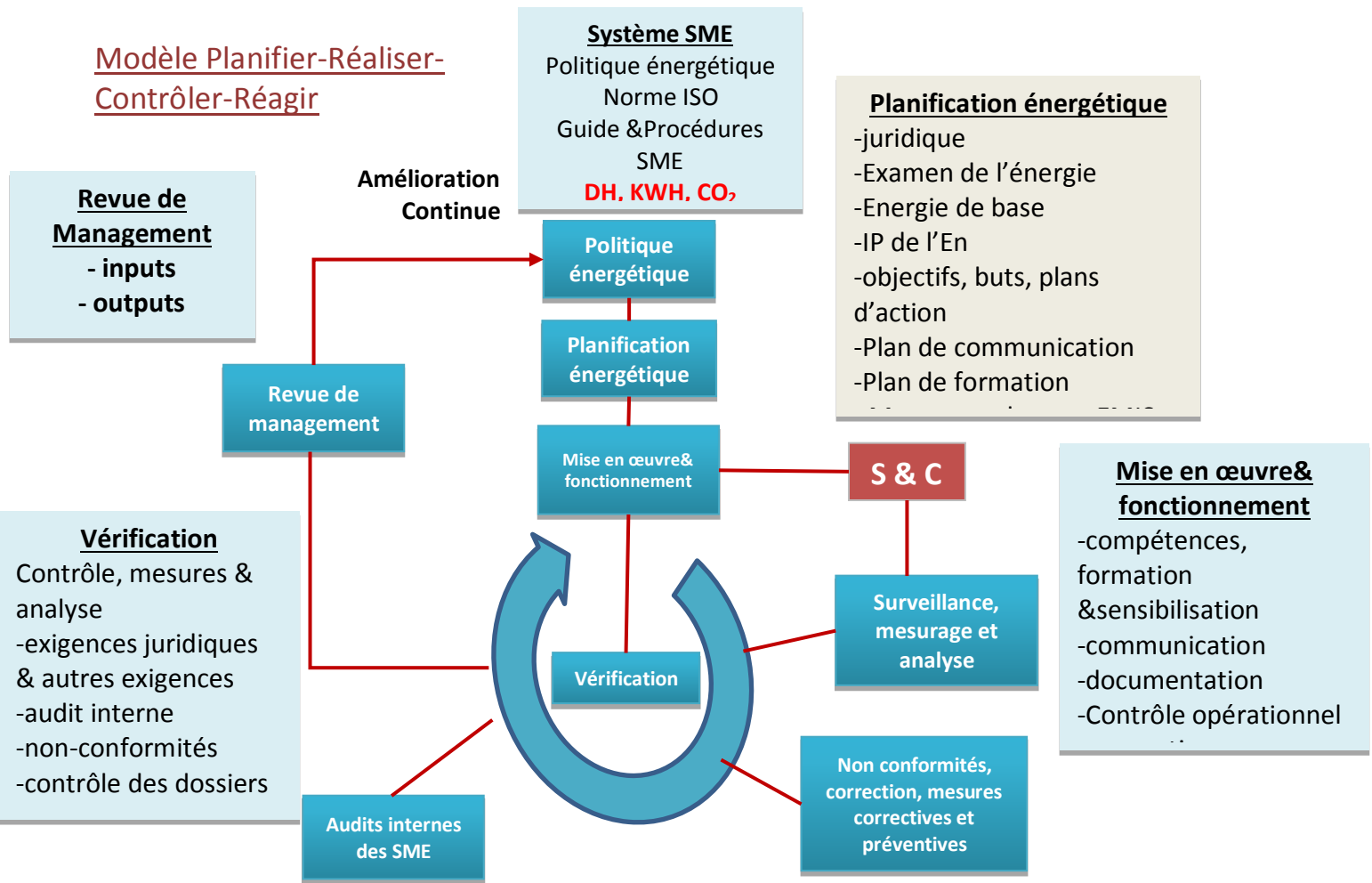


Figure : Diagramme du système, y compris les éléments de la norme ISO 50001.

Figure III. 1 : Diagramme du système, y compris les éléments de la norme ISO 50001.

## III.4 Audit énergétique de l'entreprise

### III.4.1 Introduction

La consommation d'énergie a continué sa forte progression dans le monde comme a été montrée en chapitre I. Elle a pour conséquence la dégradation de l'environnement et le réchauffement climatique. Ce dernier résulte à l'augmentation de la part des gaz à effets de serre dans l'atmosphère. D'autre part le coût de production qui a un impact négatif sur la compétitivité de l'entreprise.

L'audit énergétique qui est un élément d'un programme d'efficacité énergétique, il consiste dans un examen critique de la consommation énergétique dans une entreprise dans le but de parvenir à une utilisation rationnelle de l'énergie.

Cette opération d'audit consiste à réaliser suivant une méthode rigoureuse et systématique,

## Chapitre III : Audit énergétique industriel et plan de comptage

---

une étude chiffrée de la répartition des consommations d'énergie dans tous les secteurs de l'activité. La finalité d'un audit énergétique est double :

-Établir une carte détaillée de la répartition des consommations d'énergie entre toutes les phases de l'activité, depuis la séparation entre le chauffage des bâtiments et la production de vapeur liée au procédé de fabrication, jusqu'à la désagrégation des consommations par phase de production et par catégorie de produit.

-Déterminer les actions à mener et évaluer leur impact en termes de faisabilité, de rentabilité, de remise en cause des habitudes et des modes de fonctionnement de la production.

La réalisation d'un audit énergétique est profitable dans toute entreprise ou établissement dans la mesure où il permet d'identifier les points d'amélioration potentielle. Cette démarche demande souvent de faire appel à des compétences extérieures pour apporter une méthodologie de travail. Des aides financières peuvent être octroyées pour sa réalisation.

### III.4.2 L'audit énergétique :

L'ensemble de ces actions ont pour objectif la réalisation de l'économie d'énergie pour une entreprise en particulier:

- sécuriser l'approvisionnement énergétique ;
- freiner le réchauffement climatique ;
- réduire les dépenses énergétiques ;
- accroître la compétitivité des entreprises ;
- Et enfin respirer un air plus propre.

L'audit est une procédure de description et d'analyse du système énergétique d'un pays ou d'une région, ou d'un appareil, dans son fonctionnement interne et ses relations avec les autres systèmes. La phase analytique est suivie d'une phase de synthèse des différents éléments recueillis, permettant de porter un jugement sur la situation énergétique passée et présente [3].

L'expression « audit énergétique » fait référence à la collecte et l'analyse des données disponibles en rapport à l'énergie afin d'établir la ventilation de la consommation énergétique d'une usine selon les départements ou procédés, et à identifier des possibilités d'économie d'énergie dans les divers équipements ou procédés d'une entreprise dans le but de parvenir à une utilisation rationnelle de l'énergie.

L'audit énergétique peut être relativement rapide, c'est-à-dire ne repérer que les possibilités d'économies les plus évidente, ou extrêmement complètes et détaillées. Contrairement à un Bilan Carbone ou à l'Empreinte Ecologique, un audit énergétique ne porte pas sur la conception ou la configuration de l'ensemble de l'usine mais plutôt sur des composants souvent pris de façon pratiquement isolée.

L'objectif premier de l'audit énergétique dans l'industrie est de déterminer les modifications à apporter aux procédés et utilités d'une entreprise ou à leur mode d'exploitation, afin de réaliser des économies d'énergie.

Pour cela, il est nécessaire de déterminer les principaux postes de consommation énergétique et d'effectuer une analyse par comparaison ou par calcul avec la consommation qui serait obtenue par la mise en œuvre de solutions plus performantes.



La mission de l'expert auditeur dans l'entreprise devra suivre les trois phases suivantes :

- Une visite préliminaire d'évaluation,
- Un audit énergétique préliminaire,
- Un audit énergétique approfondi.

### **III.4.3 Démarche d'audit énergétique**

#### **III.4.3.1 Visite préliminaire d'évaluation**

Cette visite permettra d'évaluer le travail à effectuer, de juger de la nécessité de faire appel à un expert procédé et de préparer le planning d'intervention pour la suite de la mission. Pour le cas d'un groupement d'experts ou d'une intervention comprenant différentes activités, l'expert auditeur chef de mission devra coordonner l'activité de chaque expert et présentera un planning d'intervention pour chaque activité concernée. Dans notre cas d'étude l'équipe choisie a reçu une formation qui lui permet de réaliser l'audit sans difficulté.

#### **III.4.3.2 Audit énergétique préliminaire:**

##### ***III.4.3.2.1 Questionnaire d'audit***

L'équipe devra dans cette première étape faire remplir par l'entreprise un questionnaire afin d'obtenir toutes les données relatives à la consommation d'énergie et aux différents paramètres de production pour situer les performances énergétiques de chaque activité de l'entreprise (installations d'énergie, équipement de production,...).

##### ***III.4.3.2.2 Visite générale de l'entreprise:***

L'équipe chargée de cette effectuera une visite générale de l'entreprise afin de :

- ◆ Compléter le questionnaire d'audit,
- ◆ Identifier les différentes activités, acteurs, ateliers et équipements, périmètre d'audit,
- ◆ Identifier les interventions à effectuer pour le diagnostic approfondi et choisir les équipements, matériel ou ateliers qui feront l'objet d'investigations.

##### ***III.4.3.2.3 Mise au point des équipements de mesures et de contrôle :***

Pour cette phase l'équipe pourra contrôler le fonctionnement des instruments de mesures existants et d'enregistrement des données physiques des différents équipements, installations et matériel de l'entreprise afin de vérifier s'ils sont utilisables pour la prochaine étape. Elle devra également identifier les points et les véhicules où devront être effectuées les mesures et les compagnes jugées utiles.

Ensuite, l'équipe établira, si nécessaire, une liste d'interventions à effectuer pour la mise en place d'instruments de contrôle et de mesure.

##### ***III.4.3.2.4 Identification d'actions de maîtrise de l'énergie:***

Dans cette étape, l'équipe procèdera à l'exploitation des données recueillies lors de la visite générale de l'entreprise et la collecte d'information. Elle devra présenter les principales caractéristiques de l'usage de l'énergie pour les différentes activités et un état des lieux des actions de maîtrise de l'énergie mis en œuvre par l'entreprise. Ces actions seront présentées selon leur origine (issues d'un audit ou non) et avec une évaluation de leurs impacts sur les performances énergétiques de l'entreprise.

Suite à cela, l'équipe proposera un plan d'actions à réaliser immédiatement. Ce plan d'actions doit être chiffré et argumenté et permettant d'améliorer l'utilisation de l'énergie pour les

différentes activités de l'entreprise et de développer le recours aux énergies de substitution.

### **III.4.3.2.5 Elaboration du rapport d'audit préliminaire:**

A l'issue de cette phase, l'équipe devra établir un rapport d'audit énergétique préliminaire regroupant toutes les informations collectées, les investigations effectuées ainsi que le plan d'actions proposé.

## **III.5 Audit énergétique approfondi:**

### **III.5.1 Mise en place du matériel de mesure et campagne de mesure :**

L'équipe devra mettre en place tous les instruments de mesure et de contrôle et vérifier leur bon fonctionnement. Quelques essais préliminaires de préparation seront nécessaires (une liste d'équipements de mesures et de contrôle devront appartenir aux bureaux d'études. La campagne de mesure et d'enregistrement de données relative aux installations industrielles devra être effectuée sur une durée suffisamment longue afin de s'assurer de la fiabilité des résultats.

### **III.5.2 Analyse et exploitation des mesures effectuées:**

L'équipe devra effectuer l'analyse et le traitement de ces mesures pour aboutir aux bilans énergétiques et matières des ateliers, des équipements et du matériel roulant. Des recoupements devront être faits avec les données fournies par l'entreprise afin de juger la qualité de la gestion et du suivi de l'énergie. Ces analyses permettront d'établir des ratios de consommation qui situeront les performances des différentes activités de l'entreprise par rapport aux standards communément admis.

A partir de ces données, l'équipe établira un certain nombre de recommandations qu'il devra les justifier par le calcul du temps de retour brut des investissements nécessaires.

### **III.5.3 Examen des installations industrielles**

L'équipe devra examiner les différents points de fonctionnement de l'installation industrielle ayant trait à la consommation et à la production d'énergie :

- ◆ Analyse de la production et de la distribution d'utilités (vapeur, froid, électricité, air comprimé, etc.) du point de vue efficacité et de leur adaptation aux besoins réels ;
- ◆ Examen des conditions de stockage et de livraison de l'énergie ;
- ◆ Evaluation du système de gestion de l'énergie mis en place par l'entreprise ;
- ◆ Examen des procédures de conduites, de l'ordonnancement des fabrications et de l'organisation générale des ateliers en rapport avec une incidence éventuelle sur la consommation de l'énergie ou sa gestion ;
  - Evaluation du système d'évaluation et de maintenance ;
  - Examen des possibilités d'améliorer l'utilisation des énergies par le remplacement des équipements, par la mise en place d'équipement complémentaire, par des récupérations, par l'emploi de matériel à hautes performances énergétiques, par la production simultanée de chaleur et d'électricité ;
  - Recherche de la possibilité d'utiliser des ressources alternatives : déchets, biomasse, énergie solaire, rejets à basse température.

## Chapitre III : Audit énergétique industriel et plan de comptage

### III.5.4 Elaboration du rapport d'audit approfondi

A l'issue de cette phase, l'expert devra établir un rapport d'audit énergétique approfondi regroupant toutes les informations collectées, les investigations effectuées ainsi que le plan d'actions proposé.

### III.5.5 procédure d'audit énergétique

La procédure d'audit énergétique est composée de plusieurs phases qui sont regroupés sous forme de tableau:

Phase	Etapes	Objectifs
<b>Phase0: Contact préliminaire</b>	Étape 0.1:prise de contact	<ul style="list-style-type: none"><li>- Établir le contact ;</li><li>- Identifier les interlocuteurs locaux, s'assurer leur collaboration.</li></ul>
	Étape 0.2:Prise d'informations préliminaires	<ul style="list-style-type: none"><li>- Définir la typologie du site; identifier les types de consommations ;</li><li>- Présélectionner les moyens de mesures éventuels à prévoir ;</li><li>- Informer les interlocuteurs des informations qu'il leur va falloir rassembler ;</li><li>- Effectuer avec eux le recensement des informations disponibles et manquantes.</li></ul>

Phase	Etapes	Objectifs
<b>Phase1: Visite du site / Investigations et instrumentation</b>	Étape 1.1: Réunion de lancement / Recueil d'informations	<ul style="list-style-type: none"><li>- Présenter la méthodologie aux acteurs du projet ;</li><li>- Recueillir et étudier les documents nécessaires à l'étude (schémas, plans, factures, contrats d'exploitation...).</li></ul>
	Étape 1.2: Visite du site / Campagne de mesures	<ul style="list-style-type: none"><li>- Effectuer les relevés et mesures nécessaires à la réalisation de l'état des lieux précis du site et à l'analyse en découlant ;</li><li>- Mettre en place les équipements nécessaires et pertinents pour le relevé de mesures (températures, consommations fluides, etc.) sur une période définie.</li></ul>

<b>Phase2: Analyse des données – rapport intermédiaire</b>	Étape 2.1: Exploitation des données Profils théorique et réels	<ul style="list-style-type: none"><li>- Interpréter les données relevées et recueillies lors des visites afin d'obtenir une «photographie» de l'infrastructure existante et de ses consommations actuelles ainsi que de leur évolution récente</li><li>- Établir un profil énergétique théorique du site (thermique et électrique)</li><li>- Analyser les données dites réelles et théoriques pour valider le modèle et mettre en évidence d'éventuels dysfonctionnements et anomalies</li></ul>
	Étape 2.2: Préconisations de suivi	<ul style="list-style-type: none"><li>- Établir des préconisations de performance énergétique ou d'énergies renouvelables : mesures</li></ul>

## Chapitre III : Audit énergétique industriel et plan de comptage

	et d'amélioration	simples et immédiates ou actions plus complexes pour lesquelles une note technique sera proposée.
	Étape 2.3 : Pré-étude Énergies Renouvelable	- Pré-identification des opportunités d'intégration de systèmes énergies renouvelables
	Étape 2.4 : Hiérarchisation des préconisations	- Hiérarchiser les préconisations en fonction de: ✓ La faisabilité technique ✓ La faisabilité économique ✓ L'impact environnemental
	Étape 2.5 : Plan d'actions	- Proposer un programme de travaux permettant une amélioration de la performance énergétique optimisée de chaque site en tenant compte du budget mobilisable et des objectifs du maître d'ouvrage

<b>Phase3:</b> <b>Présentation du</b> <b>rapport intermédiaire –</b> <b>Proposition d'actions</b>	Étape 3.1: Rédaction du compte rendu	- Rédiger un rapport récapitulant les résultats de l'étude avec synthèse pour chaque site
	Étape 3.2: Réunion de restitution	- Présenter les résultats de l'étude à l'ensemble des acteurs du projet - Synthèse générale de la mission, notamment à l'échelle des différents sites

*Figure III. 2: Les différentes étapes de la méthode et résultats de l'audit.*

### III.6. Résultats d'audit énergétique préliminaire de la société SOFAB

Comme nous avons signalé dans les paragraphes précédents, Cette première action a pour objectif de connaître le site de production sous l'angle de la consommation d'énergie. La finalité est d'établir un état des lieux des usages énergétiques de l'entreprise à partir des données disponibles : factures d'énergie, relevés des compteurs existants, volumes de production... Le bilan peut être présenté sous la forme d'un tableau de synthèse avec une application informatique qui présente les mesures pour les 3 années [4].

La visite du site permet également permettre d'identifier les compteurs déjà en place. En général, les sites sont équipés de compteurs généraux de livraison des énergies (compteurs électriques et/ou de gaz servant à la facturation par le fournisseur d'énergie). Il faut repérer également tous les autres compteurs divisionnaires de répartition présents sur le site ainsi que tous les capteurs qui pourront donner une information sur la consommation d'énergie (capteurs de température sur un réseau d'eau ou dans une chambre à température contrôlée par exemple).

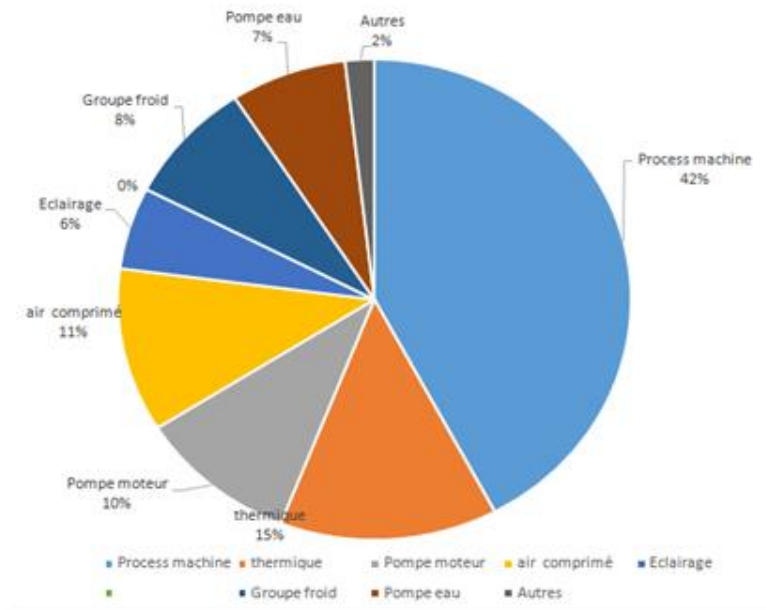
Cet état des lieux permet d'aboutir à une première répartition des consommations en énergie (kWh) et en coût (DH) au niveau global entre les différentes énergies présentes il est aussi possible dans le détail selon les usages. Si nécessaire, cette première répartition peut être affinée par calcul ou par comptage temporaire ou indirect.

Pour avoir une idée claire sur la répartition de consommation par équipement pour les années

## Chapitre III : Audit énergétique industriel et plan de comptage

précédentes 2017,2018- et 2019, nous avons analysé les factures énergétiques. Nous représentons les résultats sous forme d'un diagramme pour les différentes années comme le montre la figure III.3 et le tableau suivant:

Energie consommée	Année 2017	Année 2018	Année 2019
Electrique kwh	4919608	4804391	5003526
Fioul m <sup>3</sup>	323,058	288,292	242,771
Eau m <sup>3</sup>	146392	140415	149115



**Figure III. 3:Pourcentage de la facture énergétique pour chaque usage**

La figure III.3 illustre graphiquement l'état des lieux par énergie et par usage pour l'année 2018. En complément de l'analyse des données des factures, il est recommandé de construire un synoptique, comme illustrée par la figure III.3, en indiquant les informations suivantes :  
Identification des auxiliaires et utilités : groupe(s) d'air comprimé, chaufferie(s), chaudière(s) vapeur, groupe(s) de production de froid,...

- inventaire des énergies utilisées : électricité, gaz, fioul, biomasse, etc.
- visualisation des flux de matières et d'énergie.

D'autre par cet audit préliminaire et d'après la figure III.3 nous constatons le cout élevé par ordre décroissant pour : les Process, thermique, air comprimé, Moteur pompe, froid,.... Ces éléments feront l'objet de notre étude en chapitre IV.

### III.7 Mise en place d'un plan de comptage

#### III.7.1 Introduction

Dans le cadre d'un Système de Management de l'Énergie (SME), le plan de mesurage selon la FDX 30-147 s'intègre dans la structure de la norme ISO 50001 version 2018, chapitres « **Planification** » et « **évaluation de la Performance** ». Le plan de comptage est l'outil qui permet de mesurer et d'analyser en continu la performance énergétique de l'entreprise en fonction de facteurs qui influencent la production du site.

Il est aussi dédié à la gestion de l'énergie et doit répondre à une question simple de la direction si la consommation d'énergie de l'entreprise se justifie et si elle est utilisée à bon escient.

L'objectif d'un plan de comptage est de fournir de l'information à l'entreprise pour lui permettre :

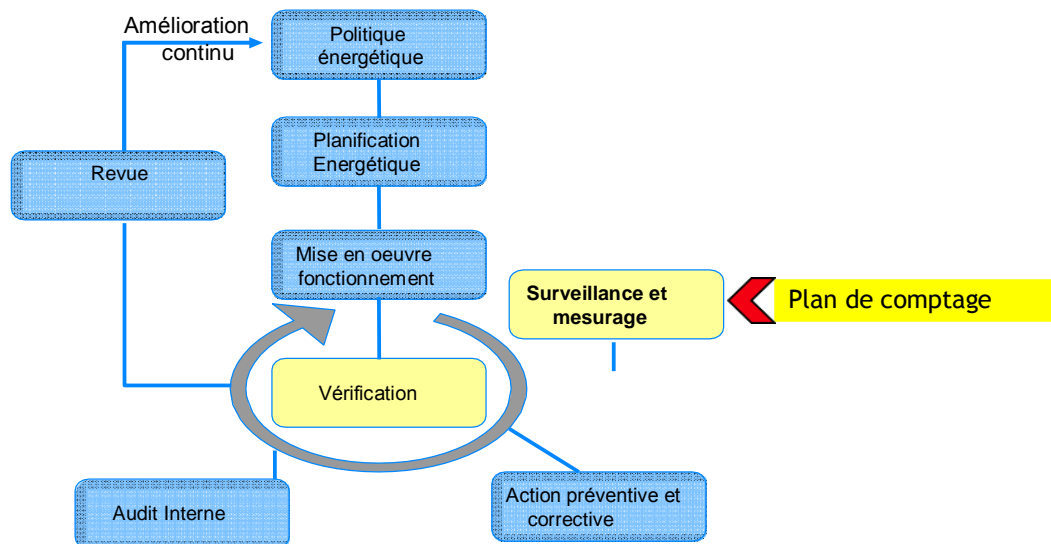
- de mesurer donc de s'assurer de la bonne performance énergétique de son site,
- d'identifier des potentiels d'amélioration,
- de pérenniser les gains effectués.

Pour assurer une maîtrise globale de la gestion de l'énergie au niveau des utilités, des réseaux de distribution ainsi qu'au niveau du processus de fabrication, nous avons accompagné l'entreprise dans la conception et la réalisation de son projet plan de mesurage qui inclut à la fois :

- La réalisation de bilans énergétiques, la détermination d'indicateurs de performance "sur mesure",
- La validation métrologique des instruments de mesure existants,
- Le dimensionnement des nouveaux instruments de mesure,
- L'étude du mode de communication et d'acquisition des données,
- Le paramétrage de l'outil logiciel de management de l'énergie dans le milieu et l'instrumentation de process.

#### III.7.2 Démarche

Cette démarche s'inscrit dans une démarche qualité classique d'amélioration continue comme décrit par la figure III.5.



**Figure III. 4: la démarche d'amélioration continue selon la norme NF EN ISO 50 001.**

Concrètement, la mise en place des plans de comptage permet à l'entreprise d'accéder, sans exhaustivité, aux informations suivantes.

### **Identifier des dérives d'efficacité énergétique :**

Cette dérive d'efficacité énergétique se caractérise par:

- la comparaison de la performance constatée avec celle fournie par la documentation du constructeur telle que la performance d'un groupe de production d'air comprimé en Wh/Nm<sup>3</sup> ou d'un groupe froid en EER/°C ;
- l'identification des talons de consommations d'énergie résiduelles lors d'arrêt de production, généralement synonymes de fuites (comme sur les réseaux d'air comprimé ou de vapeur), de mauvaises fermetures de vannes, etc.

### **Fournir les indicateurs et permettre le suivi de la performance énergétique du site :**

Les données du plan de comptage vont alimenter un tableau de bord (tableaux, graphiques, etc), qui va permettre l'analyse et le suivi de la performance énergétique du site. Il permet à l'entreprise de s'assurer de sa performance énergétique et/ou d'identifier des axes d'amélioration. C'est également une aide à l'affectation comptable des coûts énergétiques sur les différentes activités de l'usine. Il peut aussi être un moyen de communication pour informer et sensibiliser l'encadrement et les équipes de production sur la performance énergétique des procédés.

### **Créer un historique des performances énergétiques de l'entreprise :**

Un plan de comptage permet de suivre la performance énergétique de l'entreprise au cours du temps. C'est donc un indicateur pour a minima maintenir et conserver cette performance avant d'envisager son éventuelle amélioration. Il peut aussi servir sur la base des données enregistrées à projeter la consommation future en fonction des niveaux de production attendus, des augmentations de capacités envisagées ou des conditions climatiques relevées.

### **Quantifier et valider les gains attendus par des actions d'amélioration :**

La mesure de la consommation d'énergie d'un équipement, d'un procédé ou d'un atelier est un élément objectif de son poids énergétique.

Cela permet à l'entreprise :

- de clarifier ses enjeux énergétiques (ordre de grandeurs des usages),
- d'évaluer les gains attendus d'une action menée,
- d'avoir un outil d'aide à la décision lors de la mise en œuvre de projets énergétiques (hiérarchisation des priorités,).

### **III.7.3 Périmètre du plan de mesure énergétique**

Le périmètre du plan de mesurage doit être clairement identifié. Un périmètre intègre à la fois le zoning géographique, organisationnel et énergétique.

### **III.7.4 Identification des instruments de mesure**

#### **III.7.4.1 Mesurages**

Après avoir défini le périmètre énergétique nous avons identifié les appareils, compteurs, existants pour chaque installation dans l'entreprise avant tout nouvel investissement en équipement de comptage.

Nous nous sommes intéressés aux appareils de mesure liés à la performance énergétique. Durant cet inventaire, les caractéristiques des appareils de mesure sont relevées (marque, référence, place de mesure, unité, précision, ...).

Un certain nombre d'équipements de mesurages sont très souvent déjà disponibles sur site mais pas forcément pleinement exploité. Avant d'investir dans de nouveaux équipements, nous avons identifié et nous avons fait l'état des lieux des moyens de comptages et de mesurages déjà existants sur le site :

- compteurs électriques (servant à la facturation),
- sous-compteurs déjà en place mais non utilisés ou valorisés (compteurs électriques dans les locaux TGBT),
- compteurs déjà existants dissimulés dans des armoires fermées,
- compteurs d'eau d'appoint,
- etc.

#### **III.7.4.2 Relevé et récupération des données**

La collecte des données de mesures peut-être manuelle ou automatique via des dispositifs d'acquisition. Pour une entreprise qui démarre une démarche de contrôle de ses consommations, une approche pas à pas est conseillée. L'entreprise a débuté par des relevés d'index manuels et a utilisé dans un premier temps les moyens déjà en place sur le site. Cette approche lui permettra de mieux appréhender ses enjeux et ses besoins pour des investissements futurs[5].

L'investissement dans un dispositif type GTC (Gestion Technique Centralisée) peut s'avérer onéreux notamment pour une PME. Il doit avant tout permettre à l'entreprise de faciliter la récupération et l'analyse des données.

Les avantages sont :

- permettre l'augmentation de la fréquence des relevés et la finesse de l'analyse,
- mieux comprendre l'historique des activités,
- suivre une multitude de points de mesures pour des sites industriels très équipés en moyen de comptages et à multiples procédés,



- supprimer l'obligation de présence humaine pour relever les données.
- Lors de la mise en place d'un dispositif de relève automatique, il faut néanmoins être vigilant sur les points suivants :
  - la vision terrain s'en trouve restreinte ce qui peut rendre plus difficile l'analyse des données,
  - un système figé, par exemple PC de visionnage non connecté au réseau interne, peut rendre l'exploitation des données laborieuses,
  - certaines versions de logiciels ne supportent pas les réactualisations lors des évolutions des systèmes d'exploitation (OS) informatiques,
  - les applications seront préférentiellement installées en réseau avec accès par un navigateur web plutôt que sur un poste informatique dédié,
  - les systèmes d'acquisition automatiques sont capables de traiter finement les consommations d'énergie via les mesures compteurs. En revanche, ils intègrent généralement mal, voire pas du tout les données de production (il n'y a pas forcément de capteurs qui mesure les quantités produites). On rappelle que c'est la connaissance simultanée des deux informations qui permet de déterminer l'IPE.

La récupération des mesures issues des compteurs doit être aisée. Si les relevés sont manuels on veillera à l'accessibilité des index des capteurs.

Si les mesures sont relevées par une GTC et stockées dans une base de données, celle-ci doit rester ouverte pour traiter les données via les outils informatiques conventionnels type tableur.

Le respect des règles d'installation des compteurs et capteurs est essentiel pour obtenir la qualité attendue de mesure. Leur étalonnage périodique est indispensable pour garantir cette qualité dans le temps.


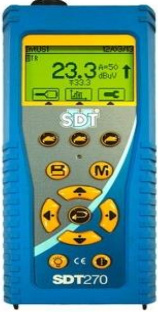
- De la même façon qu'en mesure fixe, les mesures seront corrélées à la production.
- Il existe également disponible dans le commerce des dispositifs de lecture optique d'index qui peuvent être installés ponctuellement sur les compteurs gaz et eau mécaniques.

### **III.7.4.3 Instruments de mesure identifiés**


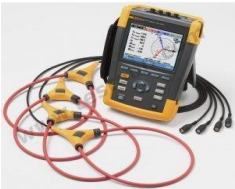
Nous avons identifié les instruments de mesure fiables et précis et tenant compte des caractéristiques des équipements de production: gamme de température, pression, vibration,... nous distinguons trois types d'instrument :

- Instruments de mesure énergétique ;
- Instruments de mesure de maintenance conditionnelle type vibration ;
- Instruments de mesure de maintenance alignement laser.




## Chapitre III : Audit énergétique industriel et plan de comptage

Techniques de surveillance	Caractéristiques	Type de mesure	Principaux avantages	Principales limitations	Champ d'applications privilégiés
<b>EMERSON CSI 2130 Vibrotest</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vitesse d'analyse des données Spectre : 1600 lignes/1000 Hz à 0,5 sec/avg ;</li> <li>- la planche de bruit Moins de 0,2 microvolts par racine Hz sur 1 000 Hz.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mesure de désalignement, de balourd, des défauts d'engrenage, de roulement et électrique ;</li> <li>- Analyse avancée des vibrations, de transitoire, des signaux temporels et des spectres ;</li> <li>- Surveillance des moteurs ;</li> <li>- Détection de la vitesse de rotation ;</li> <li>- Détection des défauts de rotor ;</li> <li>- Analyse de phase et d'orbite.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Détection de défauts à un stade précoce ;</li> <li>- Possibilité de réaliser un diagnostic approfondi ;</li> <li>- Autorise une surveillance continue.</li> <li>- Permet de surveiller de l'équipement à distance ;</li> <li>- Les mesures peuvent être enregistrées sur la carte PC ;</li> <li>- Haute fréquence et haute résolution.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Spectre parfois difficiles.</li> <li>- Dans le cas de la surveillance continue, installations relativement coûteuses.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Détection des défauts de tous les organes cinématiques de la machine (balourd, défauts d'alignement, jeux, etc.) et de sa structure.</li> </ul>
<b>Analyse acoustique SDT270</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mesure des signaux ultrasonores sur une largeur de bande de 100 kHz ;</li> <li>- Procède à l'acquisition de signaux avec une fréquence d'échantillonnage jusqu'à 256 kHz ;</li> <li>- Permet l'acquisition de signaux de longues durées ;</li> <li>- Intègre un thermomètre et un tachymètre laser ;</li> <li>- Fonctionne sous une base de données SQL ;</li> <li>- Contient un identifiant des opérateurs ;</li> <li>- Assure une traçabilité complète des mesures depuis l'opérateur jusqu'au capteur ;</li> <li>- Préviens l'opérateur quand une mesure dépasse un seuil d'alarme ;</li> <li>- Possède une adresse IP</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La détection de fuites d'air comprimé, de CO2 et de gaz ;</li> <li>- Le contrôle de la lubrification ;</li> <li>- La surveillance des machines ;</li> <li>- L'inspection des purgeurs vapeur et vannes ;</li> <li>- L'inspection des installations électriques</li> <li>- Le contrôle d'étanchéité.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permet de détecter de l'apparition de défauts audibles</li> <li>- Autorise une surveillance continue</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sensibilité au bruit ambiant.</li> <li>- Diagnostic souvent difficile à réaliser.</li> <li>- Problèmes de répétitivité des mesures.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Détection d'un bruit inhabituel pouvant ensuite être analysé par analyse vibratoire.</li> </ul>



## Chapitre III : Audit énergétique industriel et plan de comptage

	(Internet) ; Peut-être contrôlé et piloté à distance ; - Dispose de deux voies de mesure.				
<b>Caméra thermique FLIR T440 :</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Thermomètre sans contact à image thermique ;</li> <li>- Etendue de mesure : -20 à +1200°C ;</li> <li>- Enregistrer des images et des vidéos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Suivre les canalisations transportant de l'énergie thermique pour détecter les défauts d'isolation ou de faire le point sur les équipements dont les températures sont anormales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- sans contacts ;</li> <li>- Elle nous donne une cartographie de tous les éléments mesurés ;</li> <li>- La possibilité de relier la caméra avec un PC via Wifi.</li> <li>- Elle contient plusieurs mode de fonctionnement (image, video ...).</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Détection des anomalies de température au niveau de notre système.</li> </ul>
<b>Qualistar plus C.A8335:</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Surveillance de l'énergie consommée, et des puissances actives, réactives, non actives, apparentes et déformantes ;</li> <li>- Harmoniques, THD ;</li> <li>- Papillotement (Flicker) ;</li> <li>- Déséquilibre ;</li> <li>- Bosses et creux de tension ;</li> <li>- Transitoire ;</li> <li>- Fréquence ;</li> <li>- Courant de démarrage ;</li> <li>- Facteur de puissance (Cos <math>\phi</math>) ;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mesure des puissances apparentes, actives, réactives, non actives, et déformantes.</li> <li>- Mesure du courant de neutre et des 3 phases (A partir de 100mA via capteur Flex ), de la tension neutre terre et des 3 phases.</li> <li>- Mesure des énergies totales et par phase (Tonne Equivalent Pétrole...).</li> <li>- Harmoniques : mesure, calcul et affichage jusqu'au 50e rang.</li> <li>- Analyseur de qualité de l'énergie.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Entrées Tension/Courant, munies de bagues de repérage couleur ;</li> <li>- Liaison avec le PC via une connexion USB ;</li> <li>- Accès direct aux principales mesures ;</li> <li>- Affichage en temps réel des mesures.</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mesurer l'énergie consommée par le moteur et le système complet.</li> <li>- Détection des anomalies</li> </ul>
<b>Pince multimètre numérique TRMS AC, DC, AC+DC compacte (Chauvin Arnoux F205)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Afficheur rétro-éclairé 6 000 points ;</li> <li>- Puissances mono et tri équilibré AC et DC (W, var, VA, PF) et taux harmoniques (THDf, THDr) ;</li> <li>- 600A AC / 900A DC - 1000V</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mesure des courants jusqu'à 600 A dans des chemins de câble étroits ;</li> <li>- La prise de mesures de courant DC, de fréquence, de résistance et de capacité ;</li> <li>- Mesure la tension en AC/DC avec</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Simple à utiliser ;</li> <li>- Mesure instantanée et sans contacte.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'appareille est sensible au vibration et au choc ;</li> <li>- Elle mesure juste les petites et les moyennes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pour mesurer les tensions et les courants dans le système.</li> </ul>



## Chapitre III : Audit énergétique industriel et plan de comptage

	<p>AC/DC;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Détection AC/DC automatique ;</li> <li>- Résistance, continuité... ;</li> <li>- Mesure des surintensités et aussi MIN, MAX, PEAK... ;</li> <li>- Rotation de phases« Méthode 2 fils » ;</li> <li>- Mesure différentielle (<math>\Delta R</math>) et relative (<math>\Delta R/R\%</math>) ;</li> <li>- <math>\emptyset</math> d'en serrage : 34mm.</li> </ul>	<p>et sans contact, la continuité de circuits, d'interrupteurs, de fusibles et de contacts ; - dispose également d'un afficheur rétro éclairé ainsi qu'un lampe LED pour les espaces sombres.</p>		<p>tension ;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Il n' y a pas une liaison avec le PC.</li> </ul>	
<p><b>Chauvin Arnoux - CA5275 - P01196775</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mesure de la tension : 100 V AC / DC, résolution maximale 0,1 mV ;</li> <li>- Précision : 0,2 % + 2 digits ;</li> <li>- Fonction mesure <math>V_{Lowz}</math> pour éviter les erreurs de mesure liées aux tensions parasites ;</li> <li>- Intensité directe courant AC/DC 10 A, résolution maximale : 0,1 <math>\mu A</math> ;</li> <li>- Mesure de la résistance jusqu'à 60 M<math>\Omega</math>, résolution maximale: 0,1<math>\Omega</math> ;</li> <li>- Fréquence jusqu'à 50 kHz ;</li> <li>- Mesure de la capacité jusqu'à 60mF, résolution maximale : 0,001nF ;</li> <li>- Saisie MIN/MAX ;</li> <li>- Contrôle de continuité et test des diodes.</li> </ul>	<p>- Mesure électriques (Tension, Courant, Résistance) ;</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- la pareille est petite et pratique ;</li> <li>- Elle contient la norme IP54 ;</li> <li>- Simple à utiliser.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-La tension monte jusqu'à 1000 VAC/DC</li> <li>-La résistance jusqu'à 60 M<math>\Omega</math></li> <li>-La capacité jusqu'à 60 mF</li> </ul>	<p>instrument de mesure qui sert à mesurer des grandeurs peu n'importe la champs</p>
<p><b>KIMO AMI310</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Module pression Capteur piezorésistif</li> <li>- Fil chaud</li> <li>- Hélice <math>\emptyset</math> 70 et 100 mm</li> <li>- Hélice <math>\emptyset</math> 14 mm</li> <li>- Sondes hygrométrie/Temp</li> <li>- Sondes thermocouple Type K. J et T classe 1</li> </ul>	<p>- Mesure de l'hygrométrie, de la température, du CO<sub>2</sub>, du CO, de la vitesse, du débit, de la pression, de la tachymétrie (selon modèle et sonde). Mesurer la combustion, la température, l'humidité, la pression, le débit et la qualité</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Enregistrement automatique des valeurs mesurés dans la carte SD ;</li> <li>- Un menu simple et configurable ;</li> <li>- Résultats très fiables et très précis.</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pour mesurer la combustion, le débit et la qualité d'air.</li> <li>-Détecter les fuites de combustion.</li> </ul>


## Chapitre III : Audit énergétique industriel et plan de comptage

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sondes Pt100 Smart-plus</li> <li>- Module conditions climatiques</li> <li>- Sondes qualité d'air</li> <li>- Sonde multifonction</li> <li>- Sonde omnidirectionnelle</li> <li>- Sonde tachymétrie</li> <li>- Sonde fuite de gaz.</li> </ul>	<p>d'air.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Les mesures peuvent être enregistrées sur une carte SD.</li> <li>-Contient un Luxmètre .</li> </ul>			
<p><b>Easy-Laser E710</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Résolution : 0,001 mm [0,05 mils].</li> <li>- Précision de mesure : <math>\pm 1\mu\text{m} \pm 1\%</math>;</li> <li>- Gamme de mesure: Jusqu'à 20 m;</li> <li>- Type de laser: Laser à diode</li> <li>- Longueur d'onde laser: 630 à 680nm ;</li> <li>- Inclinomètre électronique: Résolution 0,1 ° ;</li> <li>- Capteurs thermiques Précision <math>\pm 1</math> °C ;</li> <li>- Protection environnementale: Classe IP 66 et 67 ;</li> <li>- Gamme de température : -10 à 50 °C .</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alignement laser ;</li> <li>- Aligner une machine ou un moteur ;</li> <li>- Vérifiez la base et le jeu des roulements;</li> <li>- Vérifier le niveau de vibration ;</li> <li>- Alignement de Poulie/courroie.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prose en charge et entretien rapides ;</li> <li>- Fiabilité sur le long terme ;</li> <li>- Sauvegarder les données dans une carte mémoire ou dans un USB.</li> <li>- Facile à utiliser.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La longueur d'onde laser est petite ;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pour aligner notre système.</li> </ul>
 <p><b>Mesure de débit</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Précision typique après étalonnage à sec : 0,5% (DN&gt; 100mm)</li> <li>-Mesure bidirectionnelle</li> <li>-Répétabilité : 0,05%, linéarité : 0,1 % (sur boucle de test)</li> <li>-Dosage volumétrique de 1 cl à 100 m3</li> <li>-Correction intégrée pour les flux - multiproduits et les transitions laminaires/turbulentes</li> <li>-Pas de perte de pression</li> <li>-Aucun dommage au tuyau</li> <li>Pas ou très peu d'entretien : pas de dérive dans le temps</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-calcule la vitesse et le débit du fluide</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- capable à mesurer le débit dans toutes applications d'eau, écoulement de divers produits pétroliers, process des industries pétrochimiques et alimentaires</li> <li>-offre la possibilité d'adapter son fonctionnement aux conditions de site les plus</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-convient aux tuyaux de 4 à 3300 mm de diamètre</li> <li>-Autonomie de la batterie : jusqu'à 40 heures en fonctionnement continu</li> <li>-Température de tuyau de -100°C à + 180°C</li> <li>-Très haute précision et sensibilité : 0,001 m/s jusqu'à... 99m/s</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Génie climatique</li> <li>-Génie civile</li> <li>-Hydrocarbures</li> </ul>

## Chapitre III : Audit énergétique industriel et plan de comptage

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Courant de sortie 4-20 mA</li> </ul>		difficiles		
 <p style="text-align: center;">Compteur</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Installation standard sur rail DIN 35 mm, conforme à la norme DIN EN50022</li> <li>-Largeur bipolaire, conforme à la norme DIN43880</li> <li>-Mesure unidirectionnelle monophasé deux fils consommation d'énergie active.</li> <li>- Conforme à la norme GB / T17245.321-2008</li> <li>- Tension : 220V</li> <li>- Dimensions : 8,3 x 6,5 cm / 3,27 x 2,56 pouces</li> <li>-Poids : 136 g</li> </ul>	Calcul de consommation d'énergie.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cache-bornes intégré, agréable, sûr pour protéger l'électricité</li> <li>- Configuration standard</li> <li>Affichage 5 + 1 chiffres (99999.1kWh)</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Calcul la consommation d'énergie électrique</li> <li>Peut n'importe le secteur.</li> </ul>
 <p style="text-align: center;">Thermomètre</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Plage de mesure : -50 à 800°C (-58 à 1472°F)</li> <li>-sensibilité spectrale : 8 ~ 14 µm.</li> <li>- Dimensions : 146 mm x 104 mm x 43 mm.</li> <li>-Autonomie de la batterie : jusqu'à 40 heures en fonctionnement continu.</li> <li>-Poids : 300g.</li> <li>-Laser : Classe II.</li> <li>-Température de stockage :-20°C à +50°C.</li> </ul>	Mesure de température	<ul style="list-style-type: none"> <li>- la lentille regroupe les ondes électromagnétiques émises par un corps dans la plage de 8 à 14 µm</li> <li>- Temps de réponse : 150 m.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Un thermomètre infrarouge peut être considéré comme une caméra.</li> <li>- laser pour cibler l'appareil à tester</li> <li>- alarme visuelle et acoustique réglable</li> <li>-balayage rapide des points chauds et froids</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Utiliser dans différents secteurs afin de mesure la température</li> </ul>

## Chapitre III : Audit énergétique industriel et plan de comptage

<p><b>Appareil ultrasons</b></p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Dimensions : 267 mm x 208 mm x 94 mm.</li> <li>-Poids : 3.4 Kg avec la batterie.</li> <li>-Résolution : 800 x 600 pixels.</li> <li>-Résistance au choc selon la norme MIL-STD-810G 516.6.</li> <li>-Température d'entreposage : de -20°C à 60°C sans batterie et -20°C à 70°C avec batterie.</li> <li>- Fréquence de numérisation : 100MHz.</li> <li>-Entrée numérique : 4 entrées numériques, 5V.</li> <li>-Sortie numérique : 3 sortie numérique, 5V, 15 mA maximum par sortie</li> <li>-impédance de sortie : 35 <math>\Omega</math> (en mode par écho d'impulsion); 30 <math>\Omega</math> (en mode à émission-réception séparées).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-un appareil de recherche de défauts</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Méthode facile et efficace de la détection des défauts.</li> <li>-Permet aussi de détecter les pertes d'épaisseur et d'autres types de dommages.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Température de fonctionnement : de -10°C à 45°C.</li> <li>--Sortie d'alimentation : 5V, 500 mA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-inspection des composants industriels</li> <li>-Inspection des soudures par ultrasons.</li> <li>-Inspection des matériaux composites.</li> </ul>
--	--	--	---	---	--

**Figure III. 5: Instruments de mesure identifiés.**

### III.8 Méthodologie de déploiement d'un plan de comptage

#### III.8.1 Introduction

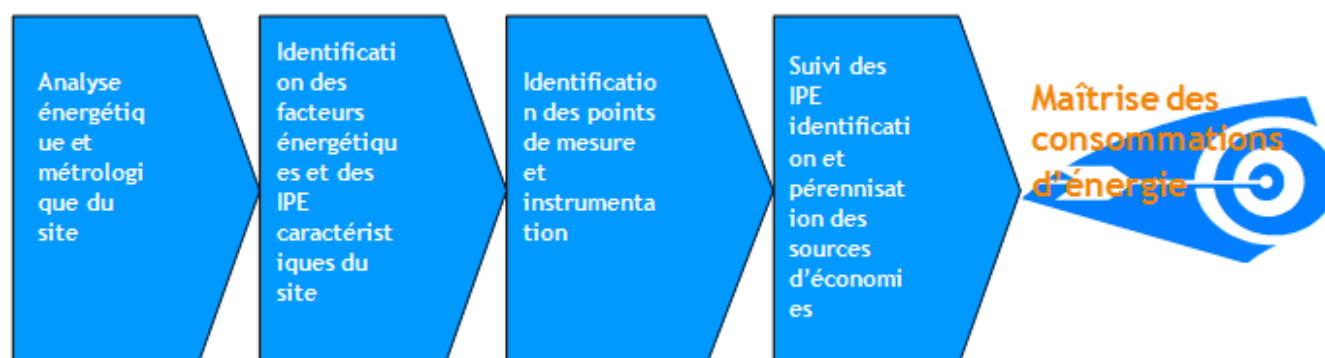
Les démarches d'amélioration de la performance énergétique, notamment conduites dans le cadre de la mise en œuvre de systèmes de management de l'énergie (selon l'iso 50001), reposent en partie sur la réalisation d'un plan de mesurage/ comptage de l'énergie nous présentons quelques définitions:

Mesurage est le processus consistant à obtenir physiquement une ou plusieurs valeurs que l'on peut raisonnablement attribuer à une grandeur [6].

Comptage est défini comme l'intégration continue de grandeurs mesurées en fonction du temps.

Plan de mesurage est ensemble de tâches organisées dans le temps comprenant la conception, la mise en œuvre, l'exploitation, la maintenance et l'amélioration d'un système de mesurage.

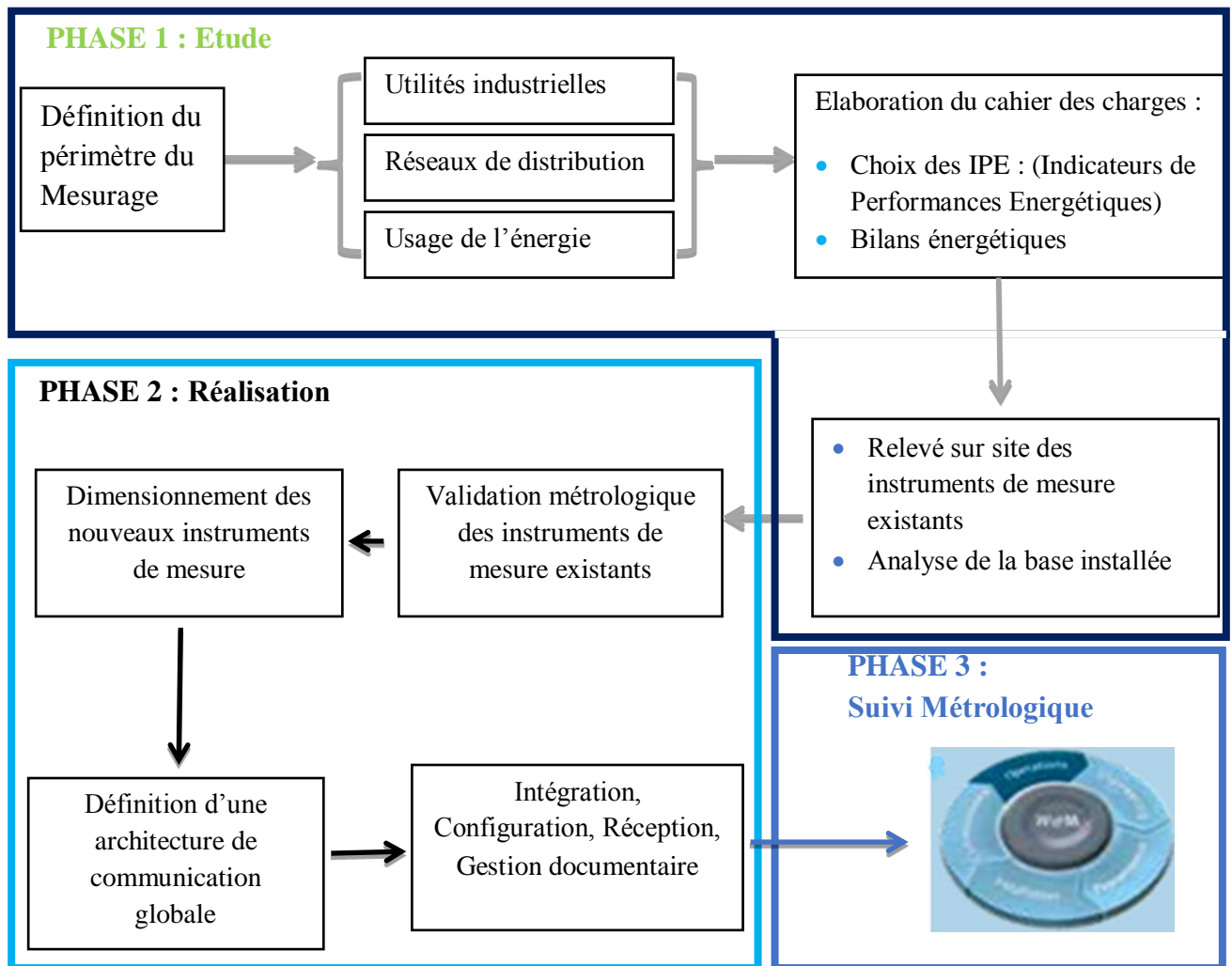
Les différentes étapes de la méthode de la méthodologie proposée se déroule schématiquement en quatre étapes telles que présentées par la figure III. 7.



*Figure III. 6: les 4 étapes de la méthodologie de déploiement d'un plan de comptage.*

#### III.8.2 Le plan de mesurage : une méthodologie au cœur de l'ISO 50001





**Figure III. 7:méthodologie au cœur de l'ISO 50001.**

Le plan de comptage doit être considéré selon les préconisations de la norme NF EN ISO 50001 c'est-à-dire le suivi des usages énergétiques significatifs des principaux postes de consommation ou des postes à fort potentiel d'amélioration.

**Les processus de mesurage consiste à :**

-Dégager les différentes opérations unitaires impliquées dans le procédé de fabrication (Séchage, évaporation, chauffage, cuisson, etc.),

-Décrire par des schémas simples ces opérations ainsi que la nature des flux thermique impliqués,

-Donner un aperçu théorique sur les performances de ces opérations,

-Relever réelles d'exploitation des équipements impliqués (température entrée sortie, concentration, humidité, etc.), Commentaires et recommandations (avec des notes de calcul des économies escomptées),

En fin nous allons faire des recommandations (avec des notes de calcul des économies escomptées).

### **III.8.3.2 Deuxième étape : identifier les facteurs d'influence et les indices de performances énergétiques du site(IPE)**

Après avoir réalisé l'état des lieux énergétiques, nous avons identifié les facteurs d'influence qui sont responsables de la consommation d'énergie du site : quantité de produits traités ou produits (en nombre, en tonnage, etc), heures de fonctionnement de la ligne de production....D'autres facteurs comme le volume d'eau chaude produit ou utilisé, la température extérieure, la surface de chambre froide, peuvent également être pertinent selon la nature des procédés[7].

Nous avons identifié les facteurs qui influencent prioritairement la consommation d'énergie cela nous permet de choisir les IPE adaptés.

#### **III.8.3.2.1 Les indicateurs de performance énergétique**

Un système de mesurage performant, tel que défini par la norme EN 17267, est un outil incontournable pour le pilotage de la maintenance préventive des utilités industrielles. Les Indicateurs de Performances Energétiques (IPE) sont au cœur de cette démarche, ils permettent à la fois de caractériser les performances énergétiques d'un équipement, de diagnostiquer et d'analyser les sources de défaillance et ainsi identifier des potentiels d'amélioration.

**L'objectif est alors de définir les IPE (les Indices de Performances Energétiques) représentatifs du site.** Ces indices seront calculés comme le rapport entre une consommation d'énergie du site par un des facteurs d'influence. En général, un IPE global permettra de suivre l'évolution de la performance énergétique globale du site. Il sera complété par des IPE secondaires qui pourront suivre plus spécifiquement un procédé identifié comme critique, une performance par nature d'énergie, etc. Les IPE sont propres à chaque entreprise, ils sont définis en fonction des objectifs stratégiques visés par l'entreprise. Généralement:

**IPE (Indice de Performance Énergétique) :** exprimé en (kWh, litre d'eau, m<sup>3</sup>de FIOUL),... consommés / unité produite d'où la baisse de l'IPE entraine:

La baisse de la consommation énergétique par unité produite entraine la baisse de la facture énergétique à production constante.

#### **III.3.2.2 Identification des indicateurs de performance énergétique :**

Avant de commencer par des actions de maintenance correctives, préventive, ou améliorative pour remédier à ce problème de perte d'énergie, nous étions amenés d'abord à formuler la problématique mathématiquement et donner la preuve mesurable à ces pertes que ce soit à l'échelle de la consommation ou bien au niveau financier.

Pour conclure sur l'état de la consommation d'énergie de l'usine SOFAB, nous avons défini les ratios énergétiques comme étant des indicateurs de performance énergétique.

L'indicateur de performance primordiale à l'unité SOFAB est le ratio de l'énergie, il est défini par le rapport des litres de boissons produites en litres sur l'énergie consommée.

## Chapitre III : Audit énergétique industriel et plan de comptage

---

Depuis le mois de janvier 2014 le ratio électrique varie entre 12 L/KWh et 16 L/KWh. Ces résultats restent loin de l'objectif du programme fixé à 18 L/KWh.

Choix des indicateurs de performance énergétique : Nous avons trois indicateurs pertinents qui peuvent donner une idée claire sur l'évolution de la consommation d'énergie. Ce choix est défini selon la facture énergétique.

- ❖ Pour la partiel thermique nous nous intéressons à l'indicateur suivant :R1

$$\text{Ratio 1} = \frac{\text{litres de boissons produits}}{\text{Quantité de fuel consommé}} \text{ [L/M3]}$$

- ❖ Pour la consommation d'eau nous avons l'indicateur R2 suivant :

$$\text{Ratio 2} = \text{litre de boisson produits/litre d'eau consommé [L/M3]}$$

Pour la consommation d'électricité nous avons l'indicateur suivant :



$$\text{Ratio 3} = \frac{\text{Litres de boissons produites (L)}}{\text{Energie électrique consommée KWh}}$$

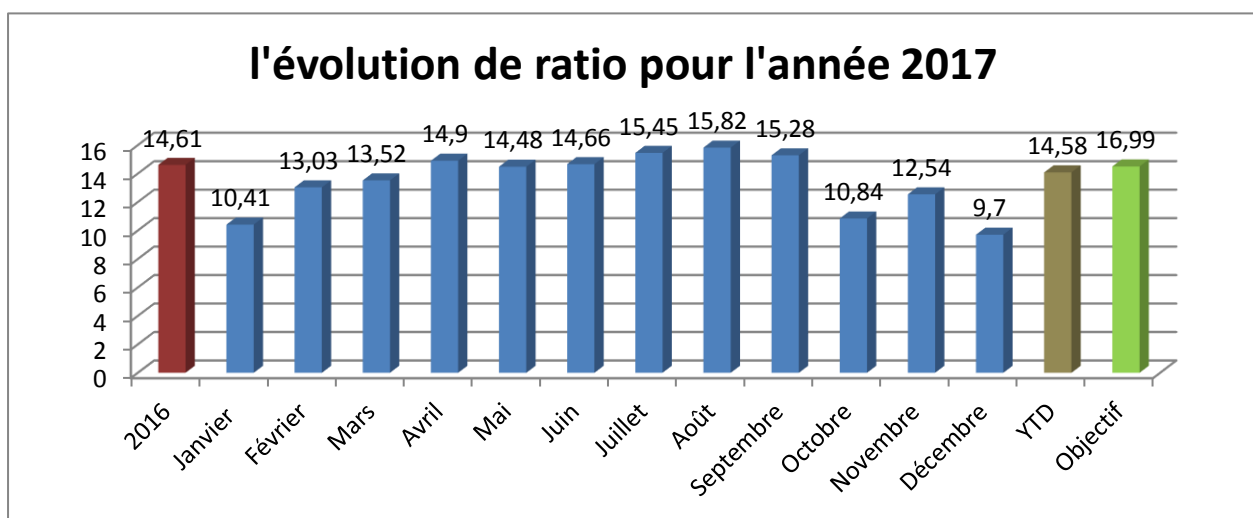
D'autres indicateurs peuvent être utilisés tel que le ratio 4, concernant la station de production d'air comprimé, mais l'entreprise s'est limitée au quatre principaux indicateurs ci dessus.

$$\text{Ratio 4} = \frac{\text{Energie électrique consommée}}{\text{Débit d'air produit}} \text{ [Wh/m3]}$$

Notre objectif consiste à analyser ces indicateurs pour se renseigner de l'état actuel des équipements dans le but de chercher les causes racines engendrant l'augmentation de leur consommation d'énergie, par conséquent les améliorer en proposant des solutions adéquates en terme financier et technique. Pour cette partie de choix des indicateurs a suscité une grande importance vus son intérêt vital de couplage production et énergie.

Après étude des bases de données concernant les ratios, enregistrées au niveau du système informatique de l'entreprise, nous avons pu obtenir les histogrammes de l'évolution de ratio pour les années 2017, 2018 et 2019.

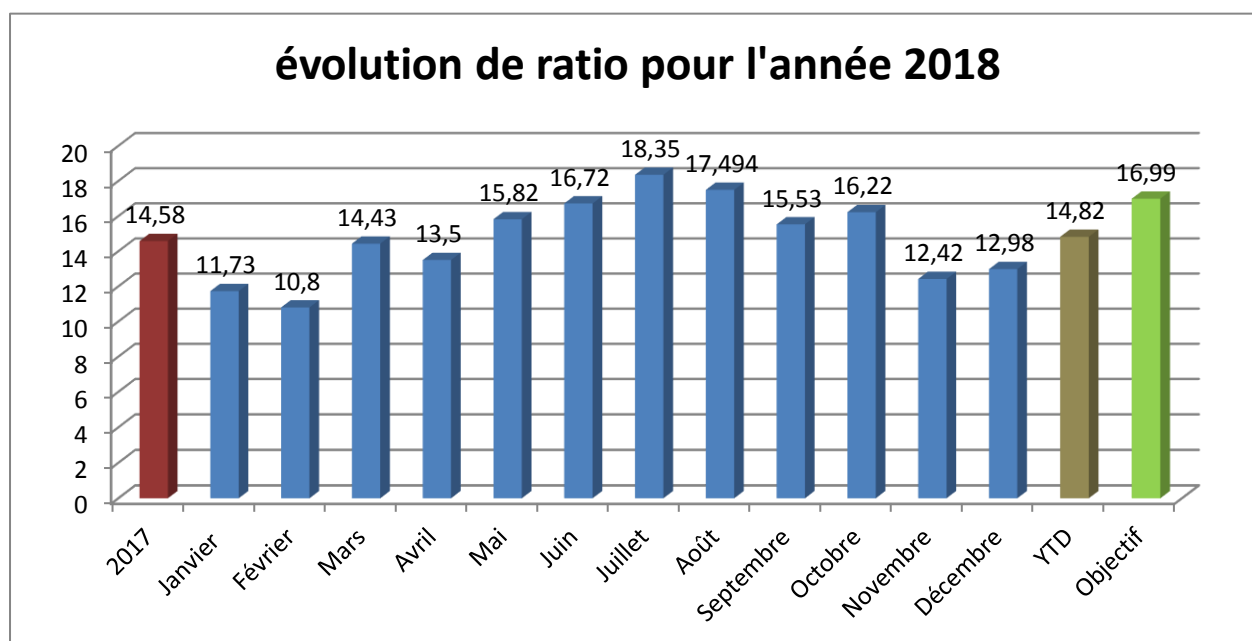
- 2017 :



**Figure III. 8:Histogramme de l'évolution de ratio pour l'année 2017.**

En comparant le ratio de 2017 avec celui de 2016 on remarque qu'il y a une diminution pour le ratio et l'objectif n'est pas atteint.

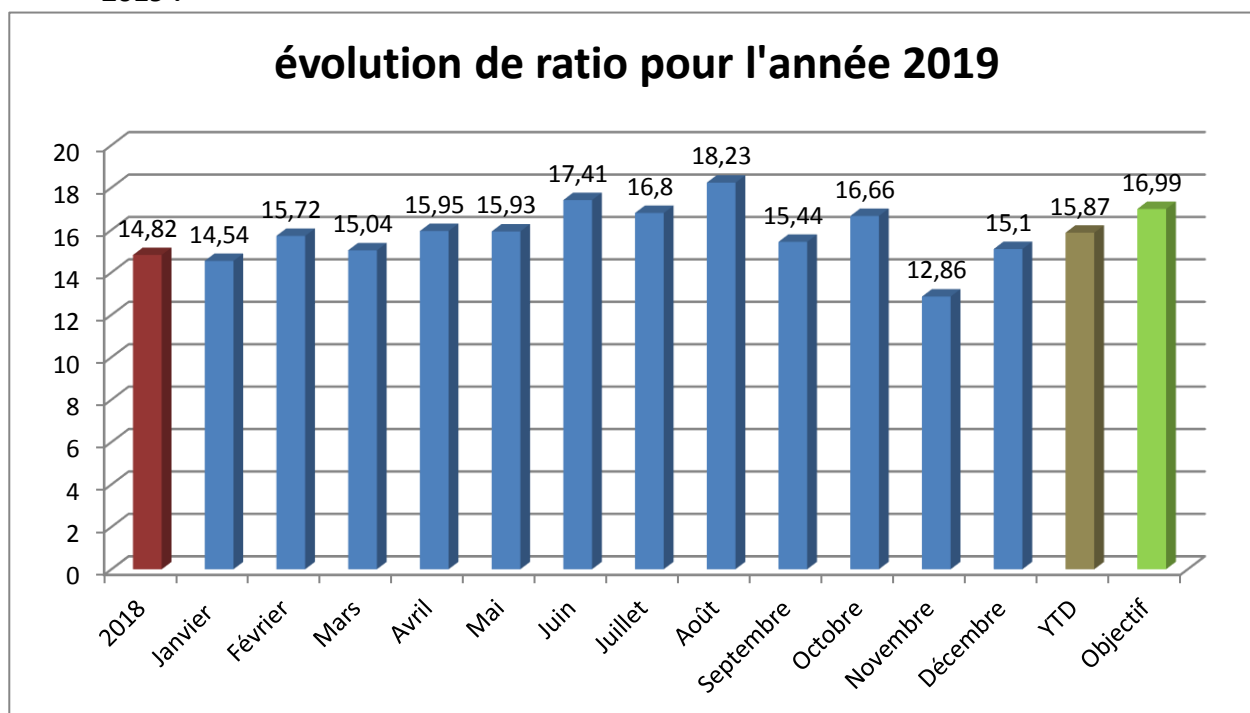
- **2018 :**



**Figure III. 9:Histogramme de l'évolution de ratio pour l'année 2018.**

Le ratio en 2018 atteint est supérieur à celui de 2017 mais il est loin de l'objectif.

• **2019 :**



**Figure III. 10:Histogramme de l'évolution de ratio pour l'année 2019.**

D'après ces résultats on constate qu'il y a une amélioration intéressante pour l'année 2019 par rapport aux années précédentes qui est due à la sensibilisation du personnel et aux actions de maintenance qui ont eu lieu.

**Tableau III. 1:consommation d'énergie en fonction du litre de produit selon les années.**

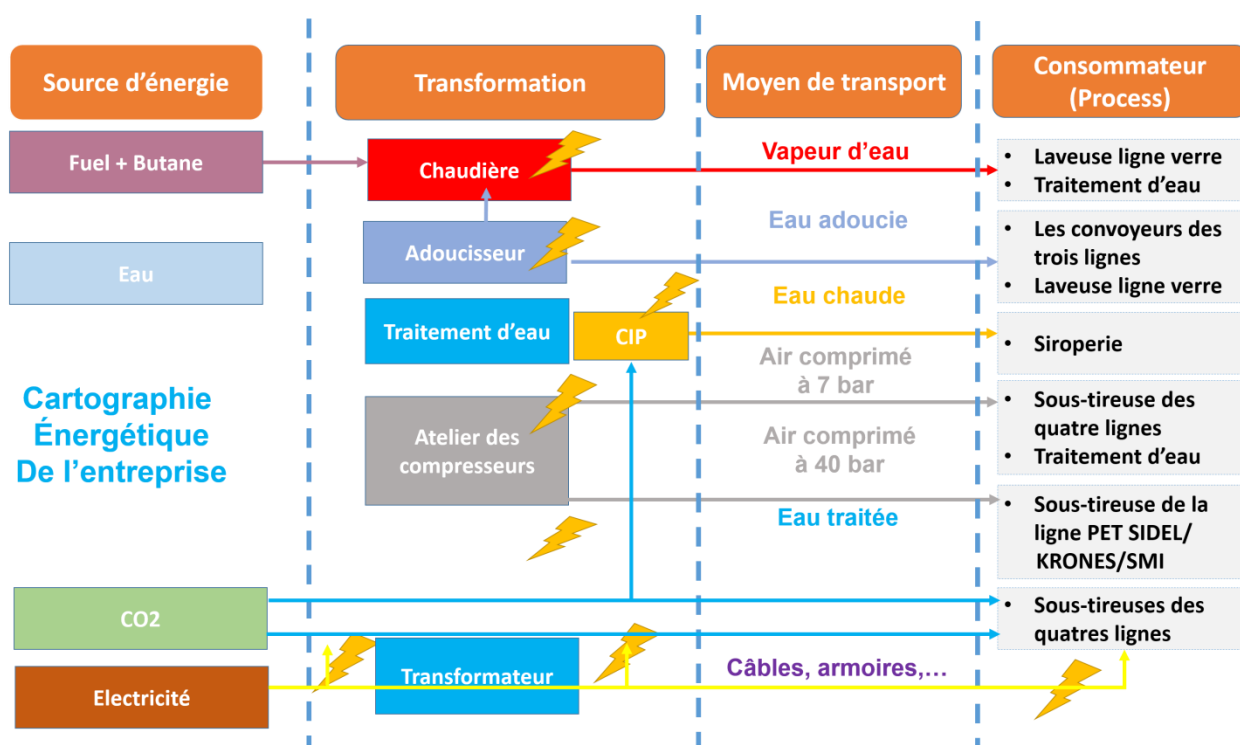
Année	Nombre de litre boisson/ KWH	Nombre de litre boisson/ litre de fioul	Nombre de litre d'eau/ litre boisson
2017	14,58	214,5	3,2
2018	14,82	215	2,2
2019	15,87	275	1,95

### III.8.3.3 Troisième étape : identifier les points de mesure

#### III.8.3.3.1 cartographie des flux énergétiques

Nous avons identifié et caractériser les flux significatifs d'énergie au sein de son périmètre de mesure défini.

À partir des audits ou des revues énergétiques, l'analyse des consommations des différents usages permet de dresser une cartographie des énergies utilisées et des proportions des flux énergétiques.



**Figure III. 11:Cartographie énergétique.**

Cette démarche précédente a permis pour cette entreprise d'élaborer la cartographie des flux d'énergie peut être représentée sous forme tableur ou sous forme visuelle.

Selon la cartographie des énergies au sein de la SOFAB :

- Le butane et le fuel sont exploités au niveau de la chaudière et ce pour produire de la vapeur qui est utilisée principalement dans la laveuse-bouteille.
- L'eau est quasiment omniprésente dans tout le site. Cette source d'énergie distribuée par l'ONEE est stockée dans une citerne avant de subir une première transformation dans deux postes : l'adoucisseur et la salle de traitement d'eau.
- L'adoucisseur génère de l'eau adoucie qui est soit exploitée directement dans les convoyeurs des trois lignes de production soit elle subit une seconde transformation au niveau de la chaudière pour générer de la vapeur, ou alors au niveau des compresseurs pour refroidir leurs moteurs, qui à leur tour produisent de l'air comprimé sous deux pressions : 7 bars qui est utilisé dans les sous-tireuses des trois lignes et 40 bars qui est utilisé dans les souffleuses des deux lignes de plastique.
- Pour la salle de traitement d'eau elle permet de produire de l'eau traitée qui est exploitée dans les sous-tireuses des trois lignes comme matière première ou elle est transformée en eau chaude au niveau de la salle du nettoyage en place CIP (Cleaning In Place) pour être envoyée vers la siroperie.
- Concernant CO<sub>2</sub>, il est exploité sans aucune transformation dans les sous-tireuses des trois lignes.
- Finalement l'électricité figure dans tous les postes de transformation du fait qu'elle est nécessaire pour l'alimentation de tous les équipements

## Chapitre III : Audit énergétique industriel et plan de comptage

Pour faciliter l'approche du plan de mesurage, nous avons pu définir un découpage par échelons ou niveaux d'approfondissement comme suit :

	Niveau 0	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
<b>Information</b>	<p>Sources énergétiques</p> <p>Concerne la source énergétique utilisée telle que l'électricité, les combustibles ou autres énergies entrantes au sein de la structure</p>	<p>Concerne la conversion d'une source énergétique en un vecteur énergétique (exemple : vapeur, eau chaude, eau glacée, air comprimé, électricité, BT, ...)</p>	<p>Permet d'identifier les pertes sur les réseaux (fuites, déperditions, ...) des vecteurs énergétiques</p>	<p>Permet une répartition par zones de consommation regroupant plusieurs usages énergétiques</p>	<p>Identification finale par usages énergétiques et par équipement</p>
<b>Finalité de Comptage</b>	<p>Performance Globale - IPE</p> <p>Agrégé - Contrôle facturation</p>	<p>Performance installations de transformation (production vapeur, froid, air, ...)</p>	<p>Performance réseaux de distribution</p>	<p>Performance secteur d'usage- IPE</p>	<p>Performance usage installation / équipements</p>
<b>Comptage</b>	<p>Comptage énergétique de facturation</p>	<p>Comptage énergétique en amont et en aval pour identifier une performance Utilités</p>	<p>Comptage énergétique en amont et en aval pour identifier la performance Réseaux</p>	<p>Comptage énergétique d'entrée (éventuellement de sortie) de zones ou de procédé</p>	<p>Comptage par usages ou par équipements</p>

**Figure III. 12: Principe général d'un plan de comptage.**

### III.8.3.3.2 Points de mesure

Pour être en capacité de publier à intervalle régulier les IPE retenus lors de la deuxième étape, nous avons mise en place au sein de l'entreprise une collecte de données qui va alimenter des tableaux de bord. Ces données seront de deux natures : des énergies consommées d'une part, les valeurs ou quantités des facteurs d'influence d'autre part.

Pour les énergies, les compteurs nécessaires à la collecte de ces données devront être installés au point de comptage retenu. Bien évidemment les compteurs en place seront prioritairement exploités. La quantité de compteurs supplémentaires à installer dépendra du détail d'analyse

## Chapitre III : Audit énergétique industriel et plan de comptage

---

recherché par le plan de comptage. Pour le choix de capteurs et instrument de mesure, on pourra utilement se reporter à la figure III.6 précédent qui résume tous les instruments définis pour ce plan de comptage.

### **III.8.3.4 Quatrième étape : suivi des IPE, identification et pérennisation des sources d'économies d'énergie**

Cette dernière étape est l'aboutissement du plan de comptage par l'exploitation dans le temps des informations fournies par les IPE intégrés dans un tableau de bord énergétique.

L'analyse énergétique initiale du site puis les variations et évolutions des IPE doivent permettre d'identifier des gains potentiels d'énergie. Les actions engagées pour optimiser la consommation énergétique devront se traduire par une amélioration à court terme des IPE du site.

## **III.9 Conclusion du chapitre**

Dans ce chapitre nous avons utilisé le système de management de l'énergie comme outils pour auditer le système industriel de la société SOFAB. Nous avons aussi mis au point un ensemble d'instrument pour relever les paramètres énergétiques et leurs suivis. Des indicateurs sont identifiés pour mesurer la performance énergétique. Le plan de mesurage mis au point renforcé par une cartographie de différentes énergies permettent de suivre une méthodologie pour évaluer et suivre facilement les différents paramètres en différents points de mesure.



### Références :

- [1] BP-X30 - Référentiel français - Diagnostic énergétique dans l'industrie.
- [2] EN 16247-3 - Norme européenne - Audits énergétiques – Exigences et recommandations de mise en œuvre pour les Procédés ;
- [3] ISO 50002 - Norme internationale - Audits énergétiques – Exigences et recommandations de mise en œuvre ;
- [4] EN 16231 - Normes européennes - Méthodologie de benchmarking de l'efficacité énergétique.
- [5] ISO 50001 - Norme internationale - SMé – Exigences et recommandations de mise en œuvre ;
- [6] ISO 50003 - Norme internationale - SMé – Exigences pour les organismes procédant à l'audit et à la certification de systèmes de management de l'énergie ;
- [7] ISO 50004 - Norme internationale - SMé – Lignes directrices pour la mise en œuvre, la maintenance et l'amélioration d'un système de management de l'énergie ;
- [8] ISO 50006 - Norme internationale - SMé – Mesurage de la performance énergétique à l'aide des performances énergétiques de référence (PER) et d'indicateurs de performance énergétique (IPE) – Principes généraux et lignes directrices ;
- [9] ISO 50015 - Norme internationale - SMé – Surveillance et mesurage de la performance énergétique des organismes – principes généraux concernant les directives.
- [10] ADEME : Bonnes pratiques, CEE, Audits, Technologies.
- [11] APUR : Typologie de bâtiments.
- [12] Fiche CEE ISO 50001 + Structures collectives.
- [13] Présentation ISO 50001.
- [14] Prospective : Filières industrielles et techniques d'avenir.
- [15] Réglementation : Textes et politiques publiques.
- [16] Retours d'expérience : Fiche témoignages entreprise.
- [17] Statistiques : Climat et énergie Monde, Europe, France.
- [18] Techniques : Meilleures pratiques et technologies.
- [19] [www.emmy](http://www.emmy) : Registre National des Certificats d'Economies d'Energie.

## Chapitre III : Audit énergétique industriel et plan de comptage

---

- [20] [www.nr-pro](http://www.nr-pro) : Comparateur des offres et primes liées aux Certificats d'Economies d'Energie.
- [21] Guide pratique pour les PME.
- [22] La norme ISO 50001 :2011.
- [23] ISO50001 des économies d'énergie aujourd'hui et demain.
- [24] Rapport audit énergétique.
- [25] Gagner le défi de l'énergie avec l'ISO 50001.
- [26] Guide de Procédure d'Evaluation.
- [27] MÉTHODOLOGIE D'AUTODIAGNOSTIC DE LA GESTION DE L'ÉNERGIE EN ENTREPRISE.
- [28] Contenu de la norme ISO 50001 – 2011.
- [29] MIEUX RÉDIGER LES ÉCRITS PROFESSIONNELS.

## **Chapitre IV : Etude de l'efficacité énergétique des installations industrielles et apport de la maintenance Etude de cas industrie agroalimentaire**

---

### **Introduction**

Afin d'aborder la partie expérimentale nous avons préparé dans le chapitre précédent toutes les conditions nécessaires pour la réussir: périmètre d'audit, procédure d'audit, instrumentations de mesurage, cartographie des énergies, indicateurs de performance énergétique,...

Dans ce chapitre nous allons présenter les 6 systèmes du travail expérimental que nous avons développé en milieu industriel au sein de l'entreprise SOFAB. Pour chaque système, les enjeux énergétiques seront exposés, ainsi que les principales pistes d'amélioration énergétique à envisager autour d'un schéma représentatif d'une installation industrielle. Enfin, sont listées, pour chacune des pistes, les actions concrètes de maintenance industrielle permettant des gains énergétiques importants, à court ou moyen terme. Elles s'organisent autour des 5 items suivants : la production, le réseau, l'utilisation, le contrôle et la maintenance. Ces actions ne sont pas limitatives et les gains possibles seront fonction des installations déjà existantes et des améliorations.

### **IV.1 Diagnostic approfondie des systèmes énergétiques**

#### **IV.1.1 Mise en place du matériel de mesure et campagne de mesure :**

Nous avons mis en place tous les instruments de mesure et de contrôle et nous avons vérifié leur bon fonctionnement. Quelques essais préliminaires de préparation sont nécessaires. En plus du matériel existant (compteurs, quelques instruments) dans l'entreprise nous avons déterminé une liste d'équipements de mesures et de contrôle et qui sont mises à la disposition de l'entreprise. La campagne de mesure et d'enregistrement de données relatives aux installations industrielles devra être effectuée sur une durée suffisamment longue afin de s'assurer de la fiabilité des résultats.

#### **IV.1.2 Analyse et exploitation des mesures effectuées :**

Nous avons effectué des mesures que nous avons analysées et traitées pour aboutir aux bilans énergétiques de toutes les installations de production. Des recoupements devront être faits avec les données fournies par l'entreprise afin de juger la qualité de la gestion et du suivi de l'énergie. Ces analyses permettront d'établir des ratios de consommation qui situeront les performances des différentes activités de l'entreprise par rapport aux standards communément admis.

A partir de ces données, nous avons établi un certain nombre de recommandations qu'ils peuvent être justifiés par le calcul du temps de retour brut des investissements nécessaires.

#### **IV.1.3 Examen des installations industrielles**

Cet examen consiste à examiner les différents points de fonctionnement des installations

industrielles ayant trait à la production d'énergie, le transport de l'énergie et à la consommation :

- Analyse de la production et de la distribution d'utilités (vapeur, froid, électricité, air comprimé, etc.) du point de vue efficacité et de leur adaptation aux besoins réels,
- Evaluation du système de gestion de l'énergie mis en place par l'entreprise,
- Examen des procédures de conduites, de l'ordonnancement des fabrications et de l'organisation générale de l'entreprise en rapport avec une incidence éventuelle sur la consommation de l'énergie et sa gestion,
- Evaluation du système d'évaluation et de maintenance,
- Examen des possibilités d'améliorer l'utilisation des énergies par le remplacement des équipements, par la mise en place d'équipement complémentaire, par des récupérations, par l'emploi de matériel à hautes performances énergétiques, par la production simultanée de chaleur et d'électricité,
- Recherche de la possibilité d'utiliser des ressources alternatives : déchets, biomasse, énergie solaire, rejets à basse température...

## IV.2 Les systèmes énergétiques

### IV.2.1 Systèmes de production et distribution de la vapeur et eau chaude

Pour l'entreprise SOFAB l'installation thermique produisant la vapeur joue un rôle très important pour les différents process de production.

Les chaudières constituant cette installation sont des appareils sous pression utilisés pour chauffer l'eau ou produire de la vapeur [1], généralement à travers l'énergie libérée par la combustion d'un combustible, pour alimenter les installations par la vapeur figure IV.1.

Une part importante de la consommation énergétique dans l'industrie est utilisée dans les chaudières, ce qui en fait l'un des principaux objectifs d'optimisation et d'amélioration de l'efficacité énergétique. Nous nous sommes intéressés par le calcul du rendement de l'installation thermique. Dans la littérature [2], la méthode indirecte est largement utilisée pour calculer le rendement d'une chaudière, vu qu'elle est plus efficace et précise que la méthode directe. Les principales pertes de chaleur dans les chaudières à vapeur sont les pertes au niveau de la combustion, les pertes dans les conduites et au niveau des process. En outre, certaines pertes inévitables se produisent pour différentes raisons (par purge, par radiation, par combustion incomplète, par surfaces non calorifugées...).

Différents paramètres affectent l'efficacité de la chaudière (tels que : l'excès d'air, la qualité de l'eau d'alimentation [3], les surfaces non isolées de la chaudière, la qualité du combustible, la température des fumées...). Cependant, Il existe de nombreuses techniques permettant d'optimiser les pertes de chaleur afin d'améliorer le rendement de la chaudière comme :

- La mise en place des systèmes de récupération de la chaleur,
- Le réglage optimal de l'excès d'air pour une combustion stœchiométrique,

- L'isolation des circuits et des surfaces de la chaudière,
- Les opérations de maintenance régulières pour l'identification des défaillances...etc.

Ces actions et d'autres permettent aux entreprises de renforcer leur productivité et d'améliorer leur compétitivité en ciblant les actions de maintenance optimales qui visent à prolonger la durée de vie des composants et d'optimiser les dépenses.

#### IV.2.1.1 modélisation de l'installation thermique

Nous avons modélisé tout le système thermique par trois unités de production de la vapeur, de la distribution, et l'utilisation dans les process. Pour simplifier cette modélisation nous avons choisi une présentation linéaire qui tient compte de chaque zone de l'entreprise. Pour cela nous avons établi un schéma simplifié paramétré du circuit de production et de distribution de la vapeur illustrant une application information est mise au point pour la gestion de cette installation en particulier :

##### i-Les équipements participant à la production de la vapeur:

Pour cette partie nous distinguons à l'entrée de la chaudière le système du traitement d'eau et le bruleur utilisant le combustible fuel, autre éléments tel les moyens de purge.

##### ii-Le circuit de distribution :

Ce circuit de transport de vapeur est composé de différents organe, purgeurs, vannes, tuyauterie,

##### iii-Les consommateurs :

La consommation concerne les process de production type échangeurs, machine de production ainsi que les moyens de contrôle et régulation température, pression, ....

Le système de recyclage des condensats joue le rôle pour le retour de la vapeur.

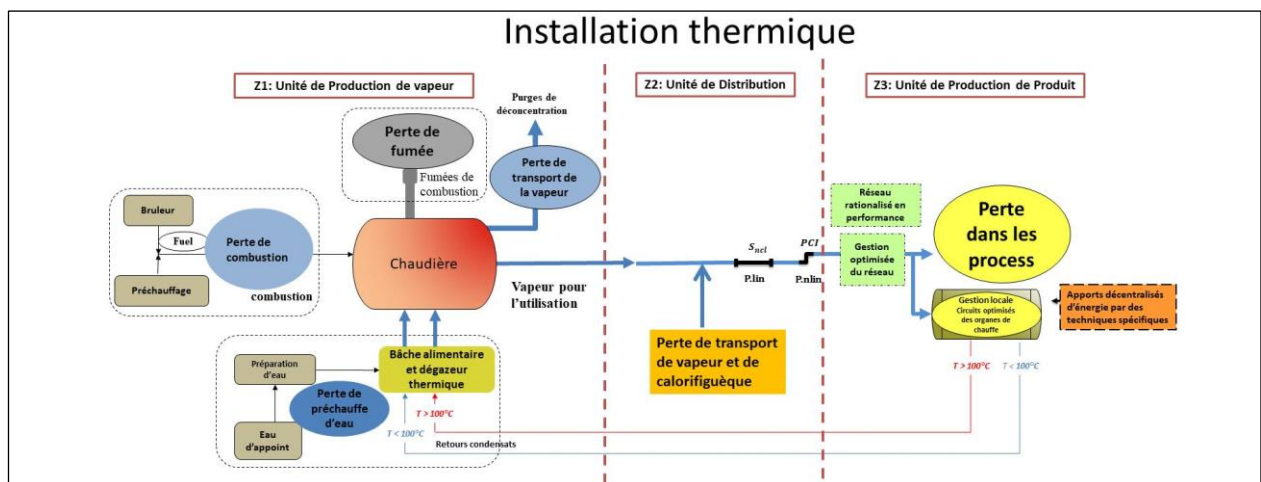


Figure IV. 1: Installation thermique.

La description du processus thermiques est représentée sur le schéma. Les caractéristiques techniques de la chaudière étudiées sont :

**Fournisseur: Rafael Cubells Ballester (RCB)**

**Débit Vapeur : 4 Tonnes/heure. Pression=7bars.**

**Année de fabrication: 2015**

**Pression max admissiblePs: 11 bar**

**Température max admissibleTs:187,1°C**

**Volume total : 10 400 litres**  
**Puissance thermique utile: 2680 KW**  
**Tension d'alimentation: 380V**  
**Model: 4000**

#### IV.2.1.2 Diagnostic et plan d'action

##### Bilan thermique de l'installation thermique

L'objectif est de réduire les pertes thermiques au niveau de la chaudière à vapeur. Il faut trouver les causes responsables de l'abaissement du rendement de la chaudière, chercher des solutions d'améliorations et des propositions pour réduire les pertes [4].

Les principales pertes évaluées sont :

- Pertes par les fumées.
- Pertes par les imbrulés.
- Pertes par les purges.
- Pertes par les parois.
- Perte de gestion.

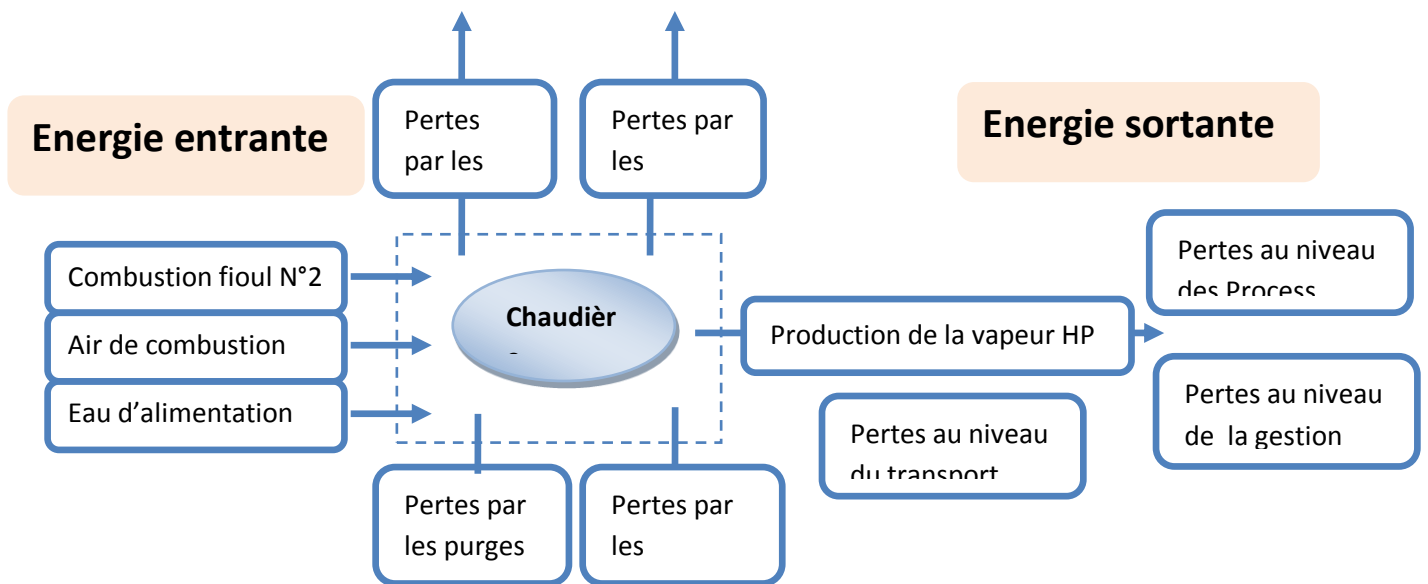


Figure IV. 2: Les différentes pertes au niveau de la chaudière.

Avec :

L'énergie entrante = combustible + air préchauffé + eau préchauffée.

L'énergie sortante = vapeur + pertes par les fumées + pertes par parois + pertes par imbrulés + pertes par les purges.

Donc la chaleur apportée par un combustible qui brûle n'est pas totalement récupérée par le fluide que l'on veut chauffer. On perd toujours une partie par différents mécanismes. Les pertes sont de différentes natures, et ont un grand effet sur le rendement de la chaudière.

##### a-Analyse de la combustion

Expression du rendement de combustion

En pratique, on exprime souvent le rendement de combustion par la formule de Siebert[5]:

$$\eta_{comb} = 100 - f \times (T_{fumées} - T_{amb}) / \%CO_2 \quad (IV.1)$$

Où :

**T<sub>fumée</sub>** = la température des fumées à la sortie de la chaudière [°C]

**T<sub>amb</sub>** = température ambiante de la chaufferie [°C]

**%CO<sub>2</sub>** = la teneur en CO<sub>2</sub> des fumées [%]

f = facteur dépendant principalement du type de combustible (mazout : f =0,57; **fioul** : f = 0,47).

Régler précisément un brûleur en mesurant, en parallèle, le rendement de combustion de façon manuelle, est très difficile d'où l'intérêt des analyseurs de combustion électroniques [6]. Cet appareil qu'on définit dans le chapitre III permet de mesurer, en une seule manipulation, la température des fumées, le pourcentage d'O<sub>2</sub>, de CO, de NO<sub>2</sub>, l'excès d'air et calculent en direct le pourcentage de CO<sub>2</sub>, l'excès d'air et le rendement de combustion.

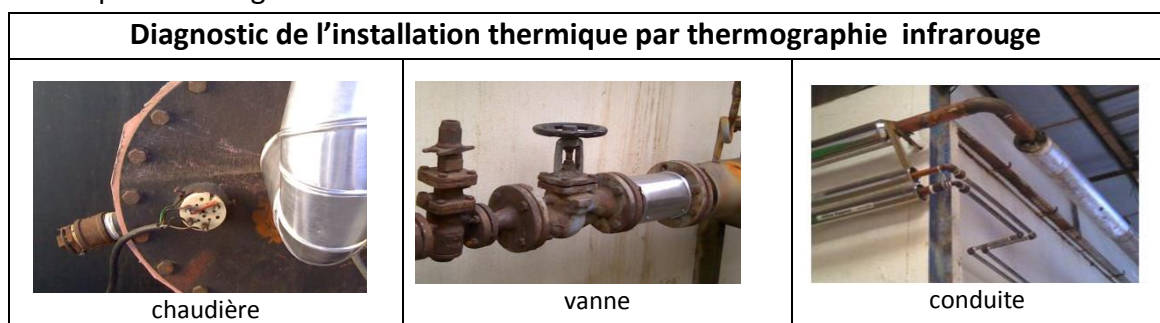
Après analyse nous avons constaté que des pertes par fumées sont plus importantes. Cette valeur montre que les pertes par fumées ont une grande influence sur le rendement de la chaudière. Nous avons constaté qu'elles peuvent provenir d'un excès d'air excessif qui peut être du à :

- Un mauvais réglage au niveau du brûleur.
- Des problèmes d'entretien tels qu'une mauvaise distribution de l'air ou une mauvaise pulvérisation du fioul.
- Une chaudière encrassée : les dépôts internes (tartres) et externes (suires) qui limitent le transfert de chaleur entre l'eau de la chaudière et les fumées.

Les analyses des fumées montrent que la température des fumées est très élevée. Elle est d'ordre de 182 °C, ce qui provoque une diminution du rendement. Cette augmentation de la température est due à l'accumulation des suies et cendres volantes sur les surfaces d'échanges. Dans le cadre de la maintenance préventive, Il est donc nécessaire de nettoyer ces surfaces, par l'opération du ramonage qui doit être effectuée régulièrement.

#### **b-Calcul des déperditions surfaciques**

Dans ce cas nous allons prendre en considération que les pertes énergétiques par rayonnement. Nous avons effectué plusieurs mesures espacées dans le temps et sur les différentes allures de la chaudière par l'instrument thermographique défini au chapitre III, les résultats sont présentés figure IV.3 :





**Figure IV. 3 : Diagnostic de l'installation thermique par thermographie infrarouge.**

Les pertes par rayonnement sont basées sur le principe que tout corps dans la nature, ayant une énergie interne diffuse de la chaleur par rayonnement suivant la loi suivante [7] :

$$Q_{ray} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_{corps}^4 - T_a^4) \quad (IV.2)$$

Avec :  $\varepsilon$  : émissivité thermique dépendant de la température.

$\sigma$  : constante de Stephan-Boltzmann égale à  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/ (m}^2 \cdot \text{K}^4)$ .

S : Surface de rayonnement.

$T_{corps}$  : température de la paroi.

$T_a$  : température ambiante.

Pour plus de précision, nous avons pris plusieurs températures en références à plusieurs points de la paroi puis on calculera la moyenne de celles-ci. Nous avons calculé la surface de tous les organes, environ  $11,5 \text{ m}^2$ , qui ne sont pas calorifugés Figure IV. 3 et en appliquant la formule (IV.2) nous avons calculé exactement les pertes thermiques.

### **C-Taux de purge**

Lors du fonctionnement d'une chaudière, la transformation de l'eau en vapeur entraîne une grande concentration des minéraux dans l'eau, qui sont les sources de corrosion et de formation de tartre.

La corrosion engendre la défaillance des tubes de chaudière, l'entartrage des surfaces de transfert de la chaleur réduit à son tour les performances et entraîne une corrosion sous dépôt, ce qui se traduit par une interruption des activités et une maintenance coûteuse[8].

La purge permet de contrôler la concentration en minéraux dans une limite acceptable, en remplaçant une partie de l'eau de chaudière contenant des minéraux concentrés par de l'eau déminéralisée, ce qui permet ainsi d'accroître considérablement la durée de vie et l'efficacité d'une chaudière. La conductivité, est la meilleur mesure pour contrôler la concentration en minéraux, elle s'exprime en ppm TDS (parties par million des matières dissoutes totales)[9], Nous avons vérifié les purgeurs et nous avons analysé les défaillances qui surviennent et qui sont sources de perte de chaleur sous forme de vapeur.



### IV.2.1.3 Calcul du rendement thermique de la chaudière à vapeur (Etude de cas)

#### IV.2.1.3.1 Déperdition et rendement énergétique des chaudières :

L'énergie dégagée par la réaction de combustion n'est pas complètement utilisée dans une chaudière. Il existe en effet des pertes qualifiées de pertes thermodynamiques [10], Cette notion de pertes permet d'introduire la notion de rendement de la chaudière, qui peut être défini par la formule suivante[11]:

$$\text{Rendement} = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie utilisée}}$$

Deux méthodes sont largement utilisées pour évaluer les performances d'une chaudière, à savoir la méthode directe et la méthode indirecte [12].

#### IV.2.1.3.2 Méthode directe (méthode d'entrée-sortie) :

La méthode directe définit le rendement comme le rapport entre la chaleur produite et la chaleur apportée suivant la formule IV.3 ci-dessous. Cette méthode dépend de la mesure du débit du combustible et des conditions côté fluide requises pour calculer l'énergie produite [13].

$$\eta = \frac{Q_{util}}{Q_{tot}} * 100 \quad (IV.3)$$

L'énergie produite utile est calculée comme suivant :

$$Q_{util} = Q_{vap} * (H_{vap} - H_{eau}) \quad (IV.4)$$

Avec :

- $Q_{vap}$  : Débit de vapeur
- $H_{vap}$  : Enthalpie de vapeur
- $H_{eau}$  : Enthalpie de l'eau

Nous calculerons l'énergie utile selon la formule simplifiée ci-dessous :

$$Q_{util} = D_e * (C_p * \Delta T + L_v) \quad (IV.5)$$

Avec :

$D_e$  : Débit de l'eau d'entrée Kg/h

$C_p$  : Chaleur spécifique de l'eau à 60°C (= 4.185 Kj/Kg.K<sup>-1</sup>)

$\Delta T$  : Différence de température (avec  $T_{vap} = 185^\circ\text{C}$ )

$$\Delta T = (T_{vap} - T_{eau}) = (185 - 60) \quad (IV.6)$$

$L_v$  : Chaleur latente de vaporisation à 8 bars (d'après les tables = 2046 Kj/Kg)

On en déduit que :

$$Q_{util} = 1000 * (4,185 * (185 - 60) + 2046) = 2,56Gj \quad (IV.7)$$

L'énergie totale introduite est le pouvoir Calorifique Inférieur du fioul lourd N°2 :

PCI = 8798 kcal/kg = 36835 Kj/Kg

L'énergie totale introduite est égale au PCI multiplié par le débit de combustible :

$$Q_{tot} = PCI * D_{fuel} = 36835 * 82 = 3,02Gj \quad (IV.8)$$

Avec :

$D_{fuel}$  : le débit de combustible = 82 Kg/h

Enfin le rendement par la méthode directe est :

$$\eta = \frac{Q_{util}}{Q_{tot}} * 100 = \left( \frac{2,56}{3,02} \right) * 100 = 85 \% \quad (IV.9)$$

#### IV.2.1.3.3 Méthode indirecte (bilan énergétique)

La méthode indirecte présente un bilan détaillé de l'énergie à l'entrée et à la sortie nécessaire pour évaluer les performances d'une chaudière. Le rendement est obtenue en soustrayant la somme des pertes de 100 selon les codes BS845-1 : 1987 et IS13979 : 1994. Dans le cas du code ASME PTC 4-2008, les pertes d'énergie et les crédits sont utilisés pour calculer l'efficacité.

La méthode indirecte est recommandée pour la précision de ses résultats puisqu'elle est basée sur des informations détaillées et complètes et tient compte des différentes pertes.

Le rendement de la chaudière sera calculé par la formule IV.10 ci-après [14] :

$$\eta = 100 - \sum_i P_i \quad (IV.10)$$

Avec :

$P_i$  : Pertes de chaleurs dans la chaudière.

- **Air théorique requis :**

L'air théorique requis pour la combustion complète est calculé suivant la formule IV.11 ci-dessous :

$$ATR = \frac{(11,6.C + 34,8 * (H_2 - \frac{O_2}{8}) + 4,35.S)}{100} \quad (IV.11)$$

Avec :

C : Pourcentage de carbone dans le combustible

$H_2$  : Pourcentage d'hydrogène dans le combustible

$O_2$  : Pourcentage d'oxygène dans le combustible

S : Pourcentage de soufre dans le combustible.

- **Excès d'air :**

L'excès d'air est calculé sur la base du pourcentage d'oxygène dans les gaz de combustion selon la formule IV.12 ci-dessous :

$$EA = \frac{O_2}{(21 - O_2)} * 100 \quad (IV.12)$$

Avec :

$O_2$  : Pourcentage d'oxygène à partir de l'analyse des gaz de combustion.

- **Air actuellement fourni :**

A la base de l'air théorique requis et de l'excès d'air calculés, l'air actuellement fournis est calculé selon la formule IV.13 suivante :

$$AAS = \left(1 + \frac{EA}{100}\right) * ATR \quad (IV.13)$$

Avec :

EA : Excès d'air en %

ATR : Air théorique requis en %

AAS : Air actuellement fournis.

Les différentes pertes survenant dans une chaudière sont calculées selon les formules ci-dessous :

**i. Pertes par gaz de combustion sec :**

La plus grande partie des pertes d'énergie se produit à travers les gaz de combustion sec. Ces pertes sont associées à l'azote qui compose l'air de combustion et qui quitte la chaudière à des températures élevées. Elles dépendent fortement de la quantité d'excès d'air fournie et de la température des gaz de combustion et sont calculés par la formule IV.14 ci-dessous :

$$P_1 = \frac{m_{\text{gaz}} * C_{pg} * (T_g - T_a)}{PCS} * 100 \quad (IV.14)$$

Avec :

$C_{pg}$  : Chaleur spécifique des gaz de combustion (0,23 kcal / kg °C)

$m_{\text{gaz}}$  : Masse des gaz de combustion par Kg de combustible

PCS : Pouvoir calorifique supérieur du combustible (en kcal/kg)

$T_g$  et  $T_a$  : Respectivement, températures des gaz de combustion, et Température ambiante (en °C).

**ii. Pertes par l'eau due à la combustion de  $H_2$  contenue dans le combustible :**

Lors de la combustion, l'oxygène se combine avec l'hydrogène présent dans le combustible pour former l'eau dans les produits de combustion. Cette eau emporte la chaleur par la cheminée sous forme de vapeur, ce qui représente les pertes par combustion de l'hydrogène et qui peuvent être calculées comme suit (formule IV.15) :

$$P_2 = \frac{9 * H_2 * (584 + C_{pv} * (T_g - T_a))}{PCS} * 100 \quad (IV.15)$$

Avec :

584 : Chaleur latente à la pression partielle de la vapeur d'eau (en J/kg)

$C_{pv}$  : Chaleur spécifique de la vapeur surchauffée (0,45 Kcal/Kg. °C)

$H_2$  : Masse d'hydrogène présente dans le carburant sur une base de 1 kg

PCS : Pouvoir calorifique supérieur du combustible (en kcal/kg)

$T_a$  et  $T_g$  : Température ambiante et la température des gaz de combustion (en °C).

**iii. Perte due à l'humidité dans le combustible :**

Durant la combustion, l'humidité contenue dans le combustible consomme de l'énergie pour s'évaporer. Cette perte se compose de :

- La chaleur sensible nécessaire pour amener l'humidité au point d'ébullition ;
- La chaleur latente d'évaporation ;

- La surchauffe nécessaire pour amener cette vapeur à la température des gaz d'échappement.

Ces pertes sont calculées par la formule IV.16 ci-après :

$$P_3 = \frac{M*(584 + C_{pv}*(T_g - T_a))}{PCS} * 100 \quad (IV.16)$$

Avec :

584 : Chaleur latente à la pression partielle de la vapeur d'eau (en J/kg)

$C_{pv}$  : Chaleur spécifique de la vapeur surchauffée (0,45 Kcal/Kg.°C)

M : kg d'humidité dans 1kg de combustible

PCS : Pouvoir calorifique supérieur du combustible (en kcal/kg)

$T_a$  et  $T_g$  : Température ambiante et la température des gaz de combustion (en °C).

**iv. Pertes dues à l'humidité dans l'air de combustion :**

L'air atmosphérique entrant dans la chaudière contient l'humidité qui devient une vapeur surchauffée après son passage dans la chaudière avant de quitter la cheminée. Cette perte est calculée par la formule IV.17 ci-dessous :

$$P_4 = \frac{AAS*FH*C_{pv}*(T_g - T_a)}{PCS} \quad (IV.17)$$

Avec :

AAS : Masse de l'air actuel fournie (en %)

FH : Facteur d'humidité (en kg d'eau/kg d'air sec)

$C_{pv}$  : Chaleur spécifique de la vapeur surchauffée (en kcal/kg.°C)

$T_a$  et  $T_g$  : Température ambiante et la température des gaz de combustion (en °C)

PCS : Pouvoir calorifique supérieur du combustible (en kcal/kg).

**v. Perte due à la combustion incomplète :**

La combustion incomplète est due à une pénurie d'oxygène dans la chambre de combustion. En effet, le carbone contenu dans le combustible réagit avec l'oxygène et génère des produits tels que le monoxyde de carbone et le dioxyde de carbone. Les produits de la combustion incomplète peuvent être mélangés avec l'oxygène et brûlés à nouveau pour libérer de l'énergie supplémentaire. Cette perte peut être calculée par la formule IV.18 ci-après :

$$P_5 = \frac{CO*C}{CO+CO_2} * \frac{5744}{PCS} * 100 \quad (IV.18)$$

Avec :

5744 : la chaleur perdue par la combustion partielle du carbone

$CO_2$  : Volume actuel du  $CO_2$  dans les gaz de combustion (en %)

CO : Volume actuel de CO dans les gaz de combustion (en %)

C : teneur du carbone dans un kg de carburant (en %)

PCS : Pouvoir calorifique supérieur du combustible (en kcal/kg).

**vi. Pertes par radiation des surfaces et par convection :**

La différence de température entre la surface extérieure d'une chaudière et la chaufferie génère des pertes de chaleur qui se produisent par rayonnement, convection et conduction. Les pertes par rayonnement sont inévitables, elles se produisent par transfert de chaleur des parois latérales de la chaudière vers l'extérieur. Nous calculerons cette perte par la formule IV.19 ci-après :

$$P_6 = 0.548 * \left( \left( \frac{T_s}{55.55} \right)^4 - \left( \frac{T_a}{55.55} \right)^4 \right) + 1.957 * (T_s - T_a)^{1.25} * \sqrt{\frac{(196.85 * V_m + 68.9)}{68.9}} \quad (IV.19)$$

Avec :

$V_m$ : Vitesse du vent (en m/s)

$T_s$  et  $T_a$  : Température de la surface de la chaudière et la température ambiante (en °C)

**IV.2.1.3.4 Etude de cas :**

Nous présentons ci-dessous les calculs réalisés dans le cadre d'une campagne de mesure, qui s'est déroulée au sein de la société SOFAB opérant dans l'industrie des boissons. La chaudière étudiée est multitubulaire à tube de fumée d'une capacité de 1 T/h travaillant avec du fuel N°2 comme combustible (PCS : 9238,55 Kcal/kg). La vapeur produite est utilisée dans les processus de fabrication ainsi que pour réchauffer le fuel, le pulvériser et le conditionner.

Le rendement de la chaudière a été évaluée par les deux méthodes : directe et indirecte. Les données nécessaires aux calculs par la méthode indirecte (Analyse immédiate du combustible, analyse des gaz de combustion...) sont présentées dans le tableau IV.1.

Selon la méthode directe, le rendement est de **85%**. D'autre part, le rendement calculé initialement par la méthode indirecte est de **90,7 %** et le rendement final suite aux actions d'améliorations est estimé à **94,8%**.

Les pertes majoritaires sont les pertes par gaz de combustion sec (2,1%) et par l'eau produite par la combustion d'hydrogène contenu dans le combustible (3,5%) qui dépendent fortement de l'excès d'air et du type de combustible brûlé. En effet, les gaz de combustion quittant la cheminée emportent une quantité importante d'énergie, et affectent l'efficacité de la chaudière. Ces pertes sont limitées à 1,5% et 1,3% en fournissant une quantité optimale d'excès d'air permettant d'assurer une combustion stœchiométrique.

En outre, d'autres pertes inévitables se produisent pour différentes raisons, comme les pertes par radiation et par convection estimées 1,8% et qui sont optimisés à 1,1% en déployant une isolation des surfaces extérieures des circuits de distribution et des différents organes de la chaudière nues qui transfèrent la chaleur vers l'environnement. L'épaisseur de l'isolation a été calculée sur la base des pertes survenant au niveau du système, et des coûts d'installation de l'isolation.

D'un point de vue économique, il est préférable de récupérer la chaleur perdue et de la transférer vers un dissipateur thermique approprié. La solution la plus efficace pour récupérer

les gaz de combustion de la chaudière est le préchauffage de l'air de combustion et de l'eau d'alimentation. D'autres solutions existent, mais elles nécessitent des investissements plus importants, tels que :

- Les pompes à chaleur,
- Le cycle organique de Rankin ou le cycle de Kalina pour générer de l'électricité
- Le cycle de réfrigération à absorption permettant d'obtenir un effet de climatisation ou de refroidissement.

Cependant, les critères de sélection de la technologie de récupération de la chaleur sont basés sur la température et le débit des gaz d'échappement de la chaudière.

## Chapitre IV : Etude de l'efficacité énergétique des installations industrielles et apport de la maintenance Etude de cas industrie agroalimentaire

Grandeur	Paramètre de calcul	Symbole	Avant Actions correctives	Après Actions correctives	Unité
<b>Caractéristique Chaudière</b>	Capacité	--	4,00		T/H
	Pression Vapeur	Pv	7,00		kg/cm <sup>2</sup>
	Température vapeur	Tv	185,00		°C
	Durée de marche	--	7200,00		H/ans
	Pouvoir calorifique supérieur combustible	PCS	9238,55		Kcal/kg
<b>Analyse Combustible</b>	Carbone	C	41,85	38,30	%
	Hydrogène	H	5,70	2,10	%
	Oxygène	O2	31,20	14,85	%
	Soufre	S	0,50	0,47	%
	Humidité	M	15,85	8,20	%
<b>Analyse fumée de combustion</b>	O <sub>2</sub> dans les fumées	O2	9,00	8,12	%
	CO <sub>2</sub> dans les fumées	CO2	15,87	11,60	%
	CO dans les fumées	CO2	0,41	0,29	%
<b>Données pour le rendement par méthode indirecte</b>	Masse des fumées par Kg de combustible	m <sub>gaz</sub>	7,32	5,60	kg/kg fuel
	Chaleur spécifique des gaz de combustion	Cp <sub>g</sub>	0,23	0,23	kcal/kg.°C
	Chaleur spécifique de la vapeur surchauffée	Cp <sub>v</sub>	0,45	0,45	Kcal/Kg.°C
	Facteur d'humidité	F <sub>H</sub>	0,02	0,02	Kg/kg air sec
	Pouvoir calorifique supérieur du combustible	PCS	9238,55	9238,55	kcal/kg
	T° ambiante	T <sub>a</sub>	25,00	25,00	°C
	T° des fumées de combustion	T <sub>g</sub>	140,00	136,00	°C
	Température de la surface de la chaudière	T <sub>s</sub>	52,00	45,00	°C
Vitesse du vent	V <sub>m</sub>	0,45	0,30	m/s	
<b>Propriétés de l'Air de Combustion</b>	Air théorique requis	ATR	5,50	4,55	%
	Excès d'air	EA	75,00	63,04	%
	Air actuellement fourni	AAS	9,63	7,42	%
<b>Méthode Indirecte</b>	Pertes par gaz de combustion sec	P1	2,10	1,55	%
	Pertes par eau produite par la combustion de H <sub>2</sub> contenue dans le combustible	P2	3,53	1,30	%
	Perte due à l'humidité dans le combustible	P3	1,09	0,56	%
	Perte due à l'humidité dans l'air	P4	0,09	0,07	%
	Perte due à la combustion incomplète	P5	0,66	0,58	%
	Perte par rayonnement & convection	P6	1,82	1,13	%
	<b>Rendement Chaudière</b>	⊗	<b>90,72</b>	<b>94,8</b>	<b>%</b>

**Tableau IV. 1. du rendement d'une chaudière (Méthode indirect).**

#### IV.2.1.3.4 Les améliorations apportées par la maintenance tableau

De multiples opportunités d'économiser sur la boucle chaufferie – réseau (plusieurs dizaines d'opérations possibles) à titre d'exemple nous présentons une liste d'actions d'économies d'énergie en chaufferie. On peut répartir les actions d'économies en chaufferie et réseau par exemple en 6 familles d'actions.

**Tableau IV. 2:Action de maintenance.**

actions	familles
Maîtriser la combustion	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimisation des conduites d'exploitation non automatisées</li> <li>• Brûleurs pilotés par automate (bruleur micro-modulant)</li> </ul>
Réduire les pertes en chaufferie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduction des purges : changement de technique et/ou d'additifs</li> <li>• Récupération de l'énergie des purges</li> <li>• Maintenir la propreté des surfaces d'échange thermique</li> <li>• Récupération sur fumées pour préchauffer l'eau par économiseur/condenseur</li> <li>• Substitution d'énergies primaires</li> <li>• Calorifugeage des générateurs</li> </ul>
Optimiser la préparation de l'eau d'appoint et du circuit condensats	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Amélioration du taux de retour des condensats</li> <li>• Rentrage des condensats sous pression par rapport à une bêche atmosphérique</li> <li>• Récupération énergie des condensats perdus</li> </ul>
Réduire les pertes et les fuites réseau	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maintenir purgeurs en état</li> <li>• Supprimer les fuites</li> <li>• Calorifuger et conserver en état</li> </ul>
Optimiser des moyens de production	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Définition des besoins dans le temps et optimisation des fournitures</li> <li>• Gestion optimisée du parc des chaudières</li> <li>• Remise en cause de la structure de la chaufferie</li> </ul>
Optimiser des réseaux de distribution	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rationalisation en permanence du réseau de distribution de vapeur</li> <li>• Gestion optimisée du réseau</li> <li>• Utilisation de technologies de production décentralisées</li> <li>• Chaudière à condensation</li> </ul>



### **IV.2.2 systèmes d'air comprimé**

Dans l'industrie, l'air comprimé est un vecteur énergétique unanimement adopté qui transporte la puissance, l'énergie et le travail. Il est également une « utilité » : son usage peut devenir très large. Car en plus d'être un vecteur de puissance facilement stockable et transportable, il est également utilisé comme moyen incomparable de séchage, de refroidissement, de nettoyage, d'éjection de déchets, de transport, de levage... [15].

L'air comprimé offre enfin des utilisations spécifiques dans différents secteurs de l'industrie, et peut participer directement aux processus de production dans les secteurs tels que les industries chimiques, agroalimentaires, pharmaceutiques, papetières, le raffinage, la production électrique.

L'efficacité énergétique de l'air comprimé est plus que médiocre : le rendement se situe souvent entre 10% et 15%, au mieux 20% pour les meilleures installations. Ce manque d'efficacité énergétique est lié au mode de production de l'air comprimé (rendement de la machine), auquel viennent s'ajouter les pertes en réseau (fuites, pertes de charge) et les pertes au niveau des outils et équipements pneumatiques (fuites, rendement)[16].

L'objectif de ce diagnostic de l'installation de l'air comprimé a pour la réduction des pertes énergétiques, c'est à dire transmettre l'énergie pneumatique des compresseurs à faible énergie électrique, assurer un débit et une pression d'air suffisant et réduire l'énergie électrique consommée, ensuite minimiser les pertes des conduites et les fuites au niveau du réseau et des outils pneumatiques.

L'audit énergétique de l'installation de l'air comprimé réalisé a permis la mesure, la surveillance de l'installation et l'analyse des données Il permet de :

- évaluer la performance de l'installation d'air comprimé ;
- connaître les coûts engendrés par la production de l'air comprimé ;
- détecter les éventuels dysfonctionnements ;
- dimensionner correctement une nouvelle installation (changement de matériel, extension de capacité...) ;
- Fournir l'information aux décideurs permettant de fonder les décisions en matière d'énergie.

#### **IV.2.2. 1 Modélisation de l'installation de production et distribution de l'air comprimé**

Nous avons modélisé toute l'installation figure IV. 4du circuit de production et de distribution de l'air comprimé illustrant :

**Les équipements de production** de l'air comprimé sont:

- Les compresseurs dont les caractéristiques déjà présentées figure IV.4:
- Les sécheurs
- Le réservoir de stockage

- Le système de filtration

#### Le circuit de distribution :

- Les conduites avec longueur et diamètre ;
- Les moyens de purge ;
- La détente secondaire.

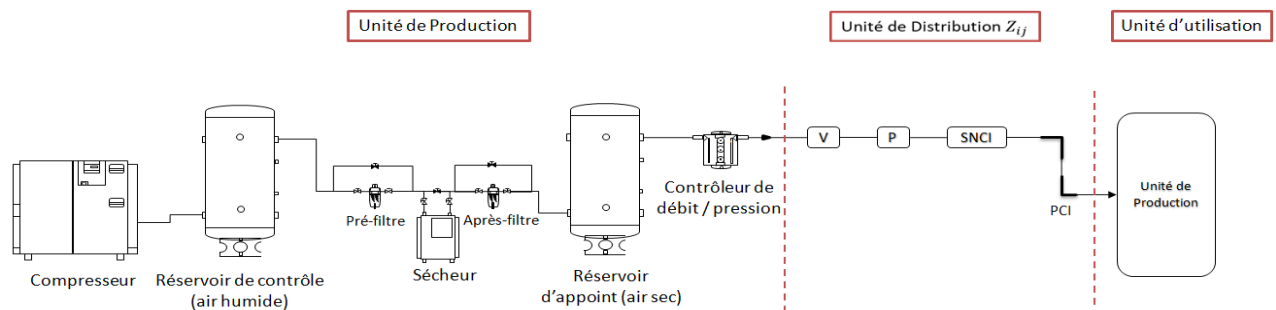
#### Les consommateurs :

Les consommateurs de l'air comprimé regroupent l'ensemble des machines de production où les circuits pneumatiques sont très utilisés pour la transmission des mouvements : vérin, ...

Nous avons décrit cette installation par un schéma linéaire figure IV.4: production de l'air comprimée, les différentes zones et organes constituant et la partie production, une application informatique regroupe les différentes zones  $Z_{ij}$  avec les éléments du système associés.

A l'aide des instruments cités dans le chapitre 3, figure III.6 nous avons effectué des mesure de contrôle et de régulations (fuite, température, pression,...)

## Air comprimé



**Figure IV. 4 : installation de l'air comprimé.**

Nous avons étudié deux types de compresseurs de caractéristiques :

**Compresseur 1**  
Pression 40bars  
Puissance électrique : 290 kW  
Puissance absorbée: 250 KW  
Tension secteur: 400v / 50 Hz  
Pression de service : 34 bars  
Pression de conception: 42bars  
Débit d'air: 1320 m3/h  
Fluide: Air  
Année de fabrication: 2012

**Compresseur 2**  
Pression 7 bars  
Puissance absorbée: 130KW  
Tension secteur: 400v  
Fréquence: 50 Hz  
Pression de service:8bars  
Pression de conception:10bars  
Débit d'air : 1320 m3/h  
Fluide: Air  
Année de fabrication 2018

#### IV.2.2.2 Plans d'action

Un plan d'action est proposé à la direction pour optimiser la consommation d'énergie en différents points névralgiques où l'on peut chercher à faire des économies sur le réseau d'air comprimé de l'entreprise

##### IV.2.2.2 .1 Gestion optimisée des compresseurs

Au niveau des compresseurs il a été intégré des variateurs de vitesse. Le principe de la régulation de vitesse consiste à faire fonctionner le compresseur en limitant les cycles à vide en agissant sur la vitesse du moteur qui entraîne les pistons du compresseur. La deuxième action c'est de mettre au point un seul réservoir au lieu de deux existants. Ce travail nous a permis de réduire la consommation de l'air comprimé et par la suite de l'énergie électrique.

##### IV.2.2.2 .2 Sur le réseau de l'air comprimé

Les fuites de l'air comprimé présentent un pourcentage très élevé. Pour remédier à ce problème nous avons utilisé une méthode de détection très efficace par ultrasons. La méthode par ultrasons permet de détecter pratiquement toutes les fuites d'un système, même celles que l'on n'entend pas pendant un arrêt de production.

##### IV.2.2.2 .3 Minimiser les pertes de charge

Les pertes de charges sont dues aux forces de frottement liées à l'écoulement de l'air. Deux types de pertes de charges sont à distinguer :

-Les pertes de charge régulières

- Liées aux parties droites du réseau Proportionnelles à la longueur du réseau (L), au carré du débit d'air (D<sup>2</sup>) et à la rugosité de la paroi interne des tuyaux (k)

-Les pertes de charge singulières

- Liées aux accessoires présents sur le réseau (coudes, tees, vannes, filtres, détendeurs, ...).

La perte de charge d'un tronçon est la somme des pertes de charges linéaires dues aux longueurs droites de tuyauteries et des pertes de charges singulières dues aux incidents de parcours rencontrés.

$$\Delta P = \sum \Delta P_{linéaires} + \sum \Delta P_{singulières} \quad (IV.20)$$

Différentes actions sont réalisées dans le cadre de la maintenance :

-Relever les heures de marche à vide et en charge de chaque compresseur ;

-Mesurer la consommation électrique du cycle Charge / décharge de chaque compresseur

(enregistrement sur une période minimale de 10 min) ;

-Mesurer ou calculer la consommation du poste air comprimé des jours de l'audit et expliciter la méthode adoptée ;

-Effectuer la campagne des fuites ;

-Relever les pressions de service de tous les consommateurs d'air comprimé ;

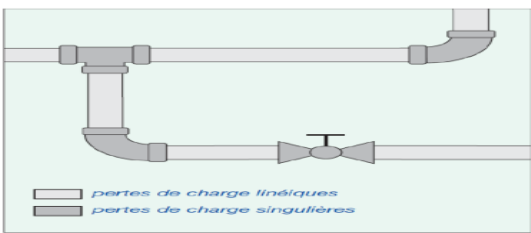

- Calculer la consommation annuelle du poste air comprimé.

Ces pertes de charge sont des chutes de pression dues à la résistance que rencontrent les fluides en écoulement : les actions de cisaillement occasionnent en effet des pertes énergétiques [17].

Les pertes de charge peuvent être :

o**Linéiques ou régulières** : elles correspondent alors à l'écoulement le long des conduites.

o**Singulières**: elles se manifestent sur les pièces spéciales qui modifient la direction ou la section de passage du fluide (raccord, T, vannes, soupapes, etc.) [18] figure IV.5.

type de perte de charge	composants
linéaire singulière	 <p>— pertes de charge linéiques — pertes de charge singulières</p>
conduite surface rugueuse, dépôt de suie, calcaire, corrosion,...	

**Figure IV. 5 : Origines des pertes de charge.**

#### IV.2.2.3.2 Pertes de charge régulières ou linéiques

**Nous avons deux types de perte de charge :**

-Du type d'écoulement, donc du **nombre de Reynolds** : en delà de  $Re = 2000$  le régime est laminaire, au-delà le régime est turbulent.

-De la **rugosité** interne de la conduite, La rugosité représente l'épaisseur moyenne des aspérités de surfaces du matériau composant la conduite. On la note E, et on l'exprime souvent en mm. Pour une conduite d'un diamètre D donné, on appelle rugosité relative le rapport  $E/D$ .

### IV.2.2.3 Calcul de perte de pression

Pour calculer les pertes de charge, on introduit la perte de pression correspondante :

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (\text{IV.21})$$

- L est la longueur de conduite,
- D est le diamètre interne de la conduite,
- $\frac{1}{2} \rho V^2$  est l'énergie cinétique volumique du fluide
- f est le coefficient de frottement ou coefficient de friction de la conduite [19].

### 2.2.3 Résultats obtenus et économies escomptées

Nous avons réalisé des actions en maintenance corrective, préventive et améliorative

- Maintenance corrective : suite au diagnostic réalisé sur les fuites un travail a été fait par les techniciens de la société ce qui a permis d'éliminer toutes les fuites dans l'installation.
- Des actions de maintenance préventives sont représentées ci-dessous. Tableau IV.3.

**Tableau IV. 3: Actions de maintenance préventives.**

Opération exécutable en fonctionnement	Exécutant	Fréquence					observation
		J	M	T	S	A	
Vérifier le niveau d'huile du compresseur	Mécanicien	x					Contrôle
Contrôler la cartouche de filtre d'air	Mécanicien		x				A l'arrêt
nettoyer la cartouche de filtre d'air	Mécanicien				x		A l'arrêt
Remplacer la cartouche de filtre d'air	Mécanicien					x	A l'arrêt
Changer la cartouche de filtre d'huile	Mécanicien			x			A l'arrêt
Vérifier le clapet de retour d'huile	Mécanicien					x	A l'arrêt
Contrôler l'étanchéité des raccords	Mécanicien				x		A l'arrêt
Vérifier l'état des canalisations	Mécanicien					x	A l'arrêt
Contrôler le système de refroidissement	Mécanicien		x				A l'arrêt
Contrôler la soupape de sécurité	Mécanicien				x		A l'arrêt
Graisser le palier du moteur	Mécanicien				x		A l'arrêt
Vérifier le clapet d'aspiration	Mécanicien					x	A l'arrêt
Vérifier l'état de l'accouplement	Mécanicien					x	A l'arrêt
Nettoyer le dispositif de commande	Mécanicien			x			A l'arrêt
Surveiller le bruit compresseur	Mécanicien						En marche
Vérifier le robinet de vidange	Mécanicien	x					
<b>Date :</b>	<b>J= jour –M= mensuel –T= trimestrielle –S= semestrielle –A= annuelle</b>						

Les moyens de contrôle et de régulation (température, pression,...)

-Des actions de maintenance amélioratives sont réalisées : mise en place des variateurs de vitesse, fusion de réservoir, réduction de pression,...réduire les pertes de charges linéaires et non linéaires. Ces actions de différentes maintenances ont permis de réduire la consommation de l'air comprimé de 2,2 %.

### **IV.2.3 Systèmes de production de froid**

#### **IV.2.3.1 Le froid**

Le froid industriel regroupe tous les systèmes permettant d'obtenir et de maintenir un système (local, produit, etc.) à une température inférieure à celle de l'environnement [20].

Le froid conserve et préserve les produits d'origine végétale et animale. Il ralentit le métabolisme des produits végétaux augmentant ainsi leur durée de commercialisation, il est utilisé pour la cryoconcentration ou la cryoséparation des boissons comme dans la SOFAB cas de notre étude. La production de froid pour les besoins domestiques, commerciaux et industriels nécessitent l'utilisation d'un dispositif capable d'extraire de la chaleur dans le milieu à refroidir pour la rejeter dans un milieu extérieur, ce dispositif obéit nécessairement au second principe de la thermodynamique est appelé « **machine frigorifique** » [21].

Le froid a un impact très important sur la compétitivité de l'entreprise et un impact environnemental indirect du fait de sa consommation importante d'énergie. La part de l'électricité utilisée pour le froid et le conditionnement d'air au niveau mondial a sensiblement augmenté ces dernières années, tant dans les pays développés que dans les pays en développement.

Dans le domaine du froid, toute économie d'énergie est rapidement synonyme d'une réelle économie financière. C'est dans ce contexte que notre travail consiste à minimiser ces pertes énergétiques par les outils de la maintenance industrielle.

#### **IV.2.3.2 Génération de l'eau froide :**

Les machines frigorifiques sont des systèmes qui doivent transférer de l'énergie calorifique d'un niveau de température inférieur vers un niveau thermique supérieur. Conformément au second principe de la thermodynamique, ils doivent nécessairement consommer de l'énergie pour effectuer cette opération antinaturelle. Lorsque le système est diatherme, n'utilisant donc que deux sources de chaleur, une source de chaleur froide et une source chaude, il doit obligatoirement consommer de l'énergie [22].

#### *Eau froide :*

Quant à l'eau froide, les pertes sont principalement issues des échangeurs non isolés, ainsi que le réservoir d'eau dans lequel est stockée l'eau refroidie de 1°C et celle de 9°C provenant des lignes, telles que les deux sont presque mélangées l'une avec l'autre, puisqu'elles sont séparées que par une tôle métallique, qui contient des ouvertures de diamètre important (selon le responsable de la salle des chaudières).

Il est aussi à signaler que l'installation est située en dehors de la salle (sauf les compresseurs), ce qui peut bien évidemment influencer sur la température de l'eau froide surtout pendant l'été, cela mène à une étude sur l'effet météorologique sur l'installation et un déplacement éventuel de celle-ci.

Quant aux trois compresseurs situés dans la salle, il sera inutile toute sorte d'isolation, car l'ammoniac détendue sera condensé afin de générer le froid, et du coup sa température avant condensation et moins importante, et par conséquent nous allons nous concentrer surtout sur les échangeurs.

#### **IV.2.3.3 Le circuit frigorifique :**

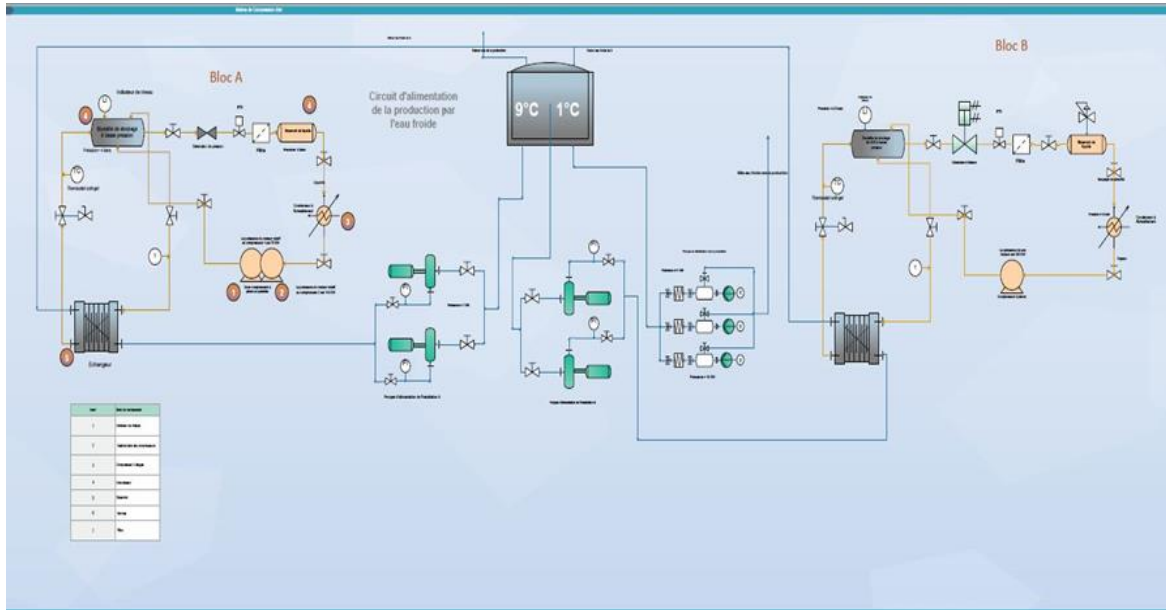
Ces installations, se présentent sous forme d'une chambre froide et d'un circuit –ammoniac / eau glycolée- permettant le refroidissement du mélange de l'eau et du CO<sub>2</sub>.

Le cycle frigorifique compression, condensation, détente, évaporation est un principe thermodynamique utilisant les propriétés physiques d'un fluide pour assurer un transfert de chaleur ou d'énergie.

Le circuit frigorifique comporte quatre éléments essentiels, le compresseur, le condenseur, le détendeur, l'évaporateur. Le circuit frigorifique permet ainsi de capter ou retirer l'énergie contenue dans une source appelée "source froide" pour la transférer ou la rejeter vers une "source chaude".

Dans le cas de l'entreprise SOFAB, le système frigorifique dispose de trois compresseurs qui fonctionne séparément selon le besoin, et deux échangeurs, à travers lesquelles l'ammoniac condensé étant à une température très basse, va refroidir l'eau glycolée (eau + glycol).

D'ailleurs le glycol est ajouté à l'eau pour que celle-ci atteigne des températures très basses sans qu'elle soit gelée.



**Figure IV. 6:circuit de refroidissement.**

#### **IV.2.3.4 Mesures réalisées :**

Le même outillage de mesure utilisé pour la vapeur est utilisé pour le froid en particulier la caméra thermique. Pour cela nous avons réalisé différentes mesures au niveau du système de froid les résultats sont présentés dans les figures suivants:

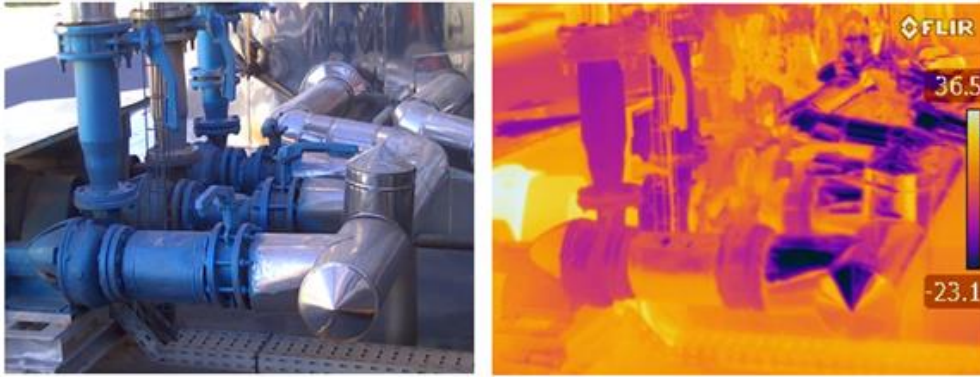
- Au niveau des pompes d'alimentation des installations:



**Figure IV. 7:images des pompes d'alimentation des installations prises par la caméra thermique.**

- Au niveau des Pompes de distribution vers la production :





**Figure IV. 8:images des Pompes de distribution vers la production prises avec la caméra thermique.**

- Au niveau de l'échangeur :



**Figure IV. 9:image de l'échangeur prise avec la caméra thermique.**

### **IV.2.3.5 Résultats et interprétation**

#### **IV.2.3.5.1 Le bilan**

Pour bien réussir cette mission de réduire la consommation dans un système de froid il faut tenir compte des conditions climatiques (température et humidité).

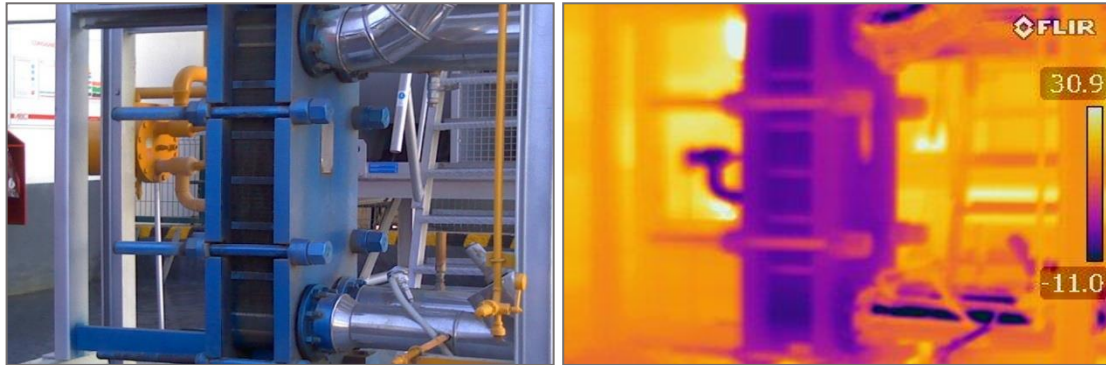
- **Etude thermique de circuit d'eau froid :**

*Echangeurs :*

Un échangeur de chaleur est un dispositif permettant de transférer de l'énergie thermique d'un fluide vers un autre sans les mélanger. Le flux thermique traverse la surface d'échange qui sépare les fluides.

L'intérêt du dispositif réside dans la séparation des deux circuits et dans l'absence d'autres échanges que la chaleur, qui maintient les caractéristiques physico-chimiques (pression, concentration en éléments chimiques...) de chaque fluide inchangé hormis leur température ou leur état.

Entre autres, on trouve cet échangeur qui manque d'isolation, celui-ci se trouve en dehors de la salle de chaudière et des compresseurs, et vu son contact direct avec son environnement, on constate une perte très importante qui s'échappe de l'échangeur et qui atteint  $-11^{\circ}\text{C}$ , et de même pour l'autre échangeur juste à côté, puisqu'il y a deux circuits.



**Figure IV. 10: image de l'échangeur prise avec la caméra thermique.**

On trouve que le même problème se répète au niveau de presque tous les échangeurs des quatre lignes, alors une isolation des échangeurs peut avoir un impact positif sur la consommation énergétique des trois compresseurs.

D'ailleurs, les images thermiques dévoilent d'autres pertes que l'on trouve au niveau des raccordements surtout au niveau de l'installation extérieur de l'eau froide qui est sujette à une hausse de température plus que les autres installations, surtout lorsqu'il fait chaud.

Et comme on peut le constater, la température au niveau de ces raccordements non isolés peut arriver jusqu'à  $10,2^{\circ}\text{C}$  au niveau de l'eau froide d'allée, et presque  $14^{\circ}\text{C}$  au niveau de celle de retour.

Quant au niveau de la production, on trouve que presque toutes les conduites portant l'eau froide, que ça soit d'allée ou bien au retour, sont bien isolées et ne présentent pas un problème de perte d'énergie. Un plan d'action est déclenché pour réaliser des calorifugeages pour toutes les parties ou organes où sont constatées les pertes énergétiques. Cette action de maintenance de calorifugeage a réduit considérablement les pertes énergétiques.

#### **IV.2.4 systèmes d'entraînement par moteurs électriques**

Le nombre de moteurs électrique, accouplement et autres organes tels que pompe, ... est très important dans cette entreprise et qui est de l'ordre de 52. Le diagnostic a montré que 50% pose le problème de désalignement, 30% problème de balourd, 20% problème non identifié. Les actions de maintenance de maintenance sont mises au point pour éliminer les désalignements et les balourds par un appareillage très précis. Ces actions ont réduit considérablement les pertes énergétiques la température des moteurs et par conséquent la dégradation des équipements en particulier les machines tournantes moteurs, pompes, ...

#### IV.2.5 réseau de distribution électrique

L'intérêt de l'**analyse du réseau électrique** est de connaître la qualité de l'installation électrique à travers des paramètres électriques afin d'identifier et de prévenir des éventuelles pertes énergétiques et pannes pouvant causer des dégâts sur les installations industrielles et nuire à la productivité de l'entreprise par l'augmentation de la facture [23].

Grace aux instruments choisis caméra thermique et un analyseur électrique on peut obtenir une image instantanée des principales caractéristiques de la qualité du réseau électrique. Ses fonctionnalités font de cet analyseur l'instrument idéal pour réaliser la maintenance, quelle soit préventive ou corrective. Il permet aussi de réaliser le bilan énergétique complet d'une installation [24].

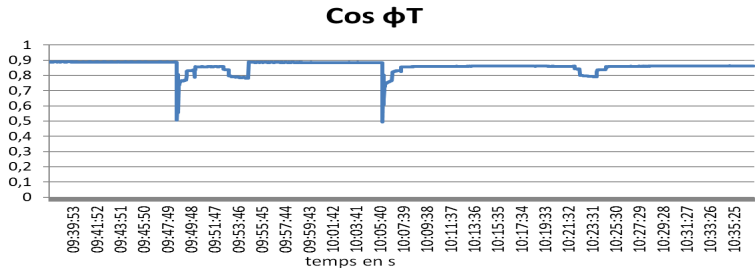
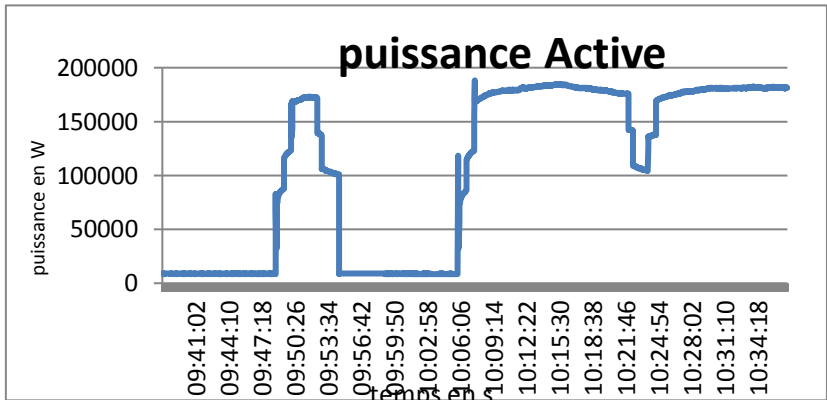
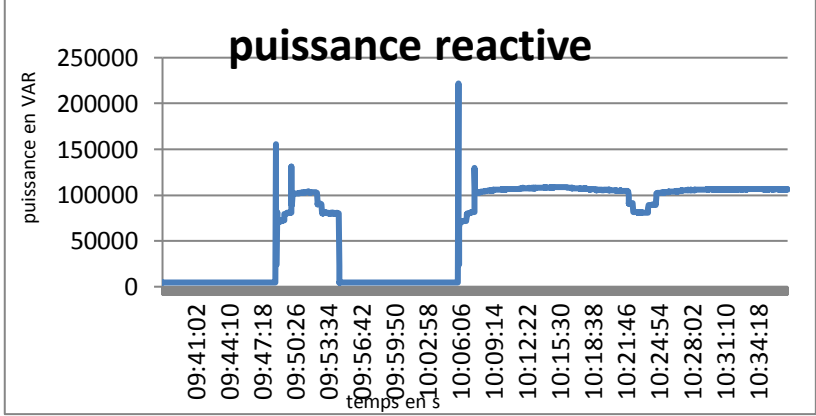
Lors de leurs connexions, les capteurs de courant permettent d'obtenir une lecture directe des mesures :

- Des entrées Tension/Courant, munies de bagues de repérage couleur
- La décomposition des puissances réactives, avec notion de puissance non-active

(N), de puissance déformante (D), et de puissance réactive (Q1).

- Détection et anticipation des problèmes liés à la qualité du réseau électrique avant qu'ils ne provoquent des temps d'arrêts (dans le cadre d'une maintenance préventive)
  - **Mesure, calcul et affichage des harmoniques** qui sont une perturbation fréquentielle qui modifie la forme du signal de sortie. Les harmoniques provoquent des échauffements qui à terme, diminuent la durée de vie des équipements. On peut constater une usure prématurée des composants mécaniques d'entraînement provoquant des pannes prématurées.
  - **Taux de distorsion harmonique (THD)** : proportion des harmoniques d'un signal par rapport à la fondamentale.

L'analyseur de réseaux, outil performant pour l'analyse des problèmes électriques et dysfonctionnements des appareils et équipement alimentés en énergie électrique cas d'un compresseur.

paramètres	Résultat
<p>cosi PHI</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Le facteur de puissance : Cos(phi ) min =0.493 ; Cos max =0.89</li> </ul>	 <p style="text-align: center;"><b>Cos φ T</b></p>
<p>puissance active</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>La puissance active : Pmax =188229.75 W; Pmin =8666.94w</li> <li>Chute du cos φ (à 10H :05 :55).</li> </ul>	 <p style="text-align: center;"><b>puissance Active</b></p>
<p>puissance réactive</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>La puissance réactive : Pmax =221885.84 VAR ; Pmin =4289.94 VAR</li> </ul>	 <p style="text-align: center;"><b>puissance reactive</b></p>

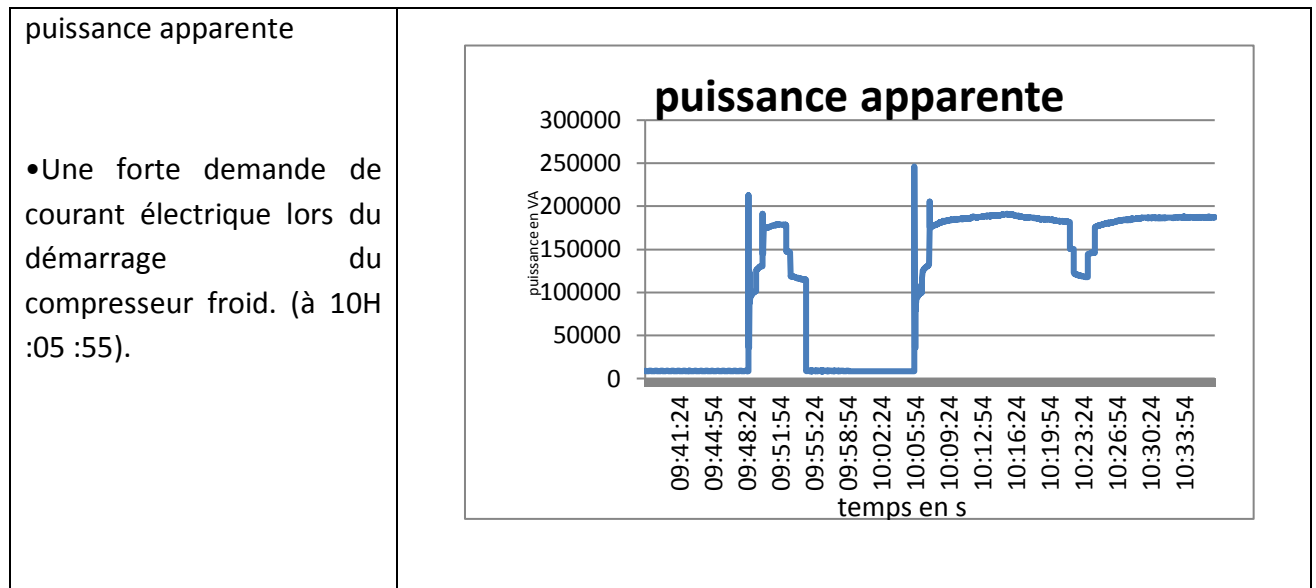


Figure IV. 11: Puissance consommée.

- La consommation énergétique des compresseurs du groupe froid est de 105kWh.

Comme conclusion il est nécessaire une gestion efficace des équipements en particulier d'éviter le marcher-arrêt de certaines machines de production d'énergie tel que les compresseurs. Un travail similaire a été réalisé pour tous les équipements et une gestion est planifiée pour éviter la consommation d'énergie.

Nous avons analysé par caméra thermique tous les circuits électriques en particulier les armoires, transformateurs, cables... Les résultats obtenus sont présentés sur les figures suivantes:

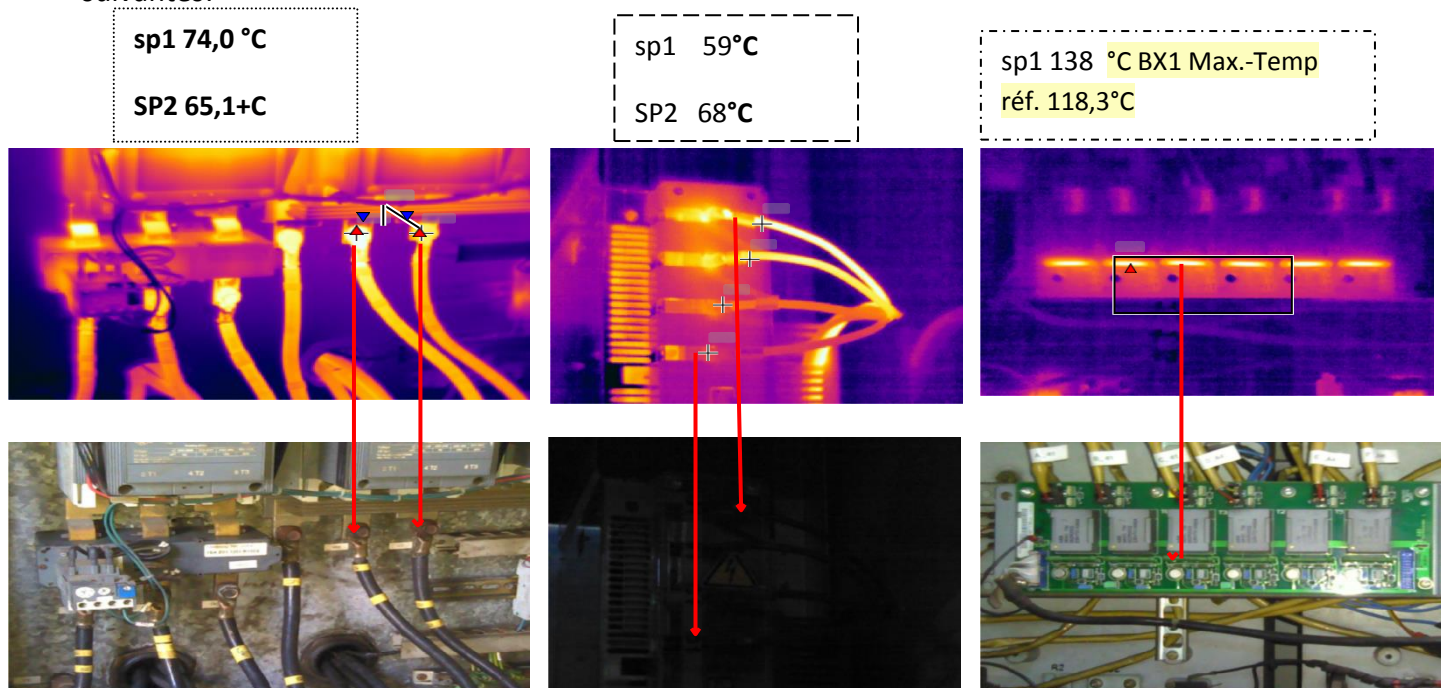


Figure IV. 12 : pertes thermiques Transformateur et armoire électrique.



Sur ce transformateur, les bornes de raccordement du dessous de la phase de gauche sont plus chaudes de 15°C comparativement aux autres phases.

Sur ce transformateur, les bornes de raccordement du dessous de la phase de droite (verticalement) sont plus chaudes de 59°C comparativement aux autres phases. Nous suspectons que le problème soit lié au mauvais contact au niveau des pièces mobiles, au cœur même de cette pièce d'équipement.

#### **IV.2.1 Les actions de maintenance mises en œuvre**

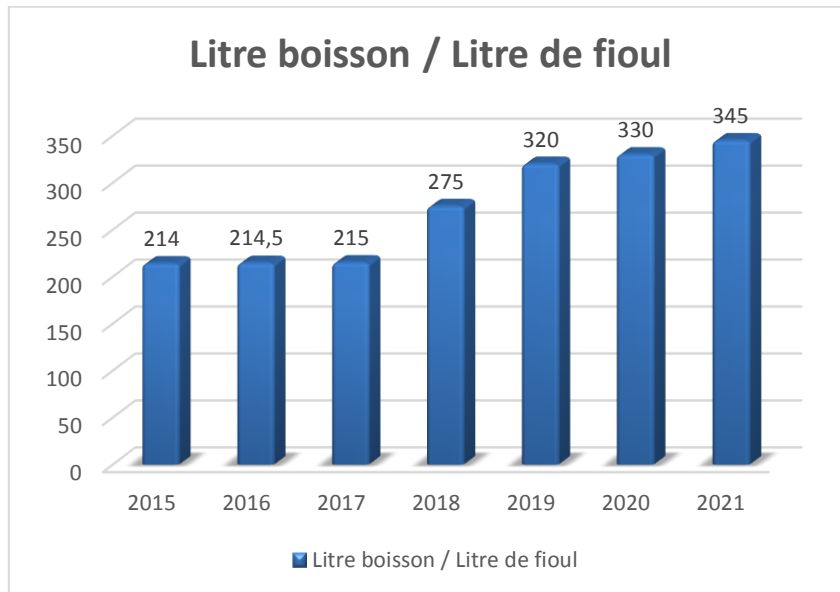
Suite à ces résultats des actions de maintenance sont mises en œuvre tel que le nettoyage ou le changement des différents fils ou connections, de point de vue gestion des marches arrêts des moteurs électriques sont évités. Nettoyage des composants des poussières régulièrement, contrôle par caméra infrarouge,...

#### **IV.3 Les indicateurs de performance énergétique**

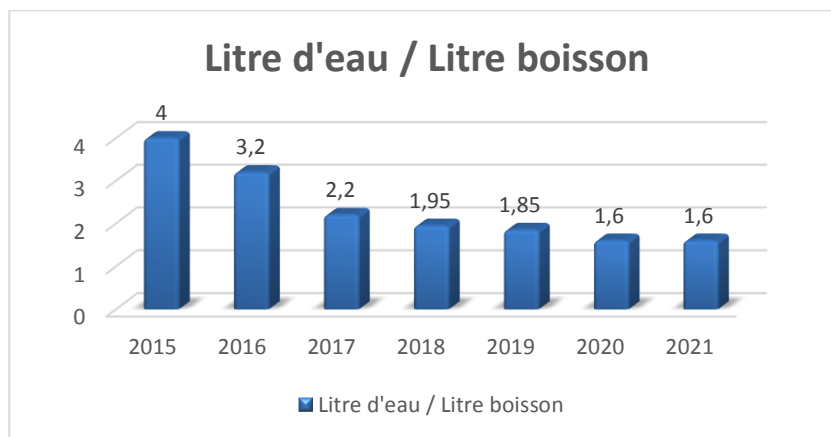
Suite aux différents diagnostics réalisés, on peut remarquer que suite aux actions de maintenance industrielle que les ratios, indicateurs de performance, sont améliorés en particulier depuis l'année 2019. Ces ratios n'ont pas encore atteint les objectifs de l'entreprise, mais qui sont améliorés nettement.

**Tableau IV. 4 : consommation d'énergie en fonction du litre de produit selon les années.**

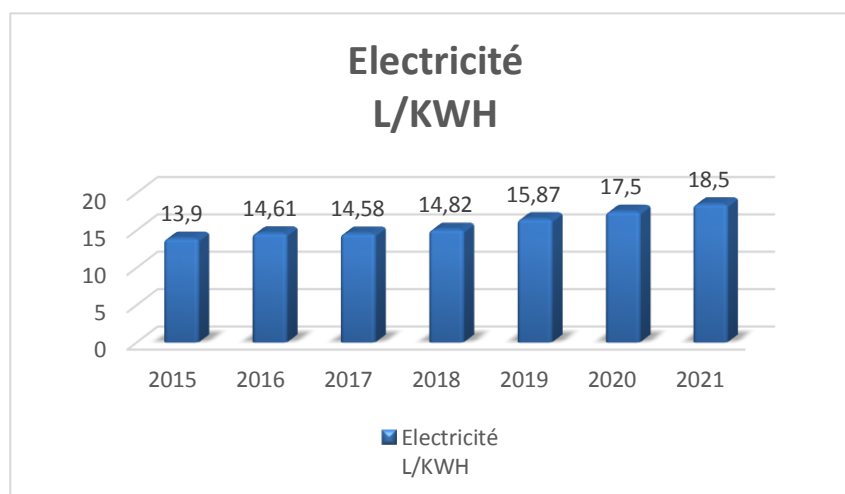
<b>Année</b>	<b>Nombre de litre boisson/ KWH</b>	<b>Nombre de litre boisson/ litre de fioul</b>	<b>Nombre de litre d'eau/ litre boisson</b>
2016	14,61	214,5	3,2
2017	14,58	215	2,2
2018	14,82	275	1,95
2019	15,87	320	1,85
2020	17,5	330	1,6
2021	18,5 (au 30 mois de juin)	345 (au 30 mois de juin)	1,6 (au 30 mois de juin)



**Figure IV. 13: Litre de boisson produit par litre de fioul.**



**Figure IV. 14: Litre de d'eau par litre de boisson produit.**



**Figure IV. 15: Litre de boisson produit par KWH.**

#### **IV.5 Conclusion du chapitre :**

Dans cette partie nous avons réalisé un diagnostic des différentes installations énergétiques avec différents instruments de mesure établies dans le chapitre 3. Ces diagnostics réalisés ont permis de mettre en évidence des pertes énergétiques,

- Fuite d'air comprimé, de vapeur, d'eau
- Des pertes thermiques par rayonnement des surfaces conduite, vannes, purges...
- Electrique : pertes liées à la gestion, surchauffe : des câbles, composants, transformateur
- Gestion des équipements
- Problèmes mécaniques : balourd, alignement,

Des actions sont proposées à l'entreprise, dont la plupart ont été mises en place, ont permis de réduire nettement la consommation d'énergie et un gain très important. Les indicateurs de performance énergétique sont nettement améliorés.

Durant ce travail de diagnostic des centaines de mesures ont été effectuées, la gestion de ces données en nombre très élevés, leur stockage est très difficile et nécessite un espace volumineux. Les mesures en continue nécessite un travail continu ce qui est fatiguant et non précis quelques fois.

Devant ces difficultés il est nécessaire de réaliser des mesures fiables en temps réel et matériel précis. Devant la complexité des nouvelles technologies et l'énorme investissement pour une entreprise pour numériser son système industriel nous allons réaliser une usine numérique (banc d'essai) au sein du laboratoire pour maîtriser les mesures. Pour remédier à ce problème nous proposons dans le chapitre suivant une installation industrielle équipée de capteurs intelligents pour mesurer et stocker en temps réel et un traitement des données par l'intelligence artificielle. Les résultats de cette recherche seront transférés à l'entreprise pour numériser son système de production, maintenance, énergie,...



## Références :

- [1] Meksoub A, Elkihel B, Boulerhcha M (2019) Etude des Performances Énergétiques des Générateurs de Vapeur. In: 3rd international conference on mechanical materials structures, vol 2019, p 13
- [2] Sosa-Arno JH, Nebra SA (2011) First and second law to analyze the performance of bagasse boilers. *Int J Thermodyn* 14(2):51–58
- [3] Hightower DA, Nasal JR (2005) A relative accuracy evaluation of various methods to determine long term coal-burned values for coal pile inventory reconciliation. In: EPRI heat rate improved conference, 25–27 January, p 18
- [4] Srinivas GT, Kumar DR, Venkata P, Murali V, Rao BN (2017) Efficiency of a coal fired boiler in a typical thermal power plant. *Am J MechIndEng* 2(1):32–36
- [5] Kapre AS (2010) Energy auditing and scope for its conservation in textile industry: a case study. MaharanaPratap University of Agriculture and Technology, Rajasthan
- [6] Cortes-Rodríguez EF, Nebra SA, Sosa-Arno JH (2017) Experimental efficiency analysis of sugarcane bagasse boilers based on the first law of thermodynamics. *J BrazSocMechSciEng* 39(3):1033–1044
- [7] Lang FD (2009) Errors in boiler efficiency standards. In: ASME 2009 power conference, no April, pp 487–501
- [8] Patro B (2016) Efficiency studies of combination tube boilers. *Alex Eng J* 55(1):193–202
- [9] IS 13979:1994 (1994) Method of calculation of efficiency of packaged boiler, New Delhi
- [10] ASME PTC4-2008 (2008) Fired steam generators performance test codes, New York
- [11] BS 845-1:1987 (1987) British standard assessing thermal performance of boilers for steam, hot water and high temperature heat transfer fluids, London
- [12] Krishnanunni S, Paul JC, Potti M, Mathew EM (2012) Evaluation of heat losses in fire tube boiler. *Int J EmergTechnolAdvEng* 2(12):301–305
- [13] Ibrahim H, Qassimi M (2008) Matlab program computes thermal efficiency of fired heater. *Period PolytechChemEng* 52(2):61–69

- [14] Harimi M, Sapuan M, Ahmad M, Abas F (2008) Numerical study of heat loss from boiler using different ratios of fibre to shell from palm oil wastes. *J SciInd Res* 67(June):440–444
- [15] Barma MC, Saidur R, Rahman SMA, Allouhi A, Akash BA, Sait SM (2017) A review on boilers energy use, energy savings, and emissions reductions. *RenewSustainEnergyRev* 79(March 2016):970–983
- [16] S. public de Wallonie (2010) Economies d'énergie dans l'industrie, Gecinox
- [17] Sternlicht B (1982) Waste energy recovery: an excellent investment opportunity. *Energy Convers Manag* 22(4):361–373
- [18] ECN (2012) Heat powered cycles, Alkmaar-Netherlands
- [19] Lecompte S et al (2017) Case study of an organic Rankine cycle (ORC) for waste heat recovery from an electric arc furnace (EAF). *Energies* 10(5):1–16
- [20] Wakim M (2017) Etude des machines à absorption pour la valorisation de la chaleur fatale basse température, Paris
- [21] McKendry P (2002) Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *BioresourTechnol* 83(1):47–54.
- [22] G.T. Dhanre, U.T. Dhanre, K. Mudafale, Review paper on energy audit of a boiler in thermal power plant, *Int. J. Eng. Res. Gen. Sci.* 2 (2014) 283–288.
- [23] H. Ghritlahre, T.J. Singh, Effect of excess air on 30 TPH AFBC boiler on dry flue gas losses and its efficiency, *Int. J. Res. AdventTechnol.* 2 (2014) 19–23.
- [24] V. Mallikarjuna, N. Jashuva, B.R.B. Reddy, Improving boiler efficiency by using air preheater, *Int. J. Adv. Res. Eng. Appl. Sci.* 3 (2014) 11–24.

## **Chapitre V : Maintenance industrielle basée sur l'intelligence artificielle**

---

### **Introduction :**

Dans le domaine industriel, l'augmentation de nombre des objets connectés ainsi que le volume considérable de données générées par les capteurs produit des quantités infinies des données sur terrain (énorme données). Les objets connectés génèrent des informations et des données qui s'incrémentent en temps-réel. Aussi, l'exigence de compétitivité nécessite l'amélioration de la disponibilité, de la fiabilité et de la sécurité des objets connectés tout en réduisant leur coût.

Afin d'exploiter efficacement et durablement ces données, il est important de passer d'une industrie classique vers un écosystème qui combine le monde physique et numérique, c'est l'industrie 4.0.

La quatrième révolution industrielle ou l'industrie 4.0 est considérée comme une révolution digitale dans le monde qui devient de plus en plus connecté. Avec l'internet des objets et l'innovation technologique, le monde connaît une transformation numérique vertigineuse dans tout le secteur industriel y compris le secteur énergétique.

Pour répondre à ces défis, nous proposons, dans ce travail, un système de pronostic basé sur les réseaux de neurones qui définit une approche « Pronostic guidé par les données ». En utilisant les données générées par les capteurs de l'IoT en temps réel, le système vise à détecter les signaux de défaillances potentielles avant qu'elles ne se produisent en utilisant des méthodes d'apprentissage automatique. Par conséquent, il nous aide à résoudre les problèmes en avertissant les opérateurs à un stade précoce de sorte que des mesures préventives puissent être prises avant un arrêt de la production. Cette approche fournira une solution de pronostic efficace pour une usine 4.0.

Ce travail aide à établir une maintenance 4.0 à travers de multiples perspectives disciplinaires, permettant de poursuivre la recherche et le développement pour l'innovation industrielle et le progrès social.

### **V.1 Industrie 4.0 :**

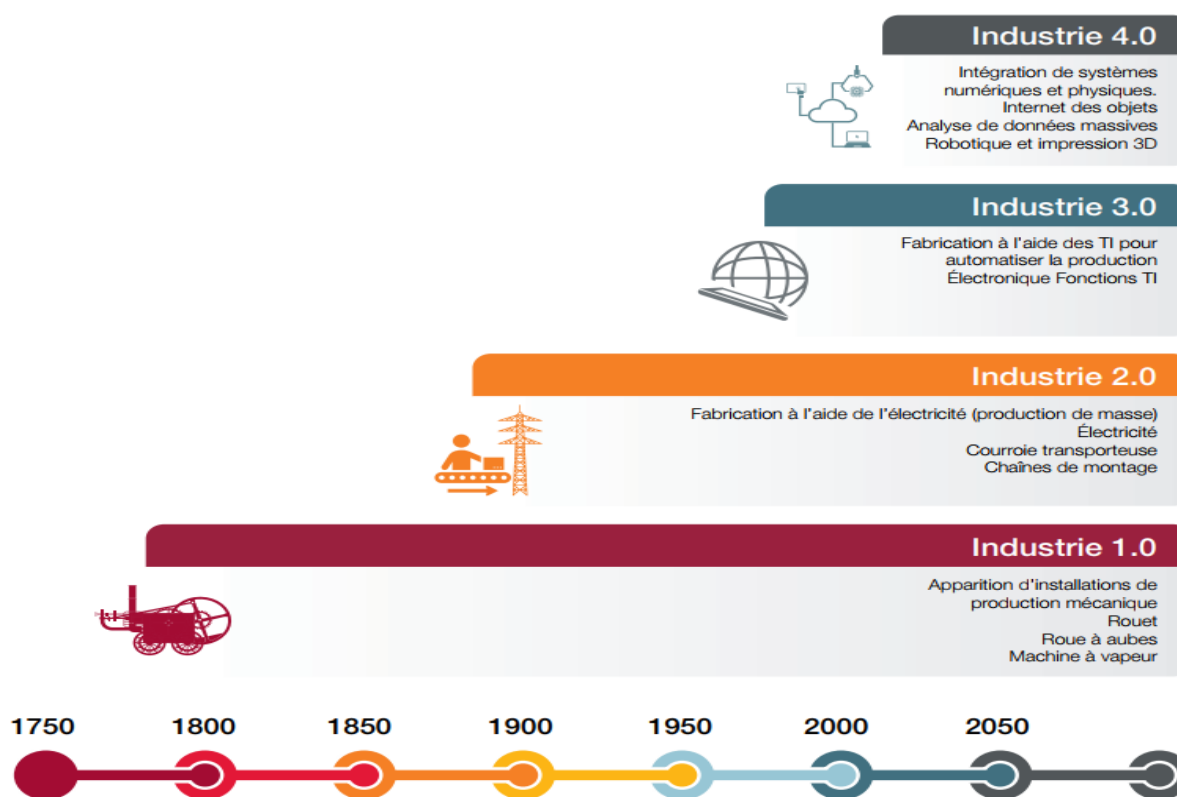
#### **V.1.1 Définition :**

L'industrie 4.0 est un concept qui fait référence à la quatrième révolution industrielle donc c'est une nouvelle méthode ou une nouvelle façon qui vise à développer des nouvelles organisations de production sur toute la chaîne de valeur[1]. Plus concrètement, l'industrie 4.0 est un système interconnecté qui relie des machines, des méthodes de gestion (MES, ERP) et des produits[2]. Il s'agit d'une industrie qui peut prendre les caractéristiques suivantes :

- Une industrie innovante ;
- Une industrie totalement digitalisée ;
- Une industrie flexible ;
- Une industrie économe et responsable sur le plan environnemental.

Cette nouvelle industrie doit permettre de répondre aux défis d'une production pour faire face aux attentes du client, mais avec des délais courts de mise sur le marché et au prix d'une production optimisée sur le plan énergie consommée, pannes réduites,...[3][4].

Le nom d'industrie 4.0 fait référence à la quatrième révolution industrielle ; les trois premières ayant été réalisées par les machines à vapeur et la mécanisation ; l'électricité et la production de masse ; l'automatisation et la technologie de l'information[5].



**Figure V. 1: Les innovations et la technologie ont toujours été le moteur des révolutions industrielles.**

- La 1<sup>ère</sup> révolution industrielle fut déclenchée dans les années 1780 par la création de la première usine de production mécanisée notamment grâce à l'invention de la machine à vapeur.
- La 2<sup>ème</sup> révolution industrielle débuta en 1860, avec l'invention de l'électricité puis de la production de masse.

- Dans les années 1970, la 3<sup>ème</sup> révolution industrielle signifie l'entrée dans l'air de la production automatisée avec le développement de l'électronique et les débuts de l'automatisme et de l'informatique industrielle.
- La 4<sup>ème</sup> révolution industrielle débutera avec l'intégration des systèmes numériques et physiques, l'Internet des Objets « IOT », le cloud computing et Big data... Pour fabriquer des produits grâce à des systèmes intelligents.

L'industrie 4.0 se fera par l'intermédiaire de l'Internet des objets et de l'Internet des services qui s'intégreront à l'environnement manufacturier. Alors qu'avec la quatrième révolution, nous avons la possibilité de guider de manière proactive la manière dont elle transforme notre monde[6]. La vision d'Industrie 4.0 est qu'à l'avenir, les entreprises industrielles construiront des réseaux mondiaux pour connecter leurs machines, leurs usines et leurs entrepôts comme des systèmes cyber-physiques, qui se connecteront et se contrôleront mutuellement de manière intelligente en partageant des informations qui déclenchent des actions[7]. Ces systèmes cyber-physiques prendront la forme d'usines intelligentes, de machines intelligentes, d'installations de stockage intelligentes et de chaînes d'approvisionnement intelligentes. Cela permettra d'améliorer les processus industriels dans l'ensemble de la fabrication, grâce à l'ingénierie, l'utilisation des matériaux, les chaînes d'approvisionnement et la gestion du cycle de vie des produits. C'est ce que nous appelons la chaîne de valeur horizontale, et la vision.

#### **V.1.2 Les enjeux autour de l'industrie 4.0 :**

L'industrie du futur est une notion bien plus transverse, elle répond à des enjeux sur 4 plans majeurs :

**Enjeux sur le plan technologique :** les marchés évoluent et l'exigence s'en trouve accrue. Il n'a jamais été aussi important de répondre à la demande dans des délais courts et aux prix négociés. Pendant ce temps, cette même demande trouve son envol dans les produits personnalisables, obligeant les industries à concevoir des procédés agiles et reconfigurables de manière presque instantanée.

**Enjeux sur le plan organisationnel :** l'agilité des machines s'accompagne aussi d'une agilité organisationnelle. Enfin, la stratégie de montée en gamme et d'innovation, couplée à une production toujours plus flexible, nécessite de repenser le management et plus particulièrement celui des ressources humaines.

**Enjeux sur le plan environnemental :** depuis les années 70, l'industrie fait l'objet de tensions, légitimes, sur le plan environnemental. Avec des ressources qui se raréfient, le changement climatique, et la transition énergétique peu à peu initiée dans tous les pays, l'usine 4.0 a plus que jamais besoin d'avoir une empreinte écologique très faible. Cette usine doit aussi "penser" à ses produits, souvent source majeure de pollution et de dette environnementale.

**Enjeux sur le plan sociétal** : l'industrie doit chercher à réduire ses impacts négatifs sur son environnement économique et social (externalités négatives) et ainsi développer une responsabilité sociétale (RSE).

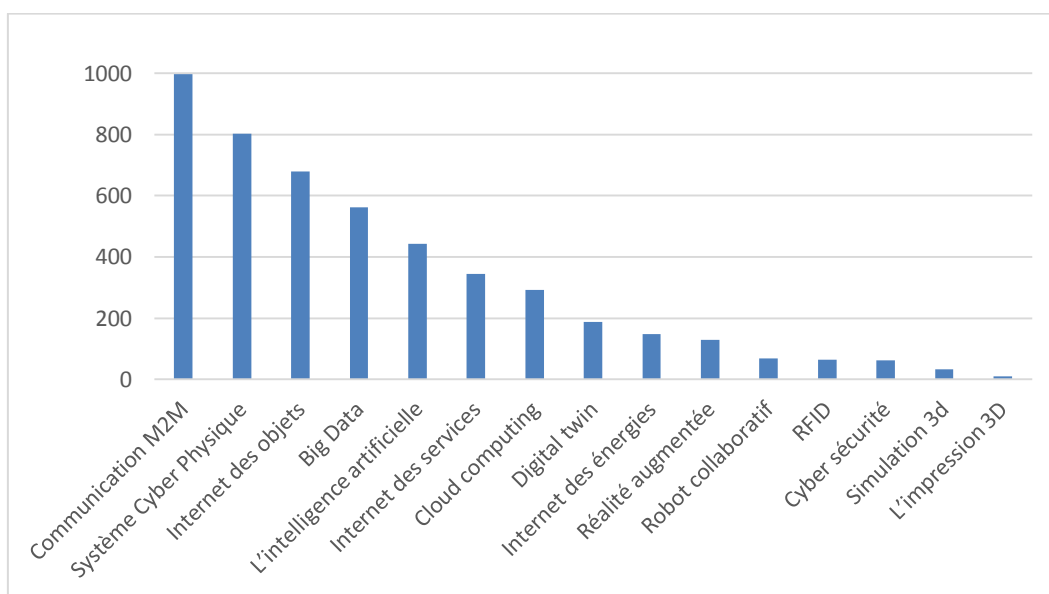
## V.2 Les travaux de recherche sur les technologiques de l'industrie et la maintenance 4.0 :

L'objectif de cette section est de donner un bref aperçu des principaux concepts et activités de technologie développées dans le domaine de l'industrie 4.0 et de la maintenance 4.0.

Les entreprises allant vers une industrie 4.0 embrassent les nouvelles technologies, certaines étant encore émergentes ou à des stades d'utilisation n'exploitant pas leur plein potentiel.

Plusieurs études concordent pour résumer les progrès technologiques dans les piliers capables de conduire à l'amélioration dans le domaine de l'industrie 4.0, que ce soit utilisé seul ou en combinaison.

L'analyse documentaire réalisée dans le cadre de ce travail a permis de trouver un nombre considérable d'articles [8][9][10] sur les progrès technologiques qui capables de conduire à l'amélioration dans le domaine de l'industrie 4.0. Comme on peut l'observer dans la figure V.2.

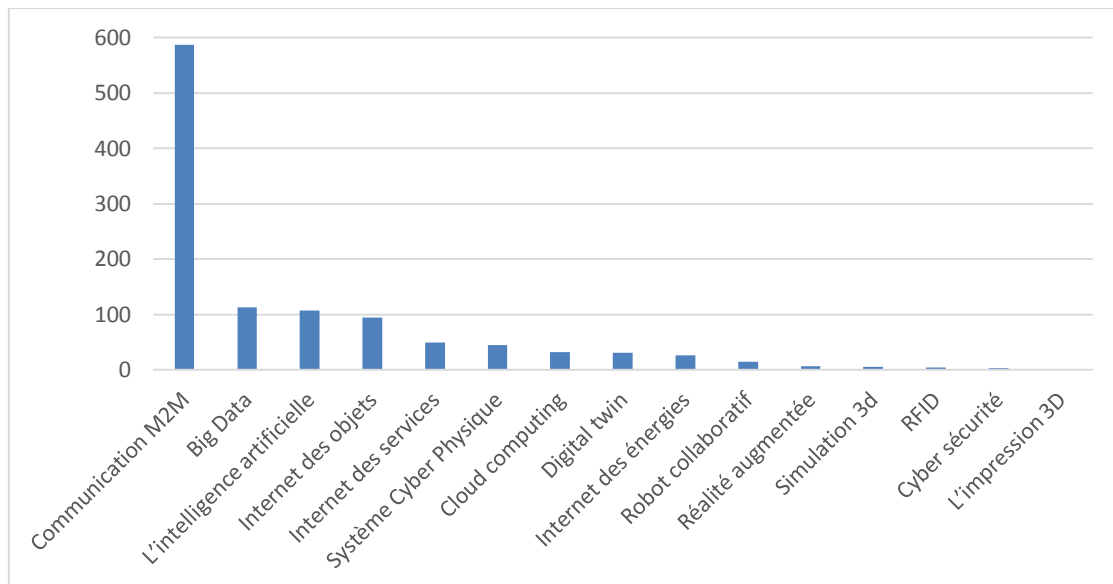


**Figure V. 2: Les innovations et la technologie ont toujours été le moteur des révolutions industrielles.**

On ne peut pas parler de l'industrie 4.0 sans parler de la maintenance 4.0, c'est l'une de ces domaines prioritaires.

L'application de la maintenance 4.0 dans les environnements de production apporte plusieurs avantages et implique également de surmonter plusieurs défis. Parmi les avantages de la maintenance 4.0 comprennent l'amélioration de la productivité, la

réduction des défauts du système [11], la minimisation des temps d'arrêt non planifiés [12], l'efficacité accrue de l'utilisation des ressources financières et humaines [13] et l'optimisation de la planification des interventions de maintenance. L'utilisation de l'apprentissage automatique « ML » permet d'établir des pronostics et de prédire les défaillances, par exemple, d'estimer la durée de vie d'une machine en utilisant une grande quantité de données pour former un algorithme Machine Learning en plus d'être utilisé pour diagnostiquer les défaillances [14].



**Figure V. 3: Nombre de publication dans la maintenance 4.0 (2015-2021).**

Parmi les nouvelles technologies de l'industrie 4.0 et de la maintenance 4.0, il y a :

- **Communication M2M**: c'est une communication entre deux machines ou plus « Machine To Machine » qui désigne l'ensemble des échanges de données effectués entre plusieurs machines (dans un système fermé) sans intervention humaine.
- **IoT (Internet of Things)**: aussi appelé « Internet des Objets » qui correspond à plusieurs appareils physiques interconnectés et capables de transférer des données sur un réseau [6]. Il s'agit de prendre toutes les machines, les capteurs, les appareils et de les connecter (internet, 4G, Bluetooth, Zigbee)... Ce concept est aujourd'hui au cœur de l'industrie 4.0.

Cette technologie profite à l'industrie manufacturière de trois manières principales :

- IoT aide les usines à obtenir une efficacité de 100 % de leur approvisionnement en identifiant et en résolvant les problèmes avant qu'ils nous provoquent des arrêts.
- IoT rend les processus et les opérations cognitifs afin que les usines puissent produire une qualité et un rendement maximum.

- IoT aide les directeurs d'usine à mieux gérer les ressources, améliorer l'expertise des travailleurs et fournir un environnement de travail sûr.
- **Big data** : Les données ont aujourd'hui atteint un volume gigantesque qu'aucun outil classique de gestion de bases de données ne peut l'analyser. Cette problématique a mené à l'émergence de la Big Data qui a pour but de stocker un nombre énorme des données puis les structurer pour les rendre accessibles par la suite[15].
- **Intelligence Artificielle** : c'est une science qui étudie et développe des théories, des méthodes, des technologies et des applications pour simuler et étendre l'intelligence humaine. L'objectif de l'IA est de permettre aux machines de penser comme des personnes et de rendre les machines intelligentes[16] .
- **Cloud** :c'est une nouvelle façon d'accéder aux ressources informatiques via l'internet, au lieu d'acheter ou de posséder des serveurs ou des centres de données physiques[17]. Il nous permet de bénéficier de la puissance de calcul et de stockage de serveurs informatiques distants, avec des coûts inférieurs à ceux des parcs informatiques internes.
- **Digital Twin**« Le jumeau numérique » : Il désigne un modèle virtuel d'un processus ou d'une machine réel. Le jumelage des mondes virtuel et réel permet d'analyser les données, surveiller les systèmes, prévenir le temps d'arrêt et planifier les interventions adéquates[18].
- **Augmente Reality** « La Réalité Augmentée » : C'est une technologie permettant de visualiser en temps réel des objets et des entités physiques sur un support numérique, c'est-à-dire, améliorer ou augmenter d'une manière numérique l'environnement réel d'une personne avec un ensemble des objets virtuels ; qui sont générés par ordinateur avec un suivi de mouvement[9][19].

### **V.3 Les notions de la maintenance dans le domaine industriel :**

L'industrie actuel a une forte connotation de tout ce qui est en relation avec la technologie de l'information et de la communication, qui permet à l'heure actuelle la mise en place des techniques innovantes de gestion de la maintenance, en passant par une maintenance classique à une maintenance prédictive et distanciel grâce à l'industrie 4.0.

Dans cette partie, on va mettre en place les différents types de maintenance dans le domaine industriel, puis on va traiter les nouvelles notions intégrées dans la maintenance prédictive (surveillance, diagnostic, pronostic).

#### **V.3.1 Les types de la maintenance industrielle :**

La maintenance est un ensemble des activités destinées à maintenir, à rétablir d'un moteur ou d'une chaîne de production dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise.



#### **V.3.1.1 La maintenance corrective :**

Comme l'indique son nom, elle vise à corriger les défauts de fonctionnement de tout équipement ou ligne de production dès leur apparition. Donc c'est une maintenance qui effectue après la défaillance. Suivant la nature des interventions, on distingue deux types de remise en état de fonctionnement :

- Curative (la réparation) : remise en état de fonctionnement conforme aux conditions données.
- Palliative (le dépannage) : remise en état provisoire qui sera obligatoirement suivi d'une réparation.

Pour limiter le coût de la maintenance corrective, les industriels optent pour la maintenance corrective palliative.

#### **V.3.1.2 La maintenance préventive :**

La maintenance préventive ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'une machine ou d'un moteur.

Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unités d'usage (maintenance systématique) et/ou de critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service (maintenance conditionnelle).

- Maintenance Préventive Systématique : Ce type de maintenance préventive se distingue par sa périodicité. Systématique, elle est réalisée à des intervalles de temps bien définis et de façon périodique. Elle permet ainsi de remplacer les composants et les pièces détachées régulièrement, ce qui améliore la productivité des machines.
- Maintenance Préventive Conditionnelle : La maintenance préventive conditionnelle consiste à surveiller les paramètres et les indicateurs clé du fonctionnement du bien et à mettre en œuvre les actions correctives nécessaires afin d'anticiper toute panne et tout dysfonctionnement.

#### **V.3.1.3 La maintenance prédictive ou prévisionnelle :**

L'émergence des solutions de traitement et d'analyse des données ainsi que de l'intelligence artificielle a permis aux industriels de planifier une maintenance prédictive ou prévisionnelle qui se base sur la prédiction des pannes et des dysfonctionnements. Ce type de maintenance industrielle permet aux entreprises d'anticiper les problèmes en planifiant les interventions nécessaires basées sur les prédictions. Elle permet ainsi de limiter les dépenses causées par les pannes inattendues et la perturbation de la production et c'est à partir de la digitalisation et la numérisation des processus et des industries.

#### **V.3.1.4 La maintenance améliorative :**

On apporte des modifications à la conception d'origine dans le but d'augmenter la durée de vie des composants, de les standardiser et bien sûr de réduire la consommation d'énergie et

d'améliorer la maintenabilité. D'une manière générale, c'est d'améliorer la sûreté de fonctionnement d'une machine ou d'un processus sans changer sa fonction requise.

Parmi les objectifs de la maintenance améliorative :

- L'augmentation des performances de production.
- L'augmentation de la fiabilité.
- L'amélioration de la maintenabilité.
- La standardisation de certains éléments ou sous-ensemble,
- L'augmentation de la sécurité des utilisateurs.

### V.3.1.5 La maintenance proactive (PRM) :

La maintenance proactive implique la surveillance et la vérification continue des causes primaires de défaillance du système surveillé. Le mode proactif et la philosophie de la maintenance centrée sur la fiabilité (MCF), elle augmente la productivité, l'efficacité du personnel et des interventions aussi la motivation de la main d'œuvre et la sécurité des machines.

### V.3.1.6 E-Maintenance :

L'e-maintenance est un concept émergent généralement qui intègre et synchronise les différentes applications de maintenance et de fiabilité pour recueillir et fournir des informations sur les actifs d'une usine ou d'un système de production du que ces dernières sont suivies et gérées par internet.

Le but de la e-maintenance est de surveiller les actifs de l'usine, de relier les systèmes de production et de maintenance, de recueillir les réactions des sites clients distants et de les intégrer aux applications d'entreprise de niveau supérieur, pour atteindre des performances prédictives à temps d'arrêt quasi nul et de se synchroniser avec le système d'entreprise.

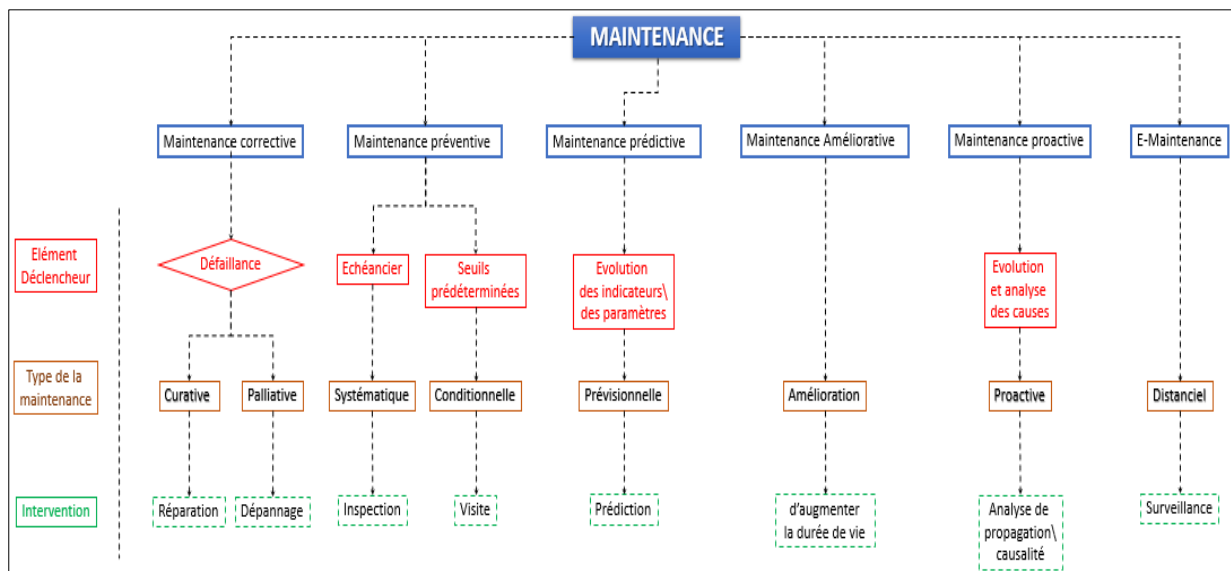


Figure V. 4: Les différents politiques de la maintenance industrielle.

### **V.3.2 l'intérêt la maintenance prédictive :**

Les industriels aujourd'hui cherchent à développer des méthodes et des procédures destinées à prévenir les dérives, et anticiper les dysfonctionnements et les pannes des équipements ou les non-qualités. Jusqu'ici, ces méthodes sont essentiellement appuyées sur des approches statistiques (Statistic Process Control, Statistic Quality Control) qui prenant en compte que les paramètres à surveiller. C'est pour cela les industriels pensaient à utiliser le IoT et l'intelligence artificielle dans le domaine de l'industrie pour dépasser les limites de l'ancienne maintenance.

C'est pour cela, la maintenance industrielle a connu plusieurs changements et développement au terme de fonctionnalités et d'adaptation avec les nouvelles politiques de l'industrie, cependant ; le développement de la technologie et la digitalisation ont créé un grand défi dans le monde industriel, ce qui l'a rendu de plus en plus complexe. Avec la vague du numérique et la digitalisation liée à l'émergence de l'industrie 4.0, la maintenance prévisionnelle ou prédictive prend toute sa place dans les entreprises industrielles, en combinant différentes technologies : des capteurs intelligents (IoT, IA), des logiciels de GMAO (Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur) et des algorithmes performants d'analyse de données et d'intelligence artificielle.

C'est pour cela, le passage de l'ancienne maintenance vers une nouvelle maintenance a été indispensable. Ce passage a été effectué généralement de la maintenance préventive vers une maintenance prédictive.

Pour mieux comprendre ce passage, on doit tout d'abord comprendre les cinq notions suivantes : la description, la surveillance, le diagnostic, le pronostic et la perspective.

#### **V.3.2.1 La Description :**

La première étape de la maintenance industrielle consiste en la description. Cette étape a pour but d'obtenir les données du passé et rapporté ce qui s'est passé à l'aide de statistiques descriptives. Cette étape est essentielle pour tout système industriel pour savoir l'historique des pannes puis extraire les données nécessaires.

#### **V.3.2.2 La Surveillance :**

L'étape suivante consiste en la surveillance. Cette étape a pour but de surveiller et détecter si la machine est soumise à l'effet d'une cause spéciale impliquant un accroissement de la variabilité de la chaîne. Cette étape est essentielle. En effet, si un dysfonctionnement n'est pas surveillé, la production engendrée peut être non-aux spécifications exigées.

La performance de la surveillance se situe sur la vitesse de détection. En effet, plus un dysfonctionnement est présent dans le système, plus elle engendre de production erronée. Il est donc essentiel pour tout système de surveillance d'être capable de conclure l'état de fonctionnement de système et ce le plus rapidement possible.

La surveillance nous permet de détecter la présence ou non d'un défaut dans le système. Mais le fait de savoir qu'un défaut est apparu dans le système ne permet pas de savoir quelle est la nature de ce défaut, ceci va être le rôle de la phase de diagnostic.

#### V.3.2.3 Le Diagnostic :

L'étape de diagnostic est la recherche ou l'analyse de la cause d'un problème ou d'un état, c'est-à-dire déterminer la cause de la détection et l'identification d'un mode de défaillance hors-contrôle au sein d'un système.

On peut conceptualiser la tâche du diagnostic comme une exploration approfondie de la défaillance pour identifier la cause principale après qu'elle soit produite. C'est d'approfondir la recherche, d'élaborer des hypothèses et d'analyser les données pour identifier les raisons et les causes principales de la défaillance qui a trouvé au stade de la description et de la surveillance.

Un système de diagnostic statue sur la cause de l'apparition d'une défaillance dans le système après qu'il soit produit. Donc le temps joue un rôle moins important dans le diagnostic, ce qui le distingue du pronostic.

#### V.3.2.4 Le Pronostic :

Le pronostic est l'étape dans laquelle son but est de générer une estimation rationnelle de la durée de vie restante et/ou de la durée de performance restante jusqu'à ce qu'une défaillance complète survienne, en se basant sur les données du passé et les facteurs futurs possibles, pour prévoir l'avenir. Le pronostic, dans sa forme la plus simple, consiste à surveiller et à détecter les premières indications de dégradation d'un composant, et être en mesure de faire des prévisions précises de manière constante. Le pronostic consiste à étudier les problèmes en tenant compte du facteur de temps pendant la période de dégradation et de faire des prévisions.

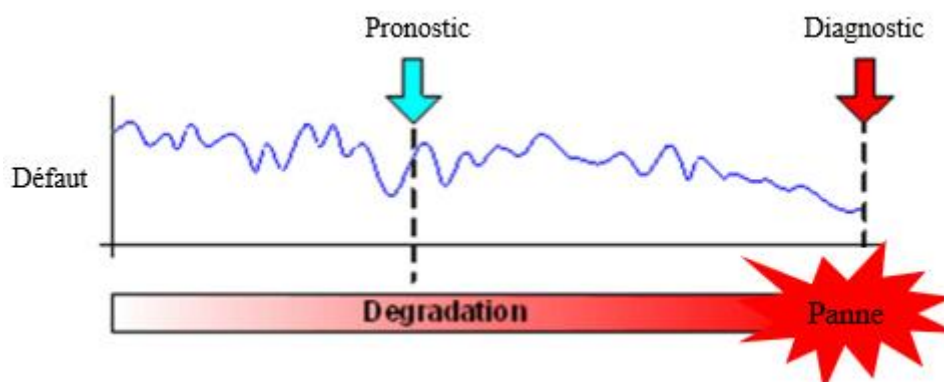


Figure V. 5: Différence entre le diagnostic et le pronostic.

### **V.3.2.5 La Perspective :**

L'étape de la perspective, elle indique ce qu'elle faut faire pour atteindre le résultat souhaité. On doit étudier les relations de cause à effet entre les variables indépendantes et dépendantes afin de recommander la ligne de conduite idéale.

Une maintenance prédictive efficace doit conduire à une réduction des pertes des arrêts non-programmée de production. Son efficacité est fortement liée à sa faculté de caractériser l'état de santé courant (diagnostic) et futur (pronostic) du système. Pour cela, il est nécessaire de pouvoir générer des données permettant de rendre compte de la dynamique de la dégradation du système, de modéliser ou d'apprendre ses modes de dégradation, d'estimer son état de santé et de prédire sa durée de vie résiduelle. Tout cela est rendu possible par l'intelligence artificielle, c'est pour cela les industriels pensaient à utiliser cette dernière dans le domaine de l'industrie pour dépasser les limites de l'ancienne maintenance.

### **V.4 L'intelligence artificielle**

Les principaux sujets d'étude de l'intelligence artificielle sont l'acquisition et la représentation de la connaissance sous toutes ses formes, puis le pouvoir de l'interpréter. En effet, l'IA est une science qui date d'une trentaine d'années. Son objet est de reconstituer à l'aide de moyens artificiels (presque toujours des ordinateurs) des raisonnements et des actions intelligentes.

Pour ce projet, l'intelligence artificielle a pour objectif de nous aider à la prise de décision pour un système industriel, c'est-à-dire élaborer un système de maintenance intelligent consistant à faire le diagnostic instantané du système pour ensuite pouvoir détecter les défauts en moment réel, afin d'optimiser les coûts de maintenance et d'éviter les pannes qui influencent directement sur la consommation de l'énergie.

#### **V.4.1 Définition de l'intelligence artificielle :**

En 1956, l'avènement de l'intelligence artificielle (nom donné par McCarthy) a suscité la conception de systèmes ayant pour objectif délibéré de modéliser la complexité de l'intelligence humaine. Les chercheurs ont conçu ces systèmes comme des cerveaux isolés d'un corps, excluant l'action dans l'élaboration de leurs connaissances. Des réalisations semblaient prouver, par leur efficacité, que des ordinateurs pouvaient se passer d'organes sensoriels et moteurs pour raisonner ou communiquer.

C'est une discipline scientifique relative au traitement des connaissances et au raisonnement dans le but de permettre à une machine d'exécuter des fonctions normalement associées à l'être humain. L'intelligence artificielle tente de reproduire les processus cognitifs humains dans le but de réaliser des actions « intelligentes ». Elle est comme « la construction des programmes informatique qui s'adonnent à des tâches qui

sont pour l'instant accomplies de façon plus satisfaisante par des êtres humains, car elles demandent des processus mentaux de haut niveau tels que :

- ✓ L'apprentissage perceptuelle.
- ✓ L'organisation de la mémoire et le raisonnement critique.

La norme ISO 2382-28 définit l'intelligence artificielle comme « la capacité d'une unité fonctionnelle à exécuter des fonctions généralement associées à l'intelligence humaine, telles que le raisonnement et l'apprentissage ». Qualifiée de prochaines révolutions informatiques, l'intelligence artificielle est au cœur de tous les sujets d'actualités, il semble indispensable de définir cette technologie de rupture et de clarifier son régime juridique, mais aussi d'identifier les applications en cours ou en développement dans les entreprises et les bénéfices qu'elles en tirent.

#### **V.4.2 Machine Learning :**

La machine Learning ou « apprentissage automatique » en français est un concept qui fait de plus en plus parler de lui dans le monde de l'informatique, et qui se rapporte au domaine de l'intelligence artificielle. Encore appelé « apprentissage statistique », ce terme renvoie à un processus de développement, d'analyse et d'implémentation conduisant à la mise en place de procédés systématiques. Pour faire simple, il s'agit d'une sorte de programme permettant à un ordinateur ou à une machine un apprentissage automatisé, de façon à pouvoir réaliser un certain nombre d'opérations très complexes.

L'objectif visé est de rendre la machine ou l'ordinateur capable d'apporter des solutions à des problèmes compliqués, par le traitement d'une quantité astronomique d'informations. Cela offre ainsi une possibilité d'analyser et de mettre en évidence les corrélations qui existent entre deux ou plusieurs situations données, et de prédire leurs différentes implications.

La machine Learning implique deux principaux systèmes d'apprentissage qui définissent ses différents modes de fonctionnement. Il s'agit de :

- ✓ L'apprentissage supervisé.
- ✓ L'apprentissage non-supervisé.

#### **V.5 Plateforme d'usine 4.0 :**

L'industrie 4.0 présente un écosystème qui se caractérise par des technologies avancées de communication. Cette réinvention offre la capacité de communication bidirectionnelle en assurant une remontée de l'information et dématérialiser l'intervention sur l'industrie. Les usines qui utilisent cette industrie peuvent alors suivre les données en temps réel et contrôler leurs équipements d'une manière optimisée et efficace.

Une architecture à la base des objets connectés constitue l'ensemble des couches physiques et logicielles servant à gérer les équipements connectés, les configurations et les protocoles de communication, le centre de traitement et finalement les tableaux de bord.

Nous avons réalisé une structure d'usine 4.0. La figure V.6 modélise l'architecture de notre système et qui peut être subdivisée en 4 couches :

- **Couche matérielle « Infrastructure »** : renfermant l'ensemble des capteurs et des compteurs intelligents qui disposent d'un moyen de communication physique (UART, I2C, USB ...) ou distant (Wifi, Bluetooth, 4G, Lora...).
- **Couche de communication** : composant les différentes implémentations de protocoles de transmission et de communication de données (TCP/IP, MQTT, Routeur, Wifi...).
- **Couche de serveur d'application** : constituant la partie centrale du système. C'est le module cœur de traitement de différents services comme la gestion de base de données, la gestion des données clients, la gestion des serveurs (d'acquisition, de base de données, d'analyse des données et les algorithmes d'apprentissage ...).
- **Couche terminale - utilisateur « Suivi »** : formant la partie destinée à l'utilisateur final. Elle permet la visualisation des données en temps réel ou les stockés, la génération de rapport sur l'état de processus, les opérations effectuées et les performances de système mis en œuvre ainsi que la gestion des alarmes.

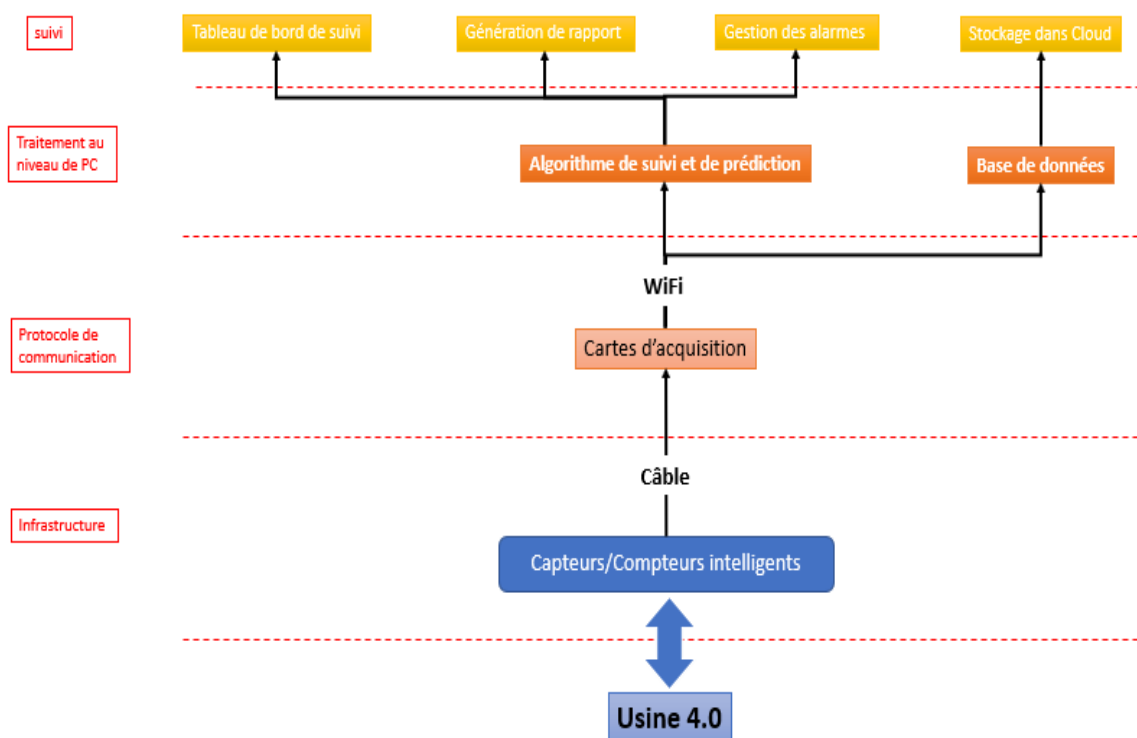


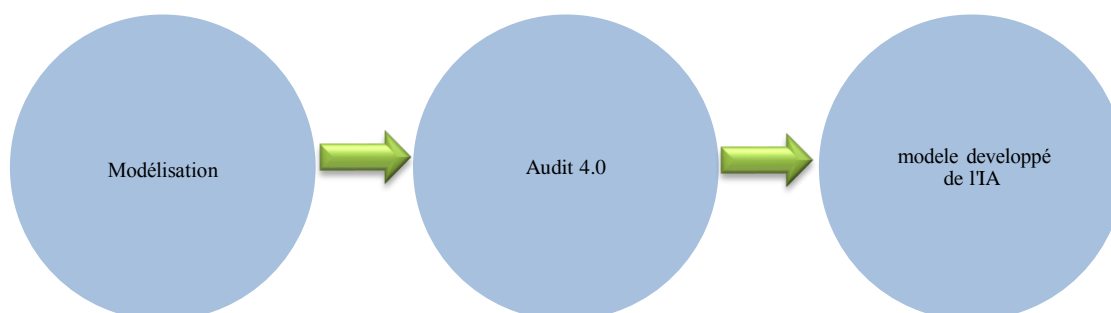
Figure V. 6 : Architecture globale de notre usine 4.0.

## V.6 Méthode d'implantation de la maintenance 4.0 dans l'industrie, études de cas d'un système industriel

Nous présentons dans cette partie la méthodologie d'implantation de la maintenance 4.0. La sélection et l'implantation de la maintenance prédictive à un impact sur la stratégie de l'entreprise ainsi que sur la surveillance, le contrôle et l'optimisation. De plus, les entreprises profitent de la transformation numérique et surtout de la maintenance prédictive pour réduire le temps d'arrêt non planifié et la consommation d'énergie d'une part, et d'autre part, d'augmenter la productivité et améliorer l'efficacité des usines.

Dans ce travail, une méthodologie a été définie guidant les industrielles à basculer vers la maintenance prédictive. Il s'agit de la modélisation, ensuite un audit et transmission des données et finalement le développement du modèle de l'intelligence artificielle à base des réseaux de neurone artificiel.

De cet effet, la méthodologie proposée est basée sur trois volets principaux qui guident les industrielles a mis en œuvre des nouvelles technologies et cheminant sur la voie de l'industrie 4.0 et plus précisément dans la maintenance prédictive, comme le monte la figure V.7.



**Figure V. 7: Guide d'implantation de maintenance prédictive.**

- 1) Modélisation : C'est le premier stade de l'évolution, il se base sur des connaissances sur les machines, leur fonctionnement et leur composant existant. C'est pour objectif de présenter la chaîne de production sous forme de modèle formel, et on présente :
  - Les machines entraînant qui génèrent le mouvement tournant tel que les moteurs, les turbines... ;
  - Les systèmes d'entraînement comme les accouplements, Transmission, réducteur, pignons... ;
  - Les machines d'entraînement qui produisent la valeur ajoutée, par exemple : l'alternateur, compresseurs, pompes, réducteurs... ;
  - Les accessoires comme les paliers, volants d'inertie, variateurs, frein....



2) Audit 4.0: ce volet a pour but de retirer toutes les données et les informations liées à la chaîne de production (vibration, température, débit...) pour faciliter l'intégration de la maintenance prédictive, car il permet de faciliter la prise de décisions de la maintenance. De cet effet, l'audit proposée est basé sur trois volets principaux qui guident les industrielles a mise en œuvre des nouvelles technologies et cheminant sur la voie de l'industrie 4.0 et plus précisément dans la maintenance prédictive.

- a. Questionnaire : C'est à partir de questionnaire et d'étude des machines et des chaînes de production, nous pouvons évaluer et retirer le degré de maturité de cette dernière. Le questionnaire constitue un outil de grande valeur dans l'implantation de la maintenance prédictive [18].
- b. Observabilité et vision de l'état existant : Nous prenons une vision objective, factuelle de tous les outils de production. Ce niveau commence par :
  - Identifier des modes de défaillances et les grandeurs à surveillé ;
  - Faire une étude de criticité ;
  - Identifier les capteurs utiles et leurs emplacements ;
  - Faire une analyse pour identifier si tous les capteurs sont nécessaires pour éviter la redondance inutile des données.

L'idée est d'optimiser la mise en place des capteurs tous en évitant la redondance des données et d'adapter les outils au système étudié.

- c. Définition du modèle des données : A ce niveau, on instrumente les machines de production et on centralise les données.
  - Centraliser toutes les données des capteurs dans un PC ou Cloud ;
  - Convertir ces données vers un format pivot unifié correspondant à l'entreprise ;
  - Élaborer des tableaux de bord et remonter des alertes ;
  - Collecter le maximum des données afin d'avoir un historique ;

Puisque l'outil de production est instrumenté, les prises de décisions par suite des observations seront automatiquement mesurées en temps réel, et l'observation des effets de changements sont immédiatement.

3) Développement du modèle de l'intelligence artificielle : C'est un stade où on mis en place des outils et des algorithmes de l'intelligence artificielle[2].

- Il s'agit de récolter toutes les données sur un algorithme d'intelligence artificielle et faire le diagnostic et le pronostic des défauts en temps réel;

Avant de lancer à ce stade, il faudra un historique suffisant et un algorithme de manipulation de données suffisamment puissant pour pouvoir nettoyer, resynchroniser, agréger les données en amont, récupérer et traiter les résultats en aval.

Avec la méthodologie proposée, nous pouvons prédire les arrêts non programmés en anticipant les pannes. Et même, nous pouvons dégager automatiquement des axes

d'amélioration des processus. Et finalement, la maintenance sera automatisée en pilotant automatiquement les interventions. Nous aurons accédé à un fort degré de maturité dans la maintenance prédictive.

### **V.6.1 Architecture du projet :**

Notre architecture de surveillance peut nécessiter des méthodes des explorations de données pour le diagnostic et le pronostic des défauts en fonction de différents objectifs ou composants de surveillance. Par conséquent, un cadre systématique basé sur l'exploration de données pour réaliser le diagnostic et le pronostic des défauts pour les centres de machines est impératif. Comme le montre la figure V.8, un cadre système est formulé pour la maintenance prédictive dans les usines sur la base des concepts de l'industrie 4.0. L'exploration de données et l'intelligence artificielle ont été appliquées pour découvrir les informations de défaillance et optimiser les solutions, respectivement. Ce système peut surveiller les actifs de l'usine, relier les systèmes d'exploitation de production et de maintenance, obtenir et collecter des données, et les intégrer dans des applications d'entreprise de niveau supérieur, découvrir des informations cachées sur les pannes imminentes et générer des connaissances de maintenance. Il peut également surveiller l'état des procédés de fabrication et prévoir l'état des équipements.

Le système développé peut prendre une décision de maintenance pour empêcher efficacement l'apparition et le développement de pannes, assurer la sécurité des équipements et des personnes tout en réduisant les pertes économiques causées par les pannes. Il peut utiliser le diagnostic des pannes, l'évaluation des performances du niveau de dégradation et les modèles de pronostic des pannes pour atteindre des performances de panne proches de zéro et améliorer la productivité de l'entreprise.

### **V.6.2 Etude de cas :**

Un banc d'essai pour la filtration d'eau a été mis au point. Ce dernier vise à caractériser l'efficacité d'atténuation des grandeurs physiques telle que les vibrations, la température, la puissance consommée..., ainsi que les performances des composants électriques, à titre d'exemple : les roulements, le moteur, la pompe dans des conditions contrôlées.

Les expériences sont effectuées sur le banc d'essai, comme illustré dans la figure V.8. Ce dernier est un alternatif très intéressant pour faire des essais sur les défauts des roulements.

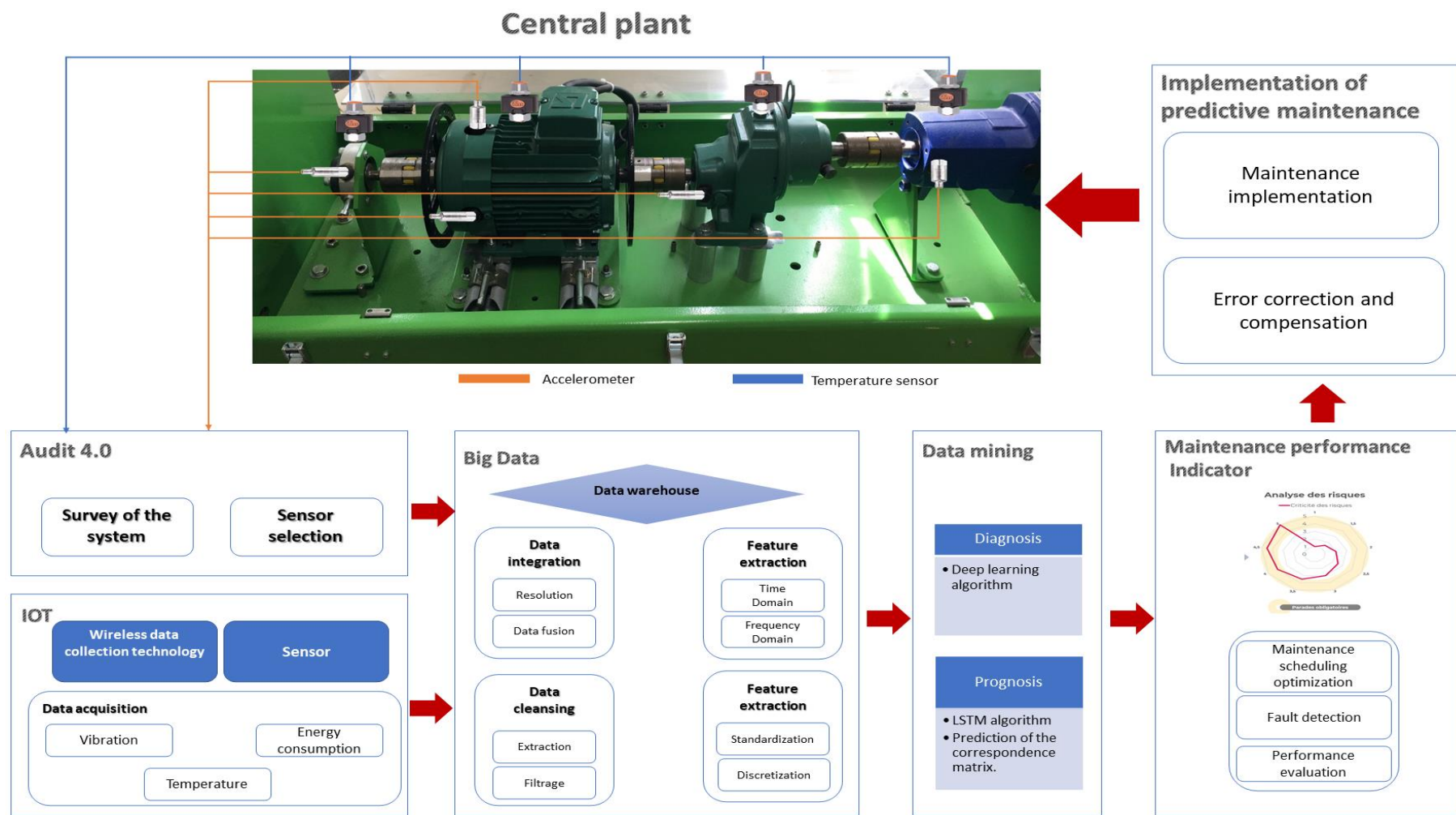
Dans cette expérience, Après un fonctionnement normal de notre système figure V.8, les défauts de roulement ont été générés artificiellement par l'application d'une force par une vis. Les deux défauts sont générés sont un sur la bague externe ou interne. L'acquisition des

données se fait en temps réel à partir des capteurs mis en place via une carte électronique dans des points bien précis du roulement étudié.

#### **V.6.2.1 Modélisation.**

Nous commençons par la modélisation de système étudié, comme on le voit sur la figure V.8, notre système est composé d' :

- Une machine entrainante : c'est un moteur triphasé de puissance 1.8KW et d'une vitesse de rotation de 3000tr/min;
- Des systèmes d'entraînement : des accouplements élastiques, un engrenage et un roulement à billes de type « 6205-Z »;
- Des machines d'entraînement : une pompe et un réducteur électronique de vitesse.



Implementation of predictive maintenance

Maintenance implementation

Error correction and compensation

Figure V. 8: Notre architecture du diagnostic et pronostic intégré dans la fabrication.

**V7.2.2 Audit 4.0 :**

Nous avons précisé plusieurs modes de défaillances dans le banc d'essai, soit des défaillances au niveau des roulements, des moteurs, des accouplements ou de pompe. Ensuite, Nous avons tiré les grandeurs physiques à surveiller dans chaque organe, comme illustrée dans le tableau V.1.

Sous - ensemble	Organes	Mode de défaillance p	Phénomène physique à surveiller	Actions	Capteur	
<b>Groupe 1:</b> Palier: Roulement Moteur Accouplement	Roulement	Echauffement	Défaut de la bague intérieure	Mesure de température et de vibration	-Capteur de température ou caméra thermique et -accéléromètre	
		Vibration	Défaut de la bague extérieure			
	Moteur	Echauffement	Défaut de la bague intérieure	Analyse de vibration	Accéléromètre	
		Vibration	Défaut de la bague extérieure			
		Grognement	Elimination d'une phase	Bruit		Sonomètre
		Puissance consommé	Balourd Désalignement	Analyseur de puissance		Compteur
	Accouplement	Son	Dressage/ Usage	Bruit	Sonomètre	
		Vibration	Désalignement	Analyse vibratoire	Accéléromètre	
<b>Groupe 2:</b> Engrenage Accouplement Pompe	Engrenage	Vibration	Fissure de pignon	Analyse vibratoire (Temps/fréquence)	Accéléromètre	
		Température		Mésure de température	Caméra thermique	
	Pompe	Fuite	Fuite de garniture	Air comprimé, gaz	Ultrason	
		Température7	Défaut dans la pompe	Mesure de température	Capteur de température ou caméra thermique	
		Cavitation	Vibration	Analyse vibratoire	Accéléromètre	

**Tableau V. 1: grandeurs à surveiller**

L'étape suivante est de fournir des données de surveillance permettant de suivre en temps réel l'état de santé de roulement étudié, ces données parviennent d'un capteur de vibration « accéléromètre » qui est installé à une position spécifique pour récupérer un fichier d'enregistrement qui sera traité et stocké par la suite.

**V.6.2.3 Définition du modèle d'analyse.**

Dans le cas de notre projet, on a traité les défauts de roulement, soit des défauts de la bague intérieure soit des défauts de la bague extérieure.

Ces défauts peuvent être détectés et diagnostiqués en observant la fréquence caractéristique de défaut (FCF) dans le domaine fréquentiel. Pour chaque type de défaut, il a un FCF spécifique, qui est proportionnel à la fréquence de rotation de fonctionnement, et le coefficient est déterminé par les paramètres structuraux.

Par exemple pour le roulement étudié, c'est un roulement à billes « 6205-Z », le coefficient FCF de la bague intérieure du roulement est de 5,43, c'est-à-dire la fréquence de passage des billes de la course intérieure (BPFI) est égale au produit du coefficient FCF (5,43) et de la

fréquence de rotation de l'arbre FR, soit BPF1 = 5,43 FR. De même, le FCF de la bague extérieure du roulement, c'est-à-dire la fréquence de passage des billes de la bague extérieure (BPFO) = 3,57 FR. Comme illustré dans le tableau V.2.

Type de roulement	Diamètre de pas	Diamètre de bille	Nombre de billes	BPF1	BPFO	Capacité de charge dynamique
6205-Z	52mm	25mm	9	5.43fr	3.57fr	14.8kN

**Tableau V. 2: Specification de 6205-Z**

### V.6.3. Méthode de diagnostic

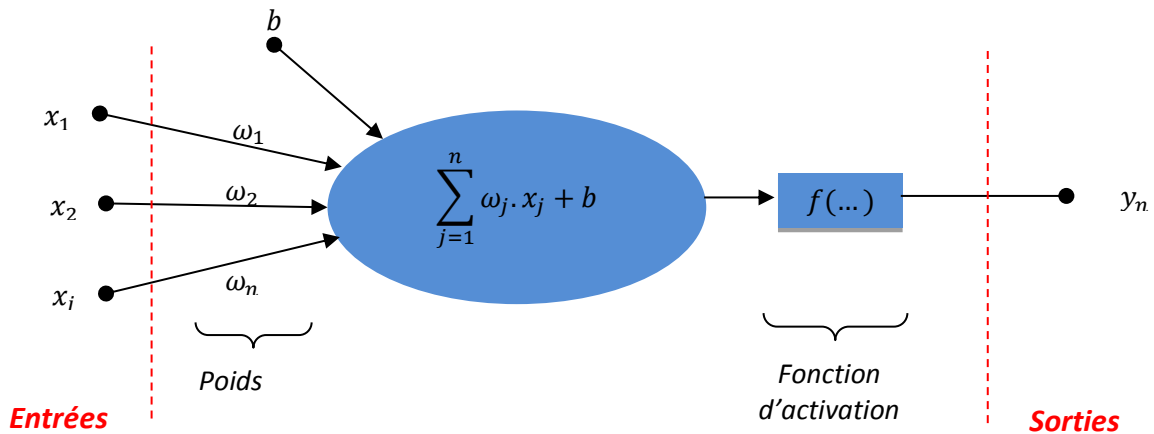
Le dernier stade de notre méthodologie est de développer un algorithme de l'intelligence artificielle qui fait le diagnostic et le pronostic des défauts en temps réel dans le but d'implémenter une maintenance prédictive fiable et efficace.

#### V.6.3.1 Algorithme de réseau de neurones pour les défauts des roulements.

Nous avons un problème de type « classification », qui veut dire que la sortie est discrète et elle ne peut prendre qu'un seul état, soit sain soit défaillant selon la valeur de l'accélération et de la vitesse.

Nous rappelons qu'un réseau de neurones est un ensemble des neurones organisés en couche, caractérisés par un biais  $b$  et relier entre eux par des connexions qui s'appellent des poids  $\omega$ . Chacun de ces poids a une valeur qui nous servira à propager l'information.

On considère le neurone suivant qui y a comme entrées  $\{x_1, x_2, \dots, x_j\}$  et en sortie, il y a  $\{y_n\}$ ;



**Figure V. 9:Architecture d'un neurone.**

Le calcul effectué par le neurone peut être divisé en deux étapes :

- Le neurone calcule la somme de toutes les entrées, c'est un calcul linéaire

- Puis le résultat du Calcul passe dans une fonction d'activation (sigmoïde, TanH, ReLu, ...) qui sert à introduire une non-linéarité dans la sortie.

$$y_n = f \left( \sum_{j=1}^n \omega_j \cdot x_j + b \right)$$

$\omega_j$  : Poids

$x_j$  : Entrées de réseau

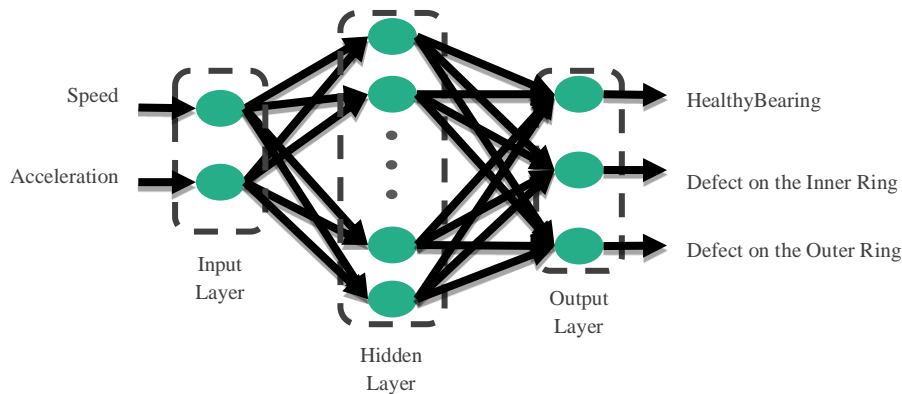
$b$  : Biais

$f$  : Fonction d'activation

$y_n$  : Sortie de réseau

C'est à partir de biais et des poids, l'apprentissage pourra se faire.

Alors L'objectif de la machine est d'apprendre les cibles (les sorties) correctes pour des nouvelles observations (les entrées).



**Figure V. 10 : Architecture de ANN.**

Notre architecture de réseaux de neurones se fonctionne comme illustrée dans la figure V.10 :

- Deux neurones en entrée sont l'accélération et la vitesse. Ces neurones reçoivent l'information du milieu extérieur pour la transmettre au réseau ;
- Trois neurones en sorties dont le fonctionnement est de sortir les résultats traités par la couche cachée décrivant l'état de roulement.

Généralement, nous avons les données de l'accélération et la vitesse reçu par les capteurs qu'on a normalisées et vectorisées, puis nous les introduisons dans notre réseau, ce qui signifie qu'on a effectué une série d'opérations matricielles sur ces données d'entrée. Pour chaque couche, nous multiplions les entrées par les poids " $\omega$ " puis on ajoute un biais " $b$ " ,

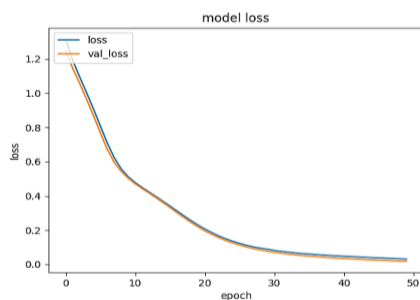
ensuite nous appliquons la fonction d'activation "ReLU" au résultat, on répète ce processus jusqu'à l'atteinte de la dernière couche. La valeur finale de la sortie est notre prédiction.

Sur notre banc d'essai nous avons réalisé des mesures expérimentales de vitesse et d'accélérations. Ces mesures nous ont permis de nous construire une base de données. Ces mesures sont réalisées en trois états différents d'un roulement : le premier état décrit les mesures d'un roulement sain, le deuxième état décrit les mesures d'un roulement qui contient une bague intérieure défective et le troisième contient un défaut dans la bague extérieure.

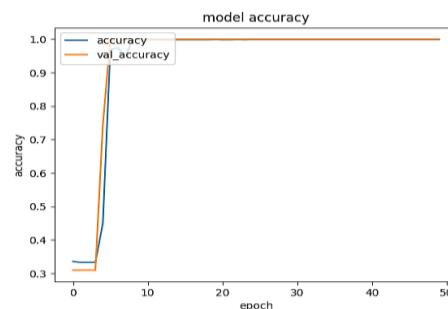
Pour ce travail, nous allons utiliser 1000 échantillons pour chaque état de roulement qui sont considérés comme suffisants pour construire un réseau de type MLP.

Notre base de données contient 3000 données au total. Nous avons divisé cette base de données en deux parties : une base de données d'entraînement égale à 70%, une deuxième base de données de 30% pour tester l'algorithme.

### V.6.3.2 Résultat et interprétation.



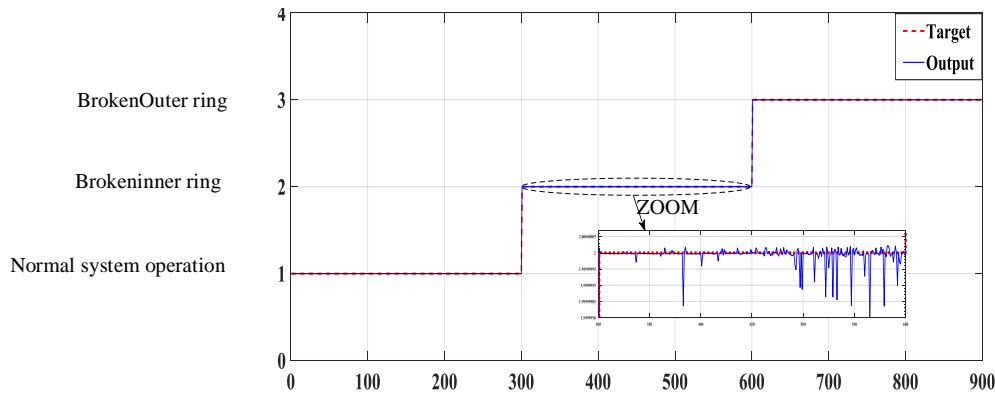
**Figure V. 11 : Représentation de la fonction de perte lors du test.**



**Figure V. 12 : Représentation de la précision du modèle lors des essais.**

La précision et la perte de notre modèle sont représentées dans les figures V.11 et V.12. Nous pouvons constater que la précision de notre modèle atteint 100% juste à 10 epochs et la perte égale = 0.001.





**Figure V. 13: Modes de fonctionnement des roulements.**

D'après la figure V.13, la courbe en rouge montre les modes de fonctionnement cibles (Target) et la courbe en bleue montre les résultats obtenus à partir du réseau (Finale Output). Nous pouvons constater que le couple de l'accélération et de la vitesse qui appartient à la base de test est identique à la cible que ça soit l'état du roulement.

Nous constatons aussi que la différence entre la cible et le résultat obtenus à partir de réseaux est à l'échelle  $10^{-10}$  donc l'erreur c'est la même échelle. Ce résultat montre que notre modèle est très sensible et très performant à la dégradation du roulement. L'algorithme détecte les défaillances à chaque variation de l'état du roulement,

### **V.7 Conclusion du chapitre:**

Dans le cadre de ce projet, nous avons développé une approche de pronostic guidée par les données et nous nous sommes focalisés sur les composants critiques de notre usine 4.0.

Le choix des composants critiques et l'acquisition de données représentatives de l'initiation et de la progression des dégradations ont constitué la première problématique de notre processus de pronostic. Dans ce cadre, nous avons proposé une démarche rationnelle permettant d'isoler les composants critiques, de définir les grandeurs physiques à surveiller, de choisir les capteurs, de définir les tests de vieillissement accéléré et de spécifier le système d'acquisition et de stockage des données. Cette démarche a été réalisée en étroite collaboration avec le constructeur du système étudié, car ils disposent des spécifications techniques et de l'expertise nécessaires à la réussite de la démarche.

La deuxième problématique à laquelle nous nous sommes attaqués concerne le traitement des données de surveillance afin d'extraire des informations pertinentes permettant de révéler les dégradations et de suivre leur progression dans le temps. Ensuite, nous avons proposé des méthodes de sélection et de réduction afin de mieux visualiser, analyser et interpréter les caractéristiques.

La troisième problématique de nos travaux concerne la modélisation de la dégradation. Pour la résoudre, nous avons proposé d'utiliser une boîte à outils composée d'un modèle de

réseaux de neurones artificiels. Cet outil, issu du domaine de l'intelligence artificielle a été choisi pour leur capacité à modéliser les incertitudes des données et à prendre en compte les non-linéarités et l'aspect de dégradation.

Enfin, la quatrième problématique est liée à l'évaluation de l'état de santé des composants et l'estimation de leurs durées de fonctionnement avant défaillance. Nous avons proposé une contribution majeure, sous forme d'une approche qui repose tout sur deux phases : une première phase d'apprentissage réalisée hors ligne et une seconde phase d'exploitation (ou de test) réalisée en ligne. Le but de la première phase est de générer des modèles de dégradation tandis que celui de la seconde phase est d'évaluer l'état de santé des composants et prédire leur durée de vie. L'approche utilise les réseaux de neurones pour modéliser la dégradation à partir d'une matrice de caractéristiques extraites des données de surveillance, l'état de santé du est obtenu directement en comparant l'indicateur de santé courant à des indicateurs de santé générés dans la phase d'apprentissage.

La méthode proposée est appliquée à une étude de cas : le diagnostic et le pronostic de l'état des roulements. Sur la base des résultats obtenus et des comparaisons avec d'autres approches d'implémentation de la maintenance prédictive, la méthodologie proposée démontre son efficacité et son applicabilité. Et d'après les résultats du travail expérimental approfondi sur le banc d'essai conçu, nous pouvons conclure que notre méthodologie et notre algorithme donnent des meilleurs résultats et que ces résultats sont certainement prometteurs pour l'ère de l'industrie 4.0 et plus précisément pour la maintenance prédictive. Pour les travaux à venir, nous envisagerons à appliquer notre méthodologie dans une usine industrielle.

## Références:

- [1] A. P. T. Pacchini, W. C. Lucato, F. Facchini, and G. Mummolo, "The degree of readiness for the implementation of Industry 4.0," *Comput. Ind.*, vol. 113, p. 103125, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.compind.2019.103125.
- [2] T. Borgi, A. Hidri, B. Neef, and M. S. Naceur, "Data analytics for predictive maintenance of industrial robots," in *2017 International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies (IC\_ASET)*, Hammamet, Tunisia, Jan. 2017, pp. 412–417. doi: 10.1109/ASET.2017.7983729.
- [3] G. Büchi, M. Cugno, and R. Castagnoli, "Smart factory performance and Industry 4.0," *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 150, p. 119790, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.techfore.2019.119790.
- [4] Y. Lu, P. Witherell, and A. Jones, "Standard connections for IIoT empowered smart manufacturing," *Manuf. Lett.*, vol. 26, pp. 17–20, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.mfglet.2020.08.006.
- [5] A. E. Kihel, E. M. Bouyahrouzi, A. Bakdid, Y. E. Kihel, H. Gziri, and A. Saka, "Bearing Fault Detection based on Artificial Neural Networks for the implementation of predictive maintenance," p. 14.
- [6] T. K. Sung, "Industry 4.0: A Korea perspective," *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 132, pp. 40–45, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.techfore.2017.11.005.
- [7] H. Ahuett-Garza and T. Kurfess, "A brief discussion on the trends of habilitating technologies for Industry 4.0 and Smart manufacturing," *Manuf. Lett.*, vol. 15, pp. 60–63, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.mfglet.2018.02.011.
- [8] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, "The Internet of Things: A survey," *Comput. Netw.*, vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.comnet.2010.05.010.
- [9] D. G. S. Pivoto, L. F. F. de Almeida, R. da Rosa Righi, J. J. P. C. Rodrigues, A. B. Lugli, and A. M. Alberti, "Cyber-physical systems architectures for industrial internet of things applications in Industry 4.0: A literature review," *J. Manuf. Syst.*, vol. 58, pp. 176–192, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jmsy.2020.11.017.
- [10] B. Emami-Mehrgani, W. P. Neumann, S. Nadeau, and M. Bazrafshan, "Considering human error in optimizing production and corrective and preventive maintenance policies for manufacturing systems," *Appl. Math. Model.*, vol. 40, no. 3, pp. 2056–2074, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.apm.2015.08.013.
- [11] D. Özgür-Ünlüakın, B. Türkali, and S. Ç. Aksezer, "Cost-effective fault diagnosis of a multi-component dynamic system under corrective maintenance," *Appl. Soft Comput.*, vol. 102, p. 107092, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.asoc.2021.107092.
- [12] H. M, M. M, and V. C, "Predictive maintenance 4.0: predict the unpredictable," *PwC Mainnovation*, 2017.
- [13] R. K. Mobley, *An introduction to predictive maintenance*, 2nd ed. Amsterdam ; New York: Butterworth-Heinemann, 2002.
- [14] T. Zonta, "Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review," *Ind. Eng.*, p. 17, 2020.

- [15] R. Welte, M. Estler, and D. Lucke, "A Method for Implementation of Machine Learning Solutions for Predictive Maintenance in Small and Medium Sized Enterprises," *Procedia CIRP*, vol. 93, pp. 909–914, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.04.052.
- [16] G. D. Putnik, V. K. Manupati, S. K. Pabba, L. Varela, and F. Ferreira, "Semi-Double-loop machine learning based CPS approach for predictive maintenance in manufacturing system based on machine status indications," *CIRP Ann.*, vol. 70, no. 1, pp. 365–368, 2021, doi: 10.1016/j.cirp.2021.04.046.
- [17] U. Ahmed, S. Carpitella, and A. Certa, "An integrated methodological approach for optimising complex systems subjected to predictive maintenance," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 216, p. 108022, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.ress.2021.108022.
- [18] M. Herrera-Galán and E. Martínez-Delgado, "Management audit applied to the maintenance department in hospital facilities," . *ISSN*, vol. 20, no. 3, p. 9, 2017.
- [19] E. Marino, L. Barbieri, B. Colacino, A. K. Fleri, and F. Bruno, "An Augmented Reality inspection tool to support workers in Industry 4.0 environments," *Computers in Industry*, vol. 127, p. 103412, May 2021, doi: 10.1016/j.compind.2021.103412.

---

## Conclusion générale

---

### **Conclusion générale:**

Après une étude bien approfondie du secteur industriel sur le plan consommation d'énergie où nous avons montré à travers des études de cas et des enquêtes la part du coût de l'énergie dans le prix de revient d'un produit industriel et qui reste assez élevée pour que l'entreprise devienne compétitive.

Pour remédier à cette problématique notre contribution est de montrer comment la maintenance prédictive pourra réduire la consommation de l'énergie. Pour ce faire nous avons mené des enquêtes auprès des entreprises pour identifier les sources de défaillances qui impactent la consommation d'énergie. Pour concrétiser ce travail nous avons réalisé une plateforme sous forme de banc d'essai avec un choix adéquat des appareils de mesure. Un banc d'essai est réalisé, des défauts sont créés dans le système tel que le désalignement, le balourd, le couplage des deux défauts,... . La technique d'analyse vibratoire a permis de mettre en évidence ces défauts en mesurant la vitesse et l'accélération. Les résultats obtenus montrent les effets de ces défaillances, en mesurant la puissance, sur la consommation de l'énergie. La mesure de la température qui augmente avec ces paramètres montre que ces défaillances contribuent aussi à la dégradation des machines tournantes.

Pour réaliser ce travail dans une entreprise industrielle nous avons préparé toutes les conditions en utilisant la démarche du système de management de l'énergie, l'audit énergétique en particulier préliminaire en analysant la consommation de l'énergie des trois années passées, qui nous a donné une idée claire sur la part de la consommation d'énergie pour chaque process. Le choix des instruments de mesure a été fait d'une manière minutieuse pour prélever les paramètres énergétiques des différentes installations. Un plan de mesurage et de comptage a été mis au point avec une cartographie des énergies de départ et leur usage. Des indicateurs de performance énergétiques ont été établis pour le suivi de la consommation et l'efficacité des actions mises en œuvre.

L'entreprise choisie répond parfaitement à nos objectifs. C'est une entreprise agroalimentaire énergivore et qui a une volonté de réduire la consommation énergétique. Pour réaliser notre audit approfondi selon la méthodologie du système de management énergétique ISO50001. En premier lieu nous avons modélisé ces systèmes en identifiant la partie production d'énergie, le transport d'énergie et partie utilisation de l'énergie qui est le process. Les pertes énergétiques sont déterminés et qui sont soit technique : fuite, surface rayonnante, combustion incomplète,

D'ordre gestion les marches arrêts qu'il faut bien gérer, et n'utiliser que la pression nécessaire demandée par le process ou d'ordre améliorative comme variateur de vitesse, nouvelle conception de l'installation comme la partie réalisée sur les réservoirs en modifiant le stockage de l'air comprimé de l'air comprimé.

Par la suite nous avons réalisé des diagnostics, en utilisant les instruments des mesures définis pour chaque type d'énergie, sur les installations : thermique, air comprimé, production de froid, électrique, moteur pompe, .... Ce diagnostic nous a permis de localiser les pertes énergétiques sur chaque système. Un plan d'action sous forme des solutions de maintenance

## Conclusion générale

---

pour réduire ou éliminer ces pertes a été mis au point dont les résultats de réduction de l'énergie sont satisfaisants qui s'est traduit par une amélioration très nette des indicateurs de performance énergétique et un gain financier pour l'entreprise.

Vu la taille de l'entreprise, le nombre de machine et capteurs, les mesures effectuées ont constitué une masse de données très élevée qui nécessite un traitement très long. Pour relever ce défi nous avons mis au point un banc d'essai où tous les composants sont connectés avec une transmission en temps réel vers le ordinateur. Les données énergétiques ou de maintenance en particulier de vibration sont stockées et traitées par des algorithmes de l'intelligence artificielle. L'intégration des seuils de vibrations a permis de prédire les pannes. Suite à ces détections précoces des interventions en temps opportun avant l'arrêt de la production.

Comme perspective et à travers cette recherche mise au point, un approfondissement de la maintenance 4.0 est nécessaire en collaboration avec les industriels pour éventuel transfert technologique vers les PME/PMI

## Annexe 1 : Questionnaire de collecte de données énergétiques

IDENTIFICATION DE L'ENTREPRISE			
Raison sociale :		Adresse :	
		Tel :	Fax :
Vos activités sont certifiées selon la norme de management de l'énergie ? oui/non si oui merci de nous communiquer l'attestation de certification		Avez-vous réalisé un diagnostic énergétique ? si oui par qui et quand ?	
Nom du responsable d'énergie / interlocuteur :		Tél :	E-mail :
		Fax :	Diplôme :
Secteur d'activité :	Principaux produits/services :	Effectif total actuel :	Fédération ou zone : oui/non Si oui, laquelle ?
CONSOMMATION D'ENERGIE ANNUELLE :			
Combustible	En Tonne	En kWh	
Pétrole brut			
Gasoil			
essences			
GPL			
FIOUL			
jet			
Naphta			
Bitumes			
Lubrifiants			
autres (lampant, paraffines et autres PP)			
Coke de pétrole			

## Questionnaire de collecte de données énergétiques

Charbon		
Bois de feu		
Charbon de bois		
Gaz Naturel		
Pneus usés		
Déchets agricoles		
Autres déchets		
Electricité : BT <input type="checkbox"/>		-
MT <input type="checkbox"/>		-
HT <input type="checkbox"/>		-

### AVEZ-VOUS UNE AUTOPRODUCTION D'ENERGIE ? NON SI OUI

Autoproduction thermique en MWh/an	Autoproduction hydraulique en MWh/an	Autoproduction autre en MWh/an	Préciser le type : photovoltaïque Eolien Mixte	Autre

Les entreprises sont priées d'envoyer le présent questionnaire, dûment complété directement, à l'adresse mail ;

[alielkihel@yahoo.fr](mailto:alielkihel@yahoo.fr)